



分类号:

学校代码: 10128

UDC:

学 号: 20111100294

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: 风沙环境下钢结构涂层的冲蚀磨损实验研究

英文题目: Experimental Research on Erosion Wear of
Steel-structure Coating in Sandstorm

研 究 生: 段国龙

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：郭国龙

指导教师签名：郭国龙

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：郭国龙

指导教师签名：郭国龙

日期：2014.6.12

日期：2014.6.12

摘 要

内蒙古中西部地区是我国北方地区沙尘暴高活动区的中心地段，该地区的桥梁、通信塔和输电塔架等钢结构体系表面的涂层受风沙冲蚀严重，涂层破坏后，钢结构表面外露锈蚀，使钢结构体系的耐久性和安全性下降，给国民经济造成了巨大的损失。本文在分析内蒙古中西部地区风沙环境特征的基础上，进行了钢结构涂层性能实验和理论计算分析，研究了钢结构涂层的力学性能、冲蚀磨损性能及摩擦学性能。本研究是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）的一部分，具体研究内容如下：

1. 对内蒙古中西部地区沙尘暴气象及其冲蚀力学参数进行了分析。基于内蒙古中西部地区的沙尘气象资料，分析了中国沙尘暴的移动路径、内蒙古中西部地区沙尘暴的时空分布特征以及风沙的冲蚀力学参数（风沙流粒子特征、风沙流速度和风沙流浓度）。

2. 制备了钢结构涂层，测定了钢结构涂层的力学性能。采用喷涂设备，制备了钢结构涂层；采用千分尺测定了钢结构涂层的厚度；利用测定体积和质量的传统方法计算了涂层的密度；采用铅笔硬度法测定了涂层的硬度；利用柔韧性测定仪测定了钢结构涂层的柔韧性；利用附着力等级测定仪测定了钢结构涂层的附着力等级；采用电子拉力机测定了涂层/基材的结合强度。

3. 利用能模拟内蒙古中西部地区风沙环境冲蚀的气流挟沙喷射法，在不同的冲蚀速度、角度、浓度和时间等风沙冲蚀力学参数下，进行了风沙环境下钢结构涂层的冲蚀实验，研究了钢结构涂层冲蚀磨损失重量在不同风沙冲蚀力学参数下的变化规律，分析其抗冲蚀磨损性能。利用扫描电镜（SEM）观测了钢结构涂层的微观失效表面，分析其冲蚀损伤机理。

4. 研究了钢结构涂层的摩擦学性能。采用摩擦系数仪测试了钢结构涂层的动、静摩擦系数；采用摩擦磨损仪测试了钢结构涂层的耐磨性；评价了钢结构涂层的摩擦学性能；运用冲蚀率的摩擦学定量预估模型，利用冲蚀实验结果，计算了钢结构涂层的冲击摩擦系数，分析了涂层的冲击摩擦性能。

最后，对全文的具体试验研究和理论分析计算进行了总结，并讨论了今后进一步

研究的方向。

关键词：风沙；冲蚀磨损；钢结构涂层；微切削；冲击摩擦系数

Abstract

The central and western region of Inner Mongolia is in the center of the high-activity area in Northern China. In this area, the steel-structure coating of bridge, communication tower and transmission is seriously eroded by sandstorms. After the coating damage, steel-structure surface exposed and rusted, led to the durability and security of steel-structure system decline, caused a huge loss to national economy. The thesis based on analyzing sandstorm environmental characteristics in the central and western region of Inner Mongolia, carried out the coating performance test and theoretical analysis, studied on the mechanical properties, erosion wear properties and tribological performance of the steel-structure coating. This subject is a part of national natural science fund project (Grant no.11162011) and Inner Mongolia autonomous region of natural science fund project (Grant no.2009 MS0706); Specific content as follows:

1. Analyzing the sandstorm weather and erosion mechanics parameters in the central and western region of Inner Mongolia. Based on the sandstorm weather information in the central and western region of Inner Mongolia; Analyzed the sandstorm moving path in China, the space-time distribution features and erosion mechanics parameters (sand particle characteristics, sand speed, sand concentration) of sandstorm.

2. Preparing the steel-structure coating, and determination of the mechanical properties of the steel-structure coating. Use coating spraying equipment to make the steel-structure coating. Measure the thickness of the steel-structure coating by micrometer; By the traditional method to measure volume and quality of the coating to calculate the density; Pencil hardness method is used to measure the hardness of the coating; Using flexibility tester to test the flexibility of the coating; The adhesion of the steel-structure coating is measured by adhesion tester; By the electronic tensile machine to test the coating/substrate bonding strength.

3. Using airflow jet with sand which can simulate the sandstorm environment of the central and western regions of Inner Mongolia to conduct erosion experiment of the steel-structure coating in different erosion speed, erosion angle, erosion concentration and erosion time. Study on erosion mass loss variation at different sand erosion mechanics parameters, and analyze the erosion wear resistance. Using scanning electron microscopy

(SEM) observed the micro failure surface of the steel-structure coating, and analyzed its erosion damage mechanism.

4. Studied the tribological properties of the steel-structure coating. Using friction coefficient tester to test the dynamic and static friction coefficient; Using friction wear tester to test the wear resistance of the steel-structure coating; Evaluation the tribological performance of the steel-structure coating; Using the tribology quantitative forecast model of erosion rate, through erosion experiment results to calculate the impact friction coefficient of the steel-structure coating, analyzed the impact friction performance of the coating.

Finally, summarize the experimental study and theoretical calculation of the thesis, and discusses the further research directions.

Key words: *Sandstorm; Erosion wear; Steel-structure coating; Micro-cutting; Impact friction coefficient*

目 录

第一章 绪论.....	1
1.1 研究的背景及意义.....	1
1.2 冲蚀磨损的定义及其影响因素.....	2
1.2.1 冲蚀磨损的定义.....	2
1.2.2 冲蚀磨损的影响因素.....	2
1.3 国内外冲蚀磨损研究现状.....	4
1.3.1 固体粒子冲蚀磨损实验装置.....	4
1.3.2 风沙两相流冲蚀磨损研究现状.....	6
1.4 涂层的摩擦学研究综述.....	6
1.5 本文的研究内容.....	7
1.6 课题的创新点.....	7
第二章 内蒙古中西部地区沙尘气象及冲蚀力学参数.....	9
2.1 沙尘暴的移动路径.....	10
2.2 沙尘暴的时空分布特征.....	10
2.2.1 沙尘暴的时间分布.....	10
2.2.2 沙尘暴的空间分布.....	13
2.3 风沙的主要冲蚀力学参数.....	14
2.3.1 风沙流粒子特征.....	14
2.3.2 风沙流速度.....	14
2.3.3 风沙流的浓度.....	14
2.4 本章小结.....	15
第三章 钢结构涂层的制备及其物理力学性能测定.....	16
3.1 钢结构涂层的制备.....	16
3.1.1 试件材料的选择.....	16
3.1.2 涂层的喷涂.....	16
3.1.3 涂层的制备.....	17

3.2 钢结构涂层的物理力学性能指标的测定.....	17
3.2.1 涂层厚度和密度的测定.....	18
3.2.2 涂层的硬度测定.....	19
3.2.3 涂层的柔韧性测定.....	20
3.2.4 涂层附着力等级的测定.....	20
3.2.5 涂层/基材的结合强度测定.....	21
3.3 本章小结.....	22
第四章 风沙环境下钢结构涂层的冲蚀实验研究.....	23
4.1 实验方法及实验装置.....	23
4.1.1 实验方法.....	23
4.1.2 实验装置.....	23
4.2 风沙冲蚀磨损性能的评价方法分析.....	24
4.3 风沙流冲蚀力学参数的分析及设置.....	25
4.3.1 沙粒的特征分析.....	25
4.3.2 风沙流的冲蚀速度设定.....	28
4.3.3 风沙流的冲蚀角度设定.....	29
4.3.4 风沙流浓度控制.....	30
4.4 钢结构涂层冲蚀磨损实验研究.....	30
4.4.1 风沙流冲蚀速度对涂层冲蚀磨损的影响.....	31
4.4.2 风沙流冲蚀角度对涂层冲蚀磨损的影响.....	34
4.4.3 风沙浓度对涂层冲蚀磨损的影响.....	36
4.4.4 风沙冲蚀时间对涂层冲蚀磨损的影响.....	37
4.5 本章小结.....	41
第五章 钢结构涂层的摩擦学性能分析.....	43
5.1 摩擦学的基本概念.....	43
5.2 钢结构涂层的摩擦性能分析.....	43
5.2.1 涂层动、静摩擦系数的测试.....	43
5.2.2 涂层的耐磨性测试.....	44
5.2.3 涂层的摩擦性能综合评价.....	45
5.3 沙粒子对钢结构涂层表面的冲击摩擦研究.....	45

5.3.1 冲击摩擦系数.....	45
5.3.1 涂层冲蚀率的摩擦学定量预估模型.....	45
5.3.2 钢结构涂层的冲击摩擦系数的分析.....	46
5.4 本章小结.....	48
第六章 结论与展望.....	50
6.1 结论.....	50
6.2 展望.....	51
参 考 文 献.....	52
致 谢.....	57

第一章 绪论

1.1 研究的背景及意义

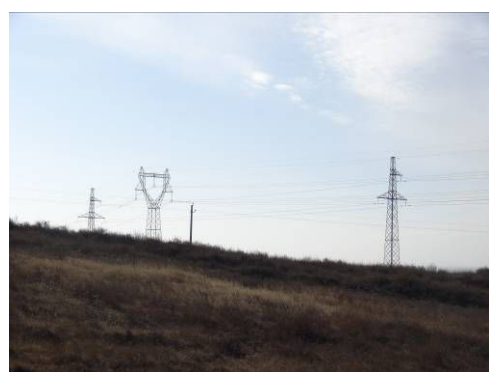
内蒙古中西部地区属于干旱、半干旱地区，该地区自西向东分布着 6 大沙漠和沙地（巴丹吉林沙漠、腾格里沙漠、乌兰布和沙漠、库布齐沙漠、毛乌素沙地和浑善达克沙地）。由于常年遭受来自西伯利亚和蒙古国冷空气的入侵，该地区大风较多，为沙尘暴的形成提供了动力条件，这些因素使得内蒙古中西部地区成为我国北方地区沙尘暴高活动区的中心地段。该地区的基础设施长期遭受风沙环境的侵蚀作用，尤其是建在沙漠周边的桥梁、通信塔和输电塔架等钢结构体系（如图 1-1）受到的影响更为显著。这种影响主要体现为风沙流粒子对钢结构表面涂层的冲蚀磨损破坏，使涂层较早的失效。钢结构表面失去涂层的防护作用之后，外露锈蚀，造成钢结构体系的安全性和耐久性下降。

近代工业发展迅速，钢结构在大型工业厂房、桥梁、输电塔和通信塔等不同领域得到广泛的应用，钢结构体系的耐久性问题已经引起了工程界和学术界的普遍关注。据统计，美国全年投入约 700 亿美元来解决工程耐久性不足的问题；中国每年由于摩擦、磨损损失近 600 亿元。因此，深入研究冲蚀磨损，是节约能源的必然要求，也是我国经济向前发展的亟待解决的一个关键问题。

冲蚀磨损是造成材料损失和设备破坏的一个重要的原因^[1-4]，目前关于风沙的冲



(a) 沙漠周边的通信塔



(b) 沙漠周边的输电塔

图 1-1 沙漠周边的钢结构

Fig.1-1 The steel structure surrounding desert

蚀磨损研究主要集中在仿生功能表面^[5-7]的抗冲蚀磨损，对于工程材料的冲蚀磨损主

要集中在含沙水流对水工混凝土材料的冲蚀磨损^[8-10]。而对于风沙环境（气固两相流）下，工程结构材料的冲蚀磨损性能的研究还不够深入，可查阅的资料也较少^[11-14]。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，采用气流挟沙喷射法，组建了一套模拟风沙环境的实验系统，研究了不同风沙冲蚀力学参数下钢结构涂层的冲蚀磨损失重量变化规律，分析其抗冲蚀磨损性能；采用扫描电镜（SEM）观测钢结构涂层的微观失效表面，分析其冲蚀损伤机理；最后，采用摩擦学性能实验和理论计算分析，分析了钢结构涂层的摩擦学性能。研究结果将为涂层的设计、应用和防护提供依据。

1.2 冲蚀磨损的定义及其影响因素

冲蚀磨损一词由来已久，不同学者在不同时期对冲蚀磨损有着不同的定义，本文在查阅国内外资料的基础上定义了冲蚀磨损并且总结了其影响因素。

1.2.1 冲蚀磨损的定义

挟带松散细小颗粒的流体，以一定的速度和角度冲击靶材，造成靶材发生损耗和破坏的现象或过程^[15-16]为冲蚀磨损。定义中细小颗粒粒径一般小于 $1000\mu\text{m}$ ，冲蚀速度一般在 550m/s 内^[17]，流体可以是气流，也可以是液体流。若为气流携带固体颗粒冲蚀则称之为喷砂型冲蚀，如本文中所探究的风沙冲蚀钢结构涂层则为喷砂型冲蚀；若液体流携带固体颗粒冲蚀则为泥浆型冲蚀^[18]，如河流中泥沙冲蚀水轮机的过流部件即为此类冲蚀磨损。

1.2.2 冲蚀磨损的影响因素

在实际生活当中，冲蚀磨损存在于不同环境或场所，冲蚀磨损受冲蚀系统工况的影响较大，所以影响冲蚀磨损的因素也较多。目前针对影响冲蚀磨损的因素我们主要从三个方面来考虑，即磨粒的特性^[19]、材料特性^[20-21]和环境因素^[22]。

