



分类号:

学校代码: 10128

UDC:

学 号: 20111100289

内蒙古工业大学

硕士学位论文

类 别: 全日制硕士研究生

题 目: 钢结构涂层受风沙环境冲蚀机理和损伤程度评价研究

英文题目: Erosion wear mechanism and evaluation of steel-structure
coating in sandstorm

研 究 生: 任莹

学科名称: 结构工程

指导教师: 郝负洪 教授

二〇一四年四月

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： 张莹

指导教师签名： 郝金塔

日期： 2014.6.12

日期： 2014.6.12

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： 张莹

指导教师签名： 郝金塔

日期： 2014.6.12

日期： 2014.6.12

摘 要

内蒙古中西部地区位于我国北部边疆,地域辽阔,自西向东分布着六大沙漠和沙地,气候干旱,大风日数多,导致沙尘暴频繁发生。该地区沙漠周边建有大量的通信塔、桥梁、输电塔架等钢结构体系,这些钢结构设施表面的涂层长期受到风沙环境的侵蚀作用过早失效,使得钢结构外露锈蚀,导致结构的安全性和耐久性降低。因此,分析钢结构表面涂层受风沙环境侵蚀的力学性能,研究其抗冲蚀磨损的损伤机理,提出冲蚀损伤程度的评价方法等一系列的问题已成为学术界和工程界迫切完成的研究任务。本文在分析内蒙古中西部地区风沙环境特征和钢结构涂层力学性能的基础上,采用理论分析和实验研究相结合的方法,分析了钢结构涂层受风沙冲蚀磨损的机理,提出了适用于风沙环境下钢结构涂层损伤程度的评价方法,最后将实验数据与实际工况进行相似性分析,使得实验结果更具有现实意义。本课题受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)和内蒙古自治区自然科学基金项目《风沙环境下钢结构涂层耐久性劣化机理研究》(批准号:2009 MS0706)的资助。具体内容如下:

1. 分析了内蒙古中西部地区风沙环境特征,确定了实验过程中的风沙冲蚀力学参数(风沙流粒子特征、风沙流速度和风沙流浓度)。

2. 采用气流挟沙喷射法,对钢结构涂层进行了风沙环境下的冲蚀磨损实验,应用扫描电子显微镜(SEM)观测涂层在不同冲蚀条件下的冲蚀磨损部位微观形貌,分析涂层材料受冲蚀磨损的力学行为和损伤机理。结果表明:涂层在受到低角度冲蚀时产生了顺着风沙流方向的微切削犁沟,随着角度的增加达到 90° 时,涂层表面则出现了垂直方向的冲击坑。

3. 研究了钢结构涂层受风沙冲蚀磨损失重量与不同风沙冲蚀力学参数的关系。应用精密分析天平测量钢结构涂层在实验前后的重量,结果显示:钢结构涂层的最大冲蚀磨损失重量出现在 45° 左右,表现出了介于塑性材料和脆性材料之间的冲蚀磨损特性;涂层的冲蚀磨损失重量随着冲蚀速度的增加而增加;在低浓度时,冲蚀磨损失重量随着浓度的增加而增加,而在高浓度时则出现下降的趋势。

4. 提出了评价该钢结构涂层材料冲蚀损伤程度的评价公式,并把计算结果与实验结果进行对比,证实了公式的可行性。

5. 运用相似性理论，将实验结果与实际工况进行对比分析，得出本次实验中最高浓度、最大速度的冲蚀磨损结果相当于内蒙古中西部强沙尘暴密集区中的钢结构涂层受到 5.5 个月到 7 年的冲蚀磨损。

关键词：钢结构涂层；风沙环境；冲蚀机理；评价方法；相似理论

Abstract

The central and the western region of Inner Mongolia is located in the northern border of China, which covers a vast geographic area. There are six deserts in this area. The climate here is dry and windy, so sandstorm occurs frequently. There are a large number of steel-structures surrounding the deserts. The coating surface of the steel structure facilities long-term erosion by sandstorm so that the premature failure, make steel structure exposed rusted, results in the decrease of the safety and durability of structure. Therefore, analysis of steel structure surface mechanical properties of coating eroded by sandstorm, study on erosion mechanism of the steel-structure coating in sandstorm, and proposing a method of evaluating erosion degree of the coating which has become academia and engineering urgent research task. This thesis based on analyzing the sandstorm environmental characteristics in the central and western region of Inner Mongolia and the physical and mechanical properties of the steel-structure coating materials, using the combined method of theoretical analysis and experiment, analysis of the mechanical behavior and erosion mechanism of the steel-structure coating in sandstorm, and proposes a method of evaluating erosion degree of the coating. Finally, analysis the similar of experimental data and the actual working condition, making the results more realistic. This subject is supported by national natural science fund project (Grant no.11162011) and Inner Mongolia of natural science fund project (Grant no.2009MS0706). Specific content as follows:

1. The thesis analyzes the sandstorm environmental characteristics in the central and the western region of Inner Mongolia, and then determines sand erosion mechanics parameters (sand particle characteristics, sand speed, and sand concentration).
2. Using airflow jet with sand to conduct erosion experiment of the steel-structure coating in sandstorm. Observed the erosion morphology of the coating at different erosion condition by using the scanning electron microscopy and analyzed the mechanical behavior and erosion mechanisms. Results show that the coating appears the micro cutting furrows along the sand flow direction at low erosion angle, and with the angle increase to 90° , the coating appears a vertical impact craters.
3. Study on erosion mass loss relation with sand erosion mechanics parameters.

Applying electronic balance to measure the weight of specimens before and after the experiment, the result shows that the erosion mass-loss of the coating is up to maximum when the erosion-angle is 45° , showed between plastic material and brittle material erosion wear characteristics; The erosion mass-loss of the coating is increasing with the increased erosion-speed; At a low sand dose, the mass-loss of coating increasing with the increased sand dose, while at a high sand dose, the result is the opposite.

4. The thesis proposes an evaluation method and the corresponding evaluation formula to evaluate the erosion degree of the steel-structure coating. The thesis also compares the calculating results with the test results, and verifies the feasibility and reliability of the evaluation formula.

5. Using the similarity theory, the experimental results and the actual working condition were compared and analyzed, the study result show that under the condition of the highest concentration and maximum speed in this experiment, the erosion wear result is equivalent to suffer erosion wear from 5.5 months to 7 years in real sandstorm concentration areas of the central and the western region of Inner Mongolia.

Key words: *Steel-structure coating; Sandstorm; Erosion mechanism; Evaluation method; Similarity theory*

目 录

第一章 绪论.....	1
1.1 研究背景及意义.....	1
1.2 国内外研究现状.....	2
1.2.1 磨损及冲蚀磨损概述.....	2
1.2.3 冲蚀磨损理论研究进程.....	3
1.2.4 冲蚀磨损影响因素的研究进展.....	4
1.2.5 高分子材料的冲蚀磨损研究进展.....	7
1.2.6 冲蚀磨损程度评价研究进展.....	7
1.3 研究内容及研究方法.....	9
1.3.1 研究内容.....	9
1.3.2 研究方法.....	10
1.4 本文的创新点.....	10
第二章 内蒙古中西部地区风沙环境分析.....	11
2.1 沙尘天气的分类.....	11
2.2 沙尘暴的移动路径.....	12
2.3 沙尘暴的时空分布特征.....	12
2.3.1 沙尘暴的时间分布.....	12
2.3.2 沙尘暴的空间分布.....	15
2.4 风沙的主要冲蚀力学参数.....	15
2.4.1 风沙粒子特征.....	16
2.4.2 风沙流速度.....	16
2.4.3 风沙浓度.....	17
2.5 本章小结.....	18
第三章 钢结构涂层冲蚀磨损机理分析.....	19
3.1 实验方法——气流挟沙喷射法.....	19
3.2 试件的制备及性能.....	21

3.3 试件冲蚀前后对比..... 21

3.4 涂层冲蚀磨损机理分析方法——扫描电镜分析法..... 22

3.5 涂层的原始形貌..... 22

3.6 涂层冲蚀损伤机理分析..... 23

 3.6.1 不同冲蚀角度条件下损伤机理分析..... 23

 3.6.2 不同冲蚀速度条件下损伤机理分析..... 25

 3.6.3 不同冲蚀浓度条件下损伤机理分析..... 26

3.7 本章小结..... 28

第四章 钢结构涂层受冲蚀磨损评价方法..... 29

 4.1 冲蚀磨损量测量方法..... 29

 4.2 冲蚀损伤程度评价公式..... 29

 4.3 实验数据与计算数据对比分析..... 30

 4.3.1 冲蚀角度与冲蚀磨损失重量的关系分析..... 31

 4.3.2 冲蚀速度与冲蚀磨损失重量的关系分析..... 33

 4.4 本章小结..... 36

第五章 冲蚀实验结果与实际工况相似性分析..... 37

 5.1 利用相似性理论分析的意义..... 37

 5.2 相似理论..... 37

 5.3 实验结果与实际工况对比分析..... 38

 5.3.1 内蒙古中西部地区沙尘暴力学参数原始数据..... 39

 5.3.2 计算实例..... 39

 5.4 本章小结..... 45

第六章 结论与展望..... 46

 6.1 结论..... 46

 6.2 展望..... 46

参 考 文 献..... 48

致 谢..... 51

第一章 绪论

1.1 研究背景及意义

内蒙古中西部地区位于我国西北方向，是西北地区沙尘暴的主要沙源地。该地区沙漠化严重，沙漠、沙地和荒漠化草原分布密集，当大风过境时，容易引发沙尘暴。近年来，该地区曾出现瞬间风速为 $18\sim 33\text{m/s}$ 的大风、扬沙、沙尘暴天气，最小能见度为 30m ，沙尘暴的频繁发生，对社会和经济的可持续发展造成极大的威胁^[1-7]。

在内蒙古中西部地区的沙漠以及周边地区，分布着众多通信塔、桥梁和输电塔架等钢结构体系，如图 1-1 所示。由于长期受到风沙的侵蚀作用，这些钢结构涂层受风沙环境冲蚀磨损破坏严重，使钢结构极易锈蚀，导致构件承载力下降，造成结构的安全性和耐久性降低。因此，分析钢结构受风沙环境侵蚀的力学行为、摩擦学行为和损伤机理，研究其受冲蚀损伤程度的评价方法意义重大。

本文在研究内蒙古中西部地区风沙环境特征和钢结构涂层力学性能的基础上，通过理论分析与实验研究相结合的方法，分析了风沙粒子流对钢结构涂层的冲蚀力学行为和损伤机理，研究了涂层冲蚀磨损失重量与不同风沙冲蚀力学参数的关系，提出适用于该钢结构涂层冲蚀损伤程度的评价公式，利用相似性理论，对比分析了实验结果与实际工况的关系，使实验结果更有现实意义。



(a) 钢结构通信塔



(b) 钢结构桥梁



(c) 钢结构输电塔

图 1-1 沙漠中的钢结构构件

Fig.1-1 Steel structure in desert

1.2 国内外研究现状

1.2.1 磨损及冲蚀磨损概述

磨损是自然界普遍存在的现象，是指当摩擦副表面作相对运动时，由于机械或化学作用，使其发生材料脱落的现象。

磨损的现象极为复杂，所以分类也较为复杂，磨损的分类标准也较多，分类方法也各不相同。学术上通常按照磨损的破坏机制对磨损进行划分，主要有粘着、疲劳、腐蚀、冲击、微动、冲蚀等产生的磨损。本文所研究的风沙对钢结构涂层的磨损破坏机制为冲蚀磨损。

冲蚀磨损是指较小的粒子流对靶材产生冲击时，靶材的表面发生破坏而失效的现

象。此定义中，粒子流粒子粒径一般小于 $1000\mu\text{m}$ ，冲蚀的速度一般不超过 550m/s 。

工程实际当中冲蚀磨损现象时有发生，已经成为许多工业材料破坏的原因之一^[8]。本文要讨论的是沙粒子冲蚀钢结构涂层对其造成的损伤。

按照不同的冲蚀流载体，冲蚀磨损可以分为：喷砂型和泥浆型。载体中的挟带物有固粒、液滴或气泡。按照不同的挟带物冲蚀磨损可以划分为四类，如表 1-1 所示。

表 1-1 冲蚀的分类

Tab.1-1 The erosion type

载体	挟带物	冲蚀类型
气流	固粒	喷砂型冲蚀
	液滴	雨蚀
液流	固粒	泥浆型冲蚀
	气泡	气蚀

本文研究的冲蚀类型属于喷砂型冲蚀。

1.2.3 冲蚀磨损理论研究进程

1. 塑性材料的冲蚀磨损理论

(1) 冲蚀微切削理论

Finnie是冲蚀微切削理论^[9-10]的奠基人，该理论的提出，较好的解释了低冲角时塑性材料受刚性粒子冲蚀导致材料破坏的冲蚀规律，但是该理论不适用于刚性粒子对脆性材料的冲蚀磨损以及高角度时的冲蚀磨损，两种情况下的冲蚀磨损存在较大的偏差。

(2) 冲蚀变形损伤理论

在1963年，Bitter经过大量的实验和研究，提出了冲蚀变形磨损理论^[11-12]，该理论根据能量守恒原理，认为冲蚀过程中能量存在守恒，即总磨损量为切削磨损量和变形磨损量之和。在冲蚀磨损试验机上进行了单颗粒的冲蚀磨损试验，验证了该理论的正确性。该理论较好的解释了塑性材料的冲蚀规律，但是其缺陷是不能构建有效的物理模型。

(3) 挤压锻打理论

A.V.Leay等人通过单颗粒寻求法和分步冲蚀实验法研究了高冲角时粒子对塑性材料的冲蚀磨损，最后经过理论计算提出了挤压锻打的理论模型。该理论^[13]认为粒子连续冲蚀靶材产生凸凹的唇片，之后对靶材连续不断的“锻打”，使靶材产生严重的

塑性变形，最后凸凹的唇片片屑从靶材表面剥落下来。

2. 脆性材料的冲蚀磨损理论

从20世纪60年代起，学者们渐渐开始对脆性材料的冲蚀损伤机理进行研究。在1966年，Finnie和Sheldon^[14]研究了球状粒子对脆性材料的冲蚀磨损行为，提出了一种理论，该理论认为在材料表面有缺陷的地方可能产生环状裂纹——赫兹裂纹，这也即是建立第一个脆性材料冲蚀模型的理论基础。

