



分类号:

学校代码: 10128

UDC:

学 号: 20121100259

内蒙古工业大学

硕士学位论文

学生类别: 全日制学术型硕士研究生

学科名称: 结构工程

论文题目: 风沙环境下混凝土受冲蚀损伤机理
及评价研究

英文题目: The study of damage mechanism and
evaluation of concrete under the
erosion of wind-blown sand
environment

学生姓名: 冯玉江

导师姓名: 郝负洪 教授

二〇一五年四月

原创性声明

本人声明：所呈交的学位论文是本人在导师的指导下进行的研究工作及取得的研究成果。除文中已经注明引用的内容外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包含为获得内蒙古工业大学及其他教育机构的学位或证书而使用过的材料。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中作了明确的说明并表示谢意。

学位论文作者签名：冯玉江 指导教师签名：郝金浩
日 期：2015.5.30 日 期：2015.5.30

学位论文版权使用授权书

本学位论文作者完全了解学校有关保留、使用学位论文的规定，即：内蒙古工业大学有权将学位论文的全部或部分内 容保留并向国家有关机构、部门送交学位论文的复印件和磁盘，允许编入有关数据库进行检索，也可以采用影印、缩印或其它复制手段保存、汇编学位论文。为保护学校和导师的知识产权，作者毕业后涉及该学位论文的主要内容或研究成果用于发表学术论文须征得内蒙古工业大学就读期间导师的同意，并且版权单位必须署名为内蒙古工业大学方可投稿或公开发表。

本学位论文属于

保密□，在___年解密后适用本授权书。

不保密☒。

(请在以上方框内打“√”)

学位论文作者签名：冯玉江 指导教师签名：郝金浩
日 期：2015.5.30 日 期：2015.5.30

摘 要

随着我国经济建设的发展,混凝土结构应用日益广泛,结构在恶劣环境(比如沙尘暴、严寒、霜冻、酸、碱和盐等)中遭受侵蚀或者腐蚀作用,使得结构耐久性降低,服役期限缩短,致使结构存在安全隐患,影响人们的正常使用。

本文主要研究区域为内蒙古中西部沙漠地区,该地区公路和桥梁等混凝土设施长期受到沙尘暴自然灾害的影响,导致结构的耐久性和安全性降低,严重影响结构的使用寿命。本文在研究内蒙古中西部地区风沙环境的特点和混凝土物理、力学性能和冲蚀接触力学行为及其理论的基础上,采用气流挟沙喷射试验方法,研究了混凝土的冲蚀磨损量或冲蚀率在不同强度和不同风沙环境冲蚀参数下的关系,得出混凝土的冲蚀规律和冲蚀机理,结合混凝土和风沙环境特征,提出了一种混凝土的冲蚀磨损量评价方法,该方法可评价混凝土受冲蚀磨损的程度,使得试验结果更具有实际意义。具体内容如下:

1. 本文对内蒙古中西部地区的风沙气象环境进行了大量的研究,分析其特点后选择风沙冲蚀参数。结合内蒙古中西部的气候特点设计混凝土的抗冲蚀试验工况,设计了三组不同强度等级的混凝土,进行混凝土在不同强度和不同风沙环境冲蚀参数的对比试验研究。

2. 采用气流挟沙喷射法进行混凝土抗冲蚀性能的试验研究,对研究结果进行统计分析,结果表明:(1)同强度混凝土的冲蚀率在相同条件下随着风沙流冲蚀角度的增大而增大,90°时达到最大;(2)同强度混凝土的冲蚀率在相同条件下随着风沙流冲蚀速度的提高而增大,并且二者近似成指数关系;(3)同强度混凝土的冲蚀率在相同条件下随着下沙率的增大呈先增大后减小的趋势;(4)试验表明混凝土在冲蚀过程中没有明显的孕育期,但是有上升期和稳定期。通过SEM扫描电镜观察了冲蚀损伤部位表面形貌,其破坏机理表现为:在低冲蚀角下破坏机制表现为类似表面划伤破坏作用;在高冲蚀角下破坏机制表现为冲击压痕破碎作用。

3. 通过建立风沙流粒子冲蚀磨损力学模型,在建立的力学模型基础上进行风沙流作用下混凝土冲蚀磨损力学行为及其理论计算分析。

4. 本文提出了一种混凝土在风沙环境下抗冲蚀磨损程度的评价方法以及相应的评价公式,利用该评价计算公式分析了混凝土冲蚀磨损重量同冲蚀速度和冲蚀角度之间的关系,并把评价计算公式结果与试验结果进行了对比,证实了评价公式的可行性和可靠性。

关键词: 风沙环境; 混凝土; 冲蚀磨损; 冲蚀机理; 评价方法

Abstract

With China's economic development, the concrete structure is a widely used structure form. However, affected by the severe environment like sand storm, temperature, and corrosive mediums including acid, alkali and salt, the durability of structure decreases which leads to the potential safety hazard has negative impacts on people's daily lives.

In this paper, the desert regions of Midwest Inner Mongolia are researched where the concrete structure in highways and viaduct have been influenced by natural disasters like sand storm for a long time, as well as low durability and safety of the structure. Gradually, the working life of the concrete structure will be shortened. On the basic study of the climatic features of the Midwest Inner Mongolia, the fundamental theories like physical and mechanical property of concrete material are discussed here. In addition, by adopting the method of blown-sand jet, the paper studies the erosive wear quality and the erosion rate under different intensity and erosion parameters. This method can precisely assess the erosion rate of the concrete structure which makes the experiment of more practical meaning. Specific contents are as follows:

1. In this paper, large amounts of researches are conducted to the sandstorm meteorological environment in mid-west Inner Mongolia based on which the erosion parameters are selected. On the basis of the natural environment and climatic features, the anti-erosion experiment of the concrete structure is designed in three types with different intensities and grades. Then the comparison research of the erosion parameters of concrete structure under different intensities and environment is carried out.
2. Sand-airflow jet method is adopted to carry out the research on erosion resistance of the concrete structure. According to the analysis of the results, it shows that: (1) the erosion rate of concrete structure under the same intensity grows as the sand erosive angle increases and the biggest one appears in 90° ; (2) the erosion rate of concrete structure under the same strength increases along with the improvement of erosion speed which implies an exponential relationship between them; (3) the erosion rate of concrete structure under the same strength will increase at first and decrease then along with the increase of the falling rate of sand; (4) the experiment shows that there is no obvious incubation period during the erosion process but the rise and stable periods. Through the investigation on the surface of the erosion sector by scanning electron microscope, the failure mechanism is the similar surface scratch under low angle attack erosion and the impact indentation fraction

under high angle attack erosion.

3. Through the establishment of contact mechanics model of sand flux's erosion, the erosion mechanics behavior and theories of concrete under the sand flux are analyzed.

4. A new assessing method and corresponding evaluation formula for erosion resistance degree subject to sandstorm are proposed in this paper. Using this evaluation formula, the relationship between the weight of concrete erosion and the erosive speed and erosive angle is calculated out. In addition, by comparing the experimental results and the results from evaluation formula, it shows the reliability and feasibility of the evaluation formula.

KEY WORDS: *Sand environment; Concrete; Erosion damage; Erosion mechanism; Evaluation method*

目 录

摘 要	I
Abstract	II
第一章 绪论	1
1.1 课题研究背景及意义	1
1.2 混凝土耐久性的国内外研究现状	2
1.2.1 在硫酸盐环境下混凝土耐久性的研究	2
1.2.2 氯盐环境下混凝土耐久性研究	3
1.2.3 混凝土耐酸性研究现状	3
1.2.4 混凝土在风沙环境下的研究现状	4
1.3 内蒙古中西部地区风沙环境对工程材料耐久性的影响	4
1.3.1 研究地区地理环境和气候条件	4
1.3.2 研究地区沙尘暴时间分布	6
1.3.3 研究地区有关工程材料抗风沙的概况	7
1.4 材料抗冲蚀的国内外研究现状	8
1.4.1 冲蚀磨损概述	8
1.4.2 冲蚀磨损理论的研究进程	8
1.4.3 材料冲蚀磨损程度评价的研究进展	9
1.5 本文研究的内容以及创新点	11
1.5.1 本文研究的内容	11
1.5.2 本文的创新性	12
第二章 试验方案设计以及性能测试	13
2.1 试验工况设计	13
2.2 试件的制备	13
2.2.1 混凝土选择	13
2.2.2 模板制作	14
2.2.3 混凝土配合比设计	15
2.2.4 混凝土试件制作以及养护	15
2.3 试件尺寸、密度以及质量测量	15
2.4 混凝土试件的性能	15
2.5 试验检测指标	17
2.6 本章小结	17
第三章 风沙流作用下混凝土冲蚀磨损力学理论分析	18

3.1 接触问题的分类	18
3.2 风沙流粒子冲蚀接触力学模型	19
3.3 接触理论分析	19
3.3.1 Hertz 弹性接触理论	20
3.3.2 弹性撞击接触分析	21
3.4 风沙流粒子冲蚀接触动力分析	24
3.5 风沙流粒子冲蚀接触应力分析	26
3.6 本章小结	33
第四章 风沙流作用下混凝土冲蚀磨损试验研究以及相似理论分析	35
4.1 试验方法和装置	35
4.1.1 试验方法	35
4.1.2 试验装置	35
4.2 风沙流冲蚀磨损试验条件	37
4.2.1 风沙流粒子的特征分析	37
4.2.2 风沙流冲蚀角度	37
4.2.3 风沙流冲蚀速度	38
4.2.4 下沙率	38
4.2.5 风沙流冲蚀时间	38
4.3 混凝土冲蚀磨损试验研究	39
4.3.1 冲蚀磨损程度的表示方法	39
4.3.2 风沙流冲蚀角度对混凝土冲蚀率的影响	39
4.3.3 风沙流冲蚀速度对混凝土冲蚀率的影响	40
4.3.4 不同下沙率对混凝土冲蚀率的影响	42
4.3.5 风沙流冲蚀时间对混凝土冲蚀失重量的影响	44
4.4 试验结果与实际工况相似性分析	45
4.4.1 相似理论	45
4.4.2 计算实例	47
4.5 本章小结	50
第五章 风沙作用下混凝土冲蚀磨损损伤机理及冲蚀磨损程度评价研究	51
5.1 混凝土冲蚀磨损损伤机理分析	51
5.1.1 混凝土冲蚀磨损形貌分析方法	51
5.1.2 混凝土冲蚀前的形貌	52
5.1.3 混凝土冲蚀磨损显微镜下的形貌及其损伤机理分析	52
5.2 风沙作用对混凝土冲蚀磨损程度的评价分析	54

5.2.1 本文关于混凝土冲蚀磨损程度的评价方法及其计算公式.....	54
5.3 试验数据与计算数据的对比分析.....	55
5.3.1 冲蚀角度与冲蚀磨损失重量的关系分析.....	55
5.3.2 冲蚀速度与冲蚀磨损失重量的关系分析.....	57
5.4 本章小结.....	58
结 论.....	59
参考文献.....	61
致 谢.....	65
在读期间取得的科研成果.....	66
作者简介.....	67

第一章 绪论

1.1 课题研究背景及意义

混凝土可以看成一种人工石材，由于其原料丰富，造价低廉，工艺简单，强度高，耐久性好的特性，使它在工程中有着广泛的应用，正是由于混凝土的诸多优点，使得人们存有混凝土物美价廉、性能卓越的思想，在设计和使用中往往容易忽视混凝土耐久性问题，从而由于混凝土耐久性不足引起的工程问题屡见不鲜，造成了巨大的经济损失。

随着西部大开发战略的实施，内蒙古正处于高速发展的阶段，为促进该地区经济更快速的发展，必然要修建公路、桥梁和房屋等基础设施，如图 1-1 所示。由于内蒙古中西部地区分布着浑善达克沙地、巴丹吉林沙漠、库布其沙漠、乌兰布和沙漠和毛乌素沙地等沙漠和沙地，是我国沙尘暴的主要起源地^[1]，这些严峻的自然条件使得该地区的公路、桥梁和房屋等基础设施长期遭受沙尘暴的侵害，不仅使结构的耐久性降低，严重的更会影响其安全性。



(a) 沙漠地区高速公路



(b) 沙漠地区高架桥梁



(c) 沙漠地区厂房和房屋等建筑



图 1-1 沙漠中的混凝土结构

Fig.1-1 Concrete structure in desert

大量实际工程资料表明，因为混凝土结构的耐久性降低或失效而引发的工程问

题，各个地区已经付出了惨痛的代价^[2]，为了避免重蹈覆辙，研究内蒙古中西部地区混凝土在风沙环境下的冲蚀规律、冲蚀机理，建立冲蚀模型以及提出适用于该混凝土冲蚀损伤程度的评价公式，将具有非常重要的实际意义和社会意义，这些研究将会更加完善混凝土结构在风沙环境下耐久性和安全性问题的理论体系。研究成果可为风沙地域混凝土的建设工程服务，解决风沙环境下混凝土结构的耐久性问题，提高混凝土对风沙环境的适用性和服役期的安全性，减少混凝土结构在工程中的病害和日后的维护费用起到了至关重要的作用。

1.2 混凝土耐久性的国内外研究现状

混凝土的耐久性是指结构在规定的使用年限内，在各种环境条件作用下，不需要额外的费用和加固处理而保持其安全性、正常使用和能接受的外观能力。国内外诸多学者关于混凝土耐久性进行了大量的研究^[3-7]。影响混凝土耐久性的因素多种多样，可分为内在因素和外部环境因素，碱骨料反应、碳化等是导致混凝土结构恶化的内部因素，往往这些内部因素和外部环境因素是密不可分的，外部环境因素的作用如酸、碱、盐、沙尘环境和严寒霜冻等的影响，这些外在环境因素加剧了混凝土在使用期间的恶化，缩短其服役期限，可见环境条件的恶劣程度是影响混凝土耐久性不可忽视的问题。

关于混凝土耐盐类腐蚀的研究多集中在氯盐、硫酸盐和酸性环境下，这方面的研究已经取得了诸多的成果。

1.2.1 在硫酸盐环境下混凝土耐久性的研究

硫酸盐的侵蚀是导致混凝土老化破坏的主要问题之一。国内外对硫酸盐侵蚀混凝土做了大量的工作。1902 年前苏联遇到硫酸盐侵蚀混凝土等问题，侵蚀导致混凝土耐久性下降，安全性降低等问题，针对这类问题做了硫酸盐侵蚀混凝土的研究，之后美国、英国、日本等国家也对混凝土遭受盐类侵蚀和如何防护进行了相关的研究。我国自上世纪 50 年代才开始硫酸盐侵蚀类的研究，诸多学者对硫酸盐侵蚀混凝土的破坏规律和破坏机理做出了大量的贡献。1958 年开始，以中国建筑科学研究院马孝轩为首的研究人员开始了土壤腐蚀研究，并在我国各个地区建立了一批以各类土壤侵蚀混凝土的试验站，经过长期观察和研究，总结了混凝土遭受盐类侵蚀的规律和机理^[8-10]。上世纪 80 年代初，国家建筑材料研究院同其他单位共同合作研究了察尔汗地区盐湖卤水对混凝土耐久性影响。90 年代末，余虹发等学者对盐湖环境下混凝土的破坏机理进行了研究。20 世纪初诸多学者也对混凝土在硫酸盐的侵蚀方面做了大量的研究^[11-13]。虽然各国学者对硫酸盐侵蚀混凝土做了大量的工作，但是由于这类问题比较复杂，仍然没有较为统一的观点，这方面的研究还有待进一步完善。

1.2.2 氯盐环境下混凝土耐久性研究

氯盐对混凝土的侵蚀多发生在沿海、高盐度土壤地区以及寒冷地区，寒冷地区混凝土遭受氯盐侵蚀主要是道路和桥梁需要撒除冰盐，这些地区遭受氯盐的侵害使得混凝土结构耐久性降低，使用期限缩短，建筑物过早破坏。

关于氯盐对混凝土结构侵蚀破坏已经有较多的研究^[14-16]，其中在氯离子如何扩散到混凝土中并导致钢筋锈蚀，从而引起混凝土结构破坏这方面的研究比较深入。相关研究表明，氯离子主要通过扩散、电化学迁移、毛细作用和渗透作用等方式进入到混凝土内部。这些侵入到混凝土内部的氯离子以三种状态存在于混凝土中：一种是和水泥胶凝材料发生化学反应存在于水泥熟料当中，这种状态的氯离子以氯化物的形式存在比较稳定；另一种则是由于水泥胶体与毛细孔的吸附作用，使得氯离子存在于混凝土当中，这部分的氯离子相对也较稳定^[17]；稳定状态的氯离子和吸附在混凝土中的氯离子很难使钢筋发生锈蚀作用，很难对混凝土结构造成损伤，但是水化作用产生的氯化物和吸附的氯离子将随着温度的变化会膨胀，在 0.15 °时，由无水氯化钠晶体变为二水氯化钠体积膨大 1.3 倍，这将产生巨大的结晶压，足以使抗拉强度较小的混凝土开裂。还有一种状态为氯离子以自由的方式存在于混凝土当中，这部分氯离子对钢筋的锈蚀起到决定性作用^[18]，氯离子侵入到混凝土内部后，钢筋锈蚀后体积变大，容易与钢筋发生锈蚀作用，这导致混凝土容易肿胀开裂，使钢筋暴露在空气当中，使得钢筋发生电化学腐蚀，加快钢筋锈蚀，最终导致混凝土破坏。

1.2.3 混凝土耐酸性研究现状

混凝土的耐酸性一般指的是酸雨对其耐久性的影响。酸雨是指 PH 低于 5.6 的雨水，酸雨的形成与燃烧煤炭、石油、天然气等有关。最早提出“酸雨”这一术语的是英国化学家罗伯特，但是当时未能引起人们注意，直到 20 世纪 40 年代，酸雨对建筑物的危害日益严重，才引起了人们的高度重视。1972 年，联合国在斯德哥尔摩召开的人类环境会议上，才第一次正式的把酸雨作为国际问题提出来，之后欧洲、美国和日本等发达国家先后展开了大规模的研究。Hill 等在模拟酸雨对混凝土耐久性影响时，提出矿渣水泥作为基材料的混凝土比普通硅酸盐水泥的混凝土抗酸性好^[19]。之后还有一些学者展开了更为细致的研究，发现不同水泥基材料的抗酸性差异很大，硅酸盐水泥的抗酸性同矿渣水泥差不多，都能表现出较好的抗酸性，而火山灰水泥抗酸性相对较差；水灰比越小，抗酸性越好；当混凝土试件在防水剂浸泡后，其抗酸性得到了很大的提高^[20]。Saricimen 和 Shameem 等通过试验研究了几种水泥基材料的抗硫酸侵蚀的性能，研究表明水泥基材料硫酸侵蚀的机理与硫酸盐侵蚀的机理不同^[21]。我国于 20 世纪 70 年代才开始酸雨方面的研究。1982 年至 1997 年期间，我国多次召开关于酸雨问题的研讨会，将酸雨来源和控制对策列入“七五”国家环保攻关课题。刘慧玲等

关于西南地区酸雨对混凝土耐久性影响的研究表明,混凝土的腐蚀是酸雨中氢离子和硫酸根离子共同作用的结果,氢离子导致混凝土内氧化钙流失,打破了矿物组成成分碱的平衡,而硫酸根离子生成大量的钙矾石对混凝土造成膨胀破坏^[22]。赵焯等通过模拟自然酸度下人工降水的试验方法对混凝土进行试验。研究表明,当酸度较浓的情况下混凝土表层侵蚀非常严重^[23]。赵卓等通过试验室加速腐蚀方法对混凝土构件在模拟酸雨环境下进行试验研究,研究了不同酸浓度对结构的侵蚀作用,并研究了混凝土结构的侵蚀过程,证实了目前关于钢筋混凝土结构的侵蚀原理^[24]。近几年大连海事大学道路与桥梁研究所的张英姿等学者进行了酸雨环境下混凝土弹性模量的研究,研究结果表明,对不同酸度侵蚀液的混凝土,在侵蚀初期弹性模量变化较大,而后随着侵蚀时间的延长逐渐增大,酸度越大,弹性模量变化越明显,规律性越强^[25]。还有一些学者对钢纤维混凝土抗酸性进行了相关的研究,研究结果表明:相同 PH 值环境下,有机酸强于无机酸对钢纤维混凝土的腐蚀,钢纤维体积率为 1.5%时抗腐蚀能力最佳^[26]。

1.2.4 混凝土在风沙环境下的研究现状

国内外学者对混凝土在酸、碱、盐以及严寒环境的研究都比较成熟,但是在沙尘环境下的研究还不够充分,能够查阅的文献比较少。近年来兰州交通大学的王起才^[27-28]等人对混凝土抗风沙性能做了一些研究,他先研究了冲击参数对混凝土冲蚀磨损的影响,之后又选用不同防护层覆盖于混凝土,通过模拟风沙环境,研究不同防护层抗风沙的性能,结果表明环氧树脂+聚氨酯涂料处理的混凝土表面抗冲蚀性能最好,PPG 涂料次之,水性硅丙乳液最差,他的研究很有参考价值,但是并没有深入的研究混凝土在风沙环境下的冲蚀磨损特征、冲蚀磨损理论、冲蚀规律和冲蚀评价体系,可见对混凝土在风沙环境下的研究体系还不完善,本文将更深入的研究有关混凝土抗风沙的性能。

1.3 内蒙古中西部地区风沙环境对工程材料耐久性的影响

近年来随着经济的发展,内蒙古中西部地区基础设施建设快速发展,由于中西部地区沙漠沙地较多,部分设施遭受沙尘暴气象灾害影响,致使其耐久性下降,而国内外学者多注重于冻融、盐、碱和酸对工程材料耐久性的研究,对风沙环境下工程材料耐久性的研究相对较少,本文对工程材料在风沙环境下耐久性做一些研究,为工程材料在风沙环境下耐久性的研究提供依据。