1. 磨粒特性

(1) 磨粒的形状

磨粒形状主要是指多角粒子和球状粒子，研究表明球状粒子造成的冲蚀失重远不及多角粒子，一般认为多角粒子比球状粒子能产生更多的切削或犁削^[23-24]。

(2) 磨粒粒度

磨粒粒度不同时，塑性材料和脆性材料所受到的冲蚀磨损效应不同。研究表明^[25-27]，在塑性材料的冲蚀磨损中，材料的冲蚀率随粒子粒度呈现一定的变化规律，即所谓的“粒度效应”。粒子粒度超过某一临界值 (D_c) 后，冲蚀率趋于稳定，不随粒度发生变化；而脆性材料的冲蚀率随粒度增加不断上升，不存在临界值 D_c 。

(3) 磨粒硬度

磨粒硬度应结合材料硬度来反映硬度对材料冲蚀磨损的影响，磨粒与材料表面的硬度比 (H_p/H_t) 决定了材料的冲蚀磨损率。对于塑性材料而言，董刚^[28]认为当 $H_p/H_t < 1.2$ 时，随着硬度比的减小，冲蚀磨损率呈下降趋势；当 $H_p/H_t > 1.2$ 时，塑性材料的冲蚀率趋于稳定。

2. 材料特性

(1) 加工硬化

金属材料经过冷变形，塑性、韧性下降，强度和硬度有所提高的过程为加工硬化。加工硬化改变了材料的物理力学性质进而影响到材料的抗冲蚀性能。

(2) 材料组织

材料组织对冲蚀磨损的影响，前人也做了大量的研究，任振安^[29]等学者研究了高铬铸铁堆焊层组织的耐冲蚀磨损性能，当堆焊层为亚共晶组织时，硬度低，耐冲蚀磨损性能差；而共晶堆焊层硬度高，耐冲蚀性能有所提高。但是 Cabe^[30]等人研究表明微观组织的改变不及硬度对材料抗冲蚀磨损能力的影响那么明显。

3. 环境因素

(1) 冲蚀速度

冲蚀率与冲蚀速度存在指数关系，所以冲蚀速度对冲蚀磨损影响很大。目前认同的规律有^[31]：

$$W = KV^n \quad (1-1)$$

式中 W 为冲蚀率， V 为冲击速度， K 和 n 均为常数。魏秀鹏，陈家富^[32]的研究中表明，粒子冲蚀速度对冲蚀率的影响存在低速和高速两个阶段。低速冲蚀时，粒子的能量不高，粒子在与靶材面碰撞后，水平方向的速度很小，靶材面上几乎没有长的切削和犁沟。而高速冲击时，速度高，能量大，粒子在靶材面上滑过较长的距离，这一过程的持续进行使冲蚀磨损量增加。总之，冲蚀速度越大，粒子动能就越大，粒子对材料表面做的功也就越多，进而影响到冲蚀磨损量。

(2) 冲蚀角度

磨粒入射方向与靶材表面形成的夹角即为冲蚀角度，冲蚀角度对冲蚀磨损的影响

与冲蚀材料有关。塑性材料的最大失重量的冲蚀角度出现在 $20^{\circ} \sim 30^{\circ}$ ；而脆性材料的最大失重量的冲蚀角度出现在 90° ^[33]。

(3) 冲蚀浓度

冲蚀浓度也是影响冲蚀磨损失重量的一个重要因素，一般情况下，浓度增大冲蚀磨损失重量也有一定的增加。但是在有些情况下，浓度增大，粒子流量很大时，由于粒子发生相互碰撞以及粒子打到靶材上的回弹，会导致材料冲蚀率有所降低。

(4) 冲蚀时间

冲蚀时间对材料的抗冲蚀磨损性能有一定的影响。研究发现，冲蚀磨损过程中有一个较长的孕育期，并且冲蚀过程到一定时间一定程度存在一个稳定期^[34-36]。在冲蚀初始阶段，粒子会嵌入靶材，使靶材产生“增重”的现象，一般而言，高角度冲蚀时嵌入增重的趋势大于低角度冲蚀。

(5) 环境温度

环境温度对材料的抗冲蚀磨损性能也会产生一定的影响。温度变化时，由于涂层和基体之间热膨胀系数的差异，会影响到涂层与基体之间的结合强度以及涂层的附着力。进而影响到涂层的冲蚀磨损量。

1.3 国内外冲蚀磨损研究现状

1.3.1 固体粒子冲蚀磨损实验装置

近年来，各国研究人员研制了许多不同类型的固体粒子冲蚀磨损试验机，根据不同的冲蚀方式，可将实验装置分为真空下落式、风洞式、气流喷砂式、离心加速式、旋转臂式等类型，如表 1-1 所示。

近年来国内外学者在这四类冲蚀磨损试验机的基础上，不断加以改进，研制出许多先进的冲蚀设备。喷射式冲蚀磨损试验机在国外应用广泛^[37-39]，美国的标准冲蚀磨损实验装置就是这种试验机^[40]。G.P.Tilly^[41]等人研制成功了较完整的旋臂式冲蚀试验机，这种试验机消除了气流流动对磨料冲蚀作用的影响。日本 Tokyo 大学研制出了比较新式的离心式冲蚀设备^[42]。我国学者张凤雷，贺琦^[43]等，通过改进测速方法和给料系统，自行设计并制作了一台喷射式冲击磨损试验机。郑州大学^[44]对旋臂式冲蚀磨损试验机进行了结构设计改进，提高了冲击速度和给料速度的精度。

表 1-1 主要固体粒子冲蚀磨损实验装置及其特点

Tab.1-1 The main solid particle erosion wear experiment device and its characteristics

类型	可控参数	优缺点	参考文献
真空下落式	可调整任意冲角。 速度: $10m/s$ (5 米垂直管)。	结构简单, 利用真空中粒子重力而作自由落体运动的动能完成对试样冲击; 速度可调范围小, 可由垂直管长度直接计算。	[45]
风洞式	可调整任意冲角, 速度: $(60\sim450)m/s$, 温度: $(10\sim1093)^{\circ}C$ 。	粒子速度高且范围宽、可实现高温冲蚀; 结构复杂, 实验周期长, 装置实验成本高。	[46]
气流喷砂式	角度可任意调节。 速度: $(120\sim340)m/s$, 一般常温, 高温需另加加热系统。	高速气流携带粒子加速完成冲蚀过程, 粒子速度分布不均, 可用于单颗粒实验; 颗粒质量浓度受限, 需定期更换喷嘴, 颗粒间相互干扰较强, 试验效率较低。	[47]
离心加速式	可调整任意冲角。 速度: $(90\sim350)m/s$, 一般常温, 高温需另加加热系统。	粒子速度及方向由转盘速度和离心力确定, 试验周期短; 结构庞大, 费用高, 冲击速度和角度偏差较大, 冲击颗粒质量计算误差大, 只适于相对磨损率测试。	[48]
旋转臂式	可调整任意冲角。 速度: $(150\sim548)m/s$, 一般常温, 高温需另加加热系统。	冲蚀过程是自由下落的粒子与旋臂上高速运动的靶材碰撞完成, 需在真空环境工作, 可用于机械叶片的模拟; 速度稳定性差。	[49]

近年来国内外报道了多种多样的冲蚀磨损试验方法, 但各种方法都存局限性, 并不能准确和有效的模拟实际的冲蚀工况。所以, 设计更为全面和精确的冲蚀试验设备,

是冲蚀试验研究亟待解决的一个关键问题。

1.3.2 风沙两相流冲蚀磨损研究现状

风沙两相流的冲蚀磨损主要是指气流挟带固体沙粒子冲击材料表面,造成材料流失或失效的现象。目前对于风沙两相流下的冲蚀磨损研究主要集中在国内,国外鲜见报道。国内最早报道的有关风沙环境中的磨损主要出现在文献[50-51]。近年来风沙冲蚀方面的研究主要有以下几个方面:

一方面是风沙对工程结构材料冲蚀磨损的研究。文献[11-13]分析了风沙环境下钢结构涂层遭受冲蚀的力学行为和损伤机理,提出了一种评价涂层冲蚀损伤程度的计算方法。文献[14]主要针对沙尘环境对混凝土结构产生的冲蚀磨损破坏,研究了不同冲击参数(冲蚀速度、角度和时间)对混凝土冲蚀磨损的影响。

另一方面的研究主要集中在风沙对仿生功能材料表面的冲蚀磨损。文献[52]认为沙漠蜥蜴和贝壳等动物具有很好的耐冲蚀性,不同的仿生表面形态对材料表面的耐冲蚀性有不同程度的影响。文献[53-54]研究了沙漠蝎子在气沙两相流作用下其体表抗冲蚀作用机理及特征。而文献[55]选取典型的沙漠生物——红柳作为生物原型,证明了红柳具有较优的抗冲蚀性能。

风沙两相流的冲蚀磨损研究还涉及到其他方面。文献[56]通过风洞试验模拟了西北地区风沙的自然环境,在闭式的风洞中进行了风沙对架空导线的冲蚀磨损实验研究。

1.4 涂层的摩擦学研究综述

涂层由于摩擦的原因以分离、裂纹和剥落的方式较早的失效。涂层的摩擦学损伤机制主要有三种^[57]:无涂层材料交换的损伤;有涂层损耗的损伤;由涂抹造成涂层的损伤。

在干摩擦条件下,WC/C、MoS₂涂层和类金刚石碳膜摩擦系数较低,其摩擦系数为0.05~0.25。在适当的条件下,类金刚石碳膜的耐磨、耐蚀性能良好,但其热稳定性较低,当温度高于300℃时就会分解^[58]。但是金刚石膜摩擦系数较低且抗磨性能好,因此具有广泛的应用前景。

在现代涂层制备的发展中,用几种不同的相和涂层可以组合成多种复合涂层^[59],各种各样的新涂层都加入了摩擦学涂层的设计理念,使涂层更贴近于实际的使用功效。金刚石涂层已经成功地应用于切削铝合金的刀具上^[60]。把CBN以涂层形式制备于

工件表面应用前景广阔。如果基材硬度较低时,涂抹涂层时先要涂一层过渡涂层,起到支撑上部涂层的作用。例如钢和钛合金基材硬度较低,可以通过氮化处理来得到支撑层^[61]。因此,采用复合涂层技术降低磨损是非常有效的。

1.5 本文的研究内容

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,采用气流挟沙喷射法,组建了一套模拟风沙环境的实验系统,研究了不同风沙冲蚀力学参数下钢结构涂层受冲蚀磨损等摩擦学行为,分析钢结构涂层在不同冲蚀力学参数下的冲蚀磨损失重量变化规律;最后采用摩擦学性能实验和理论计算分析,分析了钢结构涂层的摩擦学性能。

本文主要研究内容如下:

1. 分析和研究内蒙古中西部地区沙尘环境特征(沙尘暴的移动路径、沙尘暴的时空分布特征)以及冲蚀力学参数(沙粒子特征、风沙流速度和沙尘浓度)的特征。
2. 制备钢结构涂层,测定钢结构涂层的力学性能。采用涂层喷涂设备,制备钢结构涂层;采用千分尺测定钢结构涂层的厚度;利用测定体积和质量的传统方法计算的涂层的密度;采用铅笔硬度法测定涂层的硬度;利用柔韧性测定仪测定钢结构涂层的柔韧性;利用附着力等级测定仪测定钢结构涂层的附着力等级;采用电子拉力机测定涂层/基材的结合强度。
3. 利用能模拟内蒙古中西部地区风沙环境冲蚀的气流挟沙喷射法,在不同的冲蚀速度、角度、浓度和时间等风沙冲蚀力学参数下,进行风沙环境下钢结构涂层的冲蚀实验,研究钢结构涂层冲蚀磨损失重量在不同风沙冲蚀力学参数下的变化规律,分析其抗冲蚀磨损性能。利用扫描电镜(SEM)观测钢结构涂层的微观失效表面,分析其冲蚀损伤机理。
4. 研究钢结构涂层的摩擦学性能。采用摩擦系数仪测试钢结构涂层的动、静摩擦系数;采用摩擦磨损仪测试钢结构涂层的耐磨性;评价钢结构涂层的摩擦学性能;运用冲蚀率的摩擦学定量预估模型,利用冲蚀实验结果,计算钢结构涂层的冲击摩擦系数,分析钢结构涂层的冲击摩擦性能。

1.6 课题的创新点

本课题的特色与创新之处有三点:

1. 针对内蒙古中西部地区风沙环境特征,研究钢结构涂层的侵蚀方面的课题,

可查阅到的文献有限，研究的学者较少。本课题将在这方面做一些实验性的探索，为钢结构涂层的设计、应用和防护及准确评价钢结构涂层的耐久性提供依据，这是创新点之一。

2. 本文模拟风沙环境下钢结构涂层的冲蚀磨损，研究不同风沙冲蚀力学参数下涂层的抗冲蚀磨损性能，分析其冲蚀失效机理，是课题的创新点之二。

3. 研究钢结构涂层的摩擦学性能，分析其冲击摩擦系数，是课题的创新点之三。

第二章 内蒙古中西部地区沙尘气象及冲蚀力学参数

内蒙古中西部地区自西向东分布着 6 大沙漠和沙地，如图 2-1 所示。由于大风多的自然条件和沙源广的地理条件，使得该地区成为我国沙尘暴频发的地区。我国沙尘暴移动的路径当中有 2 条经过内蒙古中西部地区^[62]。该地区由于受西风带的影响，较强的冷空气入侵频繁，春季干燥，多大风天气，这些气象条件是该地区产生沙尘暴的主要原因。