3. 二次冲蚀理论

Tilly^[15]采用筛分法、高速摄影和电子显微镜等先进手段，对冲蚀过程中脆性粒子撞击靶材进行了观察，认为脆性粒子撞击靶材时粒子产生破碎，会对靶材的冲蚀磨损产生影响。脆性粒子在冲击靶材时产生的破碎碎片将会对靶材产生二次冲蚀。对于脆性粒子在高角度时的冲蚀磨损变化规律，运用此模型可得到较好的解释。

4. 绝热剪切与变形局部化磨损理论

Hutchings^[16]运用钢球冲击低碳钢的实验模型，对实验中靶材的变形唇进行了分析，得出了靶材会在高应变率冲击下达到很高的温升，这主要是由于变形的绝热化以及绝热剪切带的形成引起的。林福严等人通过大量的实验研究和分析验证了该理论，目前该理论已经得到了学术界的普遍认可。绝热剪切变形局部化广泛存在于各种金属、岩土和高分子材料等遭受爆炸、高速碰撞、高速切削和高速磨损等涉及高应变率载荷的高速变形过程中。

5. 低周疲劳理论

低周疲劳理论^[17]是由邵荷生、林福严等人通过多年的探索与研究提出的，该理论认为在冲蚀角度为 90° 或者接近 90° 时，冲蚀磨损主要是低周疲劳过程，该过程以温度效应为特征。

1.2.4 冲蚀磨损影响因素的研究进展

当固体粒子以大于某一临界值的入射速度冲击到靶材表面时，就会造成靶材的冲蚀破坏。目前研究冲蚀影响因素主要从三个方面考虑：环境因素、粒子性能和被冲蚀材料的性能。

1. 环境因素

(1) 冲蚀角

冲蚀角是指粒子入射方向与靶材表面之间形成的夹角。经实验研究表明，冲蚀角是影响材料冲蚀率的一个重要因素。塑性材料的最大冲蚀角出现在 $15^\circ \sim 30^\circ$ ，脆性

材料的最大冲蚀角出现在 90° ，其他材料介于两者之间。冲蚀角与冲蚀率的关系可表达为：

$$\varepsilon = A \cos^2 \alpha \sin n\alpha + B \sin^2 \alpha \quad (1-1)$$

式(1-1)中 ε 为材料的冲蚀率， α 为冲蚀角， A 、 B 、 n 为常数；典型的脆性材料 $A=0$ ；塑性材料 $B=0$ ； $n=\pi/2\alpha$ 。介于两者之间材料的冲蚀率主要由低冲击角下塑性项和高冲击角下脆性项起主要作用，通过改变式中的 A 与 B 的值便能满足要求。

(2) 冲蚀速度

冲蚀速度是影响材料冲蚀率的一个重要因素，冲蚀速度对冲蚀率的影响存在一个速度门槛值，超过这一门槛值后，材料会发生冲蚀磨损。一般认为，冲蚀率与冲蚀速度存在如下关系：

$$\varepsilon = Kv^n \quad (1-2)$$

式(1-2)中 v 表示冲蚀速度， n 是常数。

Finnie 早期实验结果认为： $n \approx 2.0$ ，与他从粒子运动方程导出的冲蚀微切削理论分析结果颇为近似。经大量实验研究发现，速度指数 n 大约在 2.05~2.44 之间，脆性材料 n 值有时高达 6.5，不过更多实验测出 n 值出现最大范围是 2.3~2.4。 n 值随着冲蚀角的增大而稍有上升^[18]。

(3) 冲蚀时间

粒子刚开始冲蚀靶材时，不一定立刻发生冲蚀破坏，而是使其表面发生硬化和粗糙，粒子不断地冲击靶材，靶材表面材料会逐渐地产生流失，这一过程的持续进行，使得材料的冲蚀率逐渐趋于稳定的阶段。Neilson 和 Gilchrist 研究了 Al_2O_3 在不同冲蚀角度下冲蚀 Al 时的冲蚀失重量随时间的变化关系。研究表明： Al 在质量损失前，存在一个短暂的潜伏期，随着冲蚀过程的进行，入射粒子嵌入靶材，出现了靶材“增重”的现象，嵌入增重的大小与粒子入射角度有关，一段时间以后冲蚀进入稳定阶段^[18]。

(4) 粒子流量

一般情况下，粒子的流量决定了粒子的动能，因此，冲蚀率会随着粒子流量的增加而增加；但是，流量增大到一定程度，就会产生随着流量的增大冲蚀率会降低的现象。这主要是由于粒子之间的相互碰撞以及回弹粒子会影响材料的冲蚀率^[19, 26]。

(5) 环境温度

环境温度是影响材料冲蚀的一个较为复杂的因素，温度不同时，材料的门槛冲蚀速以及最大冲蚀角等指标都会产生相应的变化，材料的冲蚀机理也会发生变化。但是

温度对脆性材料冲蚀的影响，理论和实验方面有较大偏差。

2. 粒子性能

(1) 粒子形状

粒子形状是影响冲蚀磨损的主要因素之一。Ballout^[20]认为尖角粒子比球状粒子能产生较多切削或犁削。有研究发现^[21]，随着球状粒子粒度增大，材料的冲蚀率也会呈现一定的变化规律。

(2) 粒度

粒度对塑性材料和脆性材料的冲蚀磨损影响各不相同，塑性材料的冲蚀率随粒度存在一个临界值(D_c)，当粒度低于临界值(D_c)时，冲蚀率随粒度增加而上升，当粒度超过临界值(D_c)时，冲蚀率几乎不发生变化，这种现象被称为“粒度效应”^[22]。脆性材料的冲蚀率随粒度增加呈上升趋势，不存在临界值 D_c 。

(3) 粒子硬度

粒子硬度对材料冲蚀磨损的影响，主要结合材料表面的硬度来进行研究，单纯的考虑粒子硬度没有实际意义。粒子与材料表面硬度比(H_p/H_t)影响材料的冲蚀磨损。Tabor 认为当 H_p/H_t 超过 1.2 时，塑性材料的冲蚀率会增大；当 H_p/H_t 小于 1.2 时，冲蚀率随 H_p/H_t 减小而降低。

3. 被冲蚀材料性能

(1) 材料的硬度和强度

除冲蚀磨损外，通常情况下材料的耐磨性随着材料的硬度和强度的增加而增强，但是冲蚀磨损体现出不同的规律。目前的研究表明^[23]，只有铸铁和纯金属的抗冲蚀能力与硬度(强度)成正比关系。

(2) 材料的塑性和韧性

塑性对塑性材料的冲蚀磨损有重要的影响。Foley 和 Levy^[24]的研究表明，随着塑性的增加材料的冲蚀失重呈降低的现象。但是，其他学者的研究否定了此说法^[25]。

断裂韧性对于脆性材料的冲蚀磨损有重要的影响。与硬度相比，断裂韧性的影响更占主导地位，换言之，在一定范围之内，硬度低，韧性好的脆性材料抗冲蚀性能依然较好^[26]。

(3) 材料的显微组织

目前，对于显微组织对材料的抗冲蚀磨损性能的影响观点并不一致，不同学者有着不同的认识^[27]。Balan^[28]，Mc-Cabe^[29]，Levy^[30]等人也针对不同物质做了大量实验，但从总体结果来看，材料成分和显微组织对其抗冲蚀性能的影响不够全面，只局限于

某一部分。甚至由于评价体系的不同可能得出矛盾的结果，缺乏规律性，需进一步深入研究和完善。

1.2.5 高分子材料的冲蚀磨损研究进展

Friedrich^[31]将聚合物分为脆性聚合物材料和韧性聚合物材料。脆性高分子材料和韧性高分子材料冲蚀率变化规律不尽相同：脆性高分子材料的冲蚀率没有孕育期，而韧性高分子材料的冲蚀率存在一个增重的孕育期。

S.M.Walley^[32]等人研究了聚丙烯(PP)、聚乙烯(PE)和聚醚醚酮(PEEK)的冲蚀磨损性能：得出了硬度和脆性由小到大依次为 PE<PP<PEEK，而耐磨性的顺序与之相反的结论，说明在低角冲蚀情况下，变形程度大并不意味着重量损失大。

1.2.6 冲蚀磨损程度评价研究进展

1. Finnie 评价公式

Finnie 根据关于刚性粒子低角度冲蚀塑性材料的冲蚀微切削理论^[9-10]，提出了关于冲蚀磨损程度的计算公式(1-3)：

$$V = \frac{cM}{P} f(\alpha) v^n (n = 2.2 \sim 2.4) \quad (1-3)$$

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 根据冲蚀变形损伤理论^[11-12]，以及冲蚀过程中的能量变化，提出了适合沙尘环境下的冲蚀磨损程度的评价公式，但是由于该公式中包含了较多的参数，很难测定。

Wood 做了一些假设来简化该公式，得出了冲蚀磨损量表达式(1-4)：

$$W_t = W_d + W_c$$

$$W_t = \left[\frac{\frac{1}{2} M (v \sin \alpha)^2}{\varepsilon} \right] \frac{\gamma}{g} + \left[\frac{\frac{1}{2} M (v \cos \alpha)^2}{\rho} \right] \frac{\gamma}{g} \quad (1-4)$$

式中: W_t ——冲蚀磨损失总重量, 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, 得出表达式(1-5):

$$W_t = W_c + W_d$$

$$W_t = \left[\frac{\frac{1}{2} M_s (v_s \cos \alpha)^2 \sin(n\alpha)}{\phi} \right] + \left[\frac{\frac{1}{2} M_s (v_s \sin \alpha - v_{cr})^2}{\varepsilon} \right] (0 < \alpha \leq \alpha_0) \quad (1-5a)$$

$$W_t = \left[\frac{\frac{1}{2} M_s (v_s \cos \alpha)^2}{\phi} \right] + \left[\frac{\frac{1}{2} M_s (v_s \sin \alpha - v_{cr})^2}{\varepsilon} \right] (\alpha_0 < \alpha \leq \frac{\pi}{2}) \quad (1-5b)$$

式中: W_t 、 W_d 、 W_c 、 M_s 、 v 、 α 物理意义与(1-4)式相同, 其他参数如下:

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. 其他评价公式

文献[33]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(1-6):

$$M = M_c + M_d$$

$$M = \left[\frac{\frac{1}{2} M_s (V \cos \alpha)^2 \sin(n\alpha)}{\psi} \right] + \left[\frac{\frac{1}{2} M_s (V \sin \alpha)^2}{\eta} \right] (0 < \alpha \leq \alpha_0) \quad (1-6a)$$

$$M = \left[\frac{\frac{1}{2} M_s (V \cos \alpha)^2}{\psi} \right] + \left[\frac{\frac{1}{2} M_s (V \sin \alpha)^2}{\eta} \right] (\alpha_0 < \alpha \leq \frac{\pi}{2}) \quad (1-6b)$$

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 ——冲蚀变形磨损能耗因数，单位： m^2/s^2 。

1.3 研究内容及研究方法

1.3.1 研究内容

1. 内蒙古中西部地区风沙环境分析

对内蒙古中西部地区的风沙环境进行分析，确定实验中所用到的风沙冲蚀力学参数(风沙流粒子特征、冲蚀速度和冲蚀浓度)。

2. 钢结构涂层的冲蚀磨损机理研究

(1) 采用气流挟沙喷射法，模拟风沙环境，基于内蒙古风沙气象资料，设定不同冲蚀力学参数，包括冲蚀环境因素、粒子性能因素和被冲蚀材料因素，研究不同冲蚀磨损影响因素下钢结构涂层受冲蚀的力学和摩擦学行为。

(2) 应用扫描电子显微镜(SEM)观测钢结构涂层受冲蚀磨损部位的微观形貌，分析该涂层材料受风沙冲蚀磨损的损伤机理。

3. 钢结构涂层冲蚀损伤程度评价方法研究

研究涂层冲蚀磨损失重量与不同风沙环境参数的关系,提出适用于评价该钢结构涂层冲蚀损伤程度的公式,结合大量实验数据,验证公式的准确性和可行性。

4. 实验结果与实际工况相似性分析

对比实验条件与实际工况的关系,运用相似性理论,把冲蚀实验条件与实际工况联系起来,使实验结果更具有实际意义。

1.3.2 研究方法

1. 采用气流挟沙喷射法,模拟风沙环境下对钢结构涂层的冲蚀磨损实验,利用电子天平测量涂层冲蚀磨损失重量,研究钢结构涂层的冲蚀磨损失重量随风沙冲蚀力学参数的变化规律。

2. 应用扫描电子显微镜(SEM)观测涂层受冲蚀磨损的微观形貌,根据钢结构涂层冲蚀前后的SEM形貌图,结合冲蚀实验数据,分析其冲蚀损伤机理。

3. 根据风沙环境及钢结构涂层性能特征,结合冲蚀磨损失重量的实验结果,基于公式(1-6)的评价方法,提出适用于本次实验钢结构涂层材料的冲蚀损伤程度评价公式。

4. 运用相似性理论,结合实验结果进行对比分析,确定实验结果与实际工况的关系。

1.4 本文的创新点

1. 利用扫描电子显微镜(SEM)观测涂层的冲蚀损伤形貌,研究其受风沙冲蚀磨损的机理。

2. 提出适用于评价风沙环境中钢结构涂层冲蚀磨损程度的评价公式,结合大量实验数据,验证该冲蚀磨损公式的可行性。

3. 运用相似性理论,将实验室加速实验的结果与实际工况相统一,使实验结果更具现实意义。

第二章 内蒙古中西部地区风沙环境分析

内蒙古中西部属于干旱、半干旱地区,该地区自西向东分布着 6 大沙漠和沙地(巴丹吉林沙漠、腾格里沙漠、乌兰布和沙漠、库布齐沙漠、毛乌素沙地和浑善达克沙地),如图 2-1 所示。由于来自西伯利亚和蒙古国冷空气的入侵,该地区风力较大,为沙尘暴提供了动力条件,这些因素使得该地区成为沙尘暴的多发区。