1.3.1 研究地区地理环境和气候条件

内蒙古地区处于中亚中高纬度的干旱、半干旱地区,是我国沙尘暴多发区之一。自西向东分布着 9 个沙漠和沙地,如图 1-2 所示。

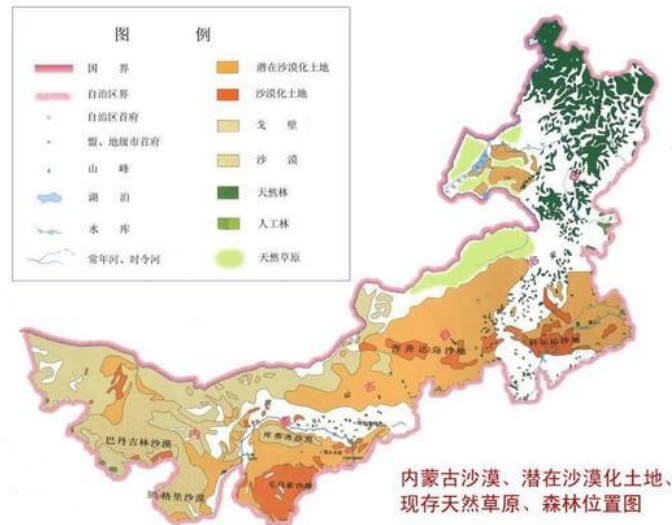


图 1-2 内蒙古中西部地区沙漠和沙地分布图

Fig.1-2 Desert and sandy distribution in the central and western region of Inner Mongolia

1.巴丹吉林沙漠

巴丹吉林沙漠位于内蒙古自治区阿拉善盟阿拉善右旗北部，面积 4.43 万平方公里，年均风速 4m/s ，八级大风日为 30 天左右，是我国第三大沙漠，其中西北部还有 1 万多平方公里的沙漠至今没有人类的足迹。

2.腾格里沙漠

腾格里沙漠位于内蒙古自治区阿拉善左旗西南部和甘肃省中部边境，面积约 4.27 万平方公里，是中国第四大沙漠，气候终年为西风环流控制，年平均风速 $3\sim 4\text{m/s}$ ，2~3 月份出现 8 级暴风，年大风日数 30~50 天。

3.乌兰布和沙漠

乌兰布和沙漠地处内蒙古阿拉善盟和巴彦淖尔盟境内，总面积约 1 万平方公里，年平均风速 4m/s 左右，3~4 月份出现 7~8 级暴风，八级大风日为 30 天左右。

4.库布其沙漠

库布其沙漠位于内蒙古自治区鄂尔多斯高原脊线的北部，年大风天数为 25~35 天，最大风暴可达 9 级。

5.毛乌素沙漠

毛乌素沙漠位于陕西省榆林地区和内蒙古自治区鄂尔多斯市之间，面积达 4.22 万平方公里，是中国四大沙地之一，八级大风日为 25 天左右。

6.浑善达克沙地

浑善达克沙地是我国十大沙漠沙地之一，面积大约为 5.2 万平方千米，是内蒙古自治区中部和东部的四大沙地之一，年平均风速 $4\sim 5\text{m/s}$ ，最大风速可达 25m/s ，年大

风日数 25~40 天。

7. 乌珠穆沁沙地

乌珠穆沁沙地位于内蒙古锡林郭勒盟，沙地面积为 456 万亩，是内蒙古五大沙地之一，该地区年平均风速 5m/s ，九级大风日数为 40 天左右。

8. 科尔沁沙地

科尔沁沙地位于内蒙古自治区通辽市附近，沙地面积大约 5.06 万平方千米，是中国最大的沙地，该地区年平均风速 $4\sim 5\text{m/s}$ ，3 月份最大风速可达 25m/s ，年大风日数 28 天左右。

9. 呼伦贝尔沙地

呼伦贝尔沙地位于内蒙古自治区呼伦贝尔高原，沙地面积近 1 万平方千米，是中国的第四个沙地，该地区年平均风速 $4\sim 5\text{m/s}$ ，2~4 月份最大风速可达九级，年大风日数 30~50 天左右。

1.3.2 研究地区沙尘暴时间分布^[29-32]

1. 沙尘暴的年代分布

图 1-3 是 1960~2015 年内蒙古中西部地区沙尘暴次数的年代分布图。

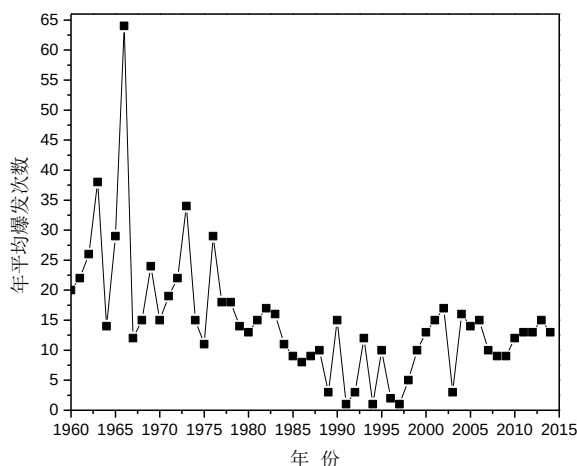


图 1-3 1960 年~2015 年内蒙古中西部地区沙尘暴次数分布

Fig.1-3 The annual distribution of sandstorms between 1961 and 2015
in the central and western region of Inner Mongolia

由图 1-3 可知，从上个世纪 60 年代到 90 年代，沙尘暴的发生次数总体大致呈下降趋势。60 年代沙尘暴发生次数占总体的 33.7%，70 年代占 27.4%，80 年代占 15.3%，90 年代则更少，占 7.2%。其中，1966 年为沙尘暴的频发年，沙尘暴发生次数为 64 次。1991、1994、1997 为沙尘暴的低发年，没有发生较大范围的沙尘暴，尽管总体

趋势下降，但是从 1999 年起又有增高的趋势。进入 21 世纪，沙尘暴发生的次数又有所增加，2000~2010 年沙尘暴发生次数占总体的 15%，其中，2001 年达到最多，之后开始减少，2004 年沙尘暴次数最少，2005 年开始呈波动增加趋势。2011~2015 年沙尘暴发生次数一直在 10 次左右波动。

2. 沙尘暴的季节分布

对内蒙古中西部地区不同年份沙尘暴月爆发次数进行统计，沙尘暴爆发此处分布如图 1-4，从图中可以看出，春季（3~5 月）是沙尘暴发生最多的时段，占全年的 80% 左右。其中以 4 月最多，平均发生次数占全年的 29.5%，同时 4 月的沙尘暴与强沙尘暴出现次数也是最多的；3 月沙尘天气次数次之，平均发生次数占全年的 26.2%，再次是 5 月份，平均发生次数占全年的 22.9%。低发季节为夏秋季（7~9 月），平均发生次数占全年的 10% 左右。

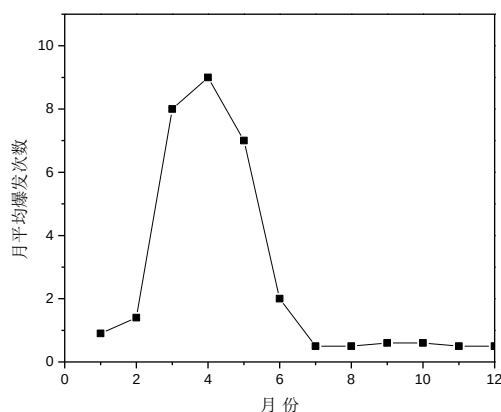


图 1-4 内蒙古中西部地区沙尘暴次数月份分布

Fig.1-4 The monthly distribution of sandstorms in the central and western region of Inner Mongolia

1.3.3 研究地区有关工程材料抗风沙的概况

通过查阅相关资料发现，有关内蒙古中西部地区工程材料抗风沙的多集中在钢结构涂层这方面的研究，对于涂层的冲蚀规律、冲蚀机理和冲蚀特征的研究已经有一个完整的体系，研究的已经比较全面，但是有关其它工程材料的研究很少。混凝土作为工程材料运用到各个领域之中，在内蒙古中西部地区十分常见，但是关于混凝土抗风沙的研究少见报道，这应当引起我们的重视，所以本文进行了混凝土在风沙环境下的一些研究，该研究可补充混凝土在风沙环境下的研究理论体系。

1.4 材料抗冲蚀的国内外研究现状

1.4.1 冲蚀磨损概述

冲蚀磨损是指固体或液体以松散的小颗粒按一定的角度或速度对靶材表面进行冲击所造成的一种材料损耗现象或过程。

工程材料在使用过程中受到冲蚀磨损等现象十分普遍，据中国冶金矿山、农机、煤炭、电力和建材五个部门不完全统计，每年由于磨损而造成损失的价值可达 15~20 亿人民币^[33]，这仅仅是在中国，而在全球范围内造成的经济损失是无法估计的，可见材料磨损问题不容忽视，逐渐成为了国内外诸多学者普遍关注的问题^[34-38]。

1.4.2 冲蚀磨损理论的研究进程

继 1946 年 Wahl 和 Hartstein 发表的第一篇关于冲蚀损伤的文献之后，国内外学者关于材料冲蚀磨损进行了大量的研究，并提出了诸多的理论。

1. 塑形材料的冲蚀磨损理论

(1) 冲蚀微切削理论

最早提出材料冲蚀磨损理论的是 Finnie，于 1958 开始塑性材料的冲蚀磨损研究。他假设冲蚀粒子以一定的速度冲击靶材表面，当粒子划过靶材表面时，对靶材表面进行切除从而产生磨损，由此提出了第一个冲蚀磨损理论——冲蚀微切削理论^[39-41]，该理论仅适用于塑性材料低冲蚀角度的情况，在高冲蚀角情况下其理论与试验结果偏差较大。

(2) 冲蚀变形损伤理论

1963 年 Bitter 通过对塑性材料的研究提出变形损伤理论^[42-43]。他认为材料在冲蚀过程中存在变形历程和能量变化，材料在反复受冲击过程会产生加工硬化，并提高材料的弹性极限，直到应力超过材料的强度，才产生裂纹，由此他提出把材料的冲蚀磨损分为变形磨损和切削磨损两部分。该理论较好的解释塑性材料的冲蚀磨损现象，但是缺乏物理模型的支持。

(3) 挤压锻打理论

1981 年 Levy 通过研究冲蚀粒子对靶材反复冲击的过程，提出了挤压锻打理论^[44]，该理论指出粒子冲击靶材，使靶材表面材料不断地受到反复的挤压锻造，产生类似于“唇片”的塑性变形，经过粒子重复的冲击使“唇片”脱落，从而导致材料流失。

2. 脆性材料的冲蚀磨损理论

关于脆性材料的研究理论始于上世纪 60 年代，1966 年 Sheldon 和 Finnie 在进行脆性材料的冲蚀磨损试验研究时，发现脆性材料的冲蚀规律与塑性材料不同，其磨损量随着冲蚀角的增大不断增加，当 90°时磨损量达到最大，并观察到靶材缺陷部位附

近会产生环状裂纹——赫兹裂纹，由此建立了第一个脆性材料的冲蚀磨损模型^[45-46]。

3. 二次冲蚀理论

1973 年 Tilly 在试验中观察到脆性粒子在冲蚀过程中会发生破碎，破碎后的粒子会再次冲蚀靶材，由此提出了二次冲蚀损伤研究理论^[47]，这个理论很好的揭示了脆性粒子冲击靶材过程中造成材料流失的两个阶段。

4. 基于应变量的 Hutchins 模型

1981 年 Hutchins 基于球形状粒子垂直冲蚀靶材冲蚀行为的研究，提出了基于应变量的 Hutchins 模型，并把应变值作为评价材料冲蚀磨损的标准^[48]，之后又有一些研究人员对 Hutchins 模型进行了更为深入的研究^[49-50]。

1.4.3 材料冲蚀磨损程度评价的研究进展

1. Finnie 评价公式

根据冲蚀微切削理论^[39-41]，Finnie 提出了关于刚性粒子低角度冲蚀塑性材料的冲蚀磨损程度的计算公式：

$$V = \frac{cM}{P} f(\alpha)v^n (n = 2.2 \sim 2.4) \quad (1-1)$$

式中：V——材料流失的体积；

M——固体粒子质量；

v——冲蚀速度；

α ——冲蚀角度；

P——弹性流体压力；

c——粒子分数。

2. Bitter 评价公式

Bitter 通过冲蚀磨损试验过程中变形历程和能量的变化，深入的分析了材料在弹塑性变形范围内的切削和变形磨损作用，他把材料的冲蚀磨损分为变形磨损和切削磨损两部分，并提出了适合复合磨粒冲蚀变形损伤理论^[42-43]，在此基础上又给出了适合复合冲蚀磨损程度的评价公式，但是由于该公式中参数较多，许多参数不易测定，致使很难应用。之后 Wood 又做了一些假设来简化该公式，得到了冲蚀磨损量表达关系：

$$W_t = W_c + W_d \quad (1-2)$$

$$W_t = \left[\frac{\frac{1}{2} M (v \sin \alpha)^2}{\varepsilon} \right] \frac{\gamma}{g} + \left[\frac{\frac{1}{2} M (v \cos \alpha)^2}{\rho} \right] \frac{\gamma}{g} \quad (1-3)$$

式中：W_t——冲蚀磨损失重总量，单位：g；

W_d ——变形磨损量, 单位: g ;
 W_c ——切削磨损量, 单位: g ;
 M ——冲蚀有效沙尘量, 单位: g ;
 v ——冲蚀速度, 单位: m/s ;
 α ——冲蚀角度, 单位: deg ;
 γ ——被冲蚀材料的密度, 单位: g/cm^3 ;
 g ——重力加速度, 单位: cm/s^2 ;
 ε ——变形能量值, 单位: $(g \cdot cm)/cm^3$;
 ρ ——切削能量值, 单位: $(g \cdot cm)/cm^3$ 。

3. Neilson 和 Gilchrist 评价公式

Neilson 和 Gilchrist 在 Bitter 公式的基础上, 做了进一步简化, 得出适合复合冲蚀磨损的表达式:

$$W_t = W_c + W_d \quad (1-4a)$$

$$W_t = \left[\frac{\frac{1}{2} M_s (v_s \cos \alpha)^2}{\phi} \right] + \left[\frac{\frac{1}{2} M_s (v_s \sin \alpha - v_{cr})^2}{\varepsilon} \right] (\alpha_0 < \alpha \leq \frac{\pi}{2}) \quad (1-4b)$$

式中: W_t ——冲蚀磨损失重总量, 单位: g ;

W_d ——变形磨损量, 单位: g ;

W_c ——切削磨损量, 单位: g ;

M ——冲蚀有效沙尘量, 单位: g ;

v ——冲蚀速度, 单位: m/s ;

α ——冲蚀角度, 单位: deg ;

v_{cr} ——无磨蚀的垂直速度临界值, 单位: m/s ;

α_0 ——区分两种磨蚀情况的临界冲角, 单位: 弧度;

n ——水平回弹率因素(当 $\alpha = \alpha_0$ 时, $\sin(n\alpha_0) = 1$, 则有 $n = \pi/2\alpha_0$), 无量纲;

ϕ ——微切削因数, 单位: m^2/s^2 ;

ε ——冲击变形因数, 单位: m^2/s^2 。

4. 其它评价公式

文献^[51]根据风沙环境和钢结构涂层的特征, 在 Bitter、Neilson 和 Gilchrist 公式的基础上, 进一步简化, 提出了适用于风沙环境中钢结构涂层磨损程度的评价公式:

$$M = M_c + M_d \quad (1-5a)$$

$$M = \left[\frac{\frac{1}{2} M_s (V \cos \alpha)^2 \sin(n\alpha)}{\psi} \right] + \left[\frac{\frac{1}{2} M_s (V \sin \alpha)^2}{\eta} \right] (0 < \alpha \leq \alpha_0) \quad (1-5b)$$

$$M = \left[\frac{\frac{1}{2} M_s (V \cos \alpha)^2}{\psi} \right] + \left[\frac{\frac{1}{2} M_s (V \sin \alpha)^2}{\eta} \right] (\alpha_0 < \alpha \leq \frac{\pi}{2}) \quad (1-5c)$$

式中： M ——涂层总冲蚀磨损失重量，单位： g ；

M_c ——涂层切削冲蚀磨损失重量，单位： g ；

M_d ——涂层变形冲蚀磨损失重量，单位： g ；

M_s ——冲蚀有效沙尘量，单位： g ；

V ——冲蚀速度，单位： m/s ；

α ——冲蚀角度，单位：弧度；

α_0 ——区分两种磨蚀情况的临界冲角， $\alpha_0 = \pi/2n$ ，单位：弧度；

n ——水平回弹率因素(当 $\alpha = \alpha_0$ 时， $\sin(n\alpha_0) = 1$ ，则有 $n = \pi/2\alpha_0$)，无量纲；

ψ ——切削磨蚀能耗因数，单位： m^2/s^2 ；

η ——冲蚀变形磨蚀能耗因数，单位： m^2/s^2 。

之后又有一些学者对上述公式进行进一步的分析^[52]，得到了更能适用钢结构涂层的评价公式。

1.5 本文研究的内容以及创新点

1.5.1 本文研究的内容

1. 本文对内蒙古中西部地区的沙尘气象环境进行了大量的研究，分析其特点后选择风沙冲蚀参数。并结合内蒙古中西部的自然环境和气候特点设计混凝土的抗冲蚀试验工况，考虑到混凝土的实际施工要求和配合比，设计了三组不同强度等级的混凝土，即 C20、C30、C40，试件尺寸为 $80mm \times 40mm \times 20mm$ 的棱柱体，进行混凝土在不同强度和不同风沙环境冲蚀参数的对比试验研究。

2. 采用气流挟沙喷射法进行混凝土抗冲蚀性能的试验研究，对研究结果进行统计分析，结果表明：（1）同强度混凝土的冲蚀率在相同条件下随着风沙流冲蚀角度的增大而增大， 90° 时达到最大；（2）同强度混凝土的冲蚀率在相同条件下随着风沙流冲蚀速度的提高而增大，并且二者近似成指数关系；（3）同强度混凝土的冲蚀率在相同条件下随着风沙流浓度的增大呈先增大后减小的趋势；（4）同强度的混凝土在相同条件下随着冲蚀角度的变大冲蚀率不断增长，在 90° 时冲蚀率达到最大，不同强度的混凝土随着强度的提升，冲蚀率不断减小；（5）试验表明混凝土在冲蚀过程中没有明

显的孕育期，但是有上升期和稳定期。通过 SEM 扫描电镜观察了冲蚀损伤部位表面形貌，其破坏机理表现为：在低角度冲蚀下沙粒水平方向的切削作用使混凝土表面产生微小裂纹，微小裂纹扩展产生微破坏区，破坏机制表现为类似表面划伤破坏作用；在高角度冲蚀下沙粒垂直方向的冲击导致混凝土表面产生冲蚀坑和微裂纹，裂纹的交叉扩展导致脆性断裂和剥落，主要破坏机制表现为冲击压痕破碎作用。

3. 通过建立风沙流粒子冲蚀磨损力学模型，进行风沙流作用下混凝土冲蚀磨损力学行为及其理论分析。

4. 运用相似理论把试验结果同实际工况进行相似性分析，结果表明下沙率越大，由试验结果推算的实际工况中冲蚀磨损时间越长；每年发生沙尘暴的次数越少，则由试验结果推算的实际工况中冲蚀磨损时间越长。

5. 本文提出了一种混凝土在风沙环境下抗冲蚀磨损程度的评价方法以及相应的评价公式，利用该评价计算公式分析了混凝土冲蚀磨损重量同冲蚀速度和冲蚀角度之间的关系，并把评价计算公式结果与试验结果进行了对比，证实了评价公式的可行性和可靠性。

1.5.2 本文的创新性

1. 本课题结合内蒙古中西部地区环境特点，将在风沙环境下混凝土耐久性领域做一些研究，模拟风沙环境冲蚀试验，研究不同风沙环境冲蚀力学参数下混凝土的冲蚀磨损行为和冲蚀特征。

2. 在试验结果的基础上结合风沙环境以及混凝土的特征，提出一种适用于混凝土在风沙环境下的损伤评价公式。

3. 依据试验数据得出混凝土在风沙环境下的冲蚀规律，运用相似理论将试验结果同实际情况进行相似性分析，得出试验工况下与实际工况下的相似关系，为混凝土结构的设计、应用及防护及准耐久性提供依据。

第二章 试验方案设计以及性能测试

随着混凝土所服役的外界环境越来越恶劣、越复杂，使用环境中的风沙、碱、盐和酸等可能以单一方式或复合方式影响着混凝土的耐久性，由于混凝土性能恶化，从而导致结构的承载力不足或使用性能下降，从而影响结构的安全性。内蒙古中西部恶劣的气候条件严重威胁着混凝土结构的耐久性和安全性，本文选取具有实际代表性的地区——库布其沙漠作为研究对象，对库布其沙漠进行实地考察，并选取此地区的沙子作为混凝土的冲蚀粒子，根据库布其沙漠沙粒的理化性质以及混凝土结构所处的自然环境和气候特点，设计试验工况，展开了不同种环境条件下混凝土抗风沙性能试验。

2.1 试验工况设计

为了模拟混凝土结构实际服役环境，本文选取了多种环境因素（冲蚀速度、下沙率、冲蚀时间和冲蚀角度）和三种不同强度等级的混凝土（C20、C30 和 C40）的组合；根据内蒙古中西部地区的环境特点，试验设定了五种冲蚀速度，六种下沙率和五种冲蚀角度，进行三种不同强度混凝土试件在相同条件下的试验。试验分组具体如表 2-1 所示。