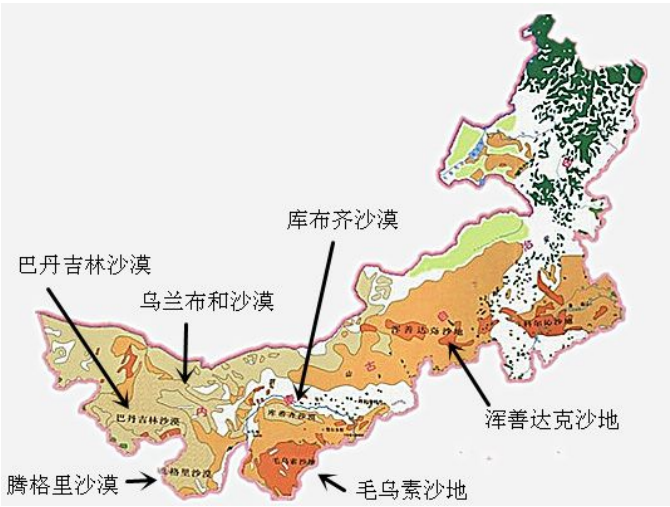


图 2-1 内蒙古中西部地区沙漠分布

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

沙尘天分为浮尘、扬沙、沙尘暴和强沙尘暴，表 2-1 所示为各类沙尘天气的表现特征及水平能见度。

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、尘土浮游在空中	$S<10km$
扬沙	风将尘沙吹起，使空气较为混浊	$1km<S\leq10km$
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	$S<500m$

2.1 沙尘暴的移动路径

中国沙尘暴有 3 条移动路径^[63]，如图 2-2 所示。西北路的主要影响范围是柴达木盆地、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；西路的影响范围新疆西部、河西走廊、河套和内蒙古东部，我国 15.4% 的沙尘暴来源于此路径，此路沙尘暴天气移动速度快、发生强度大并且影响范围广；北路的影响范围是新疆东部、内蒙古地区和华北地区，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。

综合分析上述三条沙尘暴移动路径，其中西北路和北路经过内蒙古中西部地区。

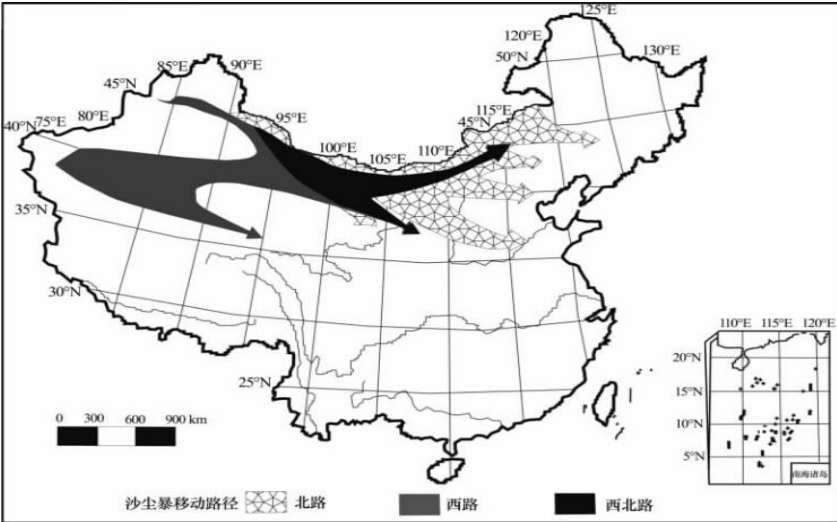


图 2-2 沙尘暴移动路径

Fig.2-2 Sandstorms moving path

2.2 沙尘暴的时空分布特征

2.2.1 沙尘暴的时间分布

1. 沙尘暴的年分布

通过统计 1961-2013 年内蒙古中西部地区沙尘暴次数，绘制了内蒙古中西部地区沙尘暴的年分布图，如图 2-3。由图可知，从 60 年代到 90 年代，沙尘暴的发生频率逐渐降低。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%，沙尘暴发生次数呈波

动趋势，一直在 10 次左右上下波动。2011-2013 年沙尘暴发生次数平均为 10 次。

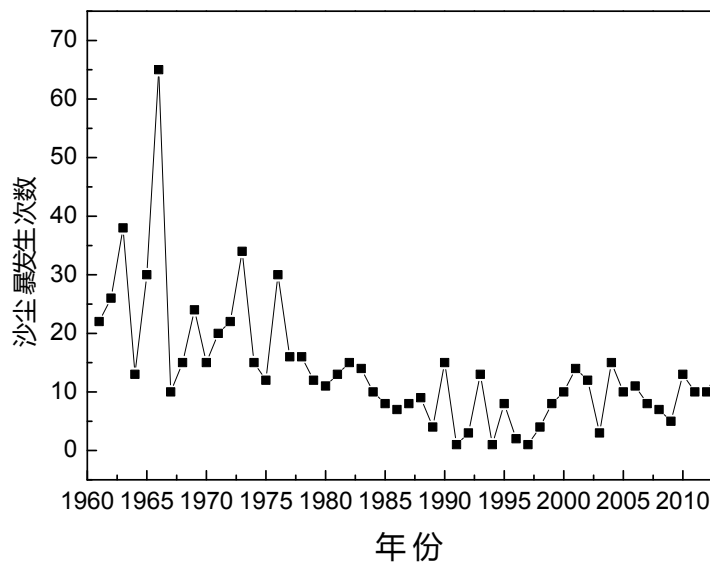


图 2-3 内蒙古中西部地区沙尘暴次数年分布（1961-2013）

Fig.2-3 Sandstorm frequency year's distribution in the central and western regions of Inner Mongolia (1961-2013)

2. 沙尘暴的月分布

图 2-4 是通过对近 50 年内蒙古中西部地区沙尘暴的调查资料分析^[64]，对同一个月份不同年份的沙尘暴发生次数取其平均值，绘制出内蒙古中西部地区沙尘暴月际变化曲线如图，从图中可以看出，沙尘暴发生的高峰期在 4 月份，高发期为 3~5 月，低发期为夏秋季的 7~10 月。高发期（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%。

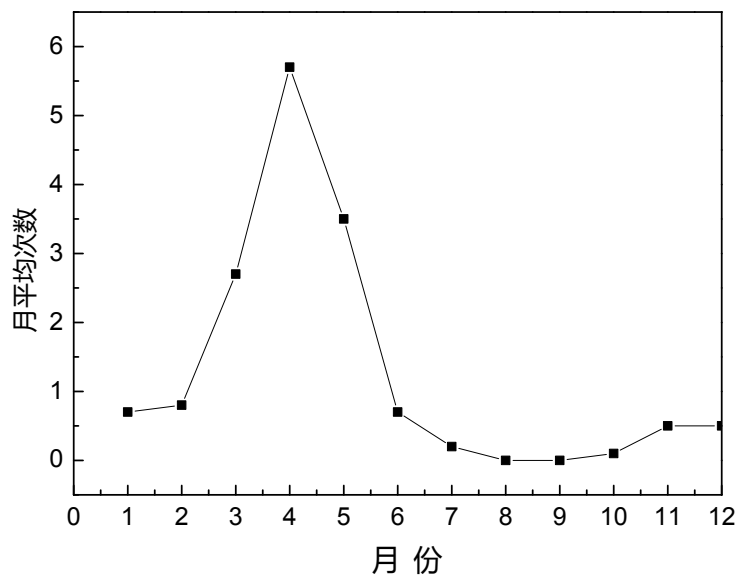


图 2-4 内蒙古中西部地区沙尘暴次数月分布

Fig.2-4 Sandstorm frequency monthly distribution in the central and western regions of Inner Mongolia

3. 沙尘暴的日变化

图 2-5 是内蒙古中西部地区沙尘暴发生的日分布图。从图中可以看出在 08:00~20:00 沙尘暴发生的频率较大, 14:00 时达到最大; 沙尘暴发生次数的峰值主要出现在午后 14:00~16:00, 这主要是由于大气的热对流不稳定触发了沙尘暴^[65], 午后的近地面遇冷空气后极易发生沙尘暴。

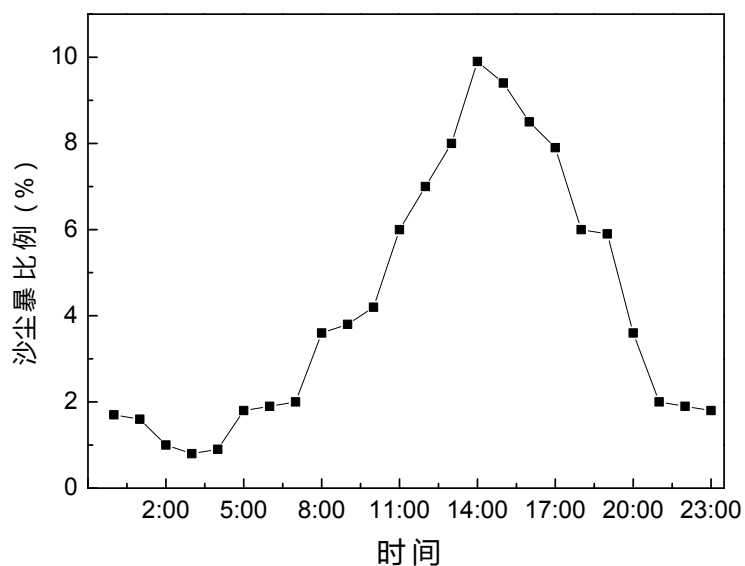


图 2-5 内蒙古中西部地区沙尘暴次数日变化

Fig.2-5 Sandstorm frequency daily distribution in the central and western regions of Inner Mongolia

2.2.2 沙尘暴的空间分布

内蒙古中西部地区沙尘暴的空间分布见图 2-6。由图可知，内蒙古中西部地区的沙尘暴发生的频率自西向东逐渐降低。沙尘暴的高发区是阿拉善盟北部地区，以拐子湖为中心的区域内 40 年平均每年沙尘暴的发生频率大于 25 日^[66]。

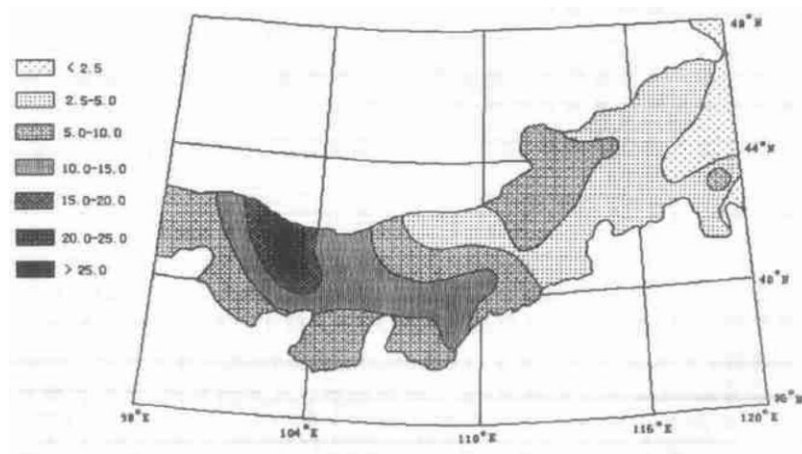


图 2-6 内蒙古中西部地区沙尘暴空间分布图(单位:日)

Fig.2-6 Sandstorm space distribution in the central and western regions of Inner Mongolia(Unit: day)

2.3 风沙的主要冲蚀力学参数

本文以内蒙古西部阿拉善地区腾格里沙漠、鄂尔多斯地区库布齐沙漠两处地域为背景,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,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。腾格里沙漠是中国第四大沙漠,沙丘面积占 71%,以流动沙丘为主,面积 42700 平方公里。这两大沙漠能较好的反映内蒙古中西部地区的风沙情况,具有很好的实际意义。

2.3.1 风沙流粒子特征

风沙流粒子的特征是风沙的主要冲蚀力学参数之一,风沙特征不同,粒子对涂层的冲蚀磨损性能不同。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

库布齐沙漠沙粒粒径主要集中在 $0.25\text{mm}\sim 0.5\text{mm}$ 之间,约占总含量的 95%左右^[67];腾格里沙漠的沙粒主要以细沙和中沙为主,细沙含量为 45.55%,中沙含量为 45.58%,沙粒粒径大多集中在 $0.125\text{mm}\sim 0.5\text{mm}$ 之间^[68];二者的粒径范围较为接近。

2. 沙粒的形状

通过光学显微镜对两个沙漠沙粒进行观察可知,沙粒的形状基本呈圆形或椭圆形,只有少数的尖角颗粒存在,这是由于沙粒在运动过程中长时间的磨损造成的。

2.3.2 风沙流速度

风沙流速度的大小决定了沙尘暴的强弱,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,内蒙古中西部地区春季风速达 $4\text{m/s}\sim 6\text{m/s}$,年平均风速一般在 3m/s 以上,该地区风力大,每年达到起沙 ($\leq 4\text{m/s}$) 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^[69]。

2.3.3 风沙流的浓度

风沙流浓度衡量沙尘暴的强度。文献[70]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2-2是文献[71]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。文献[72]综合分析了各地的观测值, 不同沙尘天气时地面沙尘浓度的综合值, 如表2-3所示。

表2-2 基于颗粒物浓度的沙尘天气分级 (单位: mg/m^3)

Fig.2-2 Classification of dust and sand storm basic on particular concentration (Unit: mg/m^3)

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

表2-3 不同沙尘天气时的沙尘浓度

Fig.2-3 Different dust weather of dust concentration

不同沙尘天气	浮尘	扬沙	沙尘暴	强沙尘暴	特强沙尘暴	
$TSP(10^{-3} g / m^3)$	实测值	0.358-1.051	1.208	3.956-6.31	12.06-28.43	33.46-1016
	综合值	0.3-1	1-3	3-10	10-40	>40

2.4 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. 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。
2. 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, 低发期为夏秋季的7~10月。(3) 08:00~20:00沙尘暴发生的频率较大, 14:00时达到最大。
3. 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逐渐降低。
4. 分析了内蒙古中西部地区风沙主要冲蚀力学参数的特征: 风沙流粒子特征、风沙流速度和风沙流的浓度。