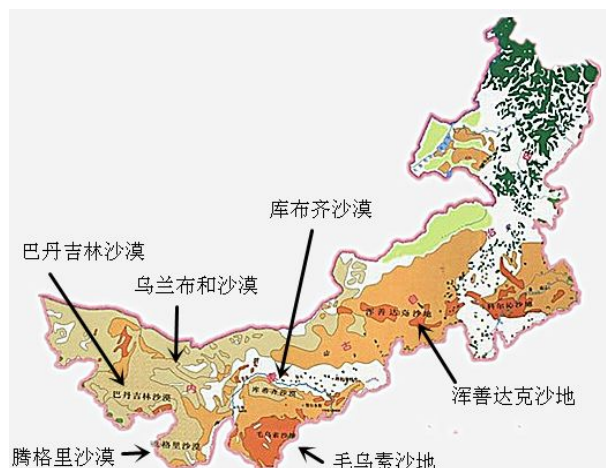


图 2-1 内蒙古中西部沙漠分布图

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

我国沙尘暴的 3 条主要路径中有 2 条经过内蒙古中西部地区^[34],使得内蒙古中西部地区成为我国西北地区沙尘暴的主要源地之一。

2.1 沙尘天气的分类

沙尘天气分为浮尘、扬沙、沙尘暴和强沙尘暴,具体分类标准如表 2-1 所示。

表 2-1 沙尘天气分类标准

Tab.2-1 Dust weather classification standards

分类	表现特征	水平能见度 (S)
浮尘	细沙、尘土均匀地浮游在空中	$S \leq 10km$
扬沙	尘沙被风吹起,使空气比较混浊	$1km < S \leq 10km$
沙尘暴	强风将地面大量尘沙吹起,使空气很混浊	$S < 1km$
强沙尘暴	大风将地面尘沙吹起,使空气模糊不清,浑浊不堪	$S < 500m$

2.2 沙尘暴的移动路径

沙尘暴移动路径的研究主要依据《地面天气图》、《中国地面气象记录月报》资料结合卫星云图中沙区高浓度走向，参考各气象站的主导风向等气象资料，认为中国沙尘暴的移动路径主要有 3 条^[35]，如图 2-2 所示。

西北路的影响范围主要包括柴达木盆地、河套地区和内蒙古东部，该路沙尘天气较多，我国 76.9%的沙尘暴来源于此路径。

西路的影响范围主要包括新疆西部、河西走廊、河套和内蒙古东部，沙尘暴次数占总次数的 15.4%。此路沙尘暴天气具有移动迅速、强度大、范围广等特点。

北路的影响范围主要包括新疆东部、内蒙古地区及华北地区。沙尘暴只占总发生次数的 7.7%，此路径的沙尘暴是影响京津地区的主要源区。

其中西北路和北路经过内蒙古中西部地区。

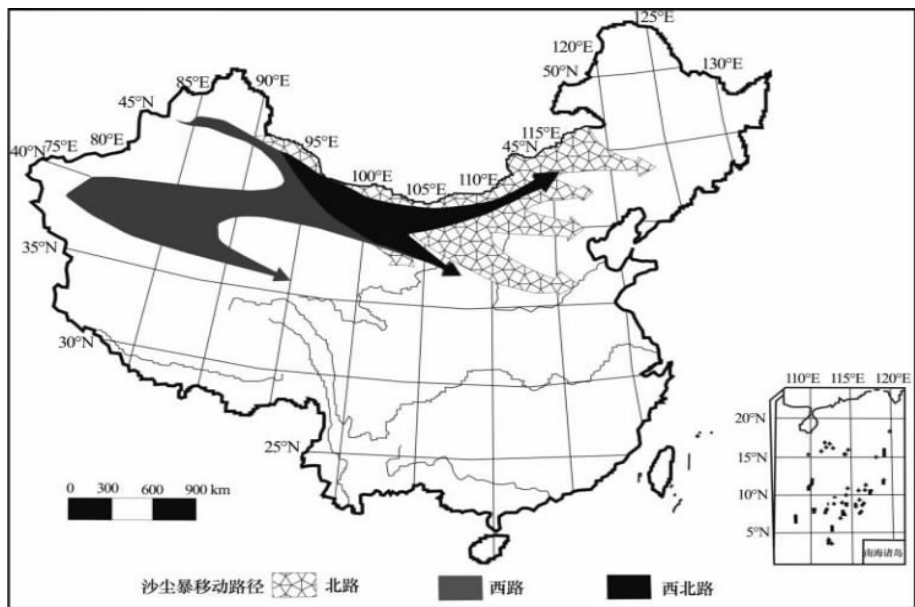


图 2-2 沙尘暴移动路径

Fig.2-2 Sandstorms moving path

2.3 沙尘暴的时空分布特征

2.3.1 沙尘暴的时间分布

1. 沙尘暴的年分布

图 2-3 是 1961~2013 年内蒙古中西部地区沙尘暴次数的年分布图，由图可知，从

上个世纪 60 年代到 90 年代，沙尘暴的发生次数总体呈下降趋势。60 年代沙尘暴发生次数占总体的 33%，70 年代占 26.4%，80 年代占 13.6%，90 年代则更少，占 7.7%。其中，1966 年为沙尘暴的频发年，较大范围的沙尘暴发生次数为 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 1998 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，2001~2010 年沙尘暴发生次数占总体的 13%，其中，2001 年达到最多，之后开始减少，2003 年沙尘暴次数最少，2004 年开始呈波动增加趋势。2011~2013 年沙尘暴发生次数一直在 10 次左右波动。

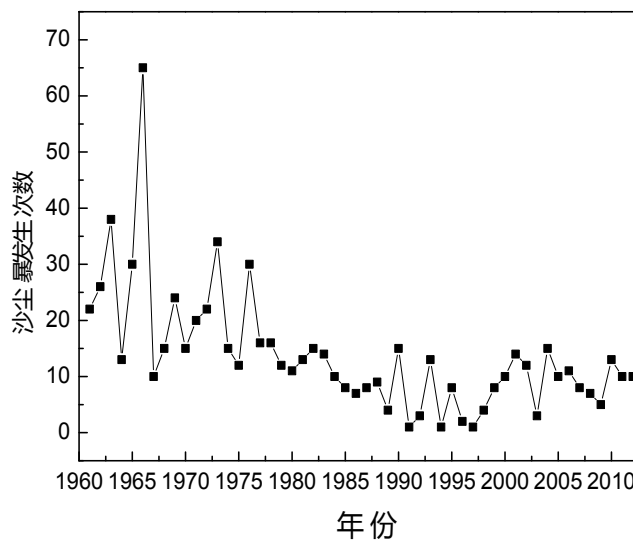


图 2-3 1961 年~2013 年内蒙古中西部地区沙尘暴次数分布

Fig.2-3 The annual distribution of sandstorms between 1961 and 2013
in the central and western region of Inner Mongolia

2. 沙尘暴的月分布

对近 50 年内蒙古中西部地区沙尘暴的调查资料进行整理分析^[36]，对不同年份同一个月份的沙尘暴发生次数取平均值，绘制出内蒙古中西部地区沙尘暴次数月变化曲线图 2-4，从图中可以看出，发生沙尘暴的高峰期在 4 月份；3~5 月是频发期；低发期为 7~10 月，即夏秋季节。频发期(3~5 月)发生频率占全年发生频率的 82.0%，低发期占全年发生频率的 0.5%。

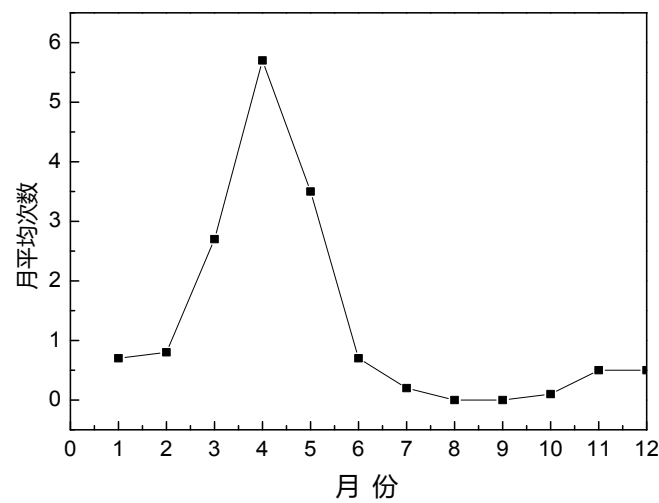


图 2-4 内蒙古中西部地区沙尘暴次数月分布

Fig.2-4 The monthly distribution of sandstorms
in the central and western region of Inner Mongolia

3. 沙尘暴的日变化

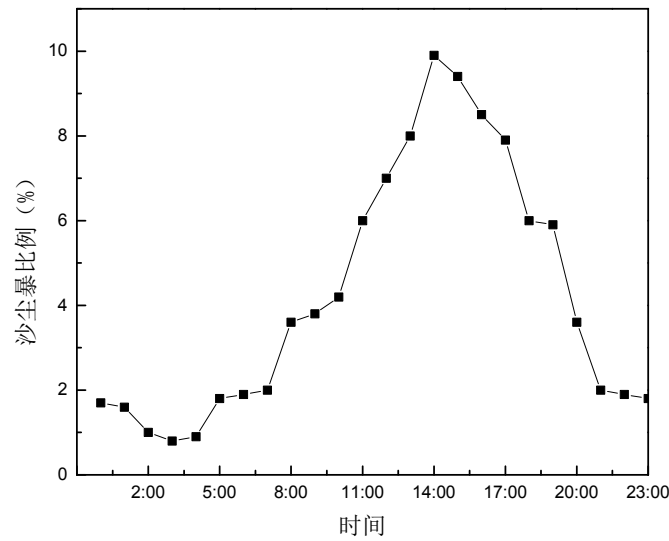


图 2-5 内蒙古中西部地区沙尘暴次数日变化

Fig.2-5 The hourly distribution of sandstorms
in the central and western region of Inner Mongolia

图 2-5 是通过分析沙尘暴发生初始时刻的日变化特征，绘制出内蒙古中西部地区沙尘暴发生的日变化曲线图^[37]。由图可知，沙尘暴的多发时段是 08:00~20:00；14:00

达到极值；午后的 14:00~16:00 是沙尘暴发生的峰值。这是由于这一时段近地面大气的热对流不稳定，容易诱发沙尘暴。

2.3.2 沙尘暴的空间分布

内蒙古中西部地区沙尘暴的空间分布图见 2-6。由图可知，内蒙古中西部地区的沙尘暴发生频率自西向东呈降低趋势。阿拉善盟偏北部地区是沙尘暴的最高发区，以拐子湖为中心的大片区域，40 年平均每年沙尘暴的发生频率大于 25 日^[2]。

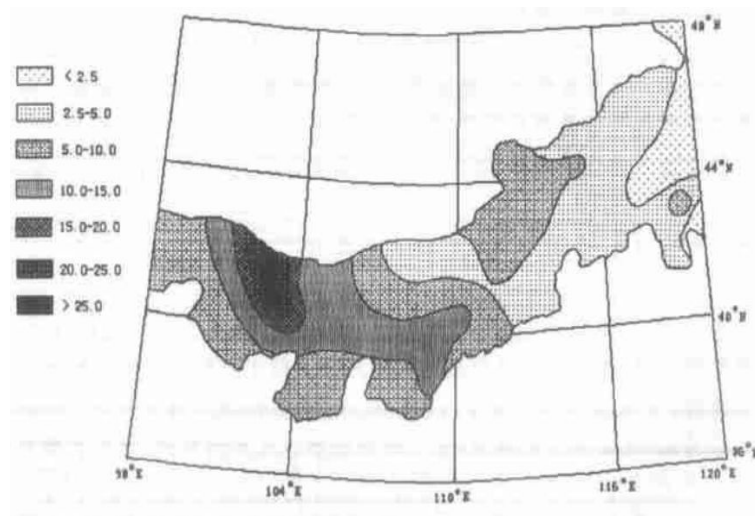


图 2-6 内蒙古中西部地区沙尘暴空间分布图(单位: 日)

Fig.2-6 The spatial distribution of sandstorms
in the central and western region of Inner Mongolia

2.4 风沙的主要冲蚀力学参数

本文以鄂尔多斯地区库布齐沙漠为研究对象，研究沙尘暴的冲蚀力学参数。库布齐沙漠是中国第七大沙漠，距离北京最近。西、北、东三面均濒临黄河，地势南高北低，南部为构造台地，中部为风成沙丘，北部为河漫滩地，总面积约 145 万公顷。此处地域为内蒙古中西部地区的主要沙源，选取此处地域具有较好的工程背景和实际意义。

沙尘暴的主要力学参数包括风沙流粒子的特征、风沙流的冲蚀速度和风沙流的浓度。

2.4.1 风沙粒子特征

风沙流粒子的特征是影响沙尘暴强度的一个重要因素，也是影响涂层材料冲蚀磨损的主要外部因素。沙粒的特征主要包括沙粒的粒径和沙粒的形状。

1. 沙粒的粒径

采用筛分法分析了库布齐沙漠沙粒粒径的分布情况，筛分结果如下表 2-2。

表 2-2 库布齐沙漠沙粒粒径分布

Tab.2-2 The size of sand in KuBuQi desert

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	0.67	1.75	50.80	37.52	8.95

由表可知库布齐沙漠沙粒粒径主要分布在 0.05mm~0.25mm 之间，在此区间内的粒子含量达到 87%以上，0.25mm 以上和 0.05mm 以下所占的比例不足 10%，沙粒的粒径比较单一，沙粒较细，其级配不良。

2. 沙粒的形状

图 2-7 是利用光学显微镜观测的沙粒放大图，可以看出沙粒的形状大多数呈圆形或椭圆形，只有少数三角形的颗粒存在，这是由于沙粒在长时间的运动过程中磨损造成的。

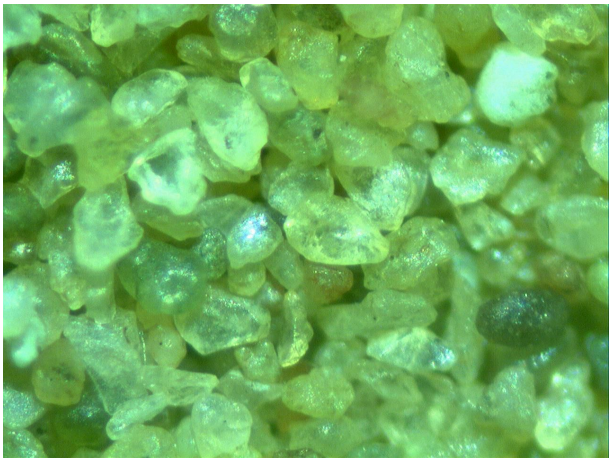


图 2-7 沙粒形状

Fig.2-7 The shape of sand

2.4.2 风沙流速度

风沙的速度决定沙尘暴的强弱，因此风沙流速度是影响涂层冲蚀磨损的一个重要

指标。大风是形成沙尘暴天气的动力条件，内蒙古中西部地区全年的平均风速一般大于 3m/s ，该地区风力强劲，风速多分布在 $9\text{m/s}\sim 26\text{m/s}$ ，每年超过临界起沙 ($\leq 4\text{m/s}$) 风速日数约为 $200\text{d}\sim 300\text{d}$ 。大风天气主要发生在春季，尤其是 8 级 ($17.3\text{m/s}\sim 20.8\text{m/s}$) 以上的大风^[38]。实验根据风力等级表设置 7 个风速分别为 13m/s 、 16m/s 、 18m/s 、 20m/s 、 23m/s 、 26m/s 和 30m/s 。