表 2-1 试验工况汇总表

Table.2-1 the summary of test conditions

序号	混凝土抗风沙试验内容分组
试验工况一	以冲蚀速度为主因素的试验
试验工况二	以冲蚀角度为主要因素的试验
试验工况三	以下沙率为主要因素的试验
试验工况四	以冲蚀时间为主要因素的试验

进行混凝土耐久性试验的方法主要有两种：一种是现场试验方法，另一种是实验室快速试验方法。现场试验方法可靠性较高，但是试验周期比较长，短期内很难得到结果，固多采用实验室快速试验方法。本文采用实验室快速试验方法，对不同环境条件下和不同强度的混凝土的冲蚀部位形貌进行观测，对质量损失进行测定，以及对混凝土的冲蚀规律和冲蚀破坏机理进行分析。

2.2 试件的制备

2.2.1 混凝土选择

1. 水泥：唐山冀东水，P.O42.5 普通硅酸盐水泥，其矿物成分见表 2-2，其性能指标

见表 2-3。

表 2-2 P.O42.5 普通硅酸盐水泥矿物组成

Table.2-2 P.O42.5 Ordinary Portland cement mineral composition

成分	硅酸三钙	硅酸二钙	铝酸三钙	铁铝酸四钙	游离氧化钙
W/%	52.73	7.14	11.12	16.34	0.27

表 2-3 P.O42.5 普通硅酸盐水泥性能指标

Table.2-3 P.O42.5 Ordinary Portland cement Performance indicators

检测项目	细度 (%)	SO ₃ (%)	安定性	烧失量 (%)	初凝时间 (min)	终凝时间 (min)	抗压强度 (MPa)		抗折强度 (MPa)	
实测	1.6	2.13	合格	1.04	230	310	3d	28d	3d	28d
							28.9	48.7	5.8	7.9

- 2. 粗骨料：采用粒径 3~5mm 连续级配、表面粗糙和质地坚硬的碎石。
- 3. 细骨料：河砂，中砂，细度模数为 2.81，堆积密度 1480kg/m³，表观密度 2600kg/m³，颗粒级配良好。
- 4. 水：普通自来水。

2.2.2 模板制作

模板材质为竹胶板，厚度为 15mm，设计按照《木结构设计规范》（GB50005-2003）^[53]进行。如图 2-1 所示。

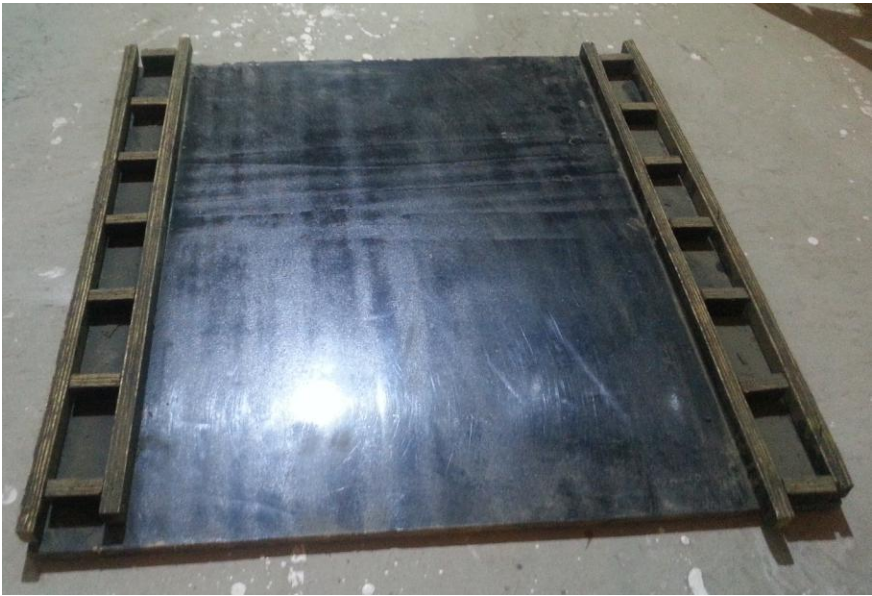


图 2-1 混凝土试件模板

Fig.2-1 The concrete specimen template

2.2.3 混凝土配合比设计

一般工程结构多采用低等级混凝土，多为 C25~C40，为了较全面的考虑工程实际，本文选择了 C20、C30 和 C40 混凝土，首先根据选定的原料品种、质量，按照《普通混凝土配合比设计规程》（JGJ 55-2011）^[54]进行初步计算，得出初步计算配合比；再经过实验室试拌调整，得出基准配合比，之后经强度复核，得出最终实验室配合比。三种混凝土配合比及其性能指标见表 2-4。

表 2-4 C20、C30 和 C40 混凝土配合比与性能

Table.2-4 The C20、C30 and C40 concrete mixture ratio and performance

编号	原材料用量 (kg/m ³)				28d 立方体抗压强度
	水泥	水	砂	石子	(MPa)
C20	333	200	636	1131	23.5
C30	444	200	563	1093	31.7
C40	500	200	544	1056	41.4

2.2.4 混凝土试件制作以及养护

按照混凝土配合比制作三种类型的试件，混凝土试件一批制作成型，装料时用细铁丝沿试模内壁进行插捣，混凝土拌合物高出试模上口，然后在振动台上完成振捣并刮去多余的混凝土，试件成型后放在室内一昼夜，编号后拆模，之后将试件放入标养室内养护至规定龄期 28 天后拿出，准备试验。

2.3 试件尺寸、密度以及质量测量

表 2-5 给出混凝土试块的物理性质，混凝土试件尺寸为 80mm×40mm×20mm 的棱柱体，如图 2-2 所示，质量 M 的测量采用如图所示型号为 OHAUS-EP214C 精度为 0.1mg，最大量程为 200g 的分析天平，如图 2-3 所示，待混凝土试件达到标准养护时间自然晾干后测定其质量，为了减少试验数据的误差，每次进行 3 次测定，取其质量平均值，质量和密度测定见表 2-5。

2.4 混凝土试件的性能

本试验测定混凝土试件标准抗压强度采用同批制作的 100mm×100mm×100mm 立方体混凝土试件，通过万能试验机可测的其强度，试验数据表明 C20、C30 和 C40 混凝土试件均达强度等级标准满足本试验的需求。



图 2-2 混凝土试件（从左至右 C20、C30 和 C40）

Fig.2-2 The concrete test piece (From left to right C20、C30 and C40)



图 2-3 精密分析天平

Fig.2-3 The precise analytical balance

表 2-5 混凝土试件物理性能

Table.2-5 The physical properties of concrete specimens

编 号	体积 (mm³)	质量 (g)					平均值 (g)	密度 (g/mm³)
		试样编号						
		1	2	3	4	5		
C20	80×40×20	150.9	149.6	151.2	148.7	151.4	150.4	2.35
C30	80×40×20	156.5	151.4	154.4	155.2	159.4	155.4	2.42
C40	80×40×20	159.8	152.2	158.9	152.2	154.5	155.6	2.43

2.5 试验检测指标

国内外现有的关于混凝土抗冲蚀性能试验研究资料表明,大多以质量损失或者冲蚀率为标准。考虑到试验实际工作量较大,本文四组试验均采用无损伤试验,即以试件的质量损失或冲蚀率作为评价指标,也就是说以质量的变化或者冲蚀率作为混凝土物理性能的检测指标。因为裂纹的扩展或者截面强度的衰减都会导致混凝土质量或者强度下降,质量损失能够在一定程度上有效地反应混凝土破坏的程度。当试件的冲蚀时间达到 12min 时终止试验。

2.6 本章小结

1. 本章提出了混凝土在风沙环境下耐久性试验研究的基本情况,指出混凝土所处环境的恶劣性和复杂性,表明了研究各种复合风沙环境因素下混凝土耐久性的必要性。
2. 本文根据混凝土实际服役环境特征,制备了三组配合比的混凝土,设计了四组试验工况,设定了不同的风沙环境参数用于试验。
3. 本文采用混凝土的质量损失或者冲蚀率作为检测指标。

第三章 风沙流作用下混凝土冲蚀磨损力学理论分析

本章应用接触力学和弹性力学的基本原理,结合内蒙古中西部地区风沙环境建立风沙流粒子冲蚀混凝土的力学模型,并对混凝土受风沙粒子冲蚀磨损的力学行为进行计算分析。

3.1 接触问题的分类

1. 按接触物体的材料性质分类

弹性物体的接触 这类接触问题是最广泛的一类接触问题,同时也是弹性理论的一大类专门性问题,目前已经研究的相当成熟。其研究的对象包括弹性物体之间的相互接触,弹性物体和刚性物体之间的接触。

塑形物体的接触 这类接触问题比较复杂,主要研究材料屈服后的接触问题,由于材料的应力和应变本构关系比较复杂,他们之间的关系是非线性的,因此研究此类接触问题有一定的困难。研究对象包括刚性物体和塑形物体之间的接触、弹塑性之间的接触和纯塑形之间的接触等问题。

粘弹性物体的接触 这类接触侧重于线性粘弹性物体接触问题的研究,由于材料的应力和应变是线性关系,需要我们把时间和速率等关系考虑进去。研究对象包括弹性物体和粘弹性物体的接触,刚性物体和粘弹性物体的接触等问题。

液体和可变形物体之间的接触 这类接触问题主要以流体力学为主,研究的主要问题为液体荷载对可变形物体的应力分布的影响。

虽然有关线性弹性接触的文献很丰富,解决的问题很多,但是这类问题与弹性理论的其它专门问题有共同特征,对于它们的研究还有待继续发展。

2. 按空间分类

半平面问题 大多数是压块与弹性半平面的边界直线相接处,压块有可能是弹性的或是刚性的。

半空间问题 两个接触的物体各自占据半个无限的空间或者理解为半空间的压块压在半无限空间的边界平面上,接触区域是一小块面积。

空间的接触问题 此类问题还有待继续发展,目前能够查阅的文献还不多。

3. 按接触物体的几何形状分类

物体的结合形状种类繁多,例如:半无限接触问题,板、壳与其它形状物体的接触,压块问题,二次曲面问题,环状体问题,多连通域问题和组成物体的问题等。

4. 按接触表面的光滑度分类

Hertz 接触 假设接触表面是绝对光滑的,曲面是连续变化的。

非 Hertz 接触 实际物体不是绝对光滑的,表面带有小峰或谷带,因而有摩擦和

峰顶的塑性区。

5. 按理论力学的方法分类

静力学接触问题 静力学接触问题占据了接触问题的大部分，这类问题比较好解决。

带运动学的接触问题 此类接触问题包括滚动轴承，轴在轴承中的转动，车轮同路面的滚动接触，车轮在钢轨上的滚动等。这类接触问题既有滚动还有横向移动，或者前后的错动或螺旋运动，从而引起接触面的硬化、起层延展和磨损。

动力学的接触问题 此类问题指的是物体之间的冲击或碰撞接触，碰撞过程中连带着弹性波，比如拳击运动，乐器类演奏等。

研究接触问题的目的在于求接触面尺寸、位移场、应力场或者应变场等，当研究的问题超出接触力学的范畴，应当划到摩擦学、波动学或断裂力学当中。

3.2 风沙流粒子冲蚀接触力学模型

假设某时刻 t ，质量为 m 、半径为 r 的沙粒子以速度 V 和冲蚀角度 α 开始对混凝土表面进行弹性碰撞，由于沙粒子的质量和体积都很小，我们不考虑其变形惯性，双方接触区域的变形惯性也可以忽略，此刻问题就简化为以速度 V 运动的沙粒子和混凝土表面的准静态碰撞模型，如图 3-1 所示。依据 Hertz 弹性接触理论^[5]，我们忽略变形惯性，可以近似的把静力问题的结论作为这一动力问题的近似。

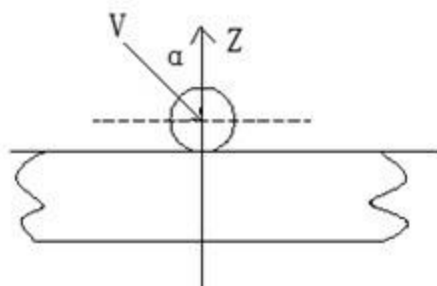


图 3-1 风沙环境下粒子冲蚀混凝土接触力学模型

Fig.3-1 The mechanics model of particle erosion under Wind-blown Sand Environment

3.3 接触理论分析

两个物体互相紧压时，在接触区域附近会产生应力和应变，称为接触应力和接触应变。接触应力和接触应变有明显的局部性，随着两物体接触处离开距离的增加而迅速减小。材料在接触处的变形受到三个方向的限制，接触区域附近存在三向应力状态。由此可见在混凝土受风沙环境下的应力计算，接触力学具有重要的意义。接触问题最先是 Hertz 解决的，他提出了两个接触物体之间接触表面的应力和应变由法向力引起的，之后又有许多研究者研究了接触面下的应力和切向力引起的接触问题。

3.3.1 Hertz 弹性接触理论

1882 年 Hertz 对两个物体接触处的应力和位移做了系统的研究和分析,并提出了 Hertz 弹性接触理论^[55]。该理论是建立在以下假定条件下的: 1.接触系统由两个相互接触的物体组成,它们间不发生刚体运动; 2.接触物体的变形是小变形,接触点可以预先确定,接触或分离只在两物体可能接触的相应点进行; 3.应力、应变关系是线性的; 4.接触表面完全光滑; 5.不考虑接触面的介质、不计动摩擦影响。该理论一经提出就引起了学者的广泛关注,也得到了学者的证实,直到如今仍然是分析接触问题的主要理论。

根据本文研究对象的特征,我们考虑接触区域半径为 R 的圆面积,由 Hertz 弹性接触理论我们可以得出接触区域至接触中心的距离为 r ($r \leq R$) 点的法向压应力为:

$$p(r) = p_0 \left(1 - \frac{r^2}{R^2}\right)^{\frac{1}{2}} \quad (3-1)$$

其中式中: R — 接触区域半径;

r — 接触区表面某点到接触中心点的距离, $r \leq R$;

$p(r)$ — 距离接触中心点距离为 r 点处的法向压应力;

p_0 — 接触中心点处的法向压应力。

通过对接触区域上积分可以得到法向总荷载 p 与 p_0 的关系:

$$p = \int_0^R p(r) 2\pi r dr = \frac{2}{3} p_0 \pi R^2 \quad (3-2)$$

由式 (3-2) 可以得出最大压应力 p_0 是平均压应力 p_c ($p_c = \frac{p}{\pi R^2}$) 的 1.5 倍。

若给定总荷载 p , 令: $\frac{1}{E} = \frac{1-\mu_1^2}{E_1} + \frac{1-\mu_2^2}{E_2}$, $\frac{1}{R^*} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$, 其中 E_1 , E_2 为接触双方材

料的弹性模量, μ_1 , μ_2 为接触双方材料的泊松比, R_1 , R_2 为接触双方的曲率半径。当

冲蚀粒子与半空间表面接触时 $R_2 \rightarrow \infty$, 此时有以下表达式:

$$\text{接触区域半径: } R = \left(\frac{3pR^*}{4E}\right)^{\frac{1}{3}} \quad (3-3)$$

$$\text{法向变形: } \delta_z = \frac{R^2}{R^*} = \left(\frac{9p^2}{16R^*E^2}\right)^{\frac{1}{3}} \quad (3-4)$$

$$\text{接触面中心点法向压应力: } p_0 = \frac{3p}{2\pi a^2} = \left(\frac{6pE^2}{\pi^3 R^{*2}} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (3-5)$$

接触表面上 ($z=0$) 半径为 r 点的法向和切向位移为:

$$S_z(r) = \frac{(1-\mu^2)\pi p_0}{4RE} (2R^2 - r^2) \quad (r \leq R) \quad (3-6a)$$

$$S_z(r) = \frac{(1-\mu^2)p}{2RE} \left[(2R^2 - r^2) \sin^{-1}(R/r) + \frac{Rr^2}{r} \left(1 - \frac{R^2}{r^2} \right)^{\frac{1}{2}} \right] \quad (r > R) \quad (3-6b)$$

$$S_r(r) = \frac{(1-2\mu)(1+\mu)R^2 p_0}{3Er} \left[1 - \left(1 - \frac{R^2}{r^2} \right)^{\frac{3}{2}} \right] \quad (3-6c)$$

$$S_r(r) = \frac{(1-2\mu)(1+\mu)R^2 p_0}{3Er} \quad (r > R) \quad (3-6d)$$

表面上 ($z=0$) 接触区域内半径为 r ($r \leq R$) 点的应力为:

$$\frac{\sigma_r}{p_0} = \frac{1-2\mu}{3} \left(\frac{R}{r} \right)^2 \left[1 - \left(1 - \frac{R^2}{r^2} \right)^{\frac{3}{2}} \right] - \left(1 - \frac{R^2}{r^2} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (3-7a)$$

$$\frac{\sigma_z}{p_0} = -\left(1 - \frac{R^2}{r^2} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (\text{Hertz 压力}) \quad (3-7b)$$

表面上 ($z=0$) 接触区域内半径为 r ($r > R$) 点的径向应力为:

$$\frac{\sigma_r}{p_0} = (1-2\mu) \frac{R^2}{3r^2} \quad (3-8)$$

在接触区域外部, 径向应力 σ_r 为拉应力, 比较式子 (3-7a) 可以得到在 $r=R$ 点的径向应力是接触区域外的拉应力最大值。

3.3.2 弹性撞击接触分析

1. 球的对心碰撞

如图 3-2 所示, 设半径为 r_1 和 r_2 , 质量为 m_1 和 m_2 的两个小球, 分别以沿 Z 轴的初速度 v_{z11} 和 v_{z21} 发生对心碰撞, 此时其他方向的速度 $v_{x1} = v_{x2} = \omega_{y1} = \omega_{y2} = 0$ 。在碰撞过程中, 因双方发生弹性变形, 两球体速度变为 v_{z1} 和 v_{z2} , 则接近的相对速度为:

$$d\delta_z/dt = v_{z2} - v_{z1}, \text{ 设 } p(t) \text{ 为碰撞过程中任意时刻的法向接触动力, 根据动力学原理可}$$

得如下关系式：

$$p(t) = m_1 \frac{dv_{z1}}{dt} \quad (3-9a)$$

$$p(t) = -m_2 \frac{dv_{z2}}{dt} \quad (3-9b)$$

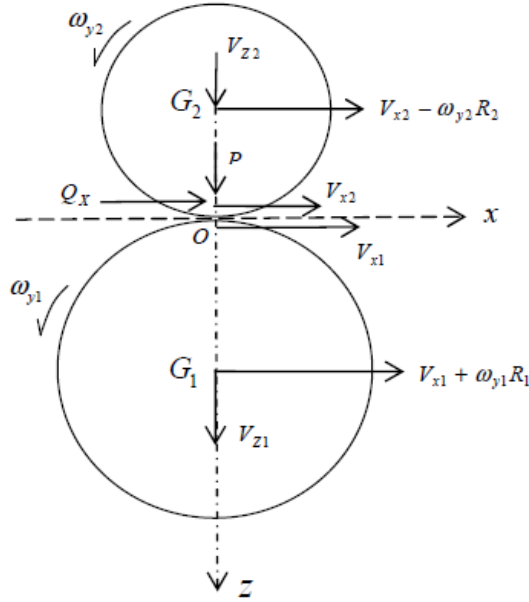


图 3-2 两球碰撞模型

Fig.3-2 Two ball collision model

由以上两个式子可得：

$$-\frac{m_1 + m_2}{m_1 m_2} p(t) = \frac{d}{dt} (v_{z2} - v_{z1}) = \frac{d^2 \delta_z}{dt^2} \quad (3-10)$$

结合 Hertz 静弹性接触理论可以得到旋转体接触的力与法向压缩量关系：

$$p = \frac{4}{3} R^{*\frac{1}{2}} E (\delta_z)^{\frac{3}{2}} = k (\delta_z)^{\frac{3}{2}} \quad (3-11)$$

其中： $k = \frac{4}{3} R^{*\frac{1}{2}} E$ ， $\frac{1}{E} = \frac{1 - \mu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \mu_2^2}{E_2}$ ， $\frac{1}{R^*} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$ ， E_1 ， E_2 为接触双方材料的弹性

模量， μ_1 ， μ_2 为接触双方材料的泊松比， R_1 ， R_2 为接触双方的曲率半径， 令

$\frac{1}{m} = \frac{1}{m_1} + \frac{1}{m_2}$ ， 将式子 (3-10) 简化为：

$$m \frac{d^2 \delta_z}{dt^2} = -k (\delta_z)^{\frac{3}{2}} \quad (3-12)$$

对 δ_z 积分可得：

$$\frac{1}{2} \left[v_z^2 - \left(\frac{d\delta_z}{dt} \right)^2 \right] = \frac{2k}{5m} (\delta_z)^{\frac{5}{2}} \quad (3-13)$$

其中： $v_z = v_{z21} - v_{z11}$ ，表示为碰撞接触时的初速度。

有上式可知，当 $\frac{d\delta_z}{dt} = 0$ 时，压缩变形 δ_z 达到最大值 $\delta_{z,max}$ ：

$$\delta_{z,max} = \left(\frac{5mv_z^2}{4k} \right)^{\frac{2}{5}} = \left(\frac{15mv_z^2}{16\sqrt{R^*}E} \right)^{\frac{2}{5}} \quad (3-14)$$

再由 (3-11) 可得法向最大碰撞力 p_{max} ：

$$p_{max} = k\delta_{z,max}^{\frac{3}{2}} = \left(\frac{125}{64} m^3 k^2 v_z^6 \right)^{\frac{1}{5}} \quad (3-15)$$

对 (3-13) 式进行积分，可得压缩量随时间的关系：

$$t = \frac{\delta_{z,max}}{v_z} \int \frac{d(\delta_z/\delta_{z,max})}{\left[1 - (\delta_z/\delta_{z,max})^{5/2} \right]^{1/2}} \quad (3-16)$$