第三章 钢结构涂层的制备及其物理力学性能测定

3.1 钢结构涂层的制备

钢结构涂层的制备主要包括涂层的基材和材料的选择、试件的制作、喷涂装置的构建以及涂层的喷涂等。

3.1.1 试件材料的选择

1. 基材的选择

试件的基体材料选用普通碳素钢薄钢板，它是一种以铁、碳、锰、硫、磷为主要含量的薄钢板，碳素薄钢板在钢材中应用广泛。它的用途有两种，一是直接用于加工各类产品；另一是用来加工其他钢材制品，如钢管、涂层钢板等。选用此种钢材具有一定的代表性。

2. 涂层材料的选择

试件表面涂层材料选用由山东奔腾漆业有限公司生产的奔腾铁红醇酸防锈漆（底漆）和由河北晨虹油漆有限公司生产的晨虹磁漆（面漆）。油漆的特征见下表 3-1。

表 3-1 油漆特征

Fig.3-1 Paint characteristics

油漆名称	产品组成	产品特点	用途
醇酸防锈漆（底漆）	醇酸树脂、防锈颜料、填料、助剂等组成。	干燥快，附着力优良，易施工等优点。	适用于钢铁设备、钢结构、管道等的涂装，作防锈底漆使用。
晨虹磁漆（面漆）	由醇酸树脂、颜料、填料、助剂和溶剂组成。	漆膜丰满、平滑、上硬度快、柔韧性好。	用于桥梁、输电塔架、等金属结构表面。

3.1.2 涂层的喷涂

喷涂装置由 SANOU 空气压缩机、K-3 型喷漆枪、和工作室三部分组成。如下图 3-1 所示。喷涂参数：气压为 0.8~1.0MPa，喷涂电压为 380V，气体流量为 6~8m³/min，喷涂距离为 200mm~300mm。

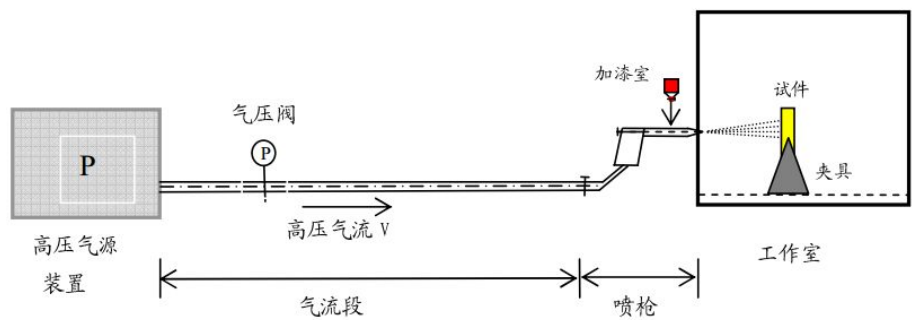


图 3-1 喷涂装置示意图

Fig.3-1 Praying device schematic diagram

3.1.3 涂层的制备

- 1. 用砂纸把基材表面锈蚀、氧化皮打磨干净，有油污的部位，用醇酸稀料擦洗除净，确保基材表面无油、无锈、无松动氧化皮，呈现金属光泽。
- 2. 将钢板制作成 $40mm \times 40mm$ 的钢片，最后用丙酮棉签擦洗干净，干燥后备用。
- 3. 按照《钢结构工程施工质量验收规范》(GB50205-2001) 中“钢结构涂装工程”工艺要求进行喷涂。喷涂时为了确保厚度和干燥程度，分多次进行喷涂，每次间隔时间为产品规定的标准干燥时间。喷涂的底漆和面漆如图 3-2 和图 3-3 所示。

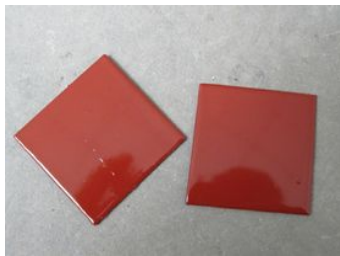


图 3-2 试件底漆

Fig.3-2 Specimen primer



图 3-3 试件面漆

Fig.3-3 Specimen surface paint

3.2 钢结构涂层的物理力学性能指标的测定

涂层的物理力学性能指标包括涂层的厚度、密度、硬度、柔韧性、涂层与基材的附着力等级和结合强度，其中涂层的硬度、柔韧性、涂层与基材的附着力等级和结合强度是与青岛科标分析检测中心合作进行检测的。

3.2.1 涂层厚度和密度的测定

1. 涂层的厚度

《漆膜厚度测定法》(GB1764-79)中规定的测试方法有千分尺法和磁性测厚仪法两种方法,其单位都以 μm 表示。磁性测厚仪法测量结果受镀层影响大,因此,本实验采用千分尺法测量涂层厚度。所采用的千分尺如图 3-4 所示,试件结构的示意图如 3-5 所示。



图 3-4 千分尺

Fig.3-4 Micrometer

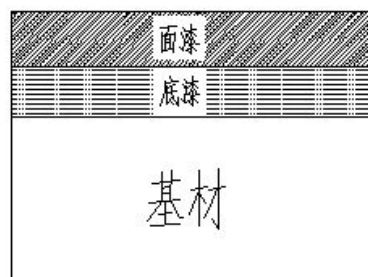


图 3-5 试件结构示意图

Fig.3-5 Specimen structure diagram

试件喷涂前测量基体的厚度,选取基体上 3 个不同的点,依次进行测量,取 3 次测量的平均值为所测基体的厚度。喷涂完毕后,待涂层干燥,再对试件厚度测量 3 次取其平均值,前后两者平均值之差即为涂层的厚度。测试结果显示,底漆的平均厚度约为 $400\mu\text{m}$,面漆的平均厚度约为 $600\mu\text{m}$ 。涂层的平均厚度为 $1000\mu\text{m}$ 。同一试件的厚度均匀、平整度好,满足实验要求。

2. 涂层密度测量

采用测定体积和质量的传统方法对涂层的密度进行测量。体积 V 的测定采用如图 3-6 所示的两组模具,其形状为规则的长方体,其体积为:

$$\text{模具 1: } V_1 = 1.8\text{cm} \times 1.8\text{cm} \times 2.7\text{cm} = 8.748\text{cm}^3 \quad (3-1)$$

$$\text{模具 2: } V_2 = 1.8\text{cm} \times 1.8\text{cm} \times 2.5\text{cm} = 8.1\text{cm}^3 \quad (3-2)$$

质量 M 的测定采用如图 3-7 所示的电子天平,此天平为精密分析天平,其测量精度为 0.1mg ,将涂层材料装入模具,待涂层完全干燥之后,再测定其质量。本实验的测定结果为 $M_1 = 15.39\text{g}$, $M_2 = 18.37\text{g}$ 。其密度为:

$$\rho_1 = \frac{M_1}{V_1} = \frac{15.39\text{g}}{8.1\text{cm}^3} = 1.9\text{g/cm}^3 \quad (3-3)$$

$$\rho_2 = \frac{M_2}{V_2} = \frac{18.37\text{g}}{8.748\text{cm}^3} = 2.1\text{g/cm}^3 \quad (3-4)$$

平均(3-3)和(3-4)得, $\rho = 2.0g/cm^3$ 。



图 3-6 模具

Fig.3-6 The mould



图 3-7 精密分析天平

Fig.3-7 Precise analytical balance

3.2.2 涂层的硬度测定

涂层硬度是衡量涂层机械强度和性能优劣的重要指标。本实验按照 GB/T 6739-1996《涂膜硬度铅笔测定法》测定涂层硬度。铅笔硬度法是采用已知硬度标号的铅笔刮划涂层,以能够穿透涂层到达底材的铅笔硬度来表示涂层硬度的测定方法。标准规定采用中华牌高级绘图铅笔,其硬度为 9H、8H、7H、6H、5H、4H、3H、2H、H、F、HB、B、2B、3B、4B、5B、6B 共 16 个等级,9H 最硬,6B 最软。

图 3-8 为漆膜铅笔硬度试验,实验中每刮划一道要对笔芯尖端重新研磨,同一硬度铅笔重复刮划 5 道。最后按照标准规定的刮破情况评定涂层硬度。本实验测定的涂层硬度为 B 级,硬度较小。

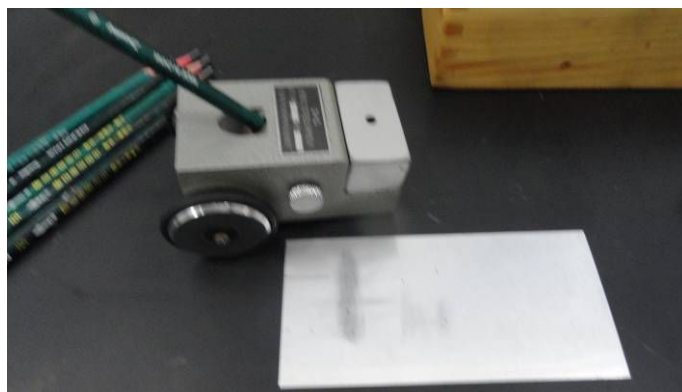


图 3-8 漆膜铅笔硬度实验

Fig.3-8 Pencil hardness test of the paint film

3.2.3 涂层的柔韧性测定

涂层柔韧性是涂层适应其承载体变形运动的能力。柔韧性是涂层抗冲蚀性能的重要指标，也是涂料的重要物理性能。

本实验使用漆膜弹性仪，按照国家标准 GB1731-93《漆膜柔韧性测定法》中规定的轴棒法测定涂层柔韧性。漆膜弹性仪如图 3-9 所示，漆膜弹性仪由 7 个直径不同的钢制轴棒固定在底座上组成。轴棒直径依次为 15、10、5、4、3、2 和 1（单位： mm ）。试验时涂层柔韧性用以不引起涂层破坏的最小轴棒直径来表示。实验操作时，试板涂膜朝上，双手将试板紧压于轴棒上，绕轴棒弯曲试板，在 2~3 秒内完成，用 4 倍放大镜检查涂膜有无破损现象。

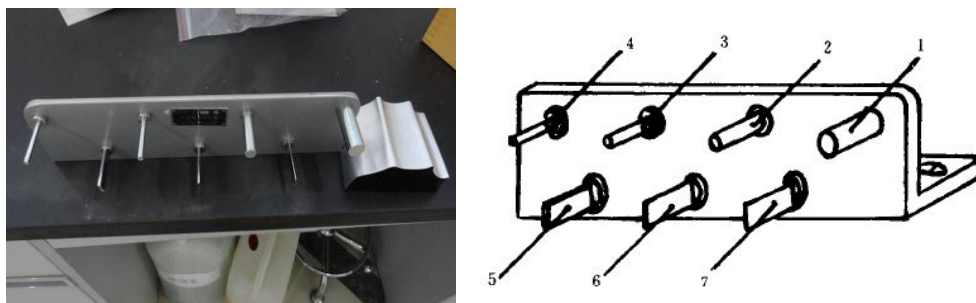


图 3-9 漆膜柔韧性测定仪

Fig.3-9 The flexibility tester of the coating

柔韧性评定时分为 7 个等级，以 mm 表示，分别为 15 mm 、10 mm 、5 mm 、4 mm 、3 mm 、2 mm 和 1 mm 。其中 1 mm 最优，15 mm 最差，本次钢结构涂层的柔韧性测定结果为 4 mm ，柔韧性较好。

3.2.4 涂层附着力等级的测定

附着力是评价涂层性能的一个重要指标。作为耐磨涂层，涂层必须具备良好的附着力，否则涂层很容易被破坏。

本实验根据 GB/T 9286-1998《色漆和清漆 漆膜的划格试验》中规定的测试方法对涂层的附着力等级进行测定。实验如下图 3-10 所示。

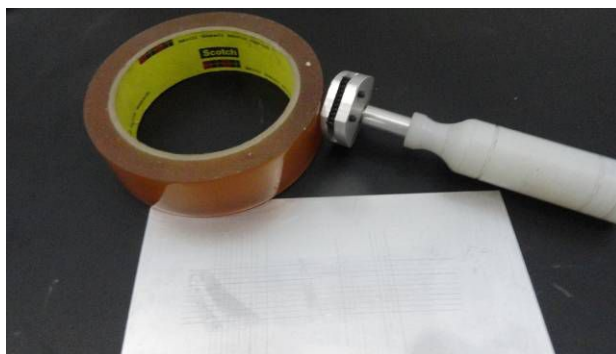


图 3-10 漆膜划格实验

Fig.3-10 Paint film scribe test

该标准根据切割涂层的破坏情况来评定涂层的附着力等级，实验结果分为 0~5 级，0 级最好，5 级最差。本实验测定的涂层的附着力等级为 0 级，涂层附着力等级优。

3.2.5 涂层/基材的结合强度测定

结合强度反映涂层的力学性能，也是评价涂层性能的重要指标。按照《建筑防水涂料试验方法》在电子万能拉力机（如图 3-11）上进行测定，对 5 个试样进行 5 次测量，取平均值作为结合强度测定值。

试验时将粘有拉伸用上夹具的试件安装在试验机上，如图 3-12，保持试件表面垂直方向的中线与试验机夹具中心在一条直线上，以 $(5 \pm 1) \text{ mm/min}$ 的速度拉伸试件至破坏，记录试件的最大拉力。试验温度为 $(23 \pm 2) ^\circ\text{C}$ 。

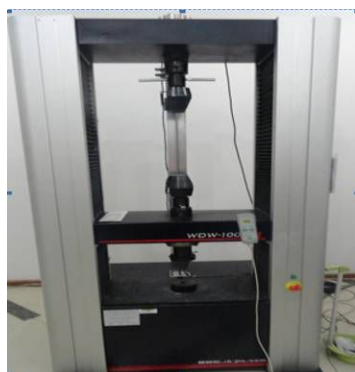


图 3-11 电子万能拉力机

Fig.3-11 Electronic universal tensile machine

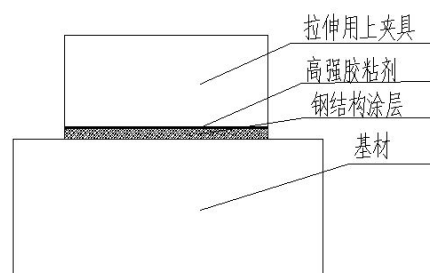


图 3-12 安装示意图

Fig.3-12 The installation diagram

结合强度如下式：

$$\sigma = F / (a \times b) \quad (3-5)$$

σ ——结合强度 (MPa);