表 2-3 风力(风速)等级表

Tab.2-3 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

2.4.3 风沙浓度

风沙流浓度也是表征沙尘暴强度的另一个重要参数，是衡量气流挟沙能力的重要指标，也是影响涂层材料冲蚀磨损的主要外部因素。文献[39]描述了民勤 4.24 特强沙尘暴过程近地面沙尘浓度变化，沙尘暴来临之前(4 月 23 日)，PM10 日平均质量浓度为 $36.7\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，沙尘浓度较低，4 月 24 日沙尘来临时沙尘浓度突然迅速升高 200 多倍，PM10 大于 $6500\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，4 月 25 日 PM10 为 $2469.1\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，4 月 26 日 PM10 降到 $780.8\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，可见沙尘暴的一次持续时间较长。表 2-4 是文献[40]通过统计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，具有较强的实用性。

表 2-4 基于颗粒物浓度的沙尘天气分级 (单位: mg/m^3)Fig.2-4 Classification of dust and sand storm basic on particular concentration(mg/m^3)

沙尘天气分级	TSP 浓度限值 (小时值)
浮尘	$1.0 \leq TSP < 2.0$
扬沙	$2.0 \leq TSP < 5.0$
沙尘暴	$5.0 \leq TSP < 9.0$
强沙尘暴	≥ 9.0

本文通过控制下沙率来模拟内蒙古中西部地区不同沙尘浓度的沙尘天气, 下沙率分别为 $90g/min$ 、 $150g/min$ 、 $240g/min$ 、 $300g/min$ 、 $360g/min$ 和 $460g/min$, 下沙率越大风沙浓度越大。

2.5 本章小结

本章分析了内蒙古中西部地区风沙环境特征和沙尘暴的主要力学参数, 主要有以下内容:

1. 沙尘天分为浮尘、扬沙、沙尘暴和强沙尘暴。
2. 中国沙尘暴的移动路径主要有三条: 西北路、西路和北路, 其中西北路和北路经过内蒙古中西部地区。
3. 内蒙古中西部地区沙尘暴的时间分布特征是:
 - (1) 沙尘暴年分布情况是从 60~90 年代依次减少, 2001~2010 有增加趋势, 2011~2013 年沙尘暴发生次数一直在 10 次左右波动。
 - (2) 月分布情况是沙尘暴发生的高峰期在 4 月份, 高发期为 3~5 月, 低发期为秋季的 7~10 月。
 - (3) 沙尘暴的日变化情况是多发时段集中在 08:00~20:00, 14:00 达到极值。
4. 内蒙古中西部地区沙尘暴的空间分布情况是沙尘暴发生频率自西向东呈降低趋势。
5. 分析了内蒙古中西部地区主要冲蚀力学参数的特征: 沙粒子特征、风沙速度和风沙浓度。

第三章 钢结构涂层冲蚀磨损机理分析

本课题实验部分由其他研究生进行研究，本文是利用该实验得出的部分实验结果和试件进行冲蚀磨损机理分析和损伤评价。

3.1 实验方法——气流挟沙喷射法

通过气流挟沙喷射法，模拟风沙环境下钢结构涂层的冲蚀磨损行为，利用扫描电子显微镜，观测钢结构涂层的冲蚀磨损微观形貌，对其冲蚀磨损机理进行分析，实验装置原理如图 3-1 所示。

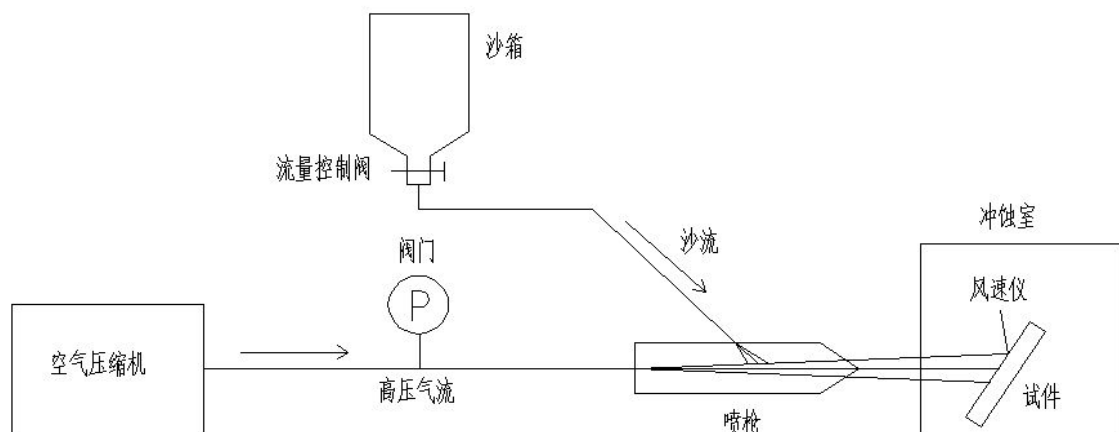


图 3-1 冲蚀磨损装置原理图

Fig.3-1 The principle diagram of the erosion device

实验装置如图 3-2 所示，其中图 (a) 为空气压缩机，图 (b) 为冲蚀磨损实验装置，图 (c) 为夹具。首先，空气压缩机产生高压气流通过导管与喷枪相连，空气压缩机的阀门可以控制风速；同时，沙子进入喷枪，通过流量控制阀控制下沙量，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。冲蚀室中试件夹在夹具上，通过角度调节杆来调节冲蚀角度。

实验所用沙粒取自库布齐沙漠，经过筛分实验得出：87%以上沙粒粒径分布在 $0.05\text{mm}\sim 0.25\text{mm}$ 之间，粒径比较单一，级配不良。



(a) 空气压缩机

(b) 冲蚀实验装置



(c) 夹具

图 3-2 冲蚀磨损实验设备

Fig.3-2 The erosion equipment

3.2 试件的制备及性能

试件为 $40\text{mm}\times 40\text{mm}$ 的普通碳素钢薄片，采用空气压缩机和喷漆枪进行喷涂，喷两道奔腾铁红醇酸防锈漆(厚度约为 0.4mm)和三道晨虹醇酸面漆(厚度约为 0.6mm)，涂层平均厚度为 1mm 。采用纳米压痕仪测量涂层的硬度为 2.1516Mpa ；利用柔韧性测定仪对涂层的柔韧性进行测定，结果为 4mm ；采用电子万能拉力机测定基材与涂层的结合强度为 2.3Mpa 。测试结果表明：涂层的硬度较低，柔韧性较好，基材与涂层的结合强度较低。

3.3 试件冲蚀前后对比

如图 3-3 所示，为冲蚀前的涂层，表面光滑平整。



图 3-3 试件

Fig.3-3 The sample

图 3-4 所示为冲蚀后的涂层，(a)、(b)、(c)三张图实验条件为：冲蚀角度 45° ，冲蚀浓度 150g/min ，冲蚀速度分别为 18m/s 、 26m/s 和 30m/s ，可以看出当风沙强度较小时，只有面漆出现轻微破坏，随着风沙强度逐渐提高，底漆则会出现破坏，甚至基材出现暴露。

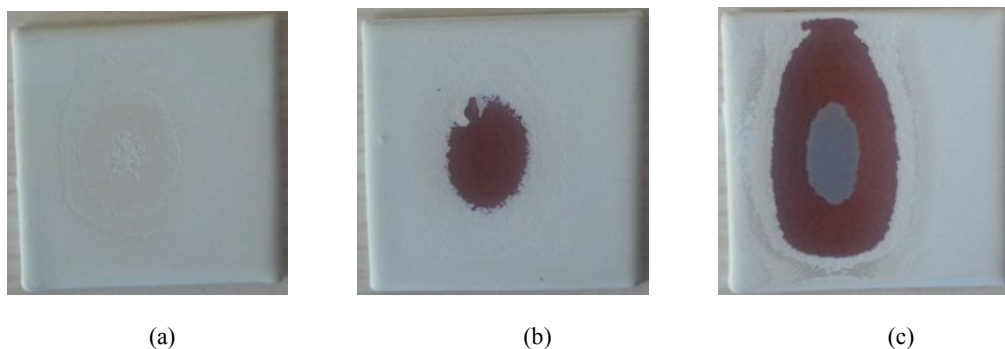


图 3-4 冲蚀后的试件

Fig.3-4 The sample after test

3.4 涂层冲蚀磨损机理分析方法——扫描电镜分析法

利用如图 3-5 所示扫描电子显微镜，观测钢结构涂层在冲蚀磨损实验前后的微观形貌，分析涂层受冲蚀磨损机理。



图 3-5 扫描电子显微镜

Fig.3-5 Scanning Electron Microscope(SEM)

3.5 涂层的原始形貌

涂层主要成分为高氯化聚乙烯。如图3-6所示为钢结构涂层在冲蚀磨损实验前的表面SEM形貌。涂层表面除较少的缺陷外，总体平整均匀密实。

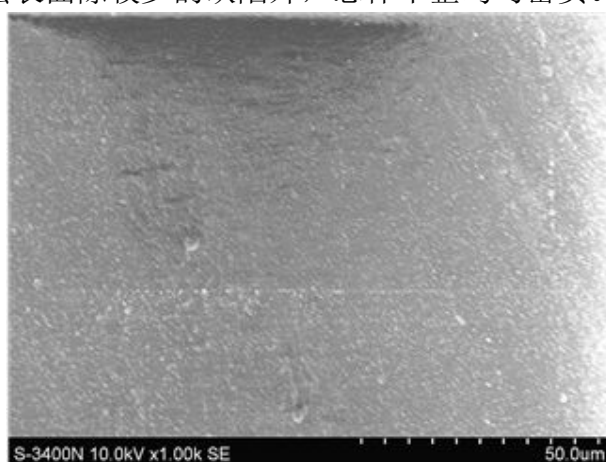


图3-6 涂层表面原始SEM形貌

Fig.3-6 SEM surface morphology of the uneroded coating

3.6 涂层冲蚀损伤机理分析

3.6.1 不同冲蚀角度条件下损伤机理分析

1. 冲蚀磨损实验条件

本实验所采用的冲蚀磨损实验条件如下：

- (1) 粒子粒径：0.05mm~0.25mm
- (2) 实验温度：室温
- (3) 冲蚀速度：23m/s
- (4) 粒子浓度：90g/min, 150g/min, 240g/min, 300g/min
- (5) 冲蚀角度：15°，30°，45°，60°，75°，90°
- (6) 冲蚀时间：12min
- (7) 冲蚀试样：40mm×40mm 钢片喷涂奔腾铁红醇酸防锈漆和晨虹醇酸面漆

2. 实验结果与冲蚀机理

在扫描电子显微镜(SEM)下观测了钢结构涂层在不同角度下的冲蚀磨损微观形貌。图 3-7(a)、(b)和(c)分别显示了冲蚀角为 15°、45°和 90°， v 为 23m/s，粒子浓度为 300g/min，冲蚀时间为 12min 条件下的冲蚀磨损微观形貌。由图可知，冲蚀角度越大，冲蚀产生的划痕和犁沟的方向性越不明显。如图 3-7(a)，在低角度 15° 时，由于粒子冲击的水平分力较大，材料表面出现了明显的水平切削划痕，划痕长而浅。如图 3-7(b)，在 45° 时，材料表面都是同一方向的犁沟状划痕，划痕短而深，行唇总是在凹坑的前部，因此尽管粒子反复冲击后，凹坑行唇发生相互重叠，划痕和犁沟的方向仍然明显，涂层的表面因被冲蚀呈现波纹状的形貌，波纹的周围有材料被挤出。如图 3-7(c)，在冲蚀角度为 90° 时，材料已经不仅仅是从凹坑的前部被挤出，而是均匀的从凹坑的四周被挤出，图正中出现了由于粒子垂直对材料进行挤压产生的冲击坑，因此，从冲击坑四周被挤出的材料互相叠加，这些被挤压出的材料被粒子不断地冲蚀疲劳以至于剥落。

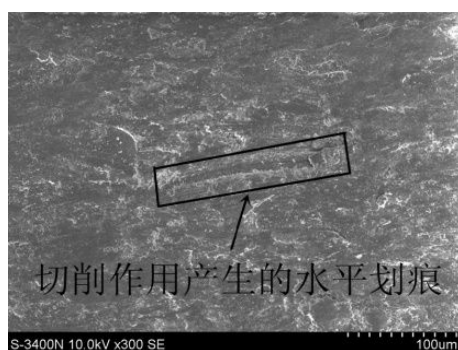
粒子以一定角度冲蚀涂层时，作用力分解为水平方向的剪切应力和竖直方向的挤压应力。前者主要造成切削和犁耕，后者主要起冲击作用并诱发裂纹。粒子以低角度冲蚀涂层时，涂层表面出现了与粒子冲蚀方向相同的犁沟和划痕，在犁沟和划痕的周围同时伴有微裂纹。这是因为，当低角度冲蚀时，水平方向的分力较大，此时水平方向的微切削作用占主导，根据 Finnie 的冲蚀微切削理论，在低冲角时，涂层的冲蚀磨