因为分析采用 Hertz 理论，建立在理想弹性条件下，不考虑摩擦，我们可以得到碰撞总时间：

$$T = 2t = 2 \frac{\delta_{z,max}}{v_z} \int_0^1 \frac{d(\delta_z/\delta_{z,max})}{\left[1 - (\delta_z/\delta_{z,max})^{5/2} \right]^{1/2}} = 2.94(\delta_z/\delta_{z,max}) = 2.87 \left(\frac{m^2}{R^* E^2 v_z} \right)^{\frac{1}{5}} \quad (3-17)$$

2. 球的斜碰撞

如图 3-2 所示，斜碰撞问题需考虑两球体在碰撞前后碰撞点的法向速度 v_z 、切向速度 v_x 以及旋转角度 ω_y 。当考虑到两碰撞物体间有摩擦时，接触面会出现切向力，当不考虑摩擦时，其运动方式不受碰撞的干扰。根据动力学原理，列出如下切向的线动量方程，式中 Q_x 表示合摩擦力：

$$Q_x = m_1 \frac{d}{dt} (v_{x1} + \omega_{y1} R_1) \quad (3-18a)$$

$$Q_x = -m_2 \frac{d}{dt} (v_{x2} - \omega_{y2} R_2) \quad (3-18b)$$

每个球关于 Oy 轴的动量矩是守恒的，有以下式子：

$$\frac{d}{dt} [m_1 v_{x1} R_1 + m_1 (R_1^2 + \rho_1^2) \omega_{y1}] = 0 \quad (3-19a)$$

$$\frac{d}{dt} [-m_2 v_{x2} R_2 + m_2 (R_2^2 + \rho_2^2) \omega_{y2}] = 0 \quad (3-19b)$$

式中 ρ_1 、 ρ_2 是两球的质心回转半径。由式子(3-18)与(3-19)可以得出：

$$Q_x = \frac{m_1}{(1 + R_1^2 / \rho_1^2)} \frac{dv_{x1}}{dt} \quad (3-20a)$$

$$Q_x = -\frac{m_2}{(1 + R_2^2 / \rho_2^2)} \frac{dv_{x2}}{dt} \quad (3-20b)$$

令 $\frac{1}{m} = \frac{m_1}{(1 + R_1^2 / \rho_1^2)} + \frac{m_2}{(1 + R_2^2 / \rho_2^2)}$ ，则上式可化简为：

$$\frac{1}{m} Q_x = \frac{d}{dt} (v_{x1} - v_{x2}) = \frac{d^2 \delta_x}{dt^2} \quad (3-21)$$

其中 δ_x 为两球接触点的切向相对弹性位移。在斜碰撞问题研究过程中，如果两碰撞体是弹性相似的，我们可以认为切向力不影响法向运动；相反，由于这种影响很小，也可以合理的将其忽略，于是接触区域和在整个碰撞期间接触压力的变化可以由赫兹碰撞理论给出，和摩擦力无关。

3.4 风沙流粒子冲蚀接触动力分析

1. 法向接触动力分析

根据图 3-1 所示的冲蚀接触力学模型，碰撞瞬间的粒子法向靠近的初速度为：

$$v_{z0} = v \cos \alpha \quad (3-22)$$

由于两球体接触瞬间由点及面，接触区域产生压缩变形，此时设两物体法向接近速度为 v_z ，因总压缩变形产生的法向相对位移为 δ_z ，则有：

$$\frac{d\delta_z}{dt} = v_z, p(r) = p_0 \left(1 - \frac{r^2}{R^2}\right)^{\frac{1}{2}} \quad (3-23)$$

设 $p(t)$ 为碰撞过程中任一时刻法向接触动力，由动力学原理可得动力微分方程：

$$p(t) = m_1 \frac{dv_z}{dt} \quad (3-24)$$

由式子(3-23)与(3-24)可得:

$$p(t) = m_1 \frac{dv_z}{dt} = m_1 \frac{d^2 \delta_z}{dt^2} \quad (3-25)$$

结合 Hertz 静弹性接触理论可以得到旋转体接触的力与法向压缩量关系:

$$p = \frac{4}{3} R^{*\frac{1}{2}} E (\delta_z)^{\frac{3}{2}} = k (\delta_z)^{\frac{3}{2}} \quad (3-26)$$

$$R = \left(\frac{3pR^*}{4E} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (3-27)$$

其中: $k = \frac{4}{3} R^{*\frac{1}{2}} E$, $\frac{1}{E} = \frac{1-\mu_1^2}{E_1} + \frac{1-\mu_2^2}{E_2}$, $\frac{1}{R^*} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$, E_1 , E_2 为接触双方材料的弹性

模量, μ_1 , μ_2 为接触双方材料的泊松比, R_1 , R_2 为接触双方的曲率半径。

令: $m = m_1$, 将式子(3-26)带入(3-25), 可得:

$$\frac{d^2 \delta_z}{dt^2} = \frac{k}{m} (\delta_z)^{\frac{3}{2}} \quad (3-28)$$

对 δ_z 积分可得:

$$\delta_{z0} - \left(\frac{d\delta_z}{dt} \right)^2 = \frac{4k}{5m} (\delta_z)^{\frac{5}{2}} \quad (3-29)$$

当 $\frac{d\delta_{z0}}{dt} = 0$ 时, 总压缩变形 δ_z 取得最大值:

$$\delta_{z, \max} = \left(\frac{5m}{4k} \right)^{\frac{2}{5}} \delta_{z0}^{\frac{4}{5}} \quad (3-30)$$

代入式子(3-26)可得法向接触动力最大值:

$$p_{\max} = k \delta_{z, \max}^{\frac{3}{2}} = \left(\frac{125}{64} m^3 k^2 \delta_{z0}^6 \right)^{\frac{1}{5}} = \left[\frac{125}{64} m^3 \left(\frac{16}{9} r E^2 \right) \delta_{z0}^6 \right]^{\frac{1}{5}} \quad (3-31)$$

由以上可计算出最大接触区域半径 $R_{\max}$ 及接触面上最大法向动应力:

$$R_{\max} = \left(\frac{3p_{\max} r}{4E} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (3-32)$$

$$\sigma_{z, \max} = \frac{3p_{\max}}{2\pi a_{\max}^2} = \frac{3}{2\pi} \left(\frac{16E^2 p_{\max}}{9r^2} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (3-33)$$

2. 切向接触动力分析

设接触面切向动力 Q ，根据完全无滑动和完全滑动两种极限状况进行分析。假设碰撞过程中接触面完全不滑动，则具有静摩擦性质，根据静弹性接触理论，当一组固定法向力 p 和切向力 Q 使旋转体和平面接触无滑动时，接触面处产生平行于切向力的均匀切向位移，接触区域内半径为 ρ 的点切向力大小有如下分布：

$$\tau(\rho) = \frac{Q}{2\pi R} (R^2 - \rho^2)^{\frac{1}{2}} \quad (3-34)$$

设接触面全反力与法向夹角为 α ，按静摩擦原理有 $dp = dQ/\tan \alpha$ ，将式子(3-27)两边微分可得：

$$dp = \frac{4ER^2}{r} \tan \alpha dR \quad (3-35)$$

再有(3-34)可得 dQ 引起的接触区域内半径为 ρ 的点的应力增量：

$$d\tau(\rho) = \frac{dQ}{2\pi R} (R^2 - \rho^2)^{-\frac{1}{2}} = \frac{2E \tan \alpha}{\pi r} R (R^2 - \rho^2)^{-\frac{1}{2}} dR \quad (3-36)$$

当 R 从 ρ 变化到 $R_{\max}$ 时，切向应力最终值分布($0 \leq \rho \leq R_{\max}$)：

$$\tau(\rho) = \int_{\rho}^{R_{\max}} d\tau(\rho) = \frac{2E \tan \alpha}{\pi r} \int_{\rho}^{R_{\max}} (R^2 - \rho^2)^{-\frac{1}{2}} dR = \frac{4E \tan \alpha}{\pi r} (R_{\max}^2 - \rho^2)^{-\frac{1}{2}} \quad (3-37)$$

此时接触面上最大切向动力为：

$$Q_{\max} = \int_0^{R_{\max}} \tau(\rho) 2\pi \rho d\rho = \frac{E \tan \alpha}{r} R_{\max}^2 \quad (3-38)$$

当 $\rho = 0$ 时，有接触中心切向应力最大值：

$$\tau_{\max} = \frac{4E \tan \alpha}{\pi r} R_{\max} = \frac{\tan \alpha}{\pi} \left(48E^2 \frac{p_{\max}}{r^2} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (3-39)$$

假设接触面完全光滑，设摩擦系数为 μ ，根据滑动摩擦定律有：

$$\tau = \mu \sigma_z, \quad \tau_{\max} = \mu \sigma_{z, \max}, \quad Q = \mu p, \quad Q_{\max} = \mu p_{\max} \quad (3-40)$$

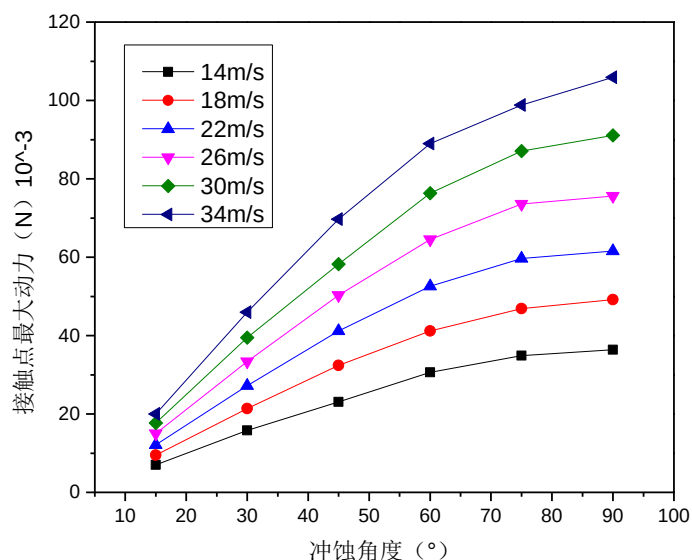
3.5 风沙流粒子冲蚀接触应力分析

风沙流粒子参数：质量 m ，半径 r (半径取 $60 \mu m$)，泊松比 $\mu_1 = 0.25$ 、 $E_1 \approx 40 GPa$ ；

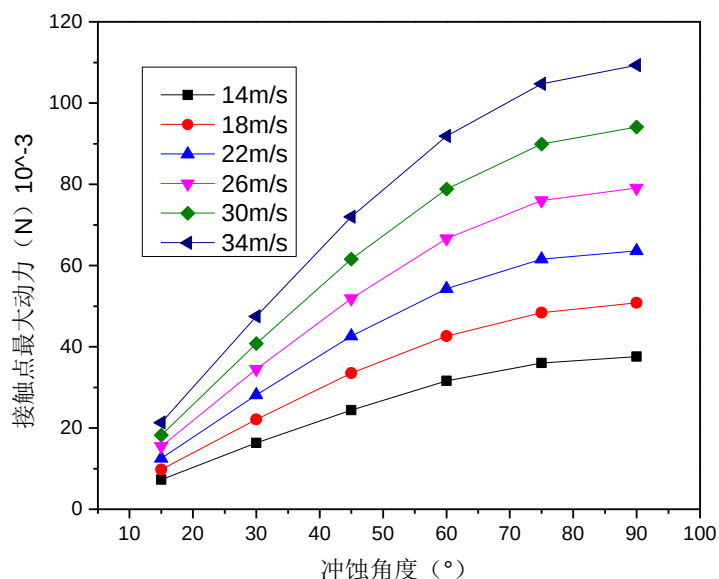
混凝土 C20、C30 和 C40 参数分别为：泊松比 0.2；弹性模量 $30GPa$ 、 $31.5GPa$ 和 $33GPa$ 。

1. 最大接触动力及接触最大半径

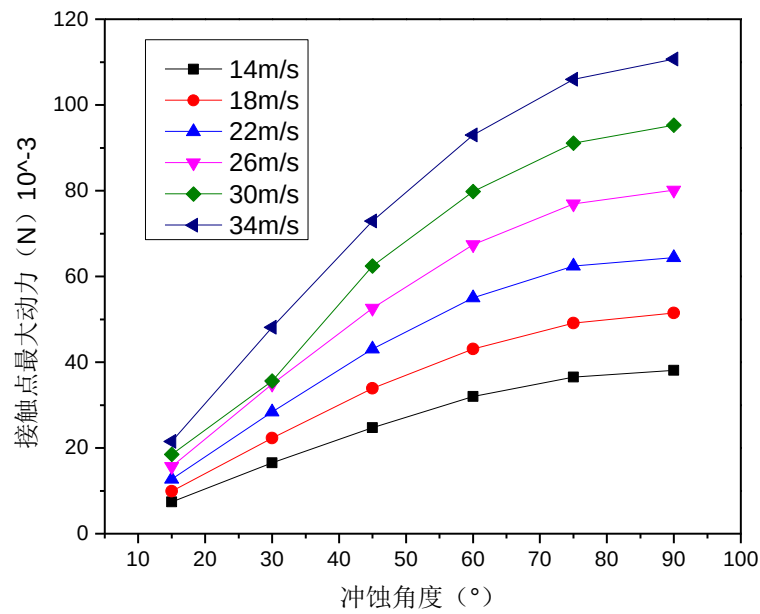
由公式(3-32)和(3-33)可以得到风沙流粒子与混凝土表面接触时的最大接触动力 $p_{\max}(N)$ 和最大接触半径 $R_{\max}(m)$ 同风沙流冲蚀角度与冲蚀速度的关系，如图 3-3 和 3-4。



(a) C20 混凝土计算结果



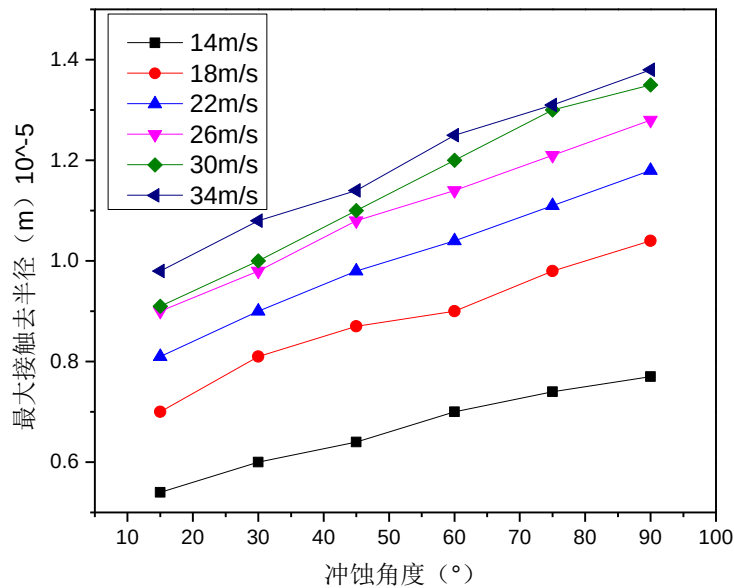
(b) C30 混凝土计算结果



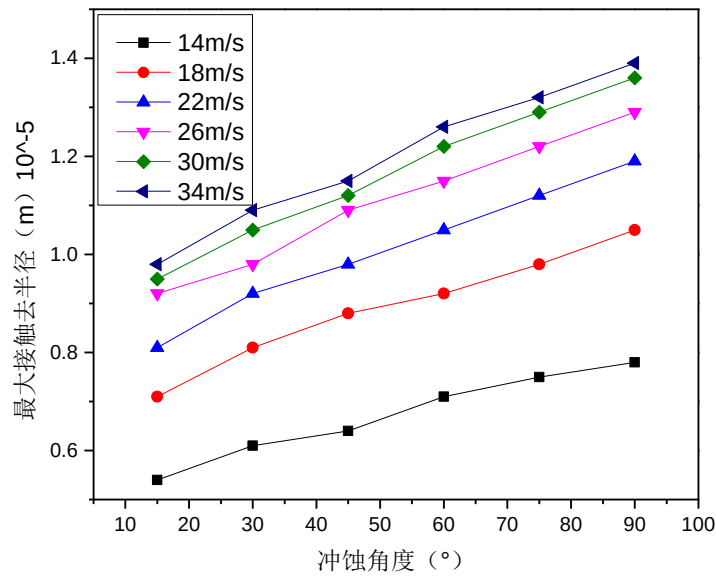
(c) C40 混凝土计算结果

图 3-3 $p_{\max}$ (N) 与冲蚀速度和角度关系

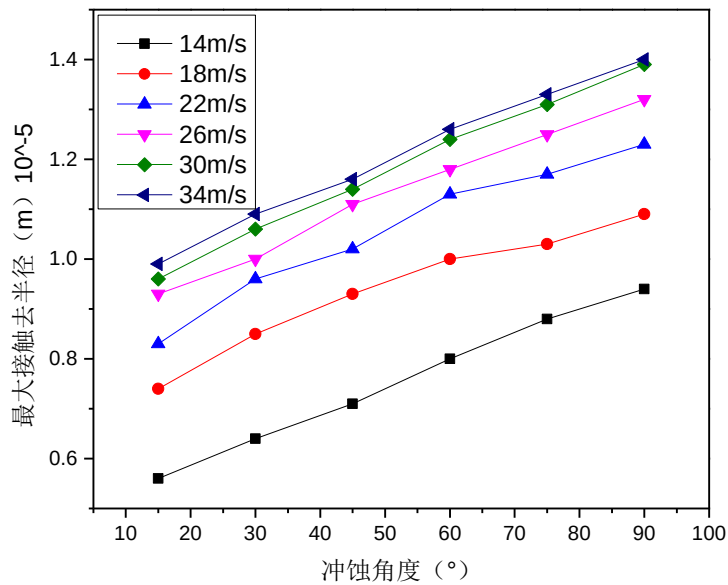
Fig.3-3 The relationship between $p_{\max}$ (N) and erosion speed and angle



(a) C20 混凝土计算结果



(b) C30 混凝土计算结果



(c) C40 混凝土计算结果

图 3-4 $R_{\max}(m)$ 与冲蚀速度和角度关系

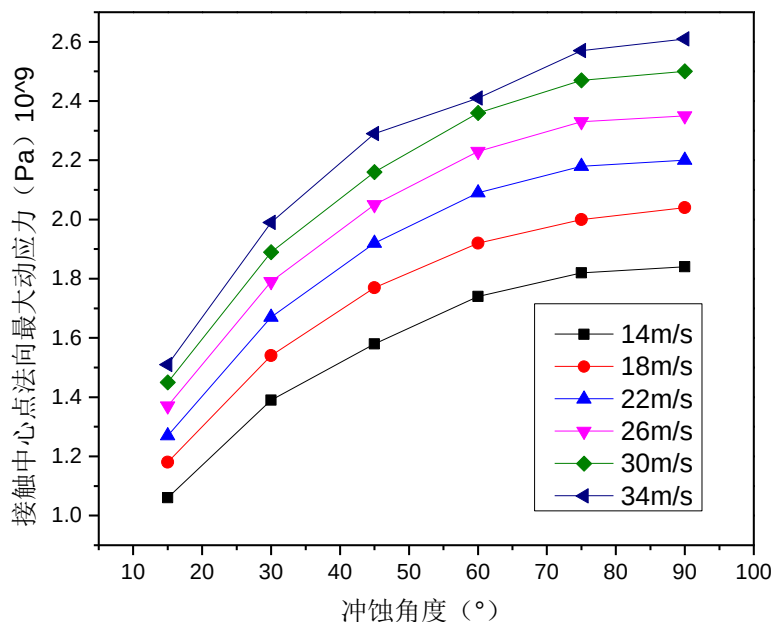
Fig.3-4 The relationship between $R_{\max}(m)$ and erosion speed and angle

由图 3-3 可以看出，在同一冲蚀速度下，最大接触动力 $p_{\max}(N)$ 随着冲蚀角度的增大而增大，当冲蚀角度 $\leq 45^\circ$ 时，二者基本呈线性变化关系；当冲蚀角度 $\geq 45^\circ$ 时，二

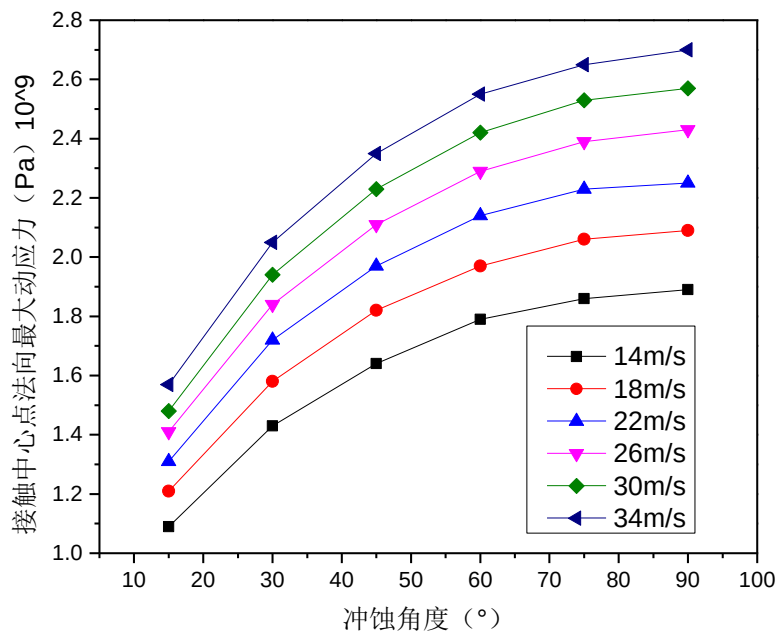
者基本呈曲线变化关系，并且斜率较前者变小，说明此时最大接触动力 $p_{\max}(N)$ 受冲蚀角度的影响较前者变小。由此图还可看出，在相同冲蚀角度情况下，最大接触动力 $p_{\max}(N)$ 随冲蚀角度的增大而增大；相同条件下，随着混凝土强度的提高，最大接触动力 $p_{\max}(N)$ 也逐渐变大。由图 3-4 可以看出，在相同冲蚀速度下，最大接触半径 $R_{\max}(m)$ 随着冲蚀角度的增大而增大，在相同冲蚀角度下，最大接触半径 $R_{\max}(m)$ 随着冲蚀速度的增大而增大；由图 3-4 还可看出，随着冲蚀速度的增大，最大接触半径 $R_{\max}(m)$ 受冲蚀速度的相对影响在减小；相同条件下，随着混凝土强度的提高，最大接触半径 $R_{\max}(m)$ 也逐渐变大。