F ——试件最大拉力 (N);

a 、 b ——试件粘接面长和宽 (mm)。

对 5 个试样进行 5 次测量, 取平均值作为结合强度测定值。测定结果如表 3-2:

表 3-2 涂层结合强度测定结果

Fig.3-2 Coating bond strength test results

测试名称	结合强度 (MPa)					平均值
测试次数	1	2	3	4	5	(MPa)
结合强度	2.3	0.9	3.3	3.0	1.8	2.3

涂层与基材的平均结合强度为 2.3MPa, 结合强度较低, 这主要是由于涂层与钢结构基材之间的热膨胀系数失配造成的, 一般而言, 有机材料的热膨胀系数高于金属材料 10 倍以上。

3.3 本章小结

本章按照《钢结构工程施工质量验收规范》(GB50205-2001), 利用喷涂设备, 制作了实验所需的钢结构涂层, 并对钢结构涂层的力学性能进行了测定:

1. 利用千分尺法测试了涂层的厚度, 测试结果显示, 底漆的平均厚度约为 400 μ m, 面漆的平均厚度约为 600 μ m, 涂层的平均厚度为 1000 μ m。同一试件的厚度均匀、平整度好。

2. 按照 GB/T 6739-1996《涂膜硬度铅笔测定法》测定了涂层的硬度。测试结果显示涂层的硬度为 B 级, 硬度较小。

3. 使用漆膜弹性仪, 按照国家标准 GB 1731-93《漆膜柔韧性测定法》中规定的轴棒法测定了涂层柔韧性。本次钢结构涂层的柔韧性测定结果为 4mm, 柔韧性较好。

4. 根据 GB/T 9286-1998《色漆和清漆 漆膜的划格试验》中规定的测试方法对漆膜的附着力等级进行了测定。本实验测定的涂层的附着力等级为 0 级, 涂层附着力优。

5. 采用《建筑防水涂料试验方法》在电子万能拉力机上对涂层/基材结合强度的测定进行了测定。涂层与基材的平均结合强度为 2.3MPa, 结合强度较低。

第四章 风沙环境下钢结构涂层的冲蚀实验研究

本章采用气流挟沙喷射法进行了风沙环境下钢结构涂层的冲蚀实验,研究了不同冲蚀速度、角度、风沙浓度和时间等冲蚀力学参数下钢结构涂层的冲蚀磨损失重量变化规律,分析其抗冲蚀磨损性能;利用扫描电镜(SEM)观测了钢结构涂层的微观失效表面,分析其冲蚀损伤机理。

4.1 实验方法及实验装置

由于在本次实验中,风沙冲蚀力学参数较多,因此,在研究风沙环境下钢结构涂层的冲蚀磨损时,需要一种参数便于控制,且能够较为真实的模拟风沙环境下钢结构涂层冲蚀磨损的实验设备。

4.1.1 实验方法

目前,还未见报道能够完全模拟风沙环境的冲蚀试验方法。国内外气固两相流下的冲蚀磨损实验方法主要有转盘冲蚀磨损实验法、现场模拟实验法和气流挟沙喷射法^[73-74]。

转盘磨损试验方法易于操作,但是粒子经过转盘加速受力状态与实际不符,不能有效的模拟实际的风沙环境。现场模拟实验法能较好的模拟实际的风沙环境,但其试验周期长、成本高,参数不易于控制。气流挟沙喷射法是连接高压气源系统,以一定的空气动力挟带沙粒子,形成挟沙气流对材料进行冲蚀。该方法由于参数易于调节、试验周期短、成本低、操作简单,可较为真实地模拟实际的风沙环境,是一种较好的风沙冲蚀实验方法。

本文采用气流挟沙喷射法对钢结构涂层进行风沙环境下的冲蚀磨损实验研究。

4.1.2 实验装置

实验装置原理如图 4-1 所示,试验装置由高压气源系统、供沙系统、冲蚀系统三部分组成。高压气源系统包括 SANOU 空气压缩机、气压表、稳压阀、导气管路等;供沙系统由沙箱和流量控制阀及导管组成,沙粒从沙箱进入流量控制器,调节试验时所需沙流量,从而实现试验时对风沙浓度的控制;冲蚀系统主要由喷枪、冲蚀室、试

件夹具等组成,冲蚀室一方面模拟风沙环境,另一方面对沙粒进行回收,试件夹具可在 $0^{\circ} \sim 90^{\circ}$ 范围内调节冲蚀角度,喷嘴到试件的距离也可进行调节。此外,利用风速仪来测定冲蚀时风沙流速度,通过调节气压阀可以调节风沙流速度。图 4-2 所示为试验装置图。

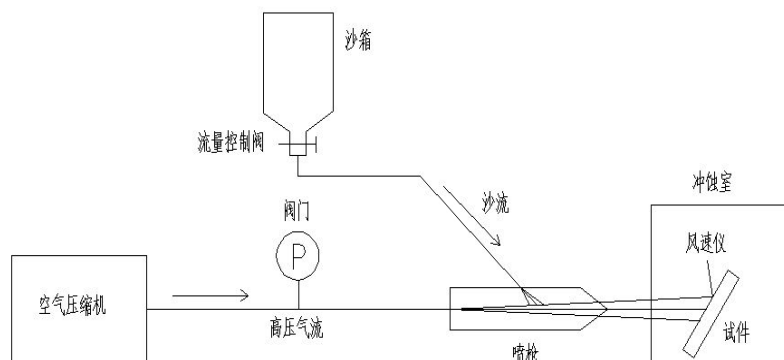


图 4-1 冲蚀磨损实验装置原理图

Fig.4-1 The principle diagram of the erosion device

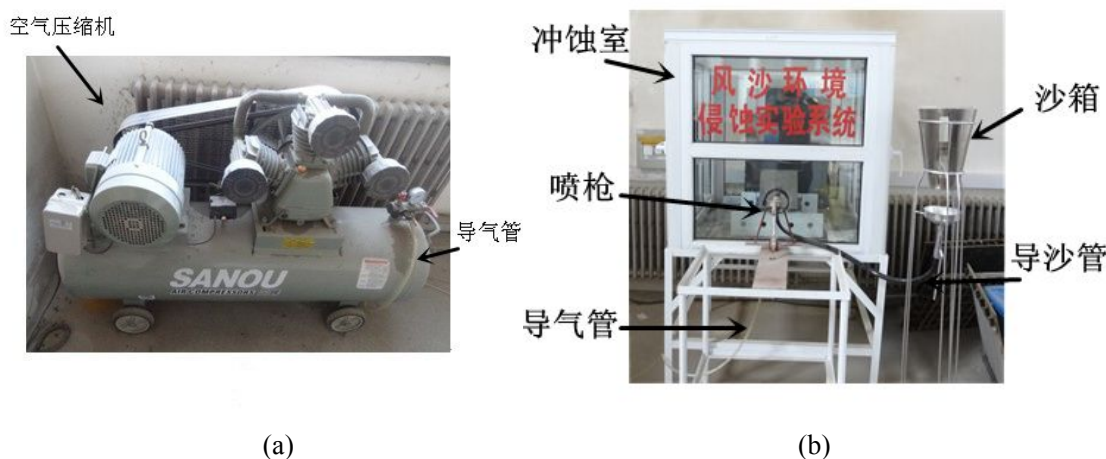


图 4-2 冲蚀磨损实验装置

Fig.4-2 The erosion device

4.2 风沙冲蚀磨损性能的评价方法分析

1. 冲蚀磨损量化的评价方法

冲蚀磨损量化是评定冲蚀磨损性能的一个关键问题。目前研究冲蚀磨损量化的主要方法有质量损失测定法、现代形貌测定法、放射性同位素测定法和尺寸变化测定法等。其中质量损失法（也称失重法）是通过测量材料冲蚀前后的质量变化来评价其冲蚀磨损程度。由于该方法便于操作，测量精度较高，因此在冲蚀磨损量化技术中占主要地位，被普遍应用。

2. 冲蚀率的评价方法

材料的冲蚀率是评定材料耐冲蚀性能好与坏的标准，目前测量材料冲蚀率的方法主要有两种：质量磨耗测量法和体积磨耗测量法。

a. 质量磨耗测量法

质量磨耗测量法通过测量冲蚀前后材料质量的变化来计算冲蚀率的方法。目前此方法应用较为普遍。冲蚀率(ε)用如下公式表示：

$$\varepsilon = \text{材料失重}(mg) / \text{磨料质量}(g) \quad (4-1)$$

b. 体积磨耗测量法

体积磨耗测量法也就是按实验前后的体积变化计算磨损率的方法。通过材料的密度可以转化为质量的变化。体积磨损率 $E_v (mm^3 \cdot g^{-1})$ 用如下公式表示：

$$E_v = (m_0 - m_1) / (\rho m) \quad (4-2)$$

式中， ρ 为试样密度， $g \cdot cm^{-3}$ ； m_0 为试样的原始质量， g ； m_1 为冲蚀磨损后试样的质量， g ； m 为磨料总质量， kg 。

综上所述，本文根据研究的特点，采用质量损失测定法（失重法）来评定钢结构涂层的冲蚀磨损失重量，采用冲蚀率来评价材料的耐冲蚀性能。测定过程中，利用越平科学仪器有限公司生产的 FA/JA 精密电子天平（精度为 $0.1mg$ ）测量冲蚀试验前后涂层质量的变化 ΔM （单位： mg ）来确定冲蚀磨损失重量，天平如图 3-7 所示。

3. 冲蚀形貌的观测方法

用扫描电镜（SEM）观察材料冲蚀部位，通过形貌分析，探讨材料冲蚀机理。

4.3 风沙流冲蚀力学参数的分析及设置

4.3.1 沙粒的特征分析

沙粒的特征是影响风沙冲蚀磨损的主要外部因素，因此研究沙粒的粒径分布、形状、硬度和密度等，对深入探究冲蚀磨损的磨损机理等至关重要。本实验中所用到的沙粒分别取自内蒙古西部地区鄂尔多斯高原北部的库布齐沙漠和阿拉善地区的腾格里沙漠。库布齐沙漠是中国第七大沙漠，总面积约 145 万公顷，流动沙丘约占 61%。腾格里沙漠是中国的第四大沙漠，面积 42,700 平方公里。沙漠内部有沙丘、湖盆、草滩、山地、残丘及平原等交错分布。这两大沙漠是内蒙古中西部地区的主要沙源地，选取这两处地域具有较好的工程背景和实际意义。

沙粒矿物主要由长石、石英和暗色矿物等颗粒组成，石英和长石的总含量占到

90%以上。本实验对沙粒的特征进行了如下分析：

1. 沙粒的粒径分析

实验中采用筛分法分析了两大沙漠沙粒粒径的分布情况，实验中所用到的筛分筛如图 4-3 所示。



图 4-3 筛分筛

Fig.4-3 Sieve

筛分筛的孔径由上至下分别为 0.5mm、0.25mm、0.1mm 和 0.05mm，用电子天平称重 250g 沙子，筛分充分后在称量各粒径范围内的重量，分析其粒径分布情况。本实验针对两个沙漠各进行了五次筛分实验，沙粒粒径变化范围及其平均值见表 4-1 (a) 和表 4-1 (b)。

表 4-1 (a) 库布齐沙漠沙粒粒径分布 (mm)

Tab.4-1 (a) The size of sand in KuBuQi desert (mm)

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

表 4-1 (b) 腾格里沙漠沙粒粒径分布 (mm)

Tab.4-1 (b) The size of sand in TengGeLi desert (mm)

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	0.80-1.36	4.32-6.00	48.12-49.64	41.32-42.48	2.20-2.56
	平均值	1.13	5.17	48.99	42.01	2.40

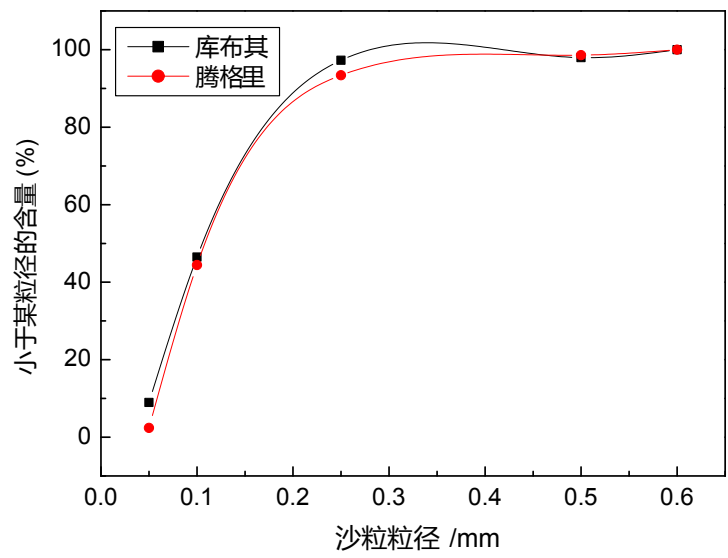


图 4-4 颗粒级配曲线

Fig.4-4 Grading curve

由表 4-1 可知两个沙漠沙粒粒径主要分布在 $0.05\text{mm}\sim0.25\text{mm}$ 之间，在此区间内，粒径含量均达到 87%以上， 0.25mm 以上和 0.05mm 以下所占的含量比例都不足 10%，沙粒的粒径比较单一。再者从颗粒级配曲线（如图 4-4）上可以看出，两者的颗粒级配曲线变化趋势基本一致，颗粒级配一致。而且两者的颗粒级配曲线都比较陡，说明两个沙漠中所含沙的级配不良。