损破坏机制以微切削为主；同时，竖直方向的挤压应力使涂层表面产生微裂纹，微裂纹扩展和交叉使涂层剥落产生微破坏区。

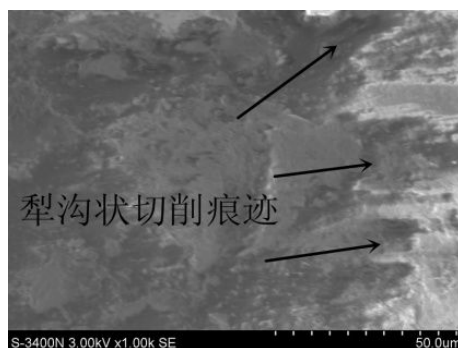
随着冲蚀角度的增大，水平方向的切削力逐渐减小，而垂直方向的挤压应力不断增大，导致切削作用不断减弱，而垂直的凿削作用逐渐增强。涂层表面由于切削作用而产生的犁沟状的划痕已不明显，此时，凿削坑和裂纹扩展产生的破坏逐渐占主导地位。

当粒子垂直入射时，涂层所受的水平切削力消失，只受垂直于表面的挤压应力。同时当粒子垂直入射时，粒子的能量损耗较少，涂层表面受到巨大的冲击力，某些区域产生了比较明显的应力集中现象^[41]，因此材料表面出现了冲蚀坑，坑的四周有材料被挤压突出。在高冲角时，柔韧性决定了材料的耐冲蚀性能，由于本实验中所用的钢结构涂层柔韧性较好，所以，高角度冲蚀时的耐冲蚀性能也较好。

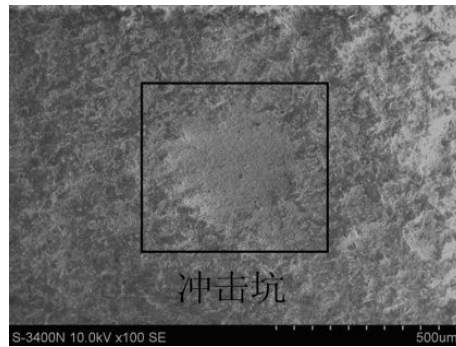
由上述分析可知，在低角度冲蚀时，水平方向的微切削作用是涂层破坏的主要原因，硬度决定了涂层的耐冲蚀性能；在高角度冲蚀时，垂直方向的挤压变形作用是涂层破坏的主要原因，柔韧性决定了涂层的耐冲蚀性能。由于本实验中钢结构涂层的硬度较低，柔韧性较好，故在高角度时涂层的耐冲蚀性能较好。



(a) 15° 时



(b) 45° 时



(c) 90° 时

图 3-7 涂层冲蚀磨损表面 SEM 形貌

Fig.3-7 SEM micrographs of eroded coating surface

3.6.2 不同冲蚀速度条件下损伤机理分析

1. 冲蚀磨损实验条件

本实验所采用的冲蚀磨损实验条件如下：

- (1) 粒子粒径：0.05mm~0.25mm
- (2) 实验温度：室温；
- (3) 冲蚀速度：13m/s, 16m/s, 18m/s, 20m/s, 23m/s, 26m/s, 30m/s
- (4) 粒子浓度：150g/min
- (5) 冲蚀角度：15° , 30° , 45° , 60° , 75° , 90°
- (6) 冲蚀时间：12min
- (7) 冲蚀试样：40mm×40mm 钢片喷涂奔腾铁红醇酸防锈漆和晨虹醇酸面漆

2. 实验结果与机理分析

图3-8(a)和(b)分别是涂层材料在速度为13m/s和30m/s, 冲蚀角度为30° , 粒子浓度为150g/min, 冲蚀时间为12min, 涂层的冲蚀磨损形貌。由3-8(a)可知, 在低速冲蚀时, 涂层表面产生很多浅而细小的犁沟状划痕, 划痕方向性较为明显, 这主要是由于低速冲蚀时材料表面受到的冲蚀磨损作用较弱。粒子以一定角度冲击涂层表面, 在垂直分力的作用下, 对材料表面产生挤压; 在水平分力的作用下在材料表面滑移留下犁沟, 最终形成一种此起彼伏的冲蚀磨损形貌。由于粒子的反复冲击, 材料表面有一定的塑性变形。由图3-8(b)可以看出, 随着速度的增加, 冲蚀磨损程度加剧, 材料表面出现明显的顺着风沙流方向的切削沟槽, 并且发生了较严重的塑性变形, 受冲击的部分被挤到邻近区域, 材料大量堆积, 其边缘在冲击粒子的反复作用下, 塑性耗尽,

最终脱落^[42]。由以上分析可知，冲蚀速度越大，粒子的动能越大，对材料造成的冲蚀磨损越严重。

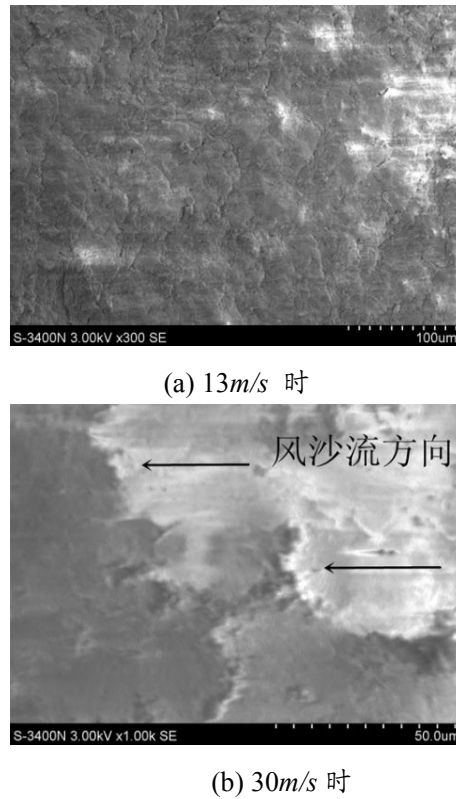


图 3-8 涂层冲蚀磨损表面 SEM 形貌

Fig.3-8 SEM micrographs of eroded coating surface

3.6.3 不同冲蚀浓度条件下损伤机理分析

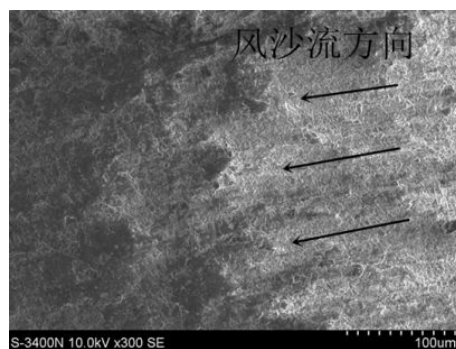
1. 冲蚀磨损实验条件

本实验所采用的冲蚀磨损实验条件如下：

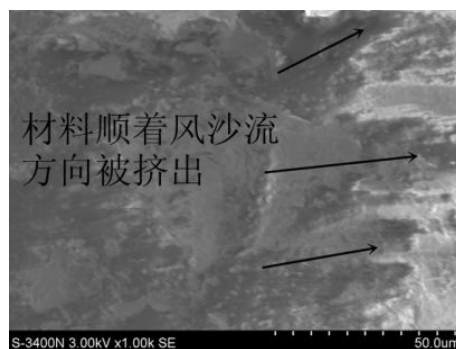
- (1) 粒子粒径：0.05mm~0.25mm
- (2) 实验温度：室温；
- (3) 冲蚀速度：23m/s
- (4) 粒子浓度：90g/min, 150g/min, 240g/min, 300g/min, 360g/min
- (5) 冲蚀角度：15°，30°，45°，60°，75°，90°
- (6) 冲蚀时间：12min
- (7) 冲蚀试样：40mm×40mm 钢片喷涂奔腾铁红醇酸防锈漆和晨虹醇酸面漆

2. 实验结果与机理分析

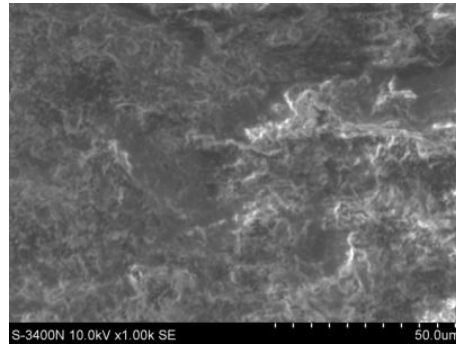
当沙尘浓度小于 $300\text{g}/\text{min}$ 时随着沙含量的增加,材料表面冲蚀磨损越来越严重,并且在 $300\text{g}/\text{min}$ 时冲蚀损伤最为严重,当沙尘浓度继续增大,达到 $360\text{g}/\text{min}$ 时,冲蚀磨损趋势减弱。如图 3-9(a)、(b)和(c)所示分别为冲蚀浓度 $90\text{g}/\text{min}$ 、 $300\text{g}/\text{min}$ 和 $360\text{g}/\text{min}$, v 为 $23\text{m}/\text{s}$, 冲蚀角度为 45° , 冲蚀时间为 12min 条件下的冲蚀磨损形貌。由(a)、(b)图对比可见,低浓度时,粒子的能量较小,材料表面出现了顺着粒子流方向的轻微切削痕迹;当浓度逐渐提高,冲蚀程度加剧,涂层表面部分材料被挤出,形成了材料的堆积。当浓度达到 $360\text{g}/\text{min}$ 时,涂层表面没有明显的破坏方向,损伤程度有所减弱,这是因为浓度过高时,气流携沙能力相对低浓度时减弱,粒子在重力作用下沿着抛物线下降,沿直线到达试件上的粒子减少,导致有效作用于试件上的沙粒子量下降。当浓度很大时,粒子之间产生相互碰撞以及回弹,削弱了冲蚀涂层的动能,粒子冲蚀涂层的作用力减弱,材料流失相对较少,以致材料的冲蚀率下降^[26],因此涂层的冲蚀磨损程度降低。



(a) $90\text{g}/\text{min}$ 时



(b) $300\text{g}/\text{min}$ 时



(c) 360g/min 时

图 3-9 涂层冲蚀磨损表面 SEM 形貌

Fig.3-9 SEM micrographs of eroded coating surface

3.7 本章小结

通过模拟风沙环境下钢结构涂层的冲蚀磨损实验，利用扫描电子显微镜(SEM)观测涂层受风沙冲蚀磨损形貌，得出如下结论：

(1) 涂层受低角度冲蚀时，微切削作用占主导，硬度起决定作用；高角度冲蚀时，挤压变形占主导，柔韧性起决定作用。涂层的硬度较低，柔韧性较好，所以高角度时涂层的耐冲蚀性能较好。

(2) 随着冲蚀速度的增加，涂层受冲蚀磨损程度越来越严重，这是因为冲蚀速度越大，粒子的动能越大，对材料造成的冲蚀磨损越严重。

(3) 在低浓度时，涂层磨损程度随浓度的增加而趋于严重；但当浓度达到一定值之后，却出现了磨损程度减弱的趋势。这是因为浓度过高时，气流挟沙能力相对低浓度时减弱，粒子在重力作用下沿着抛物线下降，沿直线到达试件上的粒子减少，导致有效作用于试件上的沙粒子量下降。当浓度很大时，粒子之间产生相互碰撞以及回弹，削弱了冲蚀涂层的动能，粒子冲蚀涂层的作用力减弱，材料流失相对较少，以致材料的冲蚀率下降，因此涂层的冲蚀磨损程度降低。

第四章 钢结构涂层受冲蚀磨损评价方法

4.1 冲蚀磨损量测量方法

利用图 4-1 所示的精密分析天平测定涂层冲蚀前后的重量差值，即为冲蚀磨损失重量。该电子天平的精度为 0.1mg ，测量误差为 0.1% 。冲蚀实验之前，对每个试件称量三次，取其平均值作为该试件的初始质量，每个冲蚀条件下进行三次实验，取其平均失重量为这一条件下的冲蚀失重量。

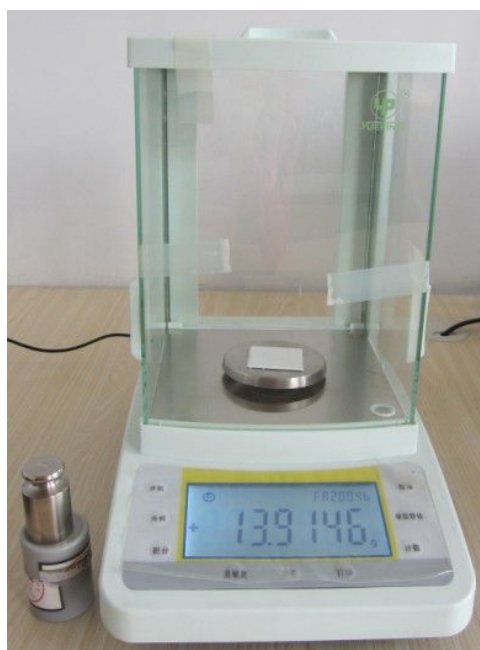


图 4-1 电子天平

Fig.4-1 Electronic Balance

4.2 冲蚀损伤程度评价公式

Bitter^[11-12]认为总冲蚀磨损失重量为切削冲蚀磨损失重量与变形冲蚀磨损失重量之和。由于典型的塑性材料最大冲蚀磨损失重量在 $20^\circ \sim 30^\circ$ 之间，典型的脆性材料最大冲蚀磨损失重量在 90° ，经实验测量，本文所用的涂层材料最大冲蚀磨损失重量在 45° ，并根据材料的冲蚀磨损形貌进行了分析，说明该材料具有介于塑性材料和脆性材料之间的冲蚀磨损特性。参考文献[33]提出的公式是适用于典型的塑性材料受冲蚀磨损程度的评价公式，因此要对该公式做出调整，即减小切削冲蚀磨损失重量

的比例(乘以调整系数 α_1)，增加变形冲蚀磨损失重量的比例(乘以调整系数 α_2)，并根据大量实验数据得出 $\alpha_1=0.95$ ， $\alpha_2=1.05$ ，提出了公式(4-1)：

$$Z = Z_1 + Z_2$$

$$Z = \alpha_1 \left[\frac{\frac{1}{2} Z_s (v \cos \beta)^2 \sin(n\beta)}{\lambda} \right] + \alpha_2 \left[\frac{\frac{1}{2} Z_s (v \sin \beta)^2}{\mu} \right] (0 < \beta \leq \beta_0) \quad (4-1a)$$

$$Z = \alpha_1 \left[\frac{\frac{1}{2} Z_s (v \cos \beta)^2}{\lambda} \right] + \alpha_2 \left[\frac{\frac{1}{2} Z_s (v \sin \beta)^2}{\mu} \right] (\beta_0 < \beta \leq \frac{\pi}{2}) \quad (4-1b)$$