2. 接触面中心点最大动应力

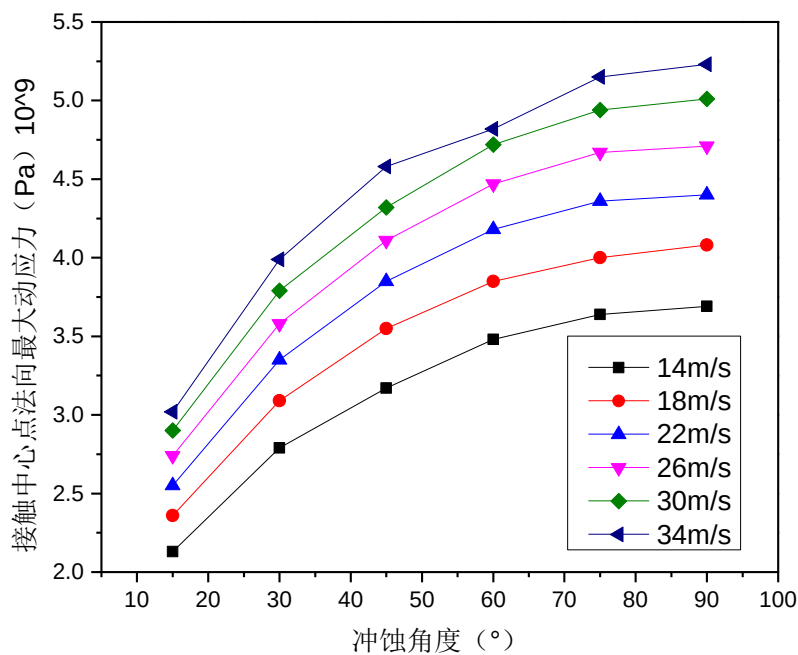
假设接触面中心点最大法向动应力为 $\sigma_{z,\max}$ 、最大切向动应力为 $\tau_{z,\max}$ ，根据公式 (3-34) 和 (3-40) 可以得到风沙流粒子与混凝土接触面接触中心点的动应力同冲蚀速度和角度的关系，如图 3-5 和 3-6 所示。



(a) C20 混凝土计算结果



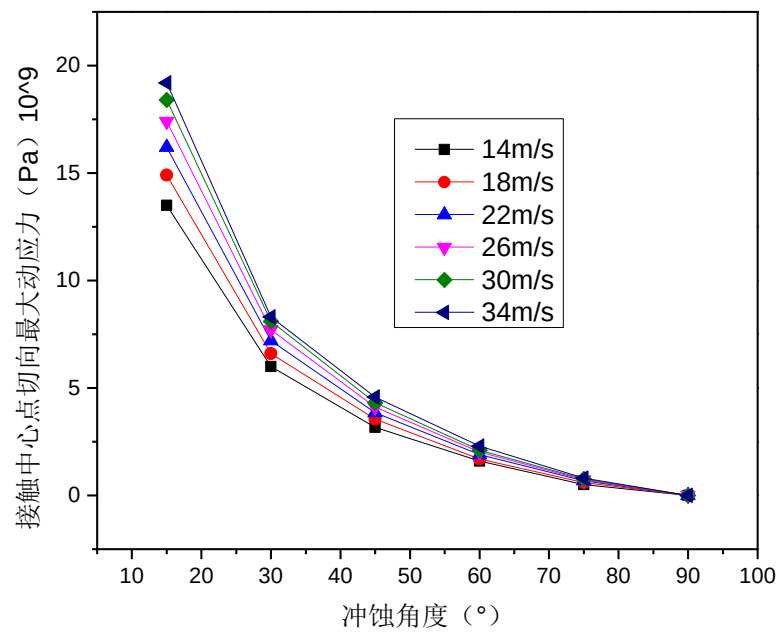
(b) C30 混凝土计算结果



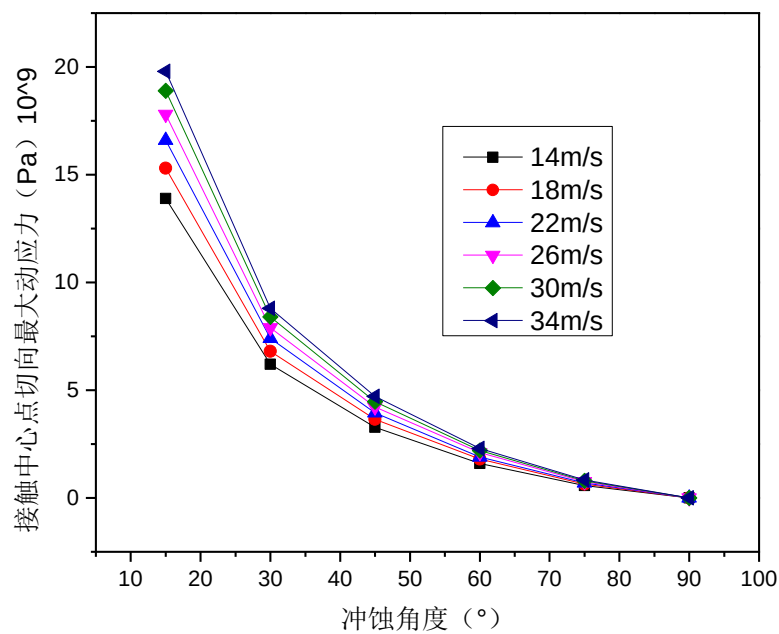
(c) C40 混凝土计算结果

图 3-5 $\sigma_{z,max}$ 与冲蚀速度和角度关系

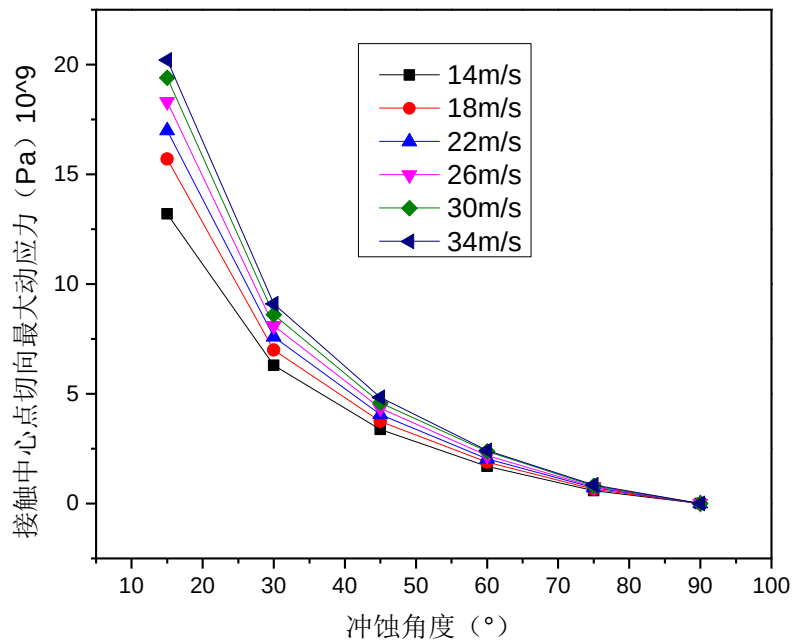
Fig.3-5 The relationship between $\sigma_{z,max}$ and erosion speed and angle



(a) C20 混凝土计算结果



(b) C30 混凝土计算结果



(c) C40 混凝土计算结果

图 3-6 $\tau_{z,\max}$ 与冲蚀速度和角度关系Fig.3-6 The relationship between $\tau_{z,\max}$ and erosion speed and angle

由图 3-5 可以看出在相同冲蚀速度的条件下, 最大法向动应力 $\sigma_{z,\max}$ 随着冲蚀角度的增大而增大; 在相同冲蚀速度的条件下, 最大法向动应力 $\sigma_{z,\max}$ 随着冲蚀角度的增大而增大。在相同条件下, 最大法向动应力 $\sigma_{z,\max}$ 随着混凝土强度的提高而增加。

由图 3-6 可以看出在相同冲蚀速度的情况下, 最大切向动应力 $\tau_{z,\max}$ 随着冲蚀角度的增大而减小。当冲蚀角度 $\leq 30^\circ$ 时递减速率要大于冲蚀角 $\geq 30^\circ$ 时, 由此可见最大切向动应力 $\tau_{z,\max}$ 受小角度冲蚀影响较大; 在相同冲蚀角度情况下, 最大切向动应力 $\tau_{z,\max}$ 随着冲蚀速度的增大而增大。在相同条件下最大切向动应力 $\tau_{z,\max}$ 随着混凝土强度的提高而增加。

3.6 本章小结

1. 本章应用 Hertz 弹性接触理论, 结合内蒙古中西部地区风沙环境建立风沙流粒子冲蚀混凝土的力学模型, 分析得到了冲蚀接触时混凝土接触动力最大值、总法向压

缩量和接触面最大法向动力。

2. 本章应用 Hertz 弹性接触理论, 分析了弹性撞击时的接触力学行为, 得到法向最大碰撞动力、总压缩变形和压缩量随时间的变化关系。

3. 根据 Hertz 弹性接触理论, 结合风沙流粒子冲蚀混凝土表面的冲蚀接触力学模型, 分析得到风沙流粒子冲蚀混凝土表面的切向接触最大动应力和法向接触最大动应力。

第四章 风沙流作用下混凝土冲蚀磨损试验研究以及相似理论分析

本文基于内蒙古中西部风沙地域的气候特点,通过模拟风沙环境对典型工程材料——混凝土进行气固两相流冲蚀磨损试验,研究混凝土在不同冲蚀角度、下沙率、冲蚀速度和冲蚀时间等冲蚀力学参数下的冲蚀磨损特征。

4.1 试验方法和装置

4.1.1 试验方法

采用气流挟沙喷射法风沙环境进行混凝土冲蚀磨损研究,该试验方法可真实有效地模拟实际风沙环境特征,试验参数易于控制,操作简单,投资成本小,是一种比较理想的模拟方法。

4.1.2 试验装置

试验原理如图 4-1 所示。试验装置如图 4-2 所示。试验系统由高压气源系统、可控下沙率的供沙系统、侵蚀系统和沙粒回收系统 4 部分组成。侵蚀系统可以调节喷嘴到试件距离,本试验采用的距离为 12cm。试件冲蚀室(图 a)由夹具(图 b)、和沙回收过滤箱(图 c)组成,其中夹具用来固定试件和调节冲蚀角度,角度可以在 $0\sim 90^\circ$ 范围内调节,沙回收过滤箱用于冲蚀后沙子的回收。试验时通过 KANOMAX KA33 风速仪,如图 d 所示,测定试件表面处的风速,并通过气压控制阀来调节气流速度。

整个试验流程为:调整好冲蚀攻角以及喷枪嘴到材料的距离,空气压缩机(图 e)产生高压气流通过导管与喷枪相连,同时沙子进入喷枪,通过流量控制阀控制下沙率,由气流挟带沙粒子进入冲蚀室,并利用风速仪测定冲蚀的速度。

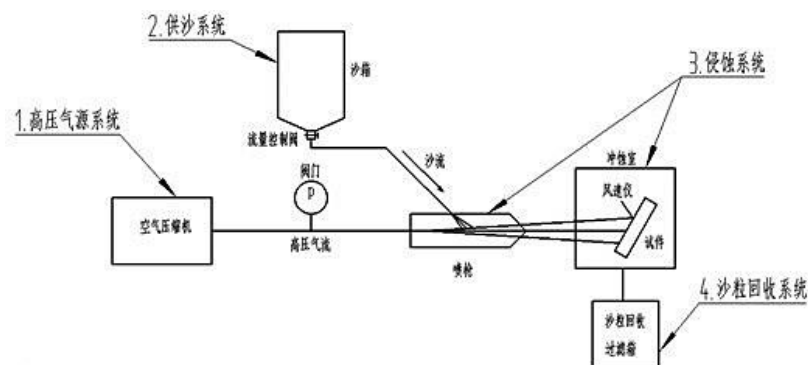
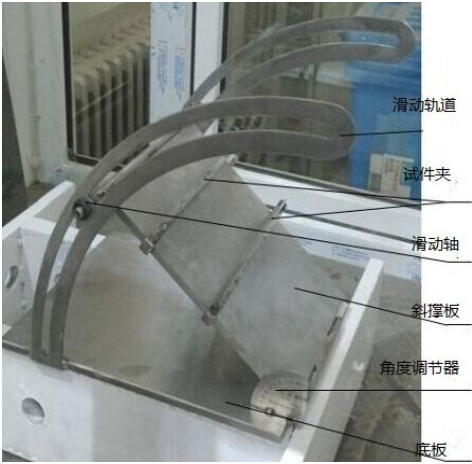


图 4-1 风沙环境下冲蚀磨损试验原理

Fig.4-1 Erosion wear experiment principle under Wind-blown Sand Environment



(a) 冲蚀室



(b) 试件夹具



(c) 试验用沙回收箱



(d) KANOMAX KA33 风速仪



(e) 空气压缩机

图 4-2 冲蚀试验装置

Fig.4-2 the erosion experiment device

4.2 风沙流冲蚀磨损试验条件

4.2.1 风沙流粒子的特征分析

试验用沙取自内蒙古鄂尔多斯高原的库布其沙漠。库布其沙漠是北方地区沙尘天气的主要沙源之一，选取该地区沙漠沙粒具有很好的实际意思和工程背景。采用筛分试验方法，得到沙粒粒径分布情况如表 4-1 所示。

表 4-1 库布其沙漠沙粒粒径分布表

Table.4-1 Kubuqi Desert sand particle size distribution table

粒径/mm		>0.5	0.5~0.25	0.25~0.1	0.1~0.05	<0.05
含量 (%)	变化范围	0.60~0.72	1.64~1.84	49.88~52.44	36.44~38.20	8.16~9.72
	平均值	0.66	1.74	50.82	37.53	8.96

其粒径分布小于 0.05mm 的颗粒不到 10%，而大于 0.25mm 的颗粒不足 3%，分布在 0.05~0.25mm 之间的高达 87%以上。

采用 LEICA-DMLM/11888605 光学显微镜分析沙粒形状，结果表明沙粒形状近似成圆形、椭圆形的可达 85%以上，如图 4-3 所示。经测定沙粒显微硬度 7750MPa；莫氏硬度 6 级。沙粒密度为 2.7g/cm³。



图 4-3 沙粒形貌

Fig.4-3 The shape of sand

4.2.2 风沙流冲蚀角度

本试验设置了 6 种不同的冲蚀角度，分别为：15°、30°、45°、60°、75°和 90°。试验过程中可以通过试件夹具调节不同的冲蚀角度。通过对混凝土进行不同冲蚀角度试验，我们可以得到冲蚀角度对混凝土的影响。

4.2.3 风沙流冲蚀速度

风沙流冲蚀速度是影响混凝土冲蚀磨损性能的重要因素。根据内蒙古地区大风天气的分布规律^[56]，我们可以得出中西部地区风速多数分布在 9~26m/s 之间，而相对应的风力等级如下表所示，试验根据风力等级设置了 6 个风速，分别为 14m/s、18m/s、22m/s、26m/s、30m/s 和 34m/s。

表 4-2 风力(风速)等级表

Tab.4-2 The grade of wind-speed

风力等级	相当于平地十米高处的风速 (m/s)	
	风速范围	平均风速
1	0.3~1.5	1
2	1.6~3.4	2
3	3.5~5.5	4
4	5.6~8.0	7
5	8.1~10.8	9
6	10.9~13.9	12
7	14.0~17.2	16
8	17.3~20.8	19
9	20.9~24.8	23
10	24.9~28.8	26
11	28.9~33.6	31
12	33.7~38.6	35

4.2.4 下沙率

通过分析近年来我国沙尘天气过程中颗粒物的浓度，对沙尘天气进行了定量分级^[57]，再根据气象统计^[58-60]，大范围爆发强沙尘暴的标准之一是三个及以上测站的区域起沙量达 $7.8\text{mg m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ，设置了不同的下沙率来模拟内蒙古中西部地区的沙尘暴，下沙率可以通过沙箱控制阀来调节流量。所用喷嘴直径为 2cm，横截面为 3.14cm^2 ，当下沙率为 150g/min 时，可折算为 $7.95\text{mg m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ，此沙流量满足爆发沙尘暴的标准。为了较全面的考虑沙尘暴强度，试验设置了 7 种不同浓度的下沙率，分别为：60g/min、90g/min、150g/min、240g/min、300g/min、360g/min 和 420g/min。

4.2.5 风沙流冲蚀时间

冲蚀时间的长短直接影响混凝土抗冲蚀磨损的程度。本试验测定时间是从第6min 开始的，并通过冲蚀室的观测窗观察混凝土试件受冲蚀磨损的程度。通过观察发现：

第6min混凝土试件受到冲蚀磨损的现象不明显,第8min混凝土试件受到冲蚀磨损的现象已经显露出来,第10min混凝土试件受到冲蚀磨损的现象已经比较明显了,第12min混凝土试件受到冲蚀磨损的现象已经很严重了,而在第13min肉眼观察到混凝土试件受到冲蚀磨损的程度较第12min只是试件内部骨料(石子)被沙粒磨损的更光滑了,经过认真的对比发现冲蚀12min已经满足该试验的要求,所以确定采用12min作为冲蚀时间。

4.3 混凝土冲蚀磨损试验研究

4.3.1 冲蚀磨损程度的表示方法

本试验根据现有试验条件,采用混凝土的失重量和冲蚀率来评价磨损程度,利用型号 OHAUS-EP214C 精度为 0.1mg,最大量程为 200g 的分析天平来称取其试验前后质量,获得试样的质量损失(单位: g),为了减少试验数据的误差进行 3 次称取,并取三次平均值作为质量损失值,通过试件冲蚀前后质量损失与所用沙子总量的比可以得到冲蚀率。

4.3.2 风沙流冲蚀角度对混凝土冲蚀率的影响

图4-4所示为试件在下沙率150g/min,风沙流速度为18m/s,冲蚀时间为12min的条件下,混凝土的冲蚀率随着冲蚀角(与试件表面成的角度) α 变化的关系曲线图。

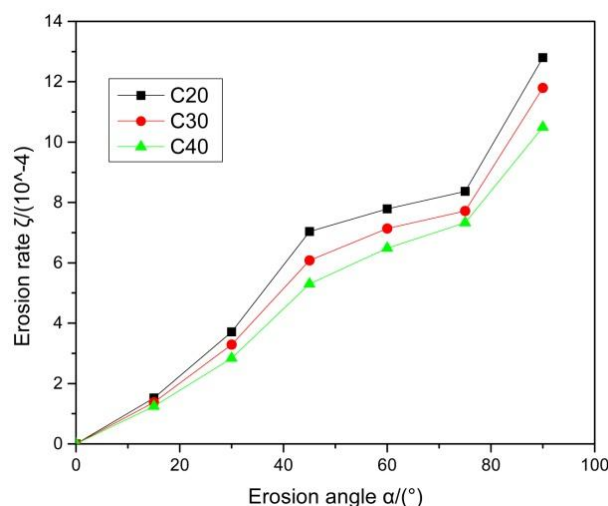


图 4-4 冲蚀角度与冲蚀率关系曲线

Fig.4-4 Erosion angle vs. erosion rate

由图4-4可以看出,同强度等级的混凝土在0~45°低角情况下,冲蚀率的增长比较明显,成线性增长,随着冲蚀角的增高,冲蚀率不断增大,在90°时冲蚀率达到最大。这是由于混凝土是典型的脆性材料,而脆性材料的抗冲蚀磨损性能和硬度有很大

关系,混凝土硬度相对沙粒又比较大,在沙粒冲蚀过程中,我们可以把沙粒作用在混凝土上的力分为法向分力和切向分力,在低冲蚀角度作用下,沙粒作用在混凝土的法向作用力比较小,对混凝土表面造成的损坏程度不大,故冲蚀率不高;而随着冲蚀角度的增大,沙粒作用在混凝土的法向作用力也相应增大,经过高速沙粒持续的冲击,混凝土表面遭到严重破坏,冲蚀率逐渐增大。由图4-4还可以看出,随着混凝土强度等级的提高,抗风沙冲蚀能力逐渐增强,但是冲蚀规律是一样的。