2. 沙粒的形状

使用上海测维光电技术有限公司生产的光学显微镜（图 4-5）对风沙粒子的形状进行观测，观测结果如图 4-6 所示。沙粒的形状基本呈圆形或椭圆形，只有少数的尖角粒子，这主要是由于沙粒在沙漠中长时间运动过程中相互撞击和磨损造成的。



图 4-5 光学显微镜

Fig.4-5 Optical microscope

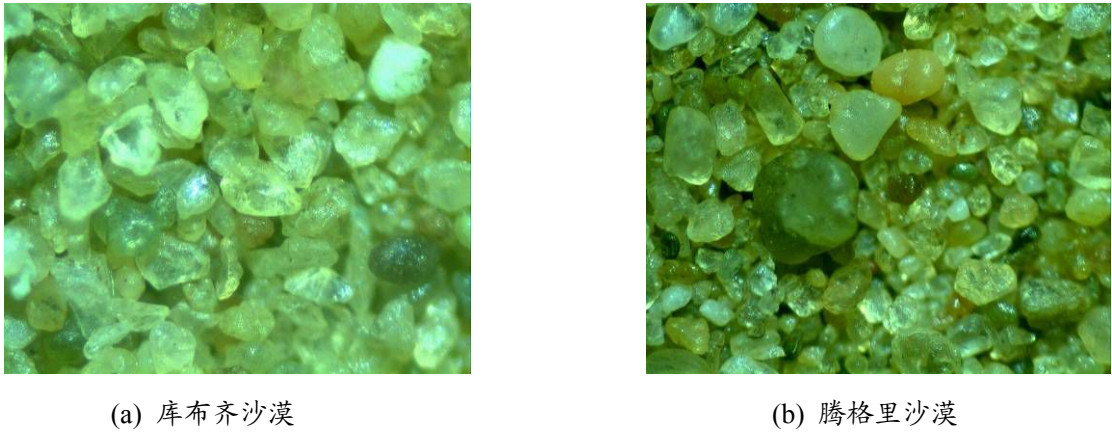


图 4-6 沙粒形状

Fig.4-6 The shape of sand

3. 沙粒的硬度

库布其沙漠沙粒莫氏硬度为 6 级，腾格里沙漠沙粒莫氏硬度为 7 级。

4. 沙粒的密度

库布其沙漠沙粒密度为 2.7 g/cm^3 ；腾格里沙漠沙粒密度为 2.65 g/cm^3 。

4.3.2 风沙流的冲蚀速度设定

风沙流速度是影响涂层材料冲蚀磨损的主要外部因素之一，由于 4 级及以下风力（平均风速 $V\leq7\text{m/s}$ ）对材料影响较小，且内蒙古中西部地区沙尘天气的风沙流速度

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

多数分布在 $9\text{m/s}\sim26\text{m/s}$ 的范围内，根据表 4-2 设置 7 个风速值来模拟内蒙古中西部

地区的风沙速度，分别为 13m/s、16m/s、18m/s、20m/s、23m/s、26m/s 和 30m/s。

实验时利用型号为 KA23/33 的风速仪测定风沙流速度，沙粒通过高速气流在管道中加速后到达涂层表面，认为在涂层表面的沙粒速度近似等于风速，风速测定仪如图 4-7 所示。



图 4-7 风速仪

Fig.4-7 Anemometer

4.3.3 风沙流的冲蚀角度设定

为了研究不同角度对冲蚀磨损的影响，确定风沙对涂层的最大冲蚀角，本文设置了 6 个角度，分别为 15°、30°、45°、60°、75°和 90°。实验过程中通过调节夹板上的支撑杆的长度来控制冲蚀角度。其控制示意图如图 4-8 所示。



图 4-8 夹具图

Fig.4-8 Fixture

4.3.4 风沙流浓度控制

本实验通过控制下沙率 (g/min) 来模拟内蒙中西部地区不同沙尘浓度下的冲蚀磨损情况。矫梅燕^[75]等将沙尘天气进行了定量分级,研究了强沙尘暴、沙尘暴、扬沙的沙尘浓度,对应关系如下表所示。

表 4-3 沙尘天气类型与浓度对应关系

Tab. 4-3 The dust weather with the corresponding concentration

沙尘天气分类	扬沙	沙尘暴	强沙尘暴
沙尘浓度 (g/m^3)	800~3000	3000~9000	9000~15000

本文根据流体力学中对流量的定义,采用如下公式定义了本实验的输沙量。将风沙流看作是连续的介质,则风沙流的流量 Q 为:

$$Q = Av \quad (4-3)$$

式中, Q 为流体的流量,本实验中为输沙量, m^3/s ; A 为过流横截面面积, m^2 ; v 为风沙流速度, m/s 。

实验中过流截面面积为:

$$A = \pi R^2 = 3.14 \times 2.31^2 = 16.8 mm^2 = 1.68 \times 10^{-5} m^2 \quad (4-4)$$

$$\text{沙尘浓度 } S = \frac{M}{Q} \quad (4-5)$$

式中, S 为试验挟沙气流的沙尘浓度, g/m^3 。 M 为下沙率, g/s 。

本文通过沙尘浓度定义设置了 $90g/min$ 、 $150g/min$ 、 $240g/min$ 、 $300g/min$ 、 $360g/min$ 和 $460g/min$ 六个下沙率来控制风沙冲蚀过程中的沙尘浓度。

例如,当下沙率为 $M = 150g/min(2.5g/s)$, $v = 26m/s$, $A = 1.68 \times 10^{-5} m^2$ 时,可求得沙尘浓度 $S = 5723g/m^3$,这一浓度范围的沙尘类型属于沙尘暴;再如, $M = 240g/min(4.0g/s)$, $v = 23m/s$, $A = 1.68 \times 10^{-5} m^2$ 时,可求得沙尘浓度 $S = 10352g/m^3$,此浓度范围内属于强沙尘暴。本文重点研究沙尘暴和强沙尘暴范围内的冲蚀磨损。

4.4 钢结构涂层冲蚀磨损实验研究

风沙流冲蚀速度、冲蚀角度、冲蚀浓度和冲蚀时间是影响钢结构涂层冲蚀磨损的 4 个主要因素。

4.4.1 风沙流冲蚀速度对涂层冲蚀磨损的影响

本次实验中由于沙粒粒径较小,在喷枪管道中很容易加速,沙粒子的速度与风速较为相近,可认为风的速度即为沙粒子的速度,文中称其为风沙流速度 $V(m/s)$ 。

图 4-9 是在各个冲蚀角度下,冲蚀时间为 $12min$,下沙率为 $150g/min$ 的条件下,冲蚀磨损失重量与风沙流冲蚀速度的变化关系。由图可知,涂层的冲蚀失重量均随着冲蚀速度的增大而增加。这是由于速度增加,冲蚀沙粒子的动能也相应地增加,粒子对涂层表面所做的功增多,分子间的结合力不断地被削弱,使大量的分子结构遭到破坏,因此冲蚀磨损失重量不断增加。

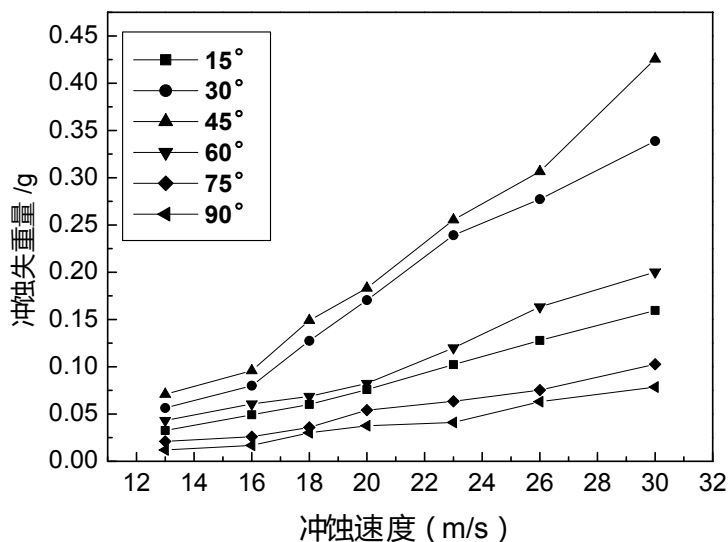


图 4-9 涂层冲蚀磨损失重量与冲蚀速度的关系

Fig.4-9 The relationship between erosion mass-loss and erosion-speed

图 4-10 是在冲蚀角度为 45° 和 90° ,下沙率为 $150g/min$,时间为 $12min$ 的条件下,涂层的冲蚀率与风沙流速度 $V(m/s)$ 的变化关系曲线图。由冲蚀率随速度的变化关系可知, 45° 时冲蚀过程出现了两个变化阶段,低速冲蚀阶段和高速冲蚀阶段;当 $V < 16m/s$ 时,冲蚀率变化趋势缓慢,属于低速冲蚀阶段,此时沙粒的能量较低,沙粒与涂层的表面碰撞后,由于速度的水平分量较小,不能在涂层表面留下较长和较深的犁沟和切削,因而冲蚀磨损失重量较少;而在 $V \geq 16m/s$ 时,属于高速冲蚀阶段,由于沙粒速度高,冲击能量大,冲蚀粒子划过涂层表面较长的距离,在涂层表面留下较长和较深的犁沟和切削,冲蚀粒子持续冲击涂层,使得初始产生的变形堆积被推平,材料损失的相对要多。而在 90° 时,由于速度不存在水平分量,因此,低速和高速

阶段，不能明显的区分。

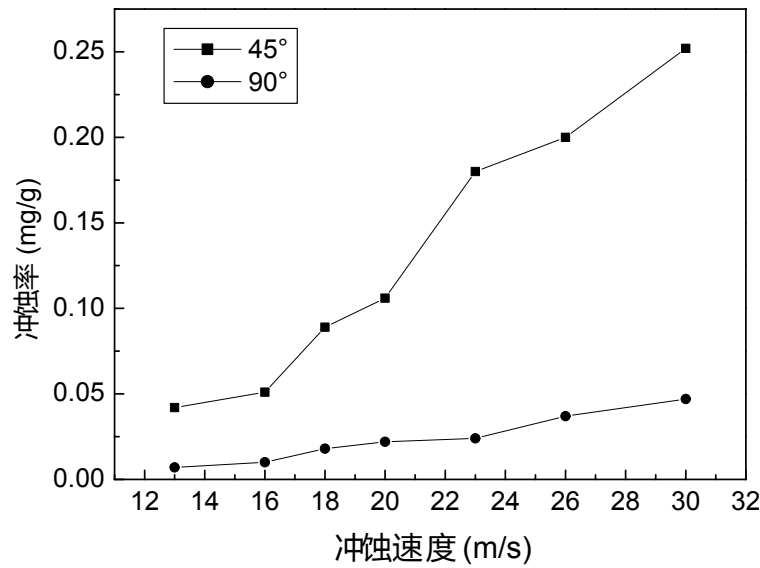


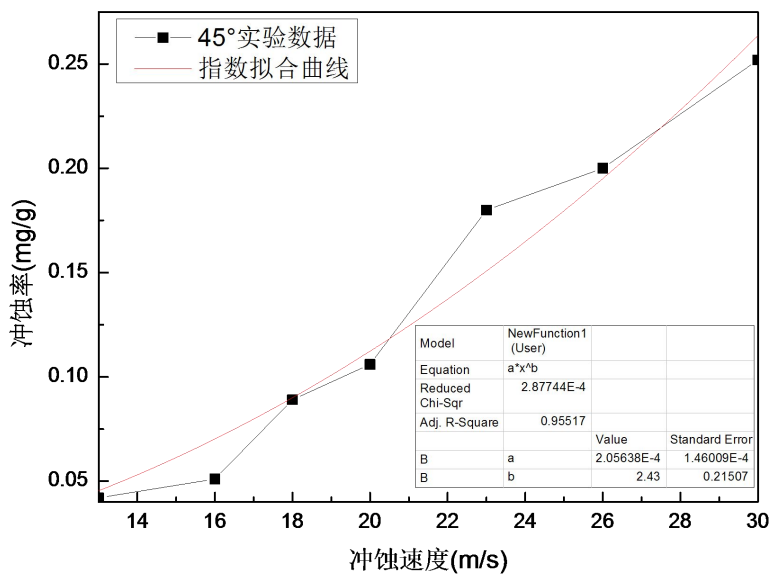
图 4-10 涂层冲蚀率与冲蚀速度的关系

Fig.4-10 The relationship between erosion mass-loss and erosion rate

由图 4-11 和 4-12 可知，冲蚀率 ε 与冲蚀速度 V 存在指数关系：

$$\varepsilon = KV^n$$

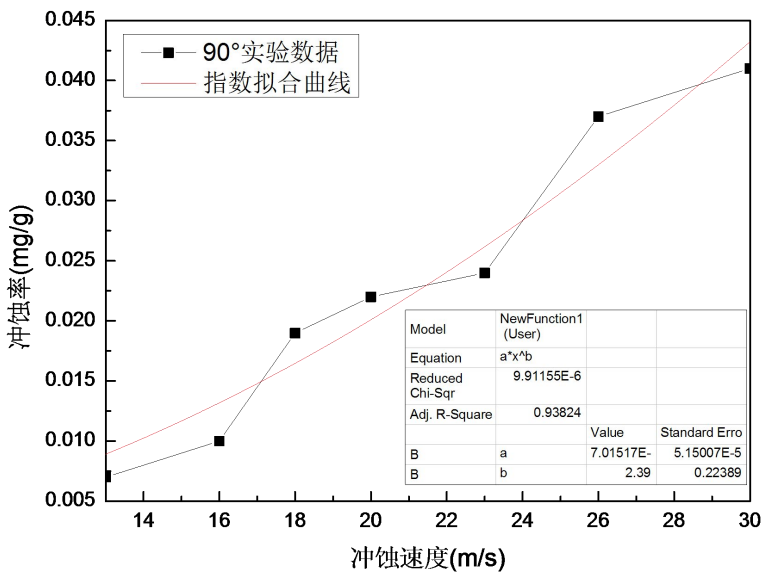
经曲线拟合可知，式中的系数 $K \approx (2.06 \sim 7.01) \times 10^{-4}$ 、 $n \approx 2.39 \sim 2.43$ 。 K 和 n 均与磨粒、被冲蚀材料和冲蚀角等因素有关。根据芬奈（Finnie）等人研究表明大多数延展性材料的指数 n 在 2.0~3.0 范围之内，说明本次实验的结果，符合延展性材料的规律，涂层属于延展性材料。另外 n 值体现被冲蚀材料对速度的敏感度， n 值越大被冲蚀材料对速度越敏感。可以看出，45° 冲角下的速度指数 n 明显比 90° 冲角下的速度指数大，这表明 45° 冲角下钢结构涂层对沙粒子冲击速度的敏感度增强。此外根据图 4-9 所示的冲蚀失重量随速度的变化趋势可以看出，速度越低钢结构涂层的抗冲蚀磨损性能越好。