式中： Z 、 Z_1 、 Z_2 分别为总冲蚀磨损失重量、切削冲蚀磨损失重量、变形冲蚀磨损失重量，单位 g ； Z_s 为沙尘质量，单位 g ； α_1 、 α_2 为调整系数， $\alpha_1=0.95$ ， $\alpha_2=1.05$ ，无量纲； β 为冲蚀角度，单位度； v 为冲蚀速度，单位 m/s ； β_0 为临界冲蚀角，当 $\beta < \beta_0$ 时，切削磨损失重量大于变形磨损失重量，当 $\beta > \beta_0$ 时，变形磨损失重量大于切削磨损失重量， $\beta_0=\pi/2n$ ； n 为水平回弹率因素(当 $\beta=\beta_0$ 时， $\sin(n\beta_0)=1$ ，则有 $n=\pi/2\beta_0$)，无量纲； λ 为切削磨蚀能耗因数，单位 m^2/s^2 ； μ 为冲蚀变形磨损能耗因数，单位 m^2/s^2 。

根据实验数据得到涂层的总冲蚀磨损失重量，但是无法区分切削冲蚀磨损失重量和变形冲蚀磨损失重量的比例。但是可以根据几个特殊角度时涂层的冲蚀磨损失重量确定 n 、 λ 、 μ 三个参数。在所有实验数据中选取出一组(实验条件：下沙量为 $300g/min$ ，冲蚀速度为 $23m/s$ ，冲蚀时间为 $12min$)，来计算参数 n 、 λ 、 μ 。当冲蚀角度 $\beta=90^\circ$ 时，涂层的切削冲蚀磨损失重量为 0 ，此时，总冲蚀磨损失重量等于变形冲蚀磨损失重量，即 $Z_1=0$ ， $Z=Z_2$ ，由公式(4-1b)得出 $\mu=1.36 \times 10^7$ ；再选取一个特殊的角度，当冲蚀角度 $\beta=75^\circ$ 时，由公式(4-1b)得出 $\lambda=1.16 \times 10^6$ ；再由 $\beta=30^\circ$ 时，由公式(4-1a)得出 $n=1.23$ 。最后根据 $\beta_0=\pi/2n$ 得出区分两种冲蚀磨损的临界冲蚀角 $\beta_0=73.17^\circ$ 。之后又选取两组数据进行验算，结果与之相符。

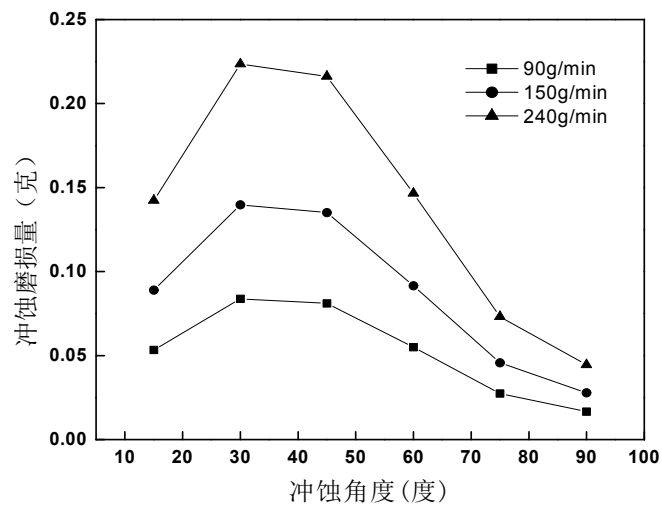
4.3 实验数据与计算数据对比分析

利用上述评价公式计算钢结构涂层在不同冲蚀条件下冲蚀磨损失重量，将计算结果与实验数据进行对比，证实该评价公式的可靠性。

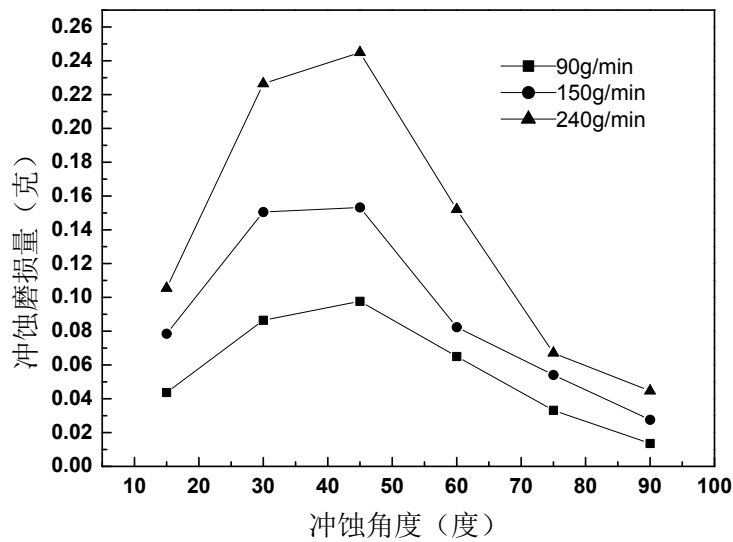
4.3.1 冲蚀角度与冲蚀磨损失重量的关系分析

如图 4-2 所示是冲蚀速度为 $20m/s$ ，冲蚀时间 $12min$ 时，不同冲蚀浓度条件下冲蚀角度与冲蚀磨损失重量的关系计算数据与实验数据的对比结果。

典型的塑性材料的最大冲蚀磨损失重量出现在 $20^{\circ} \sim 30^{\circ}$ 之间，典型的脆性材料的最大冲蚀磨损失重量出现在接近 90° 处，而本文所用涂层材料的最大冲蚀磨损失重量出现在 45° 左右，这说明，该涂层材料既没有表现出典型塑性材料的冲蚀磨损特征，也没有表现出典型脆性材料的冲蚀磨损特征，而是表现出了介于两种材料之间的冲蚀磨损特征。



(a) 计算数据

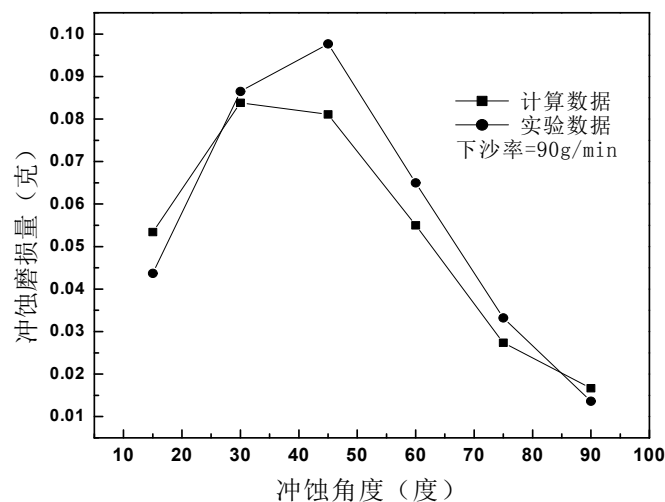


(b) 实验数据

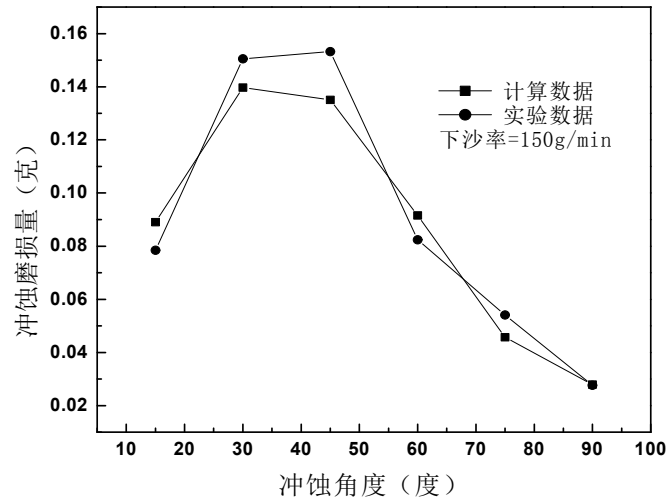
图 4-2 计算数据与实验数据对比图

Fig.4-2 Comparison of calculated data with test data

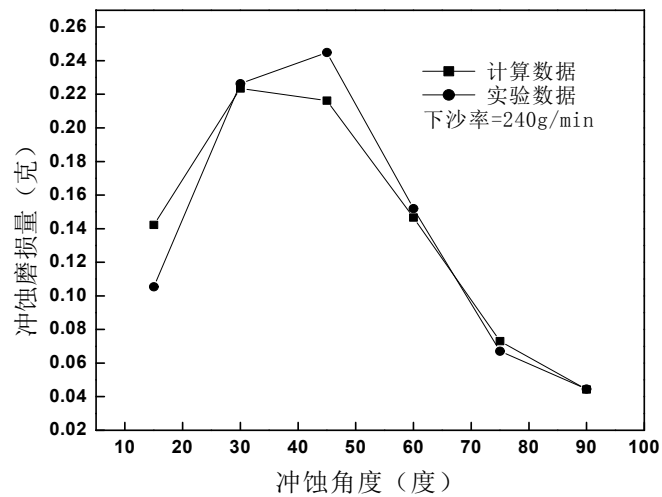
图 4-3 (a)、(b)、(c) 所示是将冲蚀浓度分别为 90g/min 、 150g/min 和 240g/min 时冲蚀磨损失重量与冲蚀角度的关系计算数据与实验数据进行对比, 由图可知, 评价公式的计算结果与实验结果基本吻合, 因此利用该评价公式进行涂层的冲蚀损伤程度评价是可靠的。



(a) 90g/min 时



(b) 150g/min 时



(c) 240g/min 时

图 4-3 计算数据与实验数据对比图

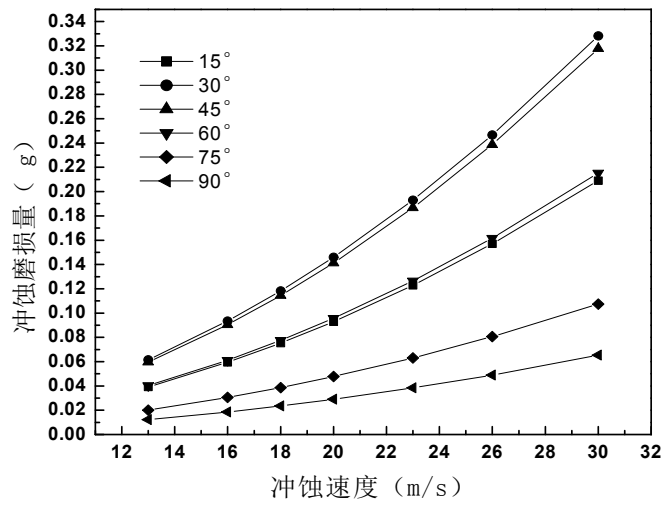
Fig.4-3 Comparison of calculated data with test data

4.3.2 冲蚀速度与冲蚀磨损失重量的关系分析

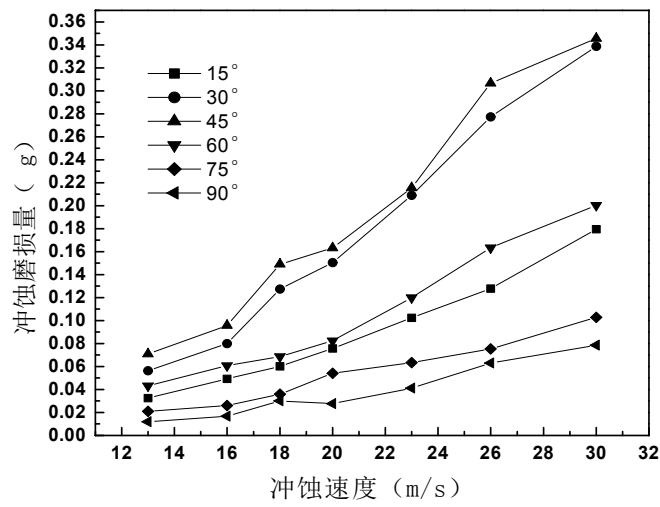
如图 4-4 所示是冲蚀浓度为 150g/min，冲蚀时间为 12min 时，不同冲蚀角度下冲蚀速度与冲蚀磨损失重量的关系计算数据和实验数据对比结果。