4.3.3 风沙流冲蚀速度对混凝土冲蚀率的影响

图 4-5 是试件在冲蚀角 45° 下沙率为 240g/min , 冲蚀时间 12min 的条件下,在不同冲蚀速度的情况下混凝土冲蚀率曲线图。

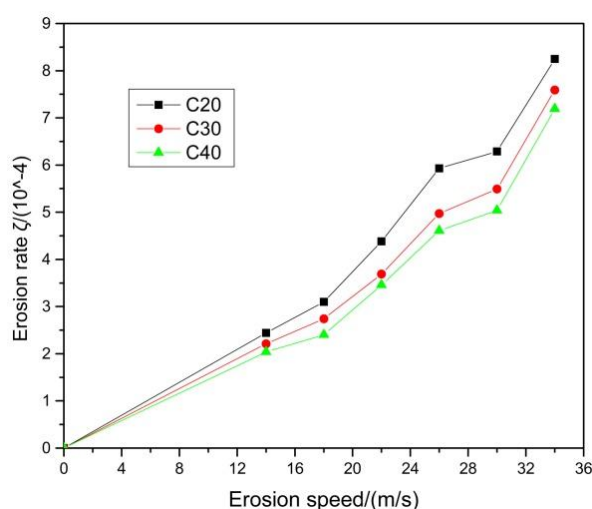


图 4-5 冲蚀速度与冲蚀率关系曲线

Fig.4-5 Erosion speed vs. erosion rate

由图 4-5 可知,随着冲蚀速度的增大,同一强度等级的混凝土冲蚀率随之增大,前期、中期冲蚀率增长缓慢,直线比较平缓,这表明在低冲蚀速度的情况下,沙粒冲击动能小,对混凝土表面冲切作用力不大,不足以对混凝土表面造成冲蚀损坏;后期快速增长,曲线比较陡峭,这表明随着冲蚀速度的增大,沙粒冲击动能逐渐变大,对混凝土表面的冲击作用大大加强,混凝土面层抵抗冲蚀能力相对减弱,经过高速粒子反复的冲击作用,面层逐渐损坏,最终产生严重的破坏,这说明可以用粒子动能来描述对混凝土冲蚀的影响。由图 4-5 还可以看出,混凝土在相同条件下随着强度等级的提高冲蚀率逐渐降低。结合表 4-3 和图 4-5 可以得出随着混凝土强度的提高硬度逐渐增大,由此可以得出,随着混凝土强度的提升,靶材(混凝土试件)硬度逐渐增大,而冲蚀粒子与靶材的相对硬度比值在变小,粒子冲蚀能力逐渐减弱,可见硬度也是影响混凝土抗冲蚀能力的一个重要因素。

表 4-3 混凝土表面硬度和强度表

Table.4-3 Hardness and Strength of Concrete

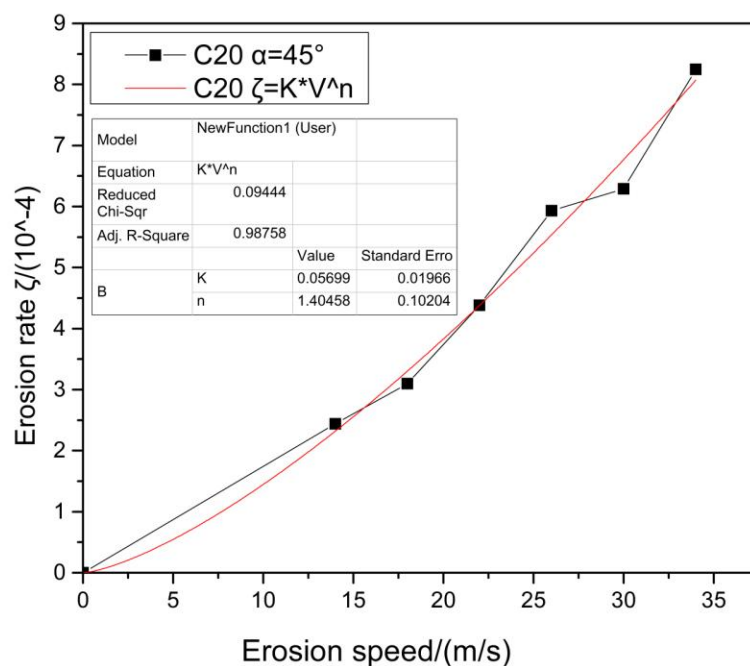
强度等级	C20			C30			C40		
试样	1	2	3	1	2	3	1	2	3
修正后回弹值	29.9	30.6	29.5	35.6	35.5	35.3	41.9	42.1	41.5
平均强度 (MPa)	22.1			31.3			42.7		

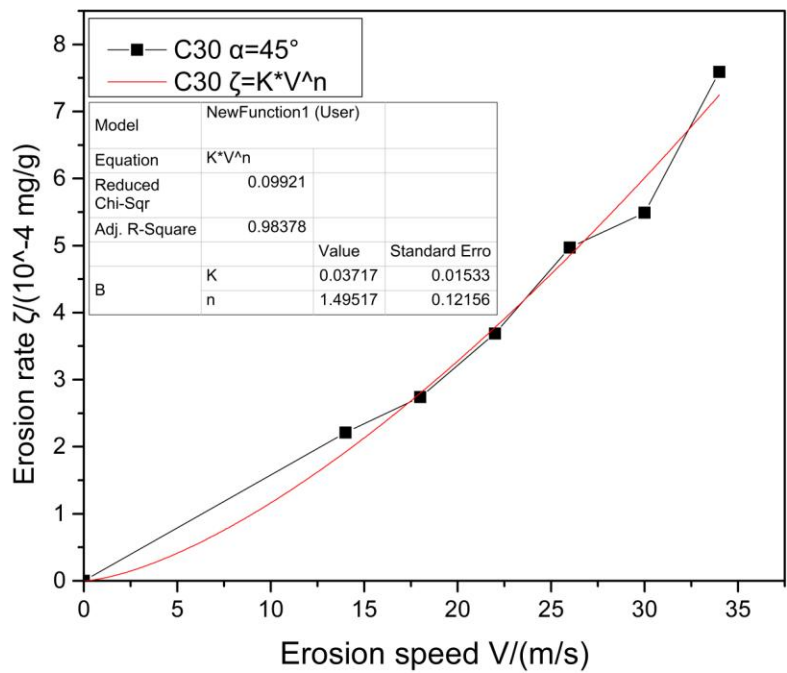
图 4-6 是混凝土等级为 C20,C30,C40 在冲蚀角 $\alpha = 45^\circ$ ，冲蚀时间 12min，下沙率 240g/min 的条件下，冲蚀率与冲蚀速度 (m/s) 关系的拟合曲线图。由图 4-6 可以看出，冲蚀率与冲蚀速度近似呈指数关系：

$$\zeta = KV^n \quad (4-1)$$

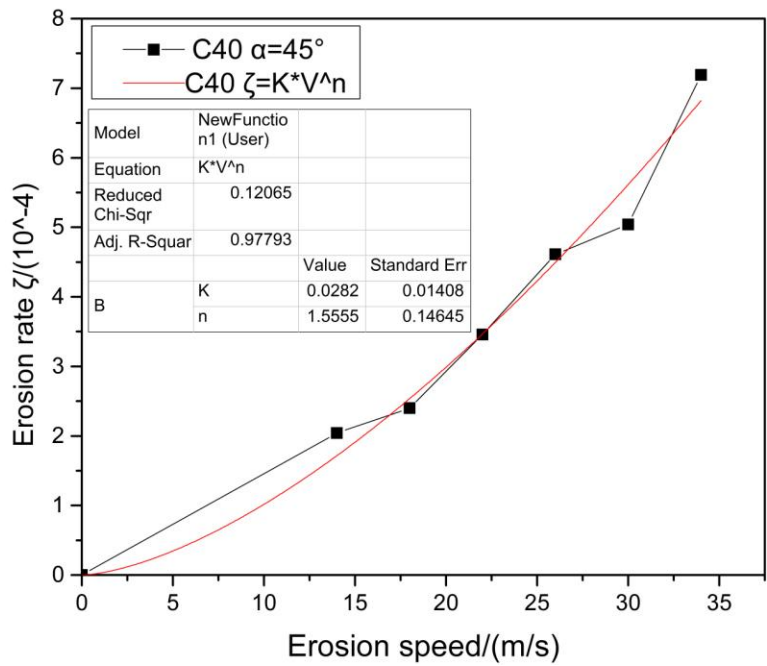
其中： ζ 为冲蚀率； V 为冲蚀速度； K 为冲蚀常数，与冲蚀粒子、被冲蚀材料和冲蚀角等因素有关； n 为速度指数。

由图 4-6 可以看出相关系数较高，说明拟合是比较合适的。不同强度等级的混凝土在低冲蚀角 $\alpha = 15^\circ$ 时速度指数系数 n 比较小，大小在 1.1 左右；而在冲蚀角 $\alpha = 45^\circ$ 时冲蚀率大致与速度平方成正比，速度指数系数达到 1.5 左右；当冲蚀角 $\alpha = 75^\circ$ 时冲蚀速率与速度也成指数关系，且速度指数系数在 2.0 附近，这表明速度指数系数 n 随着冲蚀角度的增大逐渐增大，可见速度指数 n 主要与冲蚀角有关，与试样的选取关系不大。由于冲蚀率随着速度的增大也不短增大，而且速度指数系数 n 随着冲蚀角度的增大逐渐增大由此可以预料，当在冲蚀角 $\alpha = 90^\circ$ 时，冲蚀率达到最大，而是在试验结果中图 4-6 也可以看到，预测情况和实际情况实相符的。

(a) C20 混凝土 At 45°



(b) C30 混凝土 At 45°



(c) C40 混凝土 At 45°

图 4-6 冲蚀速度与冲蚀率关系拟合曲线

Fig.4-6 Erosion speed vs. erosion rate fitting curve

4.3.4 不同下沙率对混凝土冲蚀率的影响

图 4-7 是混凝土试件在冲蚀角 60°，风沙流速度为 26m/s，冲蚀时间 12min 的条件下，在不同下沙率情况下的混凝土冲蚀率曲线图。由图 4-7 可以看出，在低浓度 0~90g/min 情况下，冲蚀率随着下沙率的增大不断增高，当下沙率 C 为 90g/min 时混

凝土冲蚀率明显最高，之后随着下沙率的增高，冲蚀率逐渐降低，在下沙率为 $90 \sim 150 \text{g/min}$ 这个区间冲蚀率降低最为明显，之后降低的速率比较平稳，这表明混凝土的冲蚀率与冲蚀粒子流量有关，我们在试验时理想的假设每一个冲蚀颗粒都是以同一种速度和相同的角度冲击靶材，然而从数据以及试验中观察到，当冲蚀颗粒流量较大时，会发生冲蚀粒子回弹现象，图 4-8 是 Shipway 在试验中观察到的回弹颗粒与入射颗粒之间发生交互作用的照片^[61]，回弹的粒子与入射的粒子之间相互交错碰撞，尤其在高浓度情况下这种相互交错的碰撞现象更为明显，粒子之间相互撞击损失大量的能量，碰撞过程中粒子偏离原来的轨迹，甚至冲击不到靶材，这种现象降低了粒子对靶材的冲蚀能力，与我们理想的冲蚀模型相违背。由此我们可以得出，混凝土的冲蚀率并不是随着下沙率的增大不断增大，而是在一定下沙率范围内冲蚀率最为明显。

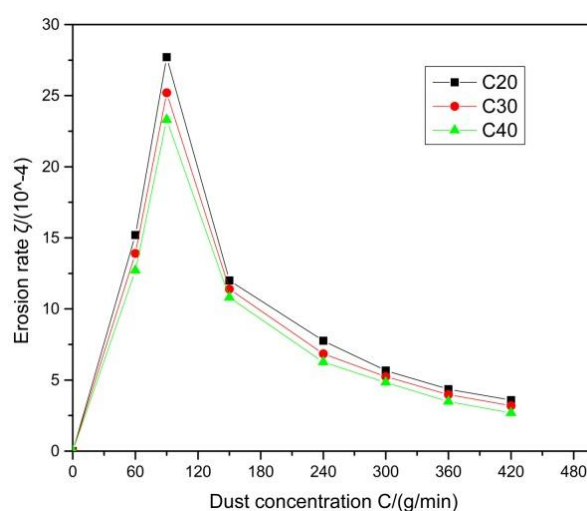


图 4-7 下沙率与冲蚀率关系曲线

Fig.4-7 Dust concentration vs. erosion rate

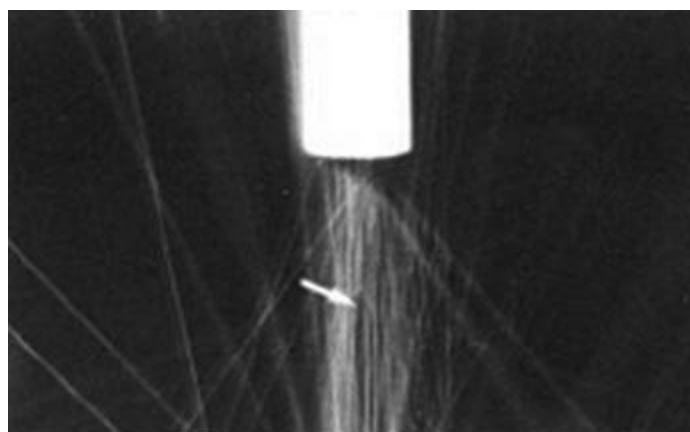


图 4-8 Shipway 在试验中观察到的回弹颗粒与入射颗粒之间发生交互作用

Fig.4-8 Interaction between bounded particles and incoming particles as observed by Shipway during the experiment

4.3.5 风沙流冲蚀时间对混凝土冲蚀失重量的影响

图 4-9 是混凝土试件在冲蚀角度 60° ，冲蚀速度 26m/s ，下沙率 150g/min 和冲蚀时间 10min 的条件下冲蚀时间对不同强度等级的混凝土试件冲蚀量的影响曲线图。

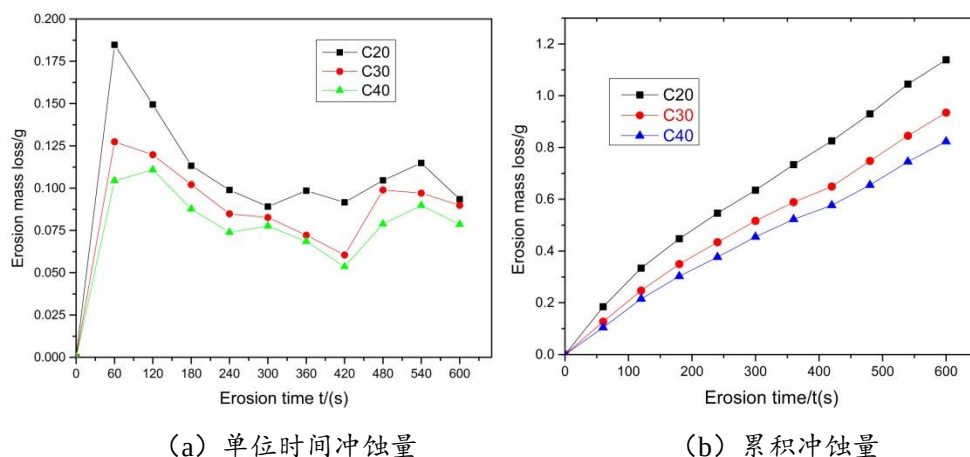


图 4-9 冲蚀时间与冲蚀量关系曲线

Fig.4-9 Erosion time vs. erosion amount

由图 (a) 可以观察到混凝土在冲蚀过程中没有明显的孕育期，但是有上升期和稳定期，这符合脆性材料冲蚀磨损随着冲蚀时间变化的规律。同一等级强度的混凝土在前 60s 的冲蚀时间内，冲蚀量成线性增长，这是由于沙粒冲蚀速度较大，混凝土外表面是大量的水胶混合物，硬度相对较小，持续的冲击作用使混凝土表面发生硬化并产生冲蚀坑，随着时间的增长，在冲蚀坑附近产生疲劳裂纹，裂纹相互交叉延伸，最终导致外表面破损和剥落，从而导致混凝土的冲蚀失重量加剧。在 90~240s 的时间内，混凝土外表面受冲蚀严重，起不到保护内部结构功能，沙粒开始冲蚀混凝土内骨料，而内部骨料有水泥胶体和碎石，且硬度相对沙粒较大，从而沙粒冲击到碎石表面发生破裂，沙粒有一部分能量损失于碰撞的破裂，故冲蚀质量开始下降。

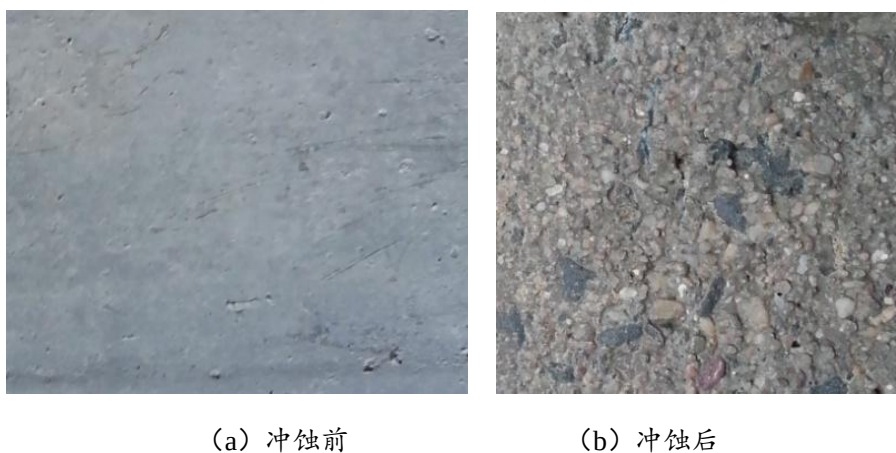


图 4-10 混凝土冲蚀外貌前后对比

Fig.4-10 Erosion appearance before and after of concrete

图 4-10 是冲蚀前和 240s 时混凝土冲蚀外貌；在 240s 之后的时间，沙粒基本上都是在混凝土内部进行冲蚀，很难在表面形成新的冲蚀坑，故混凝土失重趋于稳定。由图（b）可知，曲线斜率是不断减小的，当曲线斜率在 250s 之后几乎不变。由此我们可以得出，在冲蚀磨损初期阶段（0~250s），各强度等级的混凝土的冲蚀磨损累积损失量呈曲线增长，单位时间内材料冲蚀磨损量增长比较快；但是随着冲蚀时间的延长（250~600s），混凝土的冲蚀磨损累积损失量近乎呈直线增长，单位时间冲蚀磨损量几乎不变，这与我们由（a）分析的结果相一致。

4.4 试验结果与实际工况相似性分析

研究混凝土受冲蚀损伤的方法主要分为两种：一是现场模拟试验法，二是试验室模拟试验法。现场模拟试验法与混凝土实际工作时的状态较接近，试验结果准确性较高，缺点是试验周期较长、环境影响因素较复杂，如混凝土在自然环境中受到风吹日晒、酸雨侵蚀、严寒霜冻以及人为的破坏等因素，使耐久性性和安全性受到很大的影响，所以现场模拟试验法不能有效的反映出混凝土受风沙冲蚀磨损的特性。所以，本文选择试验室模拟试验法，并采用气流挟沙喷射法进行试验，该方法具有参数易于控制，操作简单，投资成本小等优点，并且有利于运用相似理论把室内加速试验结果与实际工况联系起来，使试验结果更具有实际意义。

经统计 1960 年~2015 年间内蒙古中西部地区不同强度沙尘暴发生次数大致出现 300 次，平均每年 5.5 次，一年中沙尘暴高爆发的季节是春季（3 月~5 月），夏季（7 月~9 月）偏少，每次爆发日数平均为 12 日，有部分地区如鄂尔多斯西北部爆发日数为 30 日、阿拉善盟爆发日数为 20 日等。根据气象统计，大范围爆发强沙尘暴的标准是三个及以上测量站的风速 $\geq 20\text{m/s}$ ，区域起沙量达 $7.8\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ，一次沙尘暴中高风速持续时间大约在 30min 以内^[58-60]。如果考虑 200m^2 范围内对一个混凝土结构构件的影响，经计算该范围内的下沙率达到 93.6g/min 。本试验中最大冲蚀速度是 34m/s ，最大下沙率是 420g/min ，根据相似理论，可推算出试验结果与实际工况下的冲蚀时间关系。

4.4.1 相似理论

为了采用混凝土在风沙环境下的试验室模拟加速方法，研究混凝土在风沙环境下的相似理论是必不可少的，按照相似理论计算模型参数与实际参数之间的相似比，估算试验结果与实际工况之间的时间关系。由于冲蚀粒子的能量对混凝土冲蚀磨损的影响比较巨大，所以我们以冲蚀粒子的动能作为相似理论分析的重点。

为了阐明相似现象所具有的性质，以一个简单的速度计算公式为例。根据速度的微分定义，对于原型结构有

$$v_p = \frac{dl_p}{dt_p} \quad (4-2)$$

对于模型结构有

$$v_m = \frac{dl_m}{dt_m} \quad (4-3)$$

设各同类物理量之间的比例常数为

$$C_v = \frac{v_m}{v_p}, \quad C_l = \frac{l_m}{l_p}, \quad C_t = \frac{t_m}{t_p} \quad (4-4)$$

式中, C_v 、 C_l 、 C_t 分别为速度、位移、时间的相似比。将式(4-4)代入式(4-3)中, 可得

$$v_m = C_v \cdot v_p = \frac{C_l}{C_t} \frac{dl_p}{dt_p} \quad (4-5)$$

$$v_p = \frac{C_l}{C_v C_t} \frac{dl_p}{dt_p} \quad (4-6)$$

比较式(4-6)和式(4-2)可知:

$$\frac{C_l}{C_v C_t} = 1 \quad (4-7)$$

可见当两个相似比任意选定后, 第三个相似系数必须满足式(4-7), 于是 $C_l / C_v C_t$ 被称为模型与原型相似的相似指标。

将式(4-4)代入式(4-7)中, 整理后可得:

$$\frac{v_m t_m}{l_m} = \frac{v_p t_p}{l_p} = \text{常数} \quad (4-8)$$

去掉式(4-8)中的下标, 可以得到一般形式:

$$\pi = \frac{vt}{l} \quad (4-9)$$

式(4-9)即为相似判据, 其中 π 为常量, 无量纲。对于彼此相似的现象, 其相似判据是相同的, 为一常量, 且相似指标等于 1。对于一般的力学问题, 只要知道物理量之间的函数关系, 就可参照上面的量纲分析过程来确定相似判据。