[幂拟合: $\varepsilon = KV^n$ Coefficient Data: $K=2.06 \times 10^{-4}$; $n=2.43$]

图 4-11 45° 时冲蚀失率与冲蚀速度的拟合关系曲线图

Fig.4-11 Erosion rate and erosion speed curve fitting at 45°



[幂拟合: $\varepsilon = KV^n$ Coefficient Data: $K=7.01 \times 10^{-4}$; $n=2.39$]

图 4-12 90° 时冲蚀失率与冲蚀速度的拟合关系曲线图

Fig.4-12 Erosion rate and erosion speed curve fitting at 90°

4.4.2 风沙流冲蚀角度对涂层冲蚀磨损的影响

图 4-13 是在下沙率分别为 90g/min 、 150g/min 和 240g/min ，冲蚀速度为 20m/s ，冲蚀时间为 12min 的条件下，涂层的冲蚀失重量与冲蚀角度 $\alpha(^{\circ})$ 的变化关系曲线图。由图可知，在 45° 时涂层的冲蚀失重量最大， 90° 时涂层的冲蚀失重量最小。典型的塑性材料最大冲蚀失重量出现在 $15^{\circ}\sim 30^{\circ}$ 之间，典型的脆性材料最大冲蚀失重量出现在接近 90° 处。而本实验中钢结构涂层的最大冲蚀失重量出现在 45° 左右，说明钢结构涂层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，而表现出了从塑性材料向脆性材料过渡的特征。

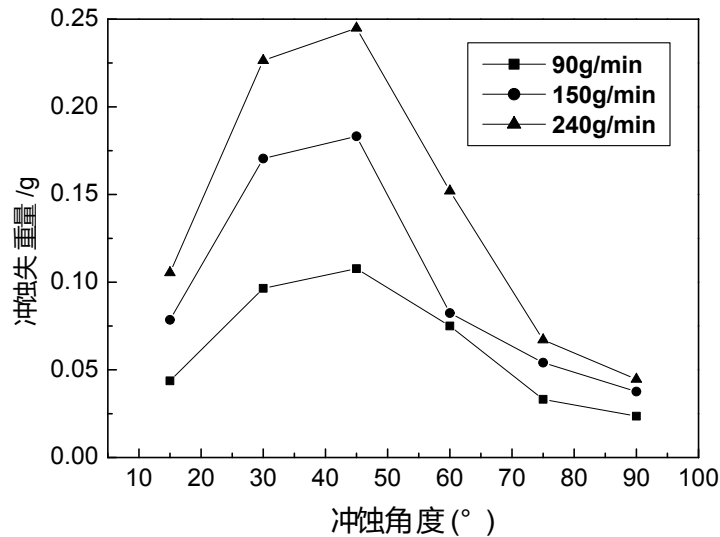


图 4-13 涂层冲蚀磨损失重量与冲蚀角度的关系

Fig.4-13 The relationship between erosion mass-loss and erosion angle

图 4-14 是涂层材料在 15° 时冲蚀磨损的 SEM 形貌图，由图可知，涂层表面有波纹状或顺风沙方向的犁沟状的划痕，划痕长，犁沟较浅且方向性明显；图 4-15 是涂层材料在 45° 时冲蚀磨损的 SEM 形貌图，由图可知，涂层表面依然有波纹状或顺风沙方向的犁沟状的划痕，划痕较长，犁沟较深且方向性明显。另外由图 4-14 和图 4-15 可以看出，在犁沟状划痕的周围有微裂纹以及微裂纹扩展产生微破坏区，部分材料从涂层表面剥离留下清晰的剥落坑，造成了涂层的破坏。说明在低冲角时，冲蚀破坏以微切削作用为主。图 4-16 为涂层材料在 75° 时的冲蚀 SEM 形貌，切削产生的划痕已经不明显，涂层表面划痕短而深，这是由于沙粒的切削作用逐渐转变为凿削，涂层表面有凿削坑和裂纹扩展与交叉而产生断裂的痕迹。图 4-17 为 90° 时的冲蚀

SEM 形貌，涂层表面出现蜂窝状冲蚀楔入坑，坑周围有材料被挤压突出。因此在高冲角时材料的破坏方式以沙粒对涂层的凿削作用为主。另由图 4-9 可知，速度最大时涂层在 45° 产生的损失量约为 90° 时的 5 倍。由此可知，低冲角时，材料破坏方式以微切削作用为主，决定材料耐冲蚀性能的主要是其硬度；在高冲角时，材料破坏方式以挤压凿削作用为主，决定材料的耐冲蚀性能的主要是其柔韧性；涂层属于延展性材料，其韧性较高，硬度较低，因此其在低角度时的冲蚀失重量要大于高角度时的冲蚀失重量。

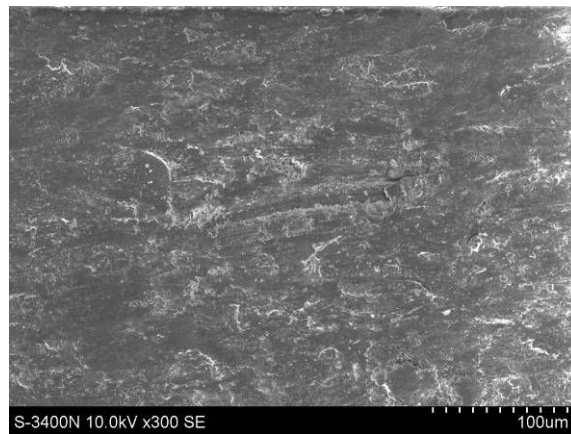


图 4-14 15° 时涂层冲蚀磨损表面 SEM 形貌

Fig.4-14 The erosion surface SEM morphology of the coating at 15°

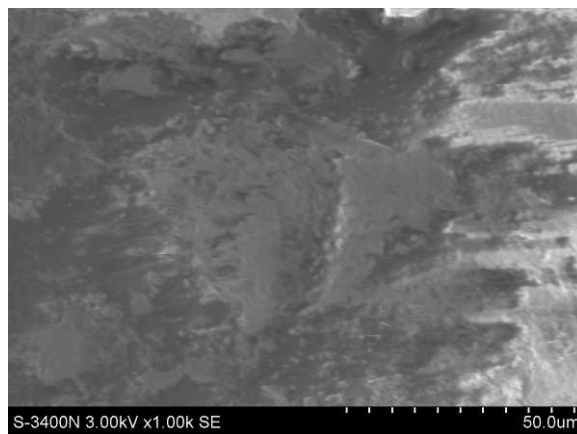


图 4-15 45° 时涂层冲蚀磨损表面 SEM 形貌

Fig.4-15 The erosion surface SEM morphology of the coating at 45°

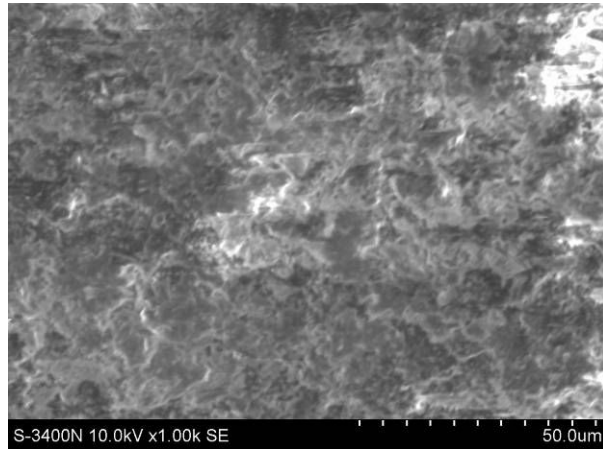


图 4-16 75° 时涂层冲蚀磨损表面 SEM 形貌

Fig.4-16 The erosion surface SEM morphology of the coating at 75°

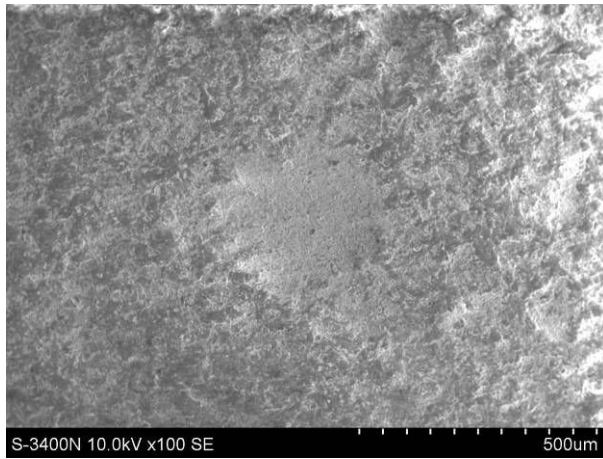


图 4-17 90° 时涂层冲蚀磨损表面 SEM 形貌

Fig.4-17 The erosion surface SEM morphology of the coating at 90°

4.4.3 风沙浓度对涂层冲蚀磨损的影响

风沙的浓度用下沙率 M (单位: g/min) 来表示, 图 4-18 是在各冲蚀角度下, 冲蚀速度为 $23m/s$, 时间为 $12min$ 条件下, 涂层的冲蚀失重量与下沙率的关系曲线图, 由图可知, 在各个角度下, 随着下沙率的增大, 冲蚀失重量在 $300g/min$ 时达到最大值, 冲蚀失重量的变化呈现两个阶段: 上升阶段和下降阶段。当 $M < 300g/min$, 冲蚀失重量呈上升趋势, 主要是由于随着下沙率的增大, 粒子冲击涂层的动能增大, 某一时刻冲击涂层表面的沙粒子增多, 涂层材料被反复切削、挤压和凿削的次数增多, 因而材料损失量也增多。当 $M \geq 300g/min$ 时, 冲蚀失重量呈下降趋势, 这是由于粒子数量增多, 粒子间的相互碰撞以及回弹粒子, 对粒子冲击涂层的动能大大削弱, 造成冲蚀失重量下降。总之, 风沙浓度对涂层冲蚀磨损的影响并不是浓度越大粒子对涂层的

冲蚀磨损程度越严重,相反,浓度达到一定高度时,涂层的冲蚀磨损程度会有所减轻。

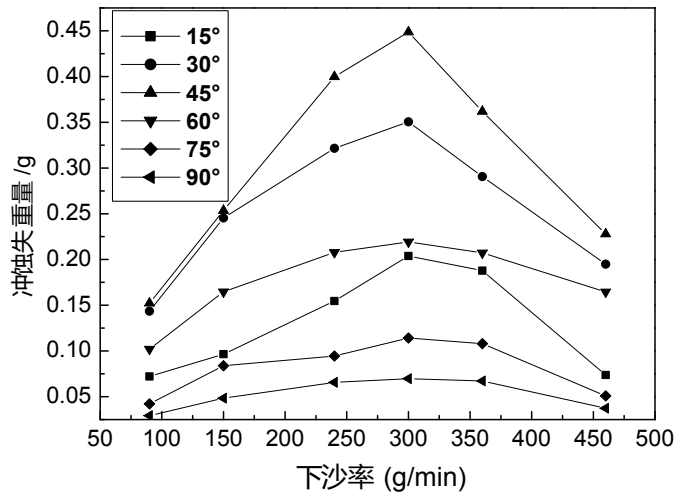


图 4-18 涂层冲蚀磨损失重量与下沙率的关系

Fig.4-18 The relationship between erosion mass-loss and sand-dose

4.4.4 风沙冲蚀时间对涂层冲蚀磨损的影响

研究钢结构涂层冲蚀磨损受时间的影响,就要对涂层的冲蚀过程分段分时间进行分析。本次每组实验中,对涂层每隔 5s 进行一次称重得到了涂层累积失重量与时间的关系以及冲蚀过程中冲蚀率随时间的变化关系。

图 4-19 和图 4-20 的冲蚀速度为 26m/s, 下沙率为 300g/min, 冲蚀时间为 13min。由图 4-19 可知,不同冲蚀角度时涂层的累积失重量随时间大致呈线性增长趋势,且 45° 时线性增长的趋势明显快于 90° 时的增长趋势。由图 4-20 可知,涂层的冲蚀过程存在明显的潜伏期、加速期和稳定期。冲蚀角度为 45° 时,冲蚀时间在 0s~25s 为潜伏期,25s~100s 为加速期,100s 之后进入稳定期;冲蚀角度为 90° 时,冲蚀时间在 0s~50s 为潜伏期,50s~170s 为加速期,170s 之后进入稳定期。90° 时的潜伏期和加速期较长。潜伏期内,45° 时冲蚀率为零,但是在 90° 时,出现冲蚀率为零和负值的情况,这主要是由于在 90° 的冲蚀初期,由于入射的沙粒子嵌入涂层,涂层就会产生“增重”的现象,而增重的大小,与冲击角度有关,一般低角度下嵌入增重的趋势明显小于高角度,本文中 45° 时没有产生嵌入增重的现象。