材料发生塑性变形和质量损失的过程是一个耗能的过程，这个能量正比于粒子冲

击材料表面时的动能，随着速度的增加，风沙粒子流的动能变大，冲蚀磨损失重量呈幂指数形式上升。



(a) 计算数据

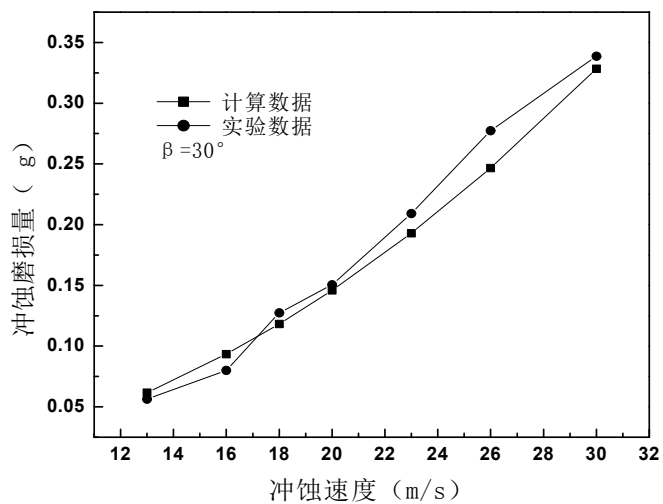


(b) 实验数据

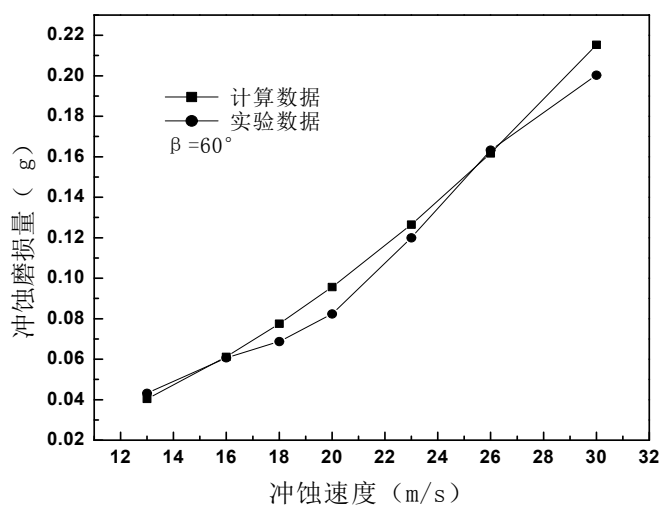
图 4-4 计算数据与实验数据对比图

Fig.4-4 Comparison of calculated data with test data

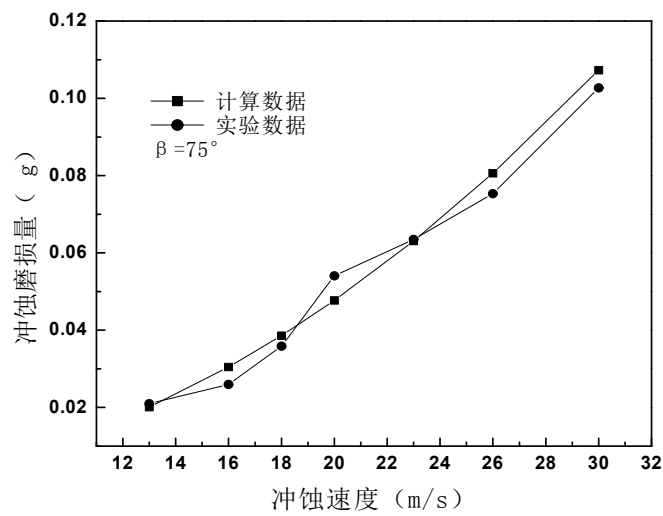
图 4-5 分别是冲蚀角度为 30°、60° 和 75° 时冲蚀磨损失重量与冲蚀速度的关系计算数据与实验数据的对比图，由图可知，由评价公式得出的计算结果与实验结果基本吻合，因此利用该评价公式进行涂层的冲蚀损伤程度评价是可靠的。



(a) 30° 时



(b) 60° 时



(c) 75° 时

图 4-5 计算数据与实验数据对比图

Fig.4-5 Comparison of calculated data with test data

4.4 本章小结

(1) 涂层材料在 45° 冲蚀角时达到最大冲蚀磨损失重量，主要是由于该涂层材料具有介于塑性材料和脆性材料之间的冲蚀磨损特性。

(2) 涂层的冲蚀磨损失重量随着冲蚀速度的增加呈幂指数的形式上升。

(3) 把冲蚀评价公式计算得出的结果与实验结果进行对比分析，结果较吻合，说明该评价公式能够较好的评价该涂层材料在风沙冲蚀环境中的冲蚀损伤程度。

第五章 冲蚀实验结果与实际工况相似性分析

5.1 利用相似性理论分析的意义

尽管实验室模拟实验用于结构耐久性研究已经很长时间，但是目前实验结果仍然不能与现场检测结果较好的联系起来^[43]，因此如何把模拟实验的结果应用于耐久性评估是钢结构耐久性研究的一个关键问题。

钢结构涂层材料受冲蚀损伤的研究方法主要分为两大类：现场模拟实验法和实验室模拟实验法。现场模拟实验法的优点是与实际的工作状态较相似，实验结果精度较高，缺点是实验周期较长、环境影响因素较大，涂层材料在自然环境中受到风吹、日晒、雨淋、温度变化等因素的影响，老化较快，所以现场模拟实验法不能准确反映出涂层材料受风沙冲蚀的特性。因此，本文选择实验室模拟实验法当中的气流挟沙喷射法，该方法具有操作简单、周期较短、参数易于控制等优点。

本实验较好的模拟了风沙环境中钢结构涂层受冲蚀磨损的行为，但是找到实验室中的模拟实验结果与实际的风沙环境对涂层冲蚀磨损之间的相关性，是使模拟实验更具现实意义的关键问题。

5.2 相似理论

为了实现耐久性的实验室模拟加速实验，必须先研究耐久性实验的相似理论。

用模型实验来模拟一个实际的物理现象，得出结论之后存在一个问题，就是将实验结果与原型统一的问题，因此，在考虑如何进行相似模拟的实验之前，应首先定义什么是相似。

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

$$v_p = \frac{dl_p}{dt_p} \quad (5-1)$$

对于模型结构有

$$v_m = \frac{dl_m}{dt_m} \quad (5-2)$$

设各同类物理量之间的比例常数为

$$C_v = \frac{v_m}{v_p}, C_l = \frac{l_m}{l_p}, C_t = \frac{t_m}{t_p} \quad (5-3)$$

式中, C_v 、 C_l 、 C_t 分别为速度、位移、时间的相似比。将式(5-3)代入式(5-2)中, 可得

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

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

比较式(5-5)和式(5-1)可知:

$$\frac{C_l}{C_v C_t} = 1 \quad (5-6)$$

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(5-6), 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(5-3)代入式(5-6)中, 整理后可得:

$$\frac{v_m t_m}{l_m} = \frac{v_p t_p}{l_p} = \text{常数} \quad (5-7)$$

式(5-7)说明彼此相似的现象中, 各物理量之间也存在着一定的关系。去掉式(5-7)中的下标, 可以得到一般形式:

$$\pi = \frac{vt}{l} \quad (5-8)$$

式(5-8)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。这个结论就是相似第一定理。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。

在做实验室模拟实验时, 在模型试件上施加相似参数、模拟原型结构的实际工作情况, 最后按相似理论确定的相似判据整理实验结果, 推算出原型结构的真实工作状态。

5.3 实验结果与实际工况对比分析

5.3.1 内蒙古中西部地区沙尘暴力学参数原始数据

经统计 1990 年~2012 年内蒙古中西部地区发生沙尘暴次数最多年份为 1990 年和 2004 年, 为 15 次, 最少是 1991 年、1994 年和 1997 年, 为 1 次, 根据气象统计^[44-46], 大范围爆发强沙尘暴的标准是三个及以上测站的风速 $\geq 20\text{m/s}$, 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部分在 30min 以内。如果考虑 100m^2 范围内对一个钢结构构件的影响, 经计算该范围内的沙尘浓度达到 46.8g/min 。

本实验中最大风速是 30m/s , 最大下沙率是 360g/min , 持续冲蚀时间为 12min 。

5.3.2 计算实例

根据动能公式:

$$W = \frac{1}{2}mv^2 \quad (5-9)$$

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 $v=30\text{m/s}$, 原型的速度 $v=20\text{m/s}$; 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:

$$C_m = \frac{m_m}{m_p} = \frac{360}{46.8} = 7.69 \quad (5-10)$$

速度相似比:

$$C_v = \frac{v_m^2}{v_p^2} = \frac{30^2}{20^2} = 2.25 \quad (5-11)$$

动能相似比:

$$C_W = \frac{W_m}{W_p} = \frac{m_m v_m^2}{m_p v_p^2} = \frac{360 \times 30^2}{46.8 \times 20^2} = 17.3 \quad (5-12)$$

根据式(5-6)验证

$$\frac{C_W}{C_m C_v} = 1 \quad (5-13)$$

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, 估算实验结果与实际工况

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:

$$\frac{W'_m}{W'_p} = \frac{12}{30} \cdot c_w = \frac{12}{30} \cdot 17.3 = 6.92 \quad (5-14)$$

即实验中风沙粒子流的动能相当于实际动能的 7 倍左右。也就是说, $12min$ 的冲蚀磨损实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 7 年时间的冲蚀磨损。

2. 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 $t=30 \times 15=450min$ 。

$$\frac{W'_m}{W'_p} = \frac{12}{450} \cdot c_w = \frac{12}{450} \cdot 17.3 = 0.46 \quad (5-15)$$

即实验中风沙粒子流的动能相当于实际动能的 0.46 倍。也就是说, $12min$ 的冲蚀磨损实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 5.5 个月时间的冲蚀磨损。

3. 近年来内蒙古中西部地区每年发生沙尘暴次数在 10 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 10 次沙尘暴时间为 $t=30 \times 10=300min$ 。

$$\frac{W'_m}{W'_p} = \frac{12}{300} \cdot c_w = \frac{12}{300} \cdot 17.3 = 0.692 \quad (5-16)$$

即实验中风沙粒子流的动能相当于实际动能的 0.692 倍。也就是说, $12min$ 的冲蚀磨损实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 8 个月时间的冲蚀磨损。

根据风速等级表 2-3, 6 级风的风速范围是 $10.9m/s \sim 13.9m/s$, 本实验中采用的风速 $13m/s$ 在这个范围内; 9 级风的风速范围是 $20.9m/s \sim 24.8m/s$, 本实验中采用的风速 $23m/s$ 在这个范围内; 11 级风的风速范围是 $28.9m/s \sim 33.6m/s$, 本实验中采用的风速 $30m/s$ 在这个范围内。由于沙尘暴年发生次数不定, 本文计算每年发生强沙尘暴 1 次、5 次、10 次和 15 次为例, 下表 5-1、5-2 和 5-3 所示为风速分别为 $13m/s$ 、 $23m/s$ 和 $30m/s$ (相当于风力等级为 6 级、9 级和 11 级), 冲蚀时间为 $12min$, 不同沙尘浓度下, 实验结果相当于实际工况中钢结构涂层受风沙冲蚀磨损的时间。

表 5-1 13m/s 时由实验结果推算的实际工况下的冲蚀时间

Tab. 5-1 The actual condition of erosion time calculated by the

experimental results at 13m/s			
沙尘浓度	沙尘暴年发生次数	模型与原型动能比	相当于实际冲蚀时间
90g/min	1 次	0.325	4 个月
	5 次	0.065	1 个月
	10 次	0.0325	10 天
	15 次	0.022	8 天
150g/min	1 次	0.54	半年
	5 次	0.11	40 天
	10 次	0.054	20 天
	15 次	0.036	13 天
300g/min	1 次	1.08	1 年
	5 次	0.216	2.5 个月
	10 次	0.108	40 天
	15 次	0.072	26 天
360g/min	1 次	1.3	1 年 4 个月
	5 次	0.26	3 个月
	10 次	0.13	47 天
	15 次	0.087	1 个月

表 5-1 中冲蚀速度为 13m/s (相当于风力等级 6 级), 当沙尘浓度为 90g/min 时, 如果按照一年发生 1 次强沙尘暴推算, 实验中的冲蚀磨损情况相当于实际工况中的钢结构涂层受到 4 个月时间的冲蚀磨损; 如果按照一年发生 15 次强沙尘暴推算, 实验中的冲蚀磨损情况相当于实际工况中的钢结构涂层受到 8 天时间的冲蚀磨损。当沙尘浓度为 360g/min 时, 如果按照一年发生 1 次强沙尘暴推算, 实验中的冲蚀磨损情况相当于实际工况中的钢结构涂层受到 1 年 4 个月时间的冲蚀磨损; 如果按照一年发生 15 次强沙尘暴推算, 实验中的冲蚀磨损情况相当于实际工况中的钢结构涂层受到 1 个月时间的冲蚀磨损。综合以上结果表明实验中的沙尘浓度越大, 由实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, 则由实验结果推算的实际工况中冲蚀磨损时间越长。

表 5-2 23m/s 时由实验结果推算的实际工况下的冲蚀时间

Tab. 5-2 The actual condition of erosion time calculated by the
experimental results at 23m/s

沙尘浓度	沙尘暴年发生次数	模型与原型动能比	相当于实际冲蚀时间
90g/min	1 次	1.02	1 年
	5 次	0.2	2.5 个月
	10 次	0.102	37 天
	15 次	0.068	25 天
150g/min	1 次	1.70	1 年 8 个月
	5 次	0.34	4 个月
	10 次	0.17	2 个月
	15 次	0.11	41 天
300g/min	1 次	3.39	3 年 5 个月
	5 次	0.678	8 个月
	10 次	0.339	4 个月
	15 次	0.226	81 天
360g/min	1 次	4.07	4 年
	5 次	0.814	1 年
	10 次	0.407	5 个月
	15 次	0.27	98 天

表 5-2 中冲蚀速度为 23m/s(相当于风力等级 9 级), 当沙尘浓度为 90g/min 时, 如果按照一年发生 1 次强沙尘暴推算, 实验中的冲蚀磨损情况相当于实际工况中的钢结构涂层受到 1 年时间的冲蚀磨损; 如果按照一年发生 15 次强沙尘暴推算, 实验中的冲蚀磨损情况相当于实际工况中的钢结构涂层受到 25 天时间的冲蚀磨损。当沙尘浓度为 360g/min 时, 如果按照一年发生 1 次强沙尘暴推算, 实验中的冲蚀磨损情况相当于实际工况中的钢结构涂层受到 4 年时间的冲蚀磨损; 如果按照一年发生 15 次强沙尘暴推算, 实验中的冲蚀磨损情况相当于实际工况中的钢结构涂层受到 98 天时间的冲蚀磨损。综合以上结果表明实验中的沙尘浓度越大, 由实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, 则由实验结果推算的实际工况中冲蚀磨损时间越长。

表 5-3 30m/s 时由实验结果推算的实际工况下的冲蚀时间

Tab. 5-3 The actual condition of erosion time calculated by the

experimental results at 30m/s			
沙尘浓度	沙尘暴年发生次数	模型与原型动能比	相当于实际冲蚀时间
90g/min	1 次	1.73	1 年 9 个月
	5 次	0.346	4 个月
	10 次	0.173	2 个月
	15 次	0.12	42 天
150g/min	1 次	2.88	3 年
	5 次	0.576	7 个月
	10 次	0.288	3.5 个月
	15 次	0.192	70 天
300g/min	1 次	5.77	5 年 9 个月
	5 次	1.154	1 年 2 个月
	10 次	0.577	7 个月
	15 次	0.38	4.6 个月
360g/min	1 次	6.92	7 年
	5 次	1.38	1 年 5 个月
	10 次	0.692	8 个月
	15 次	0.46	5.5 个月