由以上可以得出:

质量相似比:

$$C_m = \frac{m_m}{m_p} \quad (4-10)$$

速度相似比:

$$C_v = \frac{v_m}{v_p} \quad (4-11)$$

动能相似比:

$$C_w = \frac{W_m}{W_p} = \frac{m_m v_m^2}{m_p v_p^2} \quad (4-12)$$

根据式(4-9)验证, 可以得出:

$$\frac{C_w}{C_m C_v} = 1 \quad (4-13)$$

这说明计算结果与相似理论相符合。

4.4.2 计算实例

根据动能公式:

$$W = \frac{1}{2} m v^2 \quad (4-14)$$

可知, 决定风沙粒子流动能的两个因素是质量和速度。按照上述提供的数据, 速度是固定的, 即模型的速度 $v=26\text{m/s}$, 原型的速度 $v=20\text{m/s}$; 模型下沙率取 300g/min , 原型为 93.6g/min , 模型的质量是随着时间的增加而增加的。因此, 先计算风沙持续 1min 各物理量的相似比。

质量相似比:

$$C_m = \frac{m_m}{m_p} = \frac{300}{93.6} = 3.21 \quad (4-15)$$

速度相似比:

$$C_v = \frac{v_m^2}{v_p^2} = \frac{26^2}{20^2} = 1.69 \quad (4-16)$$

动能相似比:

$$C_w = \frac{W_m}{W_p} = \frac{m_m v_m^2}{m_p v_p^2} = \frac{300 \times 30^2}{93.6 \times 20^2} = 5.43 \quad (4-17)$$

根据式(4-13)验证

$$\frac{C_w}{C_m C_v} = 1 \quad (4-18)$$

计算结果与相似理论相符。

按照相似理论计算模型参数与实际参数之间的相似比,估算试验结果与实际工况之间的时间关系。

1. 按照内蒙古中西部地区一年发生 1 次强沙尘暴计算,模型的冲蚀磨损时间为 $t=12min$, 原型 1 次沙尘暴时间为 $t=30min$ 。

模型与原型的动能比为:

$$\frac{W'_m}{W'_p} = \frac{12}{30} \cdot c_w = \frac{12}{30} \cdot 5.43 = 2.2 \quad (4-19)$$

即试验中风沙粒子流的动能相当于实际动能的 2.2 倍左右。也就是说, 12min 的冲蚀磨损试验对涂层材料的冲蚀损伤, 相当于该地区按照一年发生一次强沙尘暴的频率, 钢结构涂层经受 2.2 年时间的冲蚀磨损。

2. 近年来内蒙古中西部地区每年发生沙尘暴次数在 5 次左右, 按照这个频率计算, 模型的冲蚀磨损时间为 $t=12min$, 原型 5 次沙尘暴时间为 $t=30 \times 5=150min$ 。

$$\frac{W'_m}{W'_p} = \frac{12}{150} \cdot c_w = \frac{12}{150} \cdot 5.43 = 0.44 \quad (4-20)$$

即试验中风沙粒子流的动能相当于实际动能的 0.44 倍。也就是说, 12min 的冲蚀磨损试验对涂层材料的冲蚀损伤, 相当于该地区按照一年发生 5 次强沙尘暴的频率, 钢结构涂层经受 5.3 个月时间的冲蚀磨损。

3. 按照内蒙古中西部地区一年发生 10 次强沙尘暴计算, 模型的冲蚀磨损时间为 $t=12min$, 原型 10 次沙尘暴时间为 $t=30 \times 10=300min$ 。

$$\frac{W'_m}{W'_p} = \frac{12}{300} \cdot c_w = \frac{12}{300} \cdot 5.43 = 0.22 \quad (4-21)$$

即试验中风沙粒子流的动能相当于实际动能的 0.22 倍。也就是说, 12min 的冲蚀磨损试验对涂层材料的冲蚀损伤, 相当于该地区按照一年发生 10 次强沙尘暴的频率, 钢结构涂层经受 2.6 个月时间的冲蚀磨损。

4. 按照内蒙古中西部地区一年发生 15 次强沙尘暴计算, 模型的冲蚀磨损时间为 $t=12min$, 原型 15 次沙尘暴时间为 $t=30 \times 15=450min$ 。

$$\frac{W'_m}{W'_p} = \frac{12}{450} \cdot c_w = \frac{12}{450} \cdot 5.43 = 0.14 \quad (4-22)$$

即试验中风沙粒子流的动能相当于实际动能的 0.14 倍。也就是说, 12min 的冲蚀磨损试验对涂层材料的冲蚀损伤, 相当于该地区按照一年发生 15 次强沙尘暴的频率, 钢结构涂层经受 1.7 个月时间的冲蚀磨损。

由以上理论, 可以列出部分试验结果推算的实际工况下的冲蚀时间表, 见表 4-4 和 4-5。

表 4-4 34m/s 时由试验结果推算的实际工况下的冲蚀时间 (12min)

Table. 4-4 Erosion time under the actual working conditions derived from the experimental results at 34 m/s (12 min)

下沙率	沙尘暴爆发次数	当于实际工况冲蚀时间
60g/min	5 次	55 天
	10 次	27 天
	15 次	18 天
90g/min	5 次	81 天
	10 次	40 天
	15 次	26 天
150g/min	5 次	134 天
	10 次	67 天
	15 次	45 天
240g/min	5 次	216 天
	10 次	108 天
	15 次	72 天
300g/min	5 次	270 天
	10 次	135 天
	15 次	90 天
360g/min	5 次	324 天
	10 次	162 天
	15 次	108 天
420g/min	5 次	378 天
	10 次	189 天
	15 次	126 天

表 4-5 不同冲蚀时间下由试验结果推算的实际工况下的冲蚀时间 (26m/s、300g/min)

Table. 4-5 Erosion times under the actual conditions derived from the experimental results at different erosion times (26 m/s, 300 g/min)

下沙率	沙尘暴爆发次数	当于实际工况冲蚀时间
1min	5 次	13 天
	10 次	7 天
	15 次	4 天
4min	5 次	42 天
	10 次	21 天
	15 次	14 天
8min	5 次	84 天
	10 次	42 天
	15 次	28 天
12min	5 次	168 天
	10 次	84 天
	15 次	56 天

4.5 本章小结

1. 风沙流冲蚀速度是影响混凝土冲蚀磨损的重要因素，混凝土的冲蚀率随着风沙流冲蚀速度的增加而增大，二者近似呈指数关系。速度指数系数 n 主要与冲蚀角有关，与试样的选取关系不大，系数 K 与冲蚀粒子、被冲蚀材料和冲蚀角等因素有关。

2. 同强度等级的混凝土在 $0^\circ \sim 45^\circ$ 低角情况下，冲蚀率的增长比较明显，成线性增长，随着冲蚀角的增高，冲蚀率不断增大，在 90° 时冲蚀率达到最大。

3. 混凝土的冲蚀率并不是随着下沙率的增大不断增大，而是在一定下沙率范围内冲蚀率最为明显。

4. 混凝土在风沙环境下随着冲蚀时间的延长，其冲蚀过程没有明显的孕育期，但有上升期和稳定期。

5. 试验中的下沙率越大，由试验结果推算的实际工况中冲蚀磨损时间越长；每年发生沙尘暴的次数越少，则由试验结果推算的实际工况中冲蚀磨损时间越长。

第五章 风沙作用下混凝土冲蚀磨损损伤机理及冲蚀磨损程度评价研究

本文研究的混凝土是一种多相、多层次的复合材料,其宏观行为所呈现的不确定性、不规则形、模糊性、非线性是其微观结构复杂性的反映,其冲蚀磨损特性与常规的涂层材料^[62]和金属材料相比具有较大的差异,由于诸多缺陷的存在使其冲蚀磨损机制比较特别,还没有统一的认知。通过查阅相关资料发现对混凝土的冲蚀磨损机制研究比较少^[27-28],主要集中在气液两相流即含沙水流对水工混凝土的冲蚀磨损研究^[63-65],然而对于混凝土在气固两相流即风沙环境下抗冲蚀性能的研究就比较少,目前能够查阅的文献很少^[66-67],可见对混凝土的冲蚀磨损性能研究还不够深入。

5.1 混凝土冲蚀磨损损伤机理分析

固体粒子冲蚀磨损指的是高速气流携带大量粒径小于 $1000\mu\text{m}$ 的固体颗粒以一定的速度和角度对靶材表面进行冲击,发生靶材损耗的一种现象或过程。

混凝土的冲蚀机理由风沙流的冲蚀角度决定。我们可以这样分析,把风沙粒子对混凝土表面的冲击分为垂直方向的冲击和水平方向的冲击。在低冲蚀角下,水平方向的应力分量相对较大,作用于混凝土表面的剪切应力可以进行有效的切削作用,混凝土以类似表面划伤破坏作用为主;在高冲蚀角下,垂直方向上的应力分量相对很大,靶材表面主要受正向的冲切作用,破坏以冲击压痕破碎作用为主。通过以上的分析可以得出,风沙流对混凝土的冲蚀磨损过程同时存在类似表面划伤作用和冲击压痕破碎作用。

5.1.1 混凝土冲蚀磨损形貌分析方法



图 5-1 电子扫描显微镜

Fig.5-1 Scanning Electron Microscope (SEM)

本试验采用如图5-1所示的电子扫描显微镜对混凝土试件受到冲蚀的损伤部位进行观测，根据观测结果并结合冲蚀试验相关数据，分析混凝土冲蚀磨损特性和冲蚀磨损机理。

5.1.2 混凝土冲蚀前的形貌

如图5-2所示为混凝土在冲蚀磨损试验前的表面SEM形貌。混凝土表面除较少的缺陷外，总体平整均匀密实。



图5-2 混凝土表面原始SEM形貌

Fig.5-2 SEM surface morphology of the concrete

5.1.3 混凝土冲蚀磨损显微镜下的形貌及其损伤机理分析

图 5-3 是混凝土在冲蚀角为 30° ，冲蚀速度 18m/s ，冲蚀时间为 12min 的条件下，冲蚀磨损表面的 SEM 形貌图。

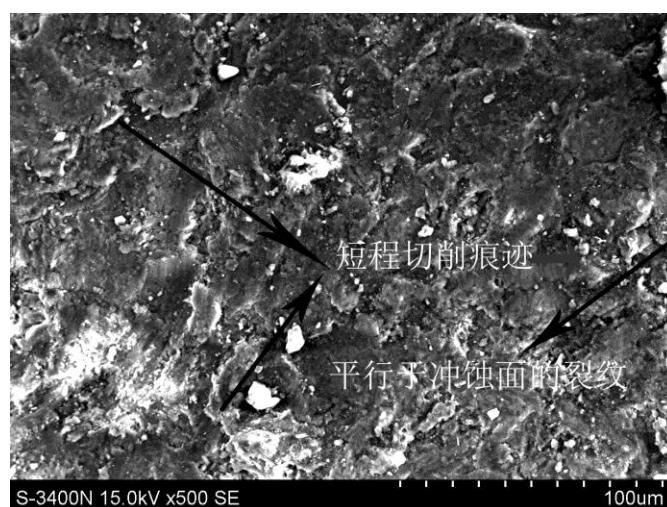


图5-3混凝土冲蚀磨损表面SEM形貌图（At 30° ）

Fig.5-3 Erosion wear surface SEM topography of concretes with different strengths (At 30°)

由图 5-3 可观察到混凝土在 30°冲蚀角度冲蚀下冲蚀磨损表面可观察到明显的犁沟，同时有较多的短程切削的痕迹和平行于冲蚀磨损面的微小裂纹，微小裂纹扩展产生微破坏区，微破坏区周围有材料的堆积，在随后的冲击过程中，这部分材料容易流失并产生剥落坑，从而导致混凝土破坏。这表明在低冲蚀角作用下，混凝土破坏的主要原因是微切削作用，而微切削作用取决于风沙流作用于混凝土表面的水平剪切作用力。

随着冲蚀角度的增大，混凝土受沙粒水平方向上的剪切作用力逐渐减小，而垂直方向上的作用力逐渐增大，使得切削作用逐渐减弱。图 5-4 是混凝土在冲蚀角为 60°，冲蚀时间为 12min 的条件下，冲蚀磨损表面的 SEM 形貌图。可以观察到切削作用明显的减轻，冲蚀磨损表面的犁沟痕迹已经不明显，短程切削痕迹几乎没有，表面的冲蚀坑和裂纹明显增多，尤其在冲蚀坑附近，裂纹相互交错产生新的断裂痕迹，这进一步加剧混凝土冲蚀磨损。当沙粒的冲蚀角度增加到 90°时，混凝土受到的水平剪切作用力减小为零，切削作用消失，此时混凝土受到的作用力全部来自于垂直方向上的应力。图 5-5 是混凝土在冲蚀角为 90°，冲蚀时间为 12min 的条件下，冲蚀磨损表面的 SEM 形貌图。混凝土表面损坏部位冲蚀坑（尺寸在 20~50 μm 不等）更明显，坑的四周有材料被挤压出来，还有部分材料处于即将脱落的状态。此时混凝土表面不存在切削作用，垂直方向的作用力达到最大，局部应力集中更加明显，再加上混凝土内部存在初始的孔洞和微裂纹等缺陷，加剧了冲蚀磨损的进程。

由此可见冲蚀角度在混凝土的冲蚀磨损机制中主要表现为两个方面：一是沙粒水平方向的切削作用；二是沙粒垂直方向的冲击导致混凝土表面产生冲蚀坑和微裂纹，裂纹的交叉扩展导致脆性断裂和剥落。切削磨损以及脆性断裂和剥落不是独立存在的，而是相互影响加剧磨损，同时存在混凝土整个冲蚀过程当中。

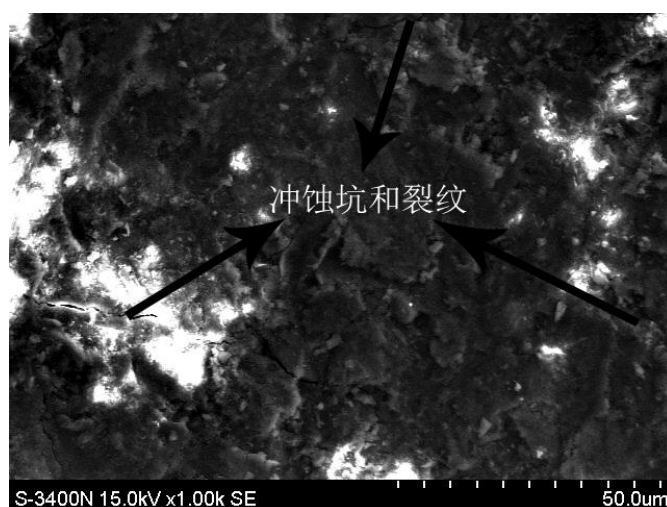


图5-4混凝土冲蚀磨损表面的SEM形貌图（At 60°）

Fig.5-4 Erosion wear surface SEM topography of concretes (At 60°)



图5-5混凝土冲蚀磨损表面的SEM形貌图 (At 90°)

Fig.5-5 Erosion wear surface SEM topography of concretes (At 90°)

5.2 风沙作用对混凝土冲蚀磨损程度的评价分析

5.2.1 本文关于混凝土冲蚀磨损程度的评价方法及其计算公式

国内外学者关于固体粒子冲蚀磨损程度的评价研究有很多，其中 Bitter 的变形磨损理论^[42-43]被广泛的采用，他指出随着冲蚀粒子反复冲击产生加工硬化，并提高材料的弹性极限，直到应力超过材料的强度，形成裂纹，导致材料破坏，由此得出材料总的磨损量是由变形磨损量 W_C 和切削磨损量 W_D 两部分组成，从而推导出复合材料的冲蚀磨损量计算公式，由于在推导过程中考虑的因素过多，致使公式比较复杂，难以应用。1968 年 Neilson 和 Gilchrist 通过单颗粒冲蚀磨损试验，得到了与 Bitter 类似的结论，从而证明 Bitter 的冲蚀磨损量计算公式是正确的，本文在 Bitter、Neilson 和 Gilchris 的基础上提出了适合混凝土的冲蚀磨损量评价公示：

$$\Delta M = K_1 W_C + K_2 W_D = \begin{cases} \frac{MK_1(V \sin \alpha - C)^2}{2A} + \frac{MK_2 \sin(n\alpha)(V \cos \alpha)^2}{2B} & 0^\circ \leq \alpha < \alpha_0 \\ \frac{MK_1(V \sin \alpha - C)^2}{2A} + \frac{MK_2(V \cos \alpha)^2}{2B} & \alpha_0 \leq \alpha \leq 90^\circ \end{cases} \quad (5-1)$$

式中： ΔM 为冲蚀角度为 α 时材料被冲蚀的磨损失重量 (g)； M 为冲蚀试验有效沙尘质量 (g)； α 为冲蚀角度； α_0 为临界冲蚀角， $\alpha_0 = \pi/2n$ ，其中 n 为水平回弹率因子，无量纲，其随着混凝土强度等级的不同取值不同，见表 5-1； V 为沙粒冲蚀速度 (m/s)； C 为沙粒临界冲蚀速度 (m/s)，其中 C 随着混凝土强度等级的不同取值不同，见表 5-1，当 $V \sin \alpha \leq C$ 时， $\Delta M = 0$ ； A 为变形磨损耗能因子 ($g \cdot m^2/g \cdot s^2$)，其中 A 随着混凝土强度等级的不同取值不同，见表 5-1； B 为切削磨损耗能因子

$(g \cdot m^2 / g \cdot s^2)$), 其中 B 随着混凝土强度等级的不同取值不同, 见表 5-1; K_1 和 K_2 为冲蚀磨损调整因子, Bitter 的冲蚀磨损量计算公式适用于复合磨粒冲蚀磨损试验, 本文所用的混凝土是典型的脆性材料, 冲蚀磨损过程比较复杂, 原公式不能完全适用, 考虑到混凝土的弹性模量较大, 在粒子冲蚀磨损过程中切削作用相对贡献较小, 因此要对该公式做出调整, 即增大变形冲蚀磨损失重量的比例 (乘以调整因子 K_1), 减小切削冲蚀磨损失重量的比例 (乘以调整因子 K_2), 并根据试验数据得出 $K_1=1.3$, $K_2=0.9$; 当 A 、 B 、 C 和 n 值确定时, 上述式子可描述混凝土的冲蚀磨损情况。

对于不同强度等级的混凝土, 我们采用气流挟沙发以不同的冲蚀速度 ($15 \sim 90^\circ$) 进行冲蚀磨损试验, 测得 ΔM 。按公式 (5-1) 进行回归分析, 得到 A 、 B 、 C 和 n 的值, 由于这四个因子随着混凝土强度的不同, 取值不断变化, 强度越高, 取值越大, 本文在总结了试验数据之后, 给出一个以强度等级为标准的数值, 列于表 5-1 中。

表 5-1 混凝土冲蚀磨损因子试验结果

Table.5-1 The test results of erosion wear factor of concrete

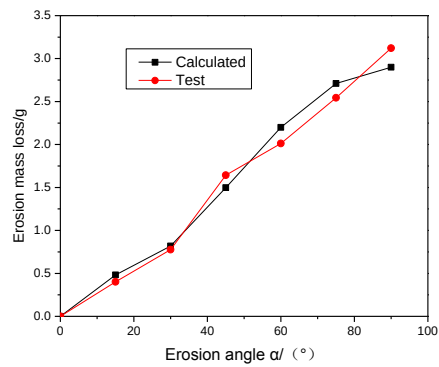
试件编号	(平均)强度 (MPa)	A ($g \cdot m^2 / g \cdot s^2$)	B ($g \cdot m^2 / g \cdot s^2$)	C (m/s)	n (无量纲)
C20	23.5	89700	257000	6.25	1.10
C30	31.7	111000	286500	6.82	1.16
C40	41.4	116000	296500	8.5	1.19

5.3 试验数据与计算数据的对比分析

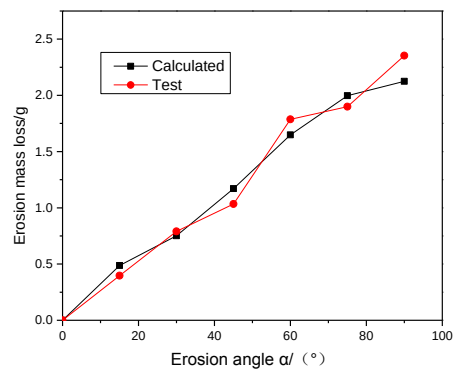
利用上述评价公式计算混凝土在不同冲蚀条件下冲蚀磨损失重量, 将计算结果与试验数据进行对比, 证实该评价公式的计算结果是可靠的。

5.3.1 冲蚀角度与冲蚀磨损失重量的关系分析

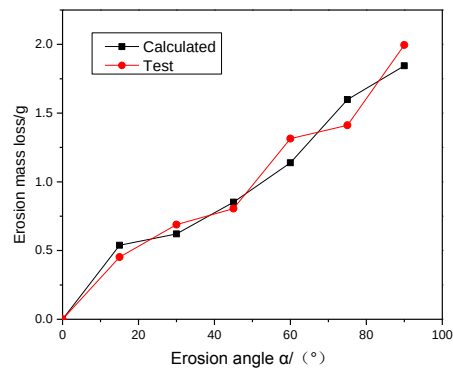
如图 5-6 所示是浓度为 $150g/min$, 冲蚀速度 $22m/s$, 冲蚀时间为 $12min$ 时, 混凝土强度等级分别为 C20、C30、C40, 不同冲蚀角度与冲蚀磨损失重量的关系计算数据和试验数据对比结果。