表 5-3 中冲蚀速度为 30m/s (相当于风力等级 11 级), 当沙尘浓度为 90g/min 时, 如果按照一年发生 1 次强沙尘暴推算, 实验中的冲蚀磨损情况相当于实际工况中的钢结构涂层受到 1 年 9 个月时间的冲蚀磨损; 如果按照一年发生 15 次强沙尘暴推算, 实验中的冲蚀磨损情况相当于实际工况中的钢结构涂层受到 42 天时间的冲蚀磨损。当沙尘浓度为 360g/min 时, 如果按照一年发生 1 次强沙尘暴推算, 实验中的冲蚀磨损情况相当于实际工况中的钢结构涂层受到 7 年时间的冲蚀磨损; 如果按照一年发生 15 次强沙尘暴推算, 实验中的冲蚀磨损情况相当于实际工况中的钢结构涂层受到 5.5 个月时间的冲蚀磨损。综合以上结果表明实验中的沙尘浓度越大, 由实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, 则由实验结果推算的实际工况中冲蚀磨损时间越长。

由表 5-1、5-2 和 5-3 对比可知, 实验中所采用的风速越大, 则由实验结果推算的实际工况中冲蚀磨损时间越长。

下表 5-4 所示为风速 30m/s(相当于风力等级 11 级), 下沙率 360g/min, 不同冲蚀时间下实验结果相当于实际工况中钢结构涂层受风沙冲蚀磨损的时间。

表 5-4 不同冲蚀时间下由实验结果推算的实际工况下的冲蚀时间

Tab. 5-4 The actual condition of erosion time calculated from the experimental

results under different erosion time			
实验冲蚀时间	沙尘暴年发生次数	模型与原型动能比	相当于实际冲蚀时间
5min	1 次	2.88	2 年 11 个月
	5 次	0.576	7 个月
	10 次	0.288	3.5 个月
	15 次	0.192	69 天
10min	1 次	5.77	5 年 9 个月
	5 次	1.154	1 年 2 个月
	10 次	0.577	7 个月
	15 次	0.38	4.6 个月
12min	1 次	6.92	7 年
	5 次	1.384	1 年 5 个月
	10 次	0.692	8 个月
	15 次	0.46	5.5 个月
15min	1 次	8.65	8 年 8 个月
	5 次	1.73	1 年 9 个月
	10 次	0.865	10 个月
	15 次	0.58	7 个月
20min	1 次	11.54	11 年 6 个月
	5 次	2.308	2 年 4 个月
	10 次	1.154	1 年 2 个月
	15 次	0.77	9 个月

由表 5-4 可知, 实验中冲蚀时间为 5min 时, 如果按照一年发生 1 次强沙尘暴推算, 实验中的冲蚀磨损情况相当于实际工况中的钢结构涂层受到 2 年 11 个月时间的冲蚀磨损; 如果按照一年发生 15 次强沙尘暴推算, 实验中的冲蚀磨损情况相当于实际工况中的钢结构涂层受到 69 天时间的冲蚀磨损。实验中冲蚀时间为 20min 时, 如果按照一年发生 1 次强沙尘暴推算, 实验中的冲蚀磨损情况相当于实际工况中的钢结构涂层受到 11 年 6 个月时间的冲蚀磨损; 如果按照一年发生 15 次强沙尘暴推算, 实验中的冲蚀磨损情况相当于实际工况中的钢结构涂层受到 9 个月时间的冲蚀磨损。

由上述分析可知, 实验中冲蚀时间越长, 则由实验结果推算的实际工况中冲蚀磨损时间越长。

5.4 本章小结

将实验结果与实际工况对比分析，得出：

(1) 由于沙尘暴每年发生的频率、次数不定，本次实验中最高浓度、最大速度的冲蚀磨损结果相当于内蒙古中西部强沙尘暴密集区中的钢结构涂层受到 5.5 个月到 7 年的冲蚀磨损。按照该地区近年来沙尘暴每年发生 10 次左右的频率，则相当于位于该地区的钢结构涂层受到 8 个月时间的冲蚀磨损。

(2) 实验中的沙尘浓度越大、所采用的风速越大，每年发生沙尘暴的次数越少，则由实验结果推算的实际工况中钢结构涂层受风沙冲蚀磨损的时间越长。

第六章 结论与展望

6.1 结论

1. 通过模拟钢结构涂层受风沙冲蚀实验, 可知, 涂层受低角度冲蚀时, 微切削作用占主导, 硬度起决定作用; 高角度冲蚀时, 挤压变形占主导, 柔韧性起决定作用。涂层的硬度较低, 柔韧性较好, 所以高角度时涂层的耐冲蚀性能较好。

2. 无论其他实验条件如何, 涂层材料均在冲蚀角为 45° 时冲蚀磨损破坏程度最为严重, 冲蚀磨损失重量也达到最大, 主要是由于该涂层材料具有介于塑性材料和脆性材料之间的冲蚀磨损特性。

3. 随着速度的增加, 涂层冲蚀磨损破坏程度越来越严重, 冲蚀磨损失重量也越来越大, 这是由于风沙粒子流的速度决定其动能, 粒子的动能越大, 对涂层材料的冲蚀磨损越严重。

4. 分析风沙浓度与涂层冲蚀磨损程度的关系可知: 在浓度低于 $300\text{g}/\text{min}$ 时, 风沙的浓度越大, 涂层的冲蚀磨损越严重; 当浓度高于 $300\text{g}/\text{min}$ 时, 却出现了冲蚀磨损程度减弱的趋势。

5. 把评价公式计算结果与实验结果进行了对比分析, 结果表明, 该评价公式能够较好的评价该涂层材料在风沙冲蚀环境中的冲蚀磨损程度。

6. 由于沙尘暴每年发生的频率、次数不定, 本实验结果相当于内蒙古中西部强沙尘暴密集区中的钢结构涂层受到 5.5 个月到 7 年的冲蚀磨损。按照该地区近年来沙尘暴每年发生 10 次左右的频率, 该实验结果相当于位于该地区的钢结构涂层受到 8 个月时间的冲蚀磨损。

7. 实验中的沙尘浓度越大、所采用的风速越大, 每年发生沙尘暴的次数越少, 则由实验结果推算的实际工况中钢结构涂层受风沙冲蚀磨损的时间越长。

6.2 展望

1. 本文对持续风沙粒子流冲蚀钢结构涂层进行了模拟实验, 但是未能模拟瞬间大风对涂层材料的冲蚀磨损情况, 下一步应该对这种情况进行进一步的研究。

2. 由于实验时间较短，而实际工况下服役时间很长，本文简单的研究了实验室加速模拟实验与实际工况的关联性，下一步应进行更系统的研究。
3. 本文只研究了一种涂层的冲蚀磨损机理，下一步应将该涂层的冲蚀磨损与其他涂层进行对比研究。

参 考 文 献

- [1] 黄宁, 郑晓静. 风沙运动力学机理研究的历史、进展与趋势[J]. 力学与实践. 2007, 29(4): 10-16
- [2] 高涛, 徐永福, 于晓. 内蒙古沙尘暴的成因、趋势及其预报[J]. 干旱区资源与环境. 2004, 18(1): 220-230
- [3] 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
- [4] 李彰俊, 姜学恭, 程丛兰. 内蒙古中西部沙源地影响沙尘暴扩展过程的数值模拟研究[J]. 中国沙漠. 2007, 27(5): 851-858
- [5] 陈磊, 顾润源, 姜学恭, 周伟灿, 宋桂英. 内蒙古中西部一次强沙尘暴天气过程的诊断分析 I——背景场分析[J]. 干旱区资源与环境. 2013, 27(1): 137-141
- [6] 李海英, 徐彦慧, 高涛. 冬季环流特征对内蒙古中西部春季沙尘暴的影响及预测[J]. 内蒙古气象. 2007(1): 4-7
- [7] 高涛, 徐永福, 李海英等. 近 40 年内蒙古沙尘暴呈减少趋势的气候成因分析[J]. 气象. 2005, 31(专刊): 10-17
- [8] 刘家浚. 材料磨损原理及其耐磨性[M]. 北京: 清华大学出版社. 1993
- [9] Finnie I. Erosion of surfaces by solid particles[J]. Wear. 1960(3): 87-103
- [10] Finnie I. Wolak. Erosion of metals by solid particles[J]. ASTM J. Mater. 1967(2): 687-700
- [11] Bitter J G A. A study of erosion phenomena (Part I) [J]. Wear. 1963, 6(1): 5-21
- [12] Bitter J G A. A study of erosion phenomena (Part II) [J]. Wear. 1963, 6(3): 169-190
- [13] Levy A. Erosion of surfaces by solid particles[J]. Wear of Materials. 1981: 233-235
- [14] Sheldon G. L. , Finnie I. On the ductile behavior of nominally brittle materials during erosive cutting[J]. Trans ASME. 1966(88B): 387-392
- [15] Tilly G. P. . Two stage mechanism of ductile erosion[J]. Wear. 1973(23): 87-96
- [16] J John Rajesh, J. Bijwe, B Venkataraman, U. S. Tewari. Effect of impinging velocity on the erosive wear behaviour of Polyamides[J]. Tribology International. 2004(37): 219-226
- [17] 王武孝, 袁森. 铸造法制备颗粒增强金属基复合材料的研究进展[J]. 铸造技术. 2001(2): 42-45
- [18] 李诗卓, 董祥林. 材料的冲蚀磨损与微动磨损[M]. 北京: 机械工业出版社. 1987
- [19] J. R. Zhou , S. Bahadur. Effect of blending of silicon carbide particles in varying sizes on the erosion of Ti-6Al-4V[J]. Wear. 1989, 132: 235-246

- [20] Ballout Y. , Mathis J. A. , Talia. J. E. Solid particle erosion mechanism in glass[J]. Wear. 1996, 196:263-269
- [21] Liebhard M. , Levy A..Effect of erodent particle characteristics on the erosion of metals[J]. Wear. 1991, 151: 381-390
- [22] Misra A. , Finnie I. On the size effect in abrasive and erosive wear[J]. Wear. 1981, 65: 359-373
- [23] Balan K. P. , Reddy A. V. , Joshi V. Influence of microstructure on the erosion behaviour of castirons[J]. Wear. 1991, 145: 283-296
- [24] Foley T. , Levy A. V. Erosion of heat-treated steels[J]. Wear. 1983, 91: 45-64
- [25] Singh T. , Tiwari S. N. , Sundararajan G. . Room temperature erosion behaviour of 304, 316 and 410 stainless steels[J]. Wear. 1991, 145: 77-100
- [26] 董刚, 张九洲. 固体粒子冲蚀磨损研究进展[J]. 材料科学与工程学报. 2003, 21(2): 301-312
- [27] 马颖, 任峻, 李元东, 等. 冲蚀磨损研究的进展[J]. 兰州理工大学学报. 2005, 31(1): 22-25
- [28] BALAN K P. REDDY A V JOSHI V, et al. The influence of microstructure on the erosion behavior of cast irons[J]. Wear. 1991(145):283-296
- [29] MCLP, CABS S G. Effect of microstructure on the erosion of steel by solid particles[J]. H Conrad Wear. 1985(105): 257-277
- [30] LEVYAV. The erosion of structure alloys , ceramets and in situoxide scales on steels[J]. Wear. 1988(127): 31-52
- [31] Friedrieh K. Erosion of Polymers material[J]. Sci. 1986(21): 3317
- [32] Walley S. M. , Field J. E. , Scullion I. M. , Bell D. . Dynamix strength propertyes and solid particle erosion behavior of a range of polymers , Proc. 7th Int. Conf. On erosion by liquid and solid impact, Cavendish Laboratory, Cambridge. p. 59
- [33] 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
- [34] 邱新法, 曾燕, 缪启龙. 我国沙尘暴的时空分布规律及其源地和移动路径[J]. 地理学报. 2001, 56(3): 316-322
- [35] 杨艳, 王杰, 田明中, 等. 中国沙尘暴分布规律及研究方法分析[J]. 中国沙漠. 2012, 32(2): 465-470
- [36] 高涛. 内蒙古沙尘暴的调查事实、气候预测因子分析和春季沙尘暴预测研究(上)[J]. 内蒙古气象. 2008, 2: 3-6
- [37] 吴占华, 任国玉. 我国北方区域沙尘天气的时间特征分析[J]. 气象科技. 2011, 35(1): 96-99

- [38] 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
- [39] 赵旋, 李耀辉, 康富贵. “4.24”民勤特强沙尘暴过程初步分析[J]. 干旱区资源与环境. 2012, 26(6): 40-46
- [40] 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
- [41] 董刚, 白万金, 张九渊, 等. 几种工程材料的冲蚀行为的研究[J]. 材料科学与工程学报. 2004, 22(6): 909-913
- [42] 代廷海, 刘炳, 张东芹, 等. 不同试验参数下铝锰基复合材料冲蚀磨损性能研究[J]. 铸造技术. 2010, 31(8): 1017-1020
- [43] 金立兵, 金伟良, 王海龙, 等. 多重环境时间相似理论及其应用[J]. 浙江大学学报(工学版). 2010, 44(4): 789-797
- [44] 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
- [45] 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
- [46] 冯鑫媛, 王武功, 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

致 谢

感谢内蒙古工业大学能够接纳我，给我一个继续深造的机会，在研究生就读期间，使我的学业和人生得到了提高。

首先要向我的导师郝负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，郝老也给予了我很多关怀和建议，使我受益匪浅，在课题研究过程中，郝老师也给予了我很多帮助，教导、帮助我解决了很多问题，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建设性的意见，并提供了很大的帮助，正是由于白老师的热心帮助，才使得实验顺利完成。

感谢我的同学段国龙，在共同完成课题的三年时间里，我们互相帮助和鼓励，圆满完成了实验任务。

在生活和学习中，要感谢我的舍友闫珺、丁一然、王智锐同学的关心、帮助和三年来的陪伴，感谢我的师妹朱敏侠、师弟冯玉江、宿廷，在撰写论文的过程中给了我很多灵感。同时也感谢 2011 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《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)和内蒙古自治区自然科学基金项目《风沙环境下钢结构涂层耐久性劣化机理研究》(批准号: 2009 MS0706)的资助,取得以下成果:

发表论文:

- [1] 郝负洪,任莹,段国龙,朱敏侠. 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(中文核心期刊/EI 收录期刊)(已录用)
- [2] 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(中文核心期刊/EI 收录期刊)(已录用)
- [3] 郝负洪,邢永明,杨诗婷,段国龙,任莹. 风沙环境下钢结构涂层的冲蚀磨损力学性能研究[J]. 应用力学学报, 2013, 30(3): 350-355