(a) C20 混凝土对比结果



(b) C30 混凝土对比结果



(c) C40 混凝土对比结果

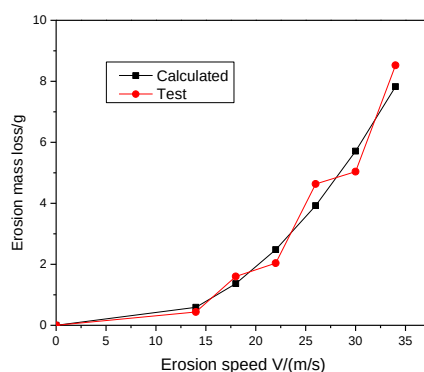
图 5-6 计算数据和试验数据对比曲线

Fig. 5-6 Calculated results vs. experimental results

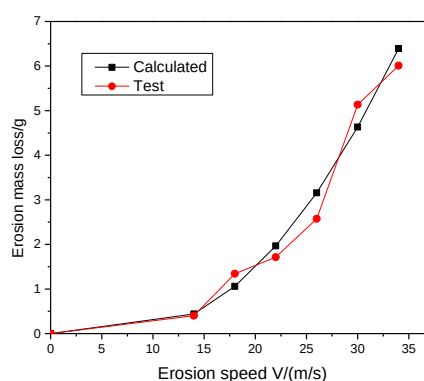
经计算和对比我们可以得出，由评价公式和试验结果得出的数据吻合度很高，说明利用该评价公式进行混凝土的冲蚀损伤程度评价是可靠的。

5.3.2 冲蚀速度与冲蚀磨损失重量的关系分析

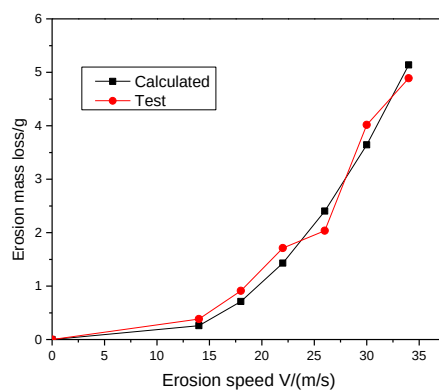
如图 5-7 所示是浓度为 150g/min ，冲蚀角度 60° ，冲蚀时间为 12min 时，混凝土强度等级分别为 C20、C30、C40，不同冲蚀角度与冲蚀磨损失重量的关系计算数据和试验数据对比结果。



(a) C20 混凝土对比结果



(b) C30 混凝土对比结果



(c) C40 混凝土对比结果

图 5-7 计算数据和试验数据对比曲线

Fig. 5-7 calculated results vs. experimental results

经计算和对比我们可以得出，由评价公式和试验结果得出的数据吻合度很高，说明利用该评价公式进行混凝土的冲蚀损伤程度评价是可靠的。

5.4 本章小结

1. 混凝土的冲蚀机理由风沙流的冲蚀角度决定。我们可以这样分析，把风沙粒子对混凝土表面的冲击分为垂直方向的冲击和水平方向的冲击。在低冲蚀角下，水平方向的应力分量相对较大，作用于混凝土表面的剪切应力可以进行有效的切削作用，混凝土以类似表面划伤破坏作用为主；在高冲蚀角下，垂直方向上的应力分量相对很大，靶材表面主要受正向的冲切作用，破坏以冲击压痕破碎作用为主。通过以上的分析可以得出，风沙流对混凝土的冲蚀磨损过程同时存在类似表面划伤作用和冲击压痕破碎作用。

2. 通过分析混凝土冲蚀表面的 SEM 形貌，分析得到混凝土在风沙冲蚀状态下的磨损机制主要表现为两个方面：一是低角度下沙粒水平方向的切削作用；二是高角度下沙

粒垂直方向的冲击导致混凝土表面产生冲蚀坑和微裂纹，裂纹的交叉扩展导致脆性断裂和剥落。切削磨损以及脆性断裂和剥落不是独立存在的，而是相互影响加剧磨损，同时存在混凝土整个冲蚀过程当中。

3. 本文提出一种评价混凝土在风沙环境下受冲蚀磨损程度的评价方法以及相应的公式，通过把试验结果与评价公式计算结果对比分析，结果表明，该评价公式能够较好的评价该混凝土受风沙冲蚀磨损的程度。

结 论

本文在研究内蒙中西部地区沙尘气候的特点和混凝土物理、力学性能和冲蚀接触力学行为及其理论的基础上,采用气流挟沙喷射试验方法,研究了混凝土的冲蚀磨损量(或冲蚀率)在不同强度和不同风沙环境冲蚀参数的关系,得出混凝土的冲蚀规律和冲蚀机理,然后结合混凝土和风沙环境特征,提出了一种混凝土的冲蚀磨损量评价方法,具体的结论如下:

1. 分析了内蒙古中西部地区风沙环境特征,根据内蒙古地区大风天气的分布规律以及风力等级表确定冲蚀速度,根据近年来我国沙尘天气过程中的颗粒物浓度,对沙尘天气进行了定量分级,从而确定下沙率,并测定了沙粒的基本参数:沙粒粒径分布、形状和硬度等,。

2. 应用 Hertz 弹性接触理论,结合内蒙古中西部地区风沙环境建立风沙流粒子冲蚀混凝土的力学模型,分析得到了冲蚀接触时混凝土接触动力最大值、总法向压缩量和接触面最大法向动力;分析了弹性撞击时的接触力学行为,得到法向最大碰撞动力、总压缩变形和压缩量随时间的变化关系。

3. 风沙流冲蚀速度是影响混凝土冲蚀磨损的重要因素,混凝土的冲蚀率随着风沙流冲蚀速度的增加而增大,二者近似呈指数关系。速度指数系数 n 主要与冲蚀角有关,与试样的选取关系不大,系数 K 与冲蚀粒子、被冲蚀材料和冲蚀角等因素有关。

4. 同强度等级的混凝土在 $0 \sim 45^\circ$ 低角情况下,冲蚀率的增长比较明显,成线性增长,随着冲蚀角的增高,冲蚀率不断增大,在 90° 时冲蚀率达到最大。

5. 混凝土的冲蚀率并不是随着下沙率的增大不断增大,而是在一定下沙率范围内冲蚀率最为明显。

6. 混凝土在风沙环境下随着冲蚀时间的延长,其冲蚀过程没有明显的孕育期,但有上升期和稳定期。

7. 试验采用电子扫描显微镜对混凝土试件受到冲蚀的损伤部位进行观测,根据观测结果然后结合冲蚀试验相关数据,分析和探讨混凝土冲蚀磨损特性和冲蚀磨损机理。

8. 提出一种评价混凝土在风沙环境下受冲蚀磨损程度的评价方法以及相应的公式,通过把试验结果与评价公式计算结果对比分析,结果表明,该评价公式能够较好的评价该混凝土受风沙冲蚀磨损的程度。

本文虽然对风沙环境下混凝土冲蚀磨损试验做出了较为完善的研究,但也存在着一定的不足之处,要想把该研究体系完善还需要从以下几个方面进行研究:

1. 本文采用的是试验室加速模拟试验方法同工程实际环境下的混凝土冲蚀磨损

相比有一定的差异性,下一步需要采取更为全面的研究方法,尽可能的与实际相符合。

2. 本文只研究了普通混凝土的冲蚀磨损行为和机理,下一步应该进行其它种类混凝土的冲蚀磨损研究,并作相应的对比,研究他们之间的不同之处。

3. 本文用于混凝土在风沙环境下的冲蚀磨损试验方法、原理和评价磨损程度研究也可以运用到其它工程材料当中,使其整个研究体系更为完善。

参考文献

- [1] 王式功, 董光荣, 陈惠忠等. 沙尘暴研究的进展[J]. 中国沙漠, 2000, 20 (4): 349-356.
- [2] 牛狄涛. 混凝土结构耐久性与寿命预测[M]. 科学技术出版社, 2003.
- [3] 刘伟, 谢友均, 董必钦, 邢锋. 海砂特性及海砂混凝土力学性能的研究[J]. 硅酸盐通报, 2014, 1 (33): 15-22.
- [4] 金伟良, 薛文, 陈驹. 海岸及近海混凝土耐久性设计指标的影响参数分析[J]. 建筑结构学报, 2011, 32 (12): 86-97.
- [5] 金伟良, 赵羽习. 混凝土结构耐久性研究的回顾与展望[J]. 浙江大学学报, 2002, 36(4): 371-403.
- [6] Selyaev V.P., Neverov V.A., Selyaev, P.V., Sorokin E.V., Yudin O.A.. Predicting the durability of concrete structures[J]. including sulfate corrosion of concrete Magazine of Civil Engineering, 2014, 45: 41-52+109-110.
- [7] Bertolini, Luca, Carsana, Maddalena, Frassoni, Massimiliano, Gelli, Massimo. Pozzolan additions for durability of concrete structures[J]. Proceedings of Institution of Civil Engineers: Construction Materials, 2011, 164: 283-291.
- [8] 马孝轩, 仇新刚, 陈从庆. 混凝土及钢筋混凝土土壤腐蚀数据积累及规律性研究[J]. 建筑科学, 1998, (4): 7-12.
- [9] 马孝轩. 我国主要类型土壤对混凝土腐蚀性规律的研究[J]. 建筑科学, 2003, 12 (6): 56-57.
- [10] 马孝轩. 我国主要土壤对混凝土腐蚀性分类[J]. 混凝土与水泥制品, 2003, 12 (6): 6-7.
- [11] 焦楚杰, 魏晓峰, 钟海明, 等. 硫酸盐侵蚀混凝土的理论模型与数值仿真[J]. 广州大学学报, 2013, (6): 38-42.
- [12] 曹健, 王元丰. 硫酸盐侵蚀混凝土周鑫受压构件徐变分析[J]. 建筑材料, 2011, 14 (4): 459-464.
- [13] 张俊, 潘志华, 李洪马, 等. 低水灰比条件下水泥砂浆的康硫酸盐侵蚀特性[J]. 混凝土, 2014, (4): 124-129.
- [14] Shi Weihua, Yu Zhiwu, Kuang Yachuan, He Chengbin. Probability-based durability analysis of structural concrete under chloride salt environment[J]. Applied Mechanics and Materials, 2012, (166-169): 1843-1847.
- [15] Liu Jun, Xing Feng, Dong Biqin, Ding Zhu, Ma Hongyan. Diffusion of chloride ions into concrete in salt spray environment[J]. Journal of Shenzhen University Science and Engineering, 2010, 27: 192-198.
- [16] Muthulingam S., Rao, B.N.. Non-uniform time-to-corrosion initiation in steel reinforced concrete under chloride environment[J]. Corrosion Science, 2014, 82: 304-315.
- [17] J. S. Kong, A.N.Ababneh, D.M.frangopol, Y.Xi. Reliability Analysis of Chloride Penetration in

- Saturated Concrete[J]. Probabilistic Engineering Mechanics, 2002, 17: 305-315.
- [18] 秦宪明, 颜超, 赵娟. 提高海工结构混凝土耐久性的原理和方法[J]. 建筑技, 2012, 43 (1): 18-20.
- [19] Hill J, Byars E A, Sharp m, et al. An experimental study of combined acid and sulfate attack of concrete[J]. Cement&Concrete Composites, 2003, 25: 997-1003.
- [20] Sersale, Frigione G, et al. Acid deposition and concrete attack: Main influences[J]. Cement and Concrete Research, 1998, 28 (1): 19-24.
- [21] Saricimen H, Shameem M, et al. Durability of Proprietary cementitious materials for use in wastewater transport systems[J]. Cement&Concrete Composites, 2003, 25: 421-427.
- [22] 刘惠玲, 周定, 谢绍东. 我国西南地区酸雨对混凝土性能影响的研究[J]. 1997, 29 (6): 101-104.
- [23] 赵焯, 李永良, 刘光等. 酸雨对普通硅酸盐建筑物表面腐蚀的形态模拟研究[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 1999, 35 (1): 136-139.
- [24] 赵卓, 张玲, 赵磊. 酸性环境下结构受弯构件的加速腐蚀试验[J]. 郑州工业大学学报, 2000, 21 (3): 57-59.
- [25] 张英姿, 赵颖华, 范颖芳. 受酸雨侵蚀混凝土弹性模量研究[J]. 工程力学, 2011, 28(2): 175-180.
- [26] 强越, 李莉, 何泽平. 钢纤维混凝土抗酸性腐蚀环境的试验研究[J]. 混凝土, 2011, (6): 41-45.
- [27] 王彦平, 居春常, 王起才. 冲击参数对兰新铁路混凝土结构冲蚀磨损的影响[J]. 硅酸盐通报, 2013, 32 (6): 607-612.
- [28] 王彦平, 居春常, 王起才. 风沙环境下混凝土、砂浆和水泥石的固体颗粒冲蚀磨损试验研究[J]. 中国铁道科学, 2013, 34 (5): 21-26.
- [29] 康玲, 孙鑫, 候婷, 沈建国, 郭瑞清. 近 13 年内蒙古地区沙尘暴的分布特征[J]. 干旱区资源与环境, 2009, 23 (11): 77-82.
- [30] 冯永忠, 刘强, 李永平, 杨改河. 近 55 年来中国西北地区沙尘暴发生时空特征分析[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2010, 38 (5): 188-192.
- [31] 姚丽, 王伟龙, 皮春冶, 武淑英. 我国北方地区的沙尘暴研究综述[J]. 内蒙古水利, 2013, (6): 23-24.
- [32] 杨艳, 王杰, 田明中, 陈兴强. 中国沙尘暴分布规律及研究方法分析[J]. 中国沙漠, 2012, 32 (2): 465-472.
- [33] Liu J. J. The wear mechanism and wear resistance of materials[M]. Beijing: Tsinghua university press, 1993.
- [34] Bruno F.C. Wear characterization and degradation mechanisms of a concrete surface under Ice friction[J]. Construction and Building Materials, 2005, 19 (5): 366-375.
- [35] Liu Y. W.. Improving the abrasion resistance of hydraulic-concrete containing surface crack by adding silica fume[J]. Construction and Building Materials, 2007, 21: 972-977.

- [36] Rodr íguez E, Flores M, P érez A, et al. Erosive wear by silica sand on AISI H13 and 4140 steels[J]. Wear, 2009, 267: 2109–2115.
- [37] R. J. Llewellyn, S. K. Yick, K. F. Dolman. Scouring erosion resistance of metallic materials used in slurry pump service [J]. Wear, 2004, 256: 592- 599.
- [38] Yigit K., Aydin H. Hydro-abrasive erosion resistance of C45 steel indifferent heat-treated states on a designed wear test apparatus. Mater Test, 2010, 52: 323–331.
- [39] Finnie, I.. Erosion of surfaces by solid particles[J]. Wear, 1960, (3): 87-103.
- [40] Finnie, I.. Wolak. Erosion of metals by solid particles[J]. ASTMJ. Mater, 1967, (2): 687-700.
- [41] Finnie, I.. Some reflection on the past and future of erosion[J]. Wear, 1995, (186-187): 1-10.
- [42] Bitter, J. G. A. A study of erosion phenomena(Part I)[J]. Wear, 1963, 6 (1): 5-21.
- [43] Bitter, J. G. A. A study of erosion phenomena(Part II)[J]. Wear, 1963, 6 (3): 169-190.
- [44] Levy A. . Erosion of surfaces by solid particles[J]. Wear of Materials, 1981: 233-235.
- [45] Sheldon G.L.. Finnie I. An investigation of impingement Erosion using single particles wear[J]. Wear, 1972, (21): 393-397.
- [46] Sheldon G.L., Finnie, I.. On the ductile behavior of nominally brittle materials during erosive cutting[J]. Trans ASME, 1966, (88B): 387-392.
- [47] Tilly G.P.. Two stage mechanism of ductile erosion[J]. Wear, 1973, (23): 87-96.
- [48] Hutchings.I.M.. Model for the erosion of metals by spherical particles at normal incidence [J]. Wear, 1981, 70 (3): 269-281.
- [49] Sundararajan G., Shewmon P.G.. Use of dynamic impact experiments in the determination of the strain sensitivity rate of metals and alloys[J]. Acta Metallurgica, 1983, 31 (1): 101-109.
- [50] Chen, D. N, Al-Hassani, S.T.S., Sarumi M. Crack straining-based spall model[J]. Wear, 1997, (19): 107-116.
- [51] 郝贞洪, 邢永明, 赵燕茹, 等. 风沙环境下钢结构涂层侵蚀机理及评价方法[J]. 建筑材料学报, 2011, 14 (3): 345-361.
- [52] 郝贞洪, 任莹, 段国龙, 朱敏霞. 钢结构表面涂层受风沙冲蚀机理和评价方法[J]. 摩擦学学报, 2014, 34 (4): 1-8.
- [53] JGJ 55-2011. 普通混凝土配合比设计规程. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.
- [54] GB50005-2003. 木结构设计规范. 北京: 中国建筑工业出版社, 2004.
- [55] Johnson, K. L.. 著[英].接触力学[M]. 徐秉业译, 高等教育出版, 1992.
- [56] 刘艳萍. 内蒙古中西部地区沙尘暴特征及成因研究[J]. 内蒙古农业大学学报, 2001, 22 (4): 56-60.
- [57] 万本太, 康晓风, 张建辉, 等. 基于颗粒物浓度的沙尘天气分级标准研究[J]. 中国环测, 2004, 20 (3): 8-11.

- [58] 刘景涛, 郑明倩. 内蒙古中西部强和特强沙尘暴的气候学特征[J]. 高原气象, 2003, 22 (1): 51-64.
- [59] 赵琳娜, 孙建华, 赵思雄. 2002 年 3 月 20 日沙尘暴天气的影响系统、起沙和输送的数值模拟[J]. 干旱区资源与环境, 2004, 18: 72-80.
- [60] 冯鑫媛, 王式功, 程一帆, 等. 中国北方中西部沙尘暴气候特征[J]. 中国沙漠, 2010, 30 (2): 394-399.
- [61] Shipway, P. H., Hutchings, I. M. A method for optimizing the particle flux in erosion testing with a gas-blast apparatus[J]. Wear, 1994, 174: 169-175.
- [62] 郝贞洪, 李永. 风沙环境下钢结构涂层低角度冲蚀特性研究[J]. 摩擦学学报, 2013, 33 (4): 343-347.
- [63] Liu Y W. Improving the abrasion resistance of hydraulic-concrete containing surface crack by adding silica fume[J]. Construction and Building Materials, 2007, 21: 972-977.
- [64] Bruno F.. Wear characterization and degradation mechanisms of a concrete surface under ice friction[J]. Construction and Building Materials, 2005, 19 (5): 366-375.
- [65] 尹延国, 胡献国, 崔德密. 水工混凝土冲击磨损行为与机理研究[J]. 水利发电学报, 2001, (4): 57-63.
- [66] Momber, A. W.. The erosion of cement paste, mortar and concrete by gritblasting[J]. Wear, 2000, 246 (1-2): 46-54.
- [67] Momber, A. W.. Damage to rocks and cementitious materials from solid impact[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2004, 37 (1): 57-82.

致 谢

感谢内蒙古工业大学能够给我一个继续深造的机会，使我的学业和人生得到了提高。

首先要向我的导师郝贡洪教授表示深深的敬意和感谢。感谢郝老师在我攻读硕士学位期间给予我诸多方面的指导、帮助和支持。在他的指导和帮助下，我才能在研究生期间顺利地完成本课题的研究工作。在生活 and 为人处事上，郝老师也给予了我很多关怀和建议，使我受益匪浅。在此，再次向郝老师表示衷心的感谢！

在实验研究的过程当中，还要感谢实验室的白明海老师，白老师给我们的实验提出了很多帮助和建设性的意见，才使得实验顺利完成。

感谢我的师兄段国龙和师姐任莹，我的同学宿廷和朱敏霞，他们给了我帮助和鼓励，使我圆满完成了实验任务。

在生活和学习中，要感谢我的舍友韩霄峰、张泽超、黄伟韬同学的关心、帮助和三年来的陪伴，感谢我的师弟樊金城，李佳奇，郭健和刘永利，师妹江南，徐慧子，刘艳晨，雅茹罕和韩燕，在撰写论文的过程中给了我很多灵感。同时也感谢 2012 级全体结构工程专业的同学以及校友对我的支持和帮助，在此我对大家表示深深的谢意！

最后，特别感谢我的父母，从参加研究生入学考试到研究生毕业他们都给了我最大的支持与关怀，父母的鼓励是我人生中最大的精神动力。

在读期间取得的科研成果

本课题受国家自然科学基金项目《严寒环境下西部盐渍区道面混凝土受风沙侵蚀损伤机理研究》（批准号：51468049）、国家自然科学基金项目《风沙环境下钢结构涂层侵蚀力学行为及损伤评价研究》（批准号：11162011）的资助，取得以下成果：

发表论文：

- [1] 郝负洪，冯玉江，段国龙，任莹. 风沙环境下钢结构涂层的冲蚀摩擦学性能[J]. 北京工业大学学报，2015，41(4):558-565.
- [2] 郝负洪，邢永明，冯玉江，朱敏霞，宿廷. 钢结构表面涂层材料抗风沙力学冲蚀力学性能研究[J]. 建筑材料学报，2013，16(6):1092-1096.
- [3] 郝负洪，任莹，段国龙，朱敏霞，冯玉江. 钢结构表面涂层受风沙冲蚀机理和评价方法[J]. 摩擦学学报，2014，34(4):357-363.
- [4] 郝负洪，段国龙，任莹，冯玉江，宿廷. 风沙对钢结构涂层的冲蚀磨损性能研究[J]. 建筑材料学报(报中文核心期刊/EI 收录期刊) (录用).

作者简介

冯玉江，男，1989 年 11 月 9 日出生，河南省新乡市人。2008 年至 2012 年在安阳师范学院建筑工程学院土木工程专业学习，并取得工学学士学位。2012 年至今在内蒙古工业大学土木工程学院结构工程专业学习。