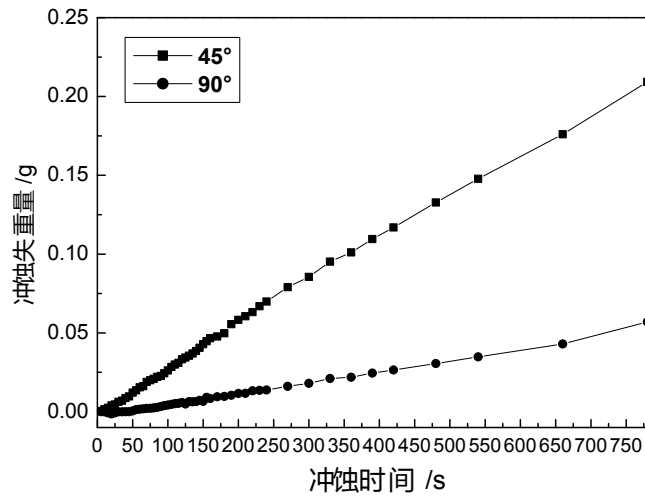


图 4-19 不同角度下涂层累积失重量与冲蚀时间的关系

Fig.4-19 The relationship between erosion mass-loss and erosion-time at different angle

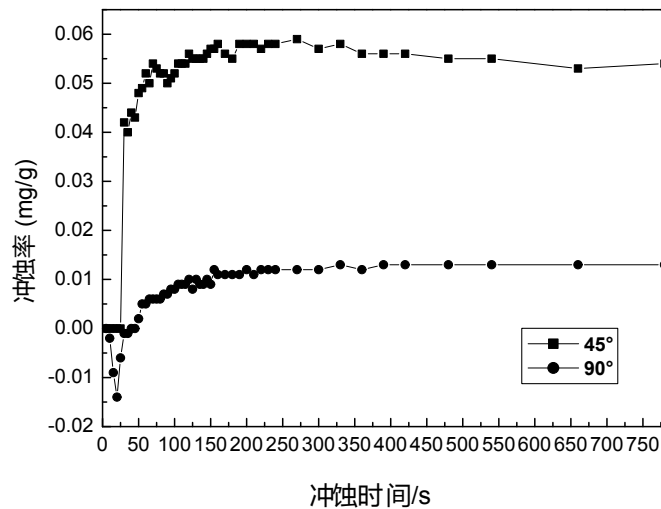


图 4-20 不同角度下冲蚀率与时间的变化关系图

Fig.4-20 The relationship between erosion rate and erosion-time at different angle

图 4-21 和图 4-22 的冲蚀角度为 60° ，下沙率为 90g/min ，冲蚀时间为 13min 。由图 4-21 可知，不同冲蚀速度时涂层的累积失重量随时间大致呈线性增长趋势，且 23m/s 时线性增长的趋势明显快于 19m/s 时增长趋势。由图 4-22 可知，涂层的冲蚀过程存在明显的潜伏期、加速期和稳定期。冲蚀速度为 23m/s 时，冲蚀时间在 $0\text{s}\sim 15\text{s}$ 为潜伏期， $15\text{s}\sim 200\text{s}$ 为加速期， 200s 之后进入稳定期；冲蚀速度为 19m/s 时，冲蚀时

间在 $0s\sim25s$ 为潜伏期, $25s\sim175s$ 为加速期, $175s$ 之后进入稳定期。 $19m/s$ 潜伏期较长, $23m/s$ 时加速期较长。在冲蚀角度为 60° 时涂层没有产生嵌入涂层“增重”的现象。

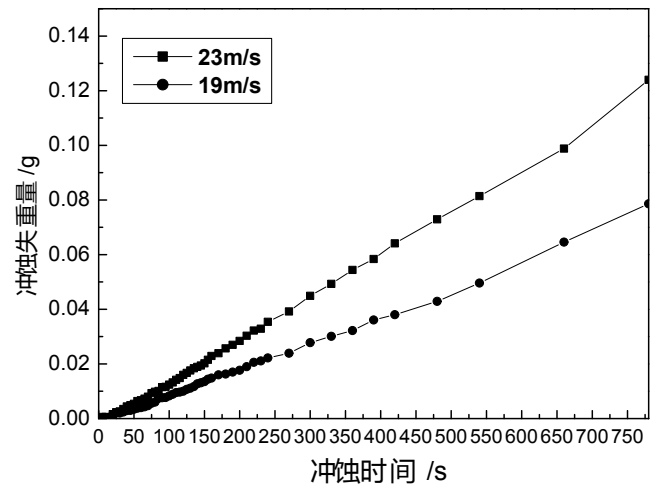


图 4-21 不同速度下涂层累积失重量与冲蚀时间的关系

Fig.4-21 The relationship between erosion mass-loss and erosion-time at different erosion speed

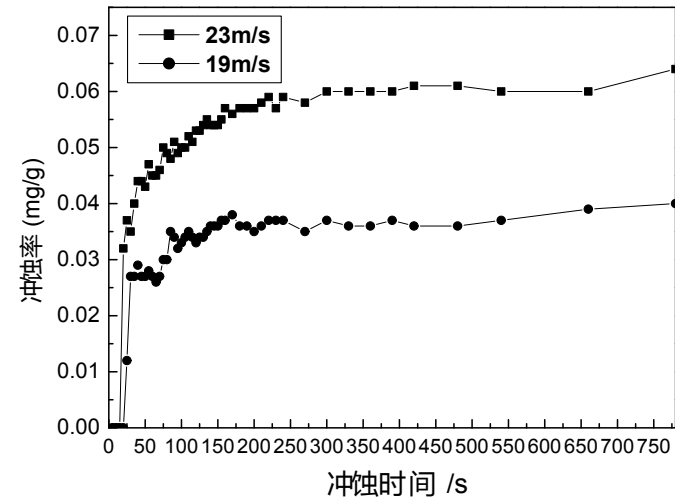


图 4-22 不同速度下冲蚀率与时间的变化关系图

Fig.4-22 The relationship between erosion rate and erosion-time at different erosion speed

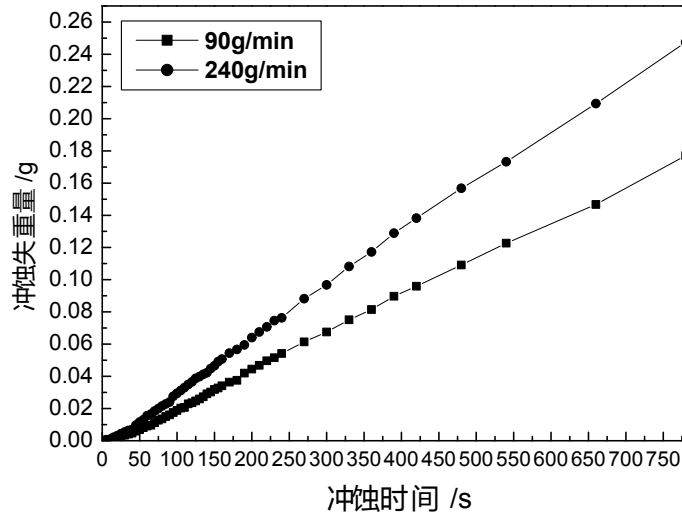


图 4-23 不同下沙率累积失重量与冲蚀时间的关系

Fig.4-23 The relationship between erosion mass-loss and erosion-time at different sand-dose

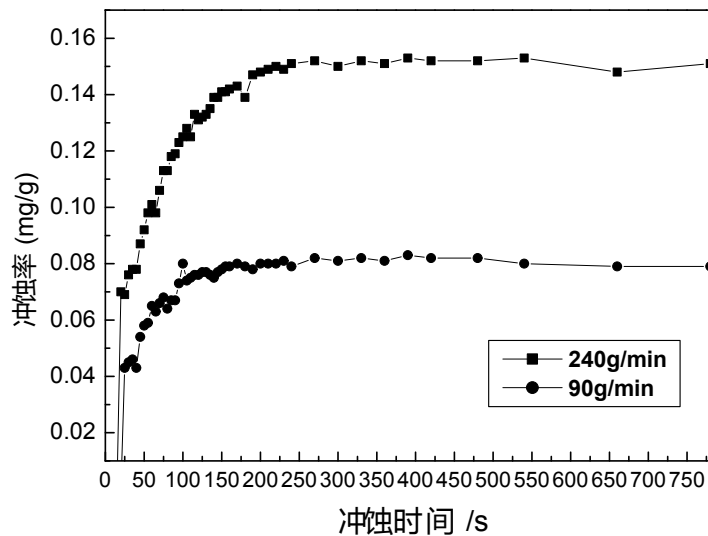


图 4-24 不同下沙率冲蚀率与时间的变化关系图

Fig.4-24 The relationship between erosion rate and erosion-time at different sand-dose

图 4-23 和图 4-24 的冲蚀角度为 30° ，冲蚀速度为 26m/s ，冲蚀时间为 13min 。由图 4-23 可知，不同下沙率时涂层的累积失重量随时间大致呈线性增长趋势，且 240g/min 时线性增长的趋势明显快于 90g/min 时增长趋势。由图 4-24 可知，涂层的冲蚀过程存在明显的潜伏期、加速期和稳定期。下沙率为 240g/min 时，冲蚀时间在

0s~20s 为潜伏期, 20s~200s 为加速期, 200s 之后进入稳定期; 下沙率为 90g/min 时, 冲蚀时间在 0s~25s 为潜伏期, 25s~125s 为加速期, 125s 之后进入稳定期。90g/min 潜伏期较长, 240g/min 加速期较长。

综上所述, 在不同冲蚀条件下, 涂层的累积失重量随时间大致呈线性增长趋势, 冲蚀过程中存在明显的潜伏期、加速期和稳定期三个阶段, 三个阶段的历时由冲蚀角度、冲蚀速度和下沙率等综合因素决定。

冲蚀磨损在三个不同阶段的冲蚀机理: (1) 潜伏期, 为冲蚀的初始阶段。低冲角时冲蚀率为零, 涂层只发生弹塑性变形, 表面留下细微的划痕; 高冲角时由于粒子嵌入涂层, 冲蚀率可能出现负数的情况, 涂层发生弹塑性变形表面产生细微的冲蚀坑。无论是低冲角还是高冲角, 在划痕或冲蚀坑的附近都伴有微裂纹产生, 微裂纹疲劳扩展而不使材料流失。(2) 加速期, 冲蚀率不断上升。此阶段内, 涂层不断吸收冲击能量导致塑性耗尽, 此时低冲角时的微切削作用和高冲角时的凿削作用造成的损失占主导地位, 二者作用的结果是, 前者形成较深的犁沟状的沟痕, 后者形成较深较大的冲蚀坑; 沟痕和冲蚀坑附近的微裂纹迅速扩展交叉, 以致断裂剥落, 形成剥落坑, 造成材料损失。(3) 稳定期, 此阶段内涂层的表面已被完全破坏。在凹凸不平的表面上较难造成有效的微切削和凿削。此时涂层的损失, 主要是微裂纹的产生和发展所导致的疲劳破坏。

4.5 本章小结

本章采用气流挟沙喷射法, 在不同的冲蚀速度、角度、浓度和时间等风沙冲蚀参数下, 对钢结构涂层进行了风沙冲蚀的模拟实验。对实验材料失重、抗冲蚀磨损性能和微观失效表面进行了分析。得出了以下主要结论:

1. 涂层的冲蚀率随风沙流速度呈指数增长, 其拟合指数 $n \approx 2.39 \sim 2.43$; n 值体现被冲蚀材料对速度的敏感度, n 值越大被冲蚀材料对速度越敏感; 45° 冲角下钢结构涂层对沙粒子冲击速度的敏感度较 90° 强。

2. 45° 时冲蚀过程出现了两个变化阶段, 低速冲蚀阶段和高速冲蚀阶段。 $V < 16\text{m/s}$ 时, 属于低速冲蚀阶段; $V \geq 16\text{m/s}$ 时, 属于高速冲蚀阶段。

3. 冲蚀角度在 45° 时涂层的冲蚀失重量最大, 90° 时涂层的冲蚀失重量最小, 表现出从塑性材料向脆性材料过渡的冲蚀磨损特征。

4. 低冲角时, 材料破坏方式以微切削作用为主, 决定材料耐冲蚀性能的主要是其硬度; 在高冲角时, 材料破坏方式以挤压凿削作用为主, 决定材料的耐冲蚀性能的

主要是其柔韧性；涂层属于延展性材料，其韧性较高，硬度较低，因此其在低角度时的冲蚀失重量要大于高角度时的冲蚀失重量。

5. 随着下沙率的增大，冲蚀失重量在 $300\text{g}/\text{min}$ 时达到最大值，冲蚀失重量的变化呈现两个阶段：上升阶段和下降阶段。

6. 在不同冲蚀条件下，涂层的累积失重量随时间大致呈线性增长趋势，冲蚀过程中存在明显的潜伏期、加速期和稳定期三个阶段，三个阶段的历时由冲蚀角度、冲蚀速度和下沙率等综合因素决定。

第五章 钢结构涂层的摩擦学性能分析

5.1 摩擦学的基本概念

摩擦副是由两个相互接触的物体产生摩擦所组成的一个摩擦体系。摩擦副的存在最终结果是产生了摩擦效应。自然界中，摩擦可以分为两大类，即静摩擦和动摩擦。静摩擦只有相对运动趋势，而没有相对运动；动摩擦具有相对运动，因此动摩擦又可分为滑动摩擦和滚动摩擦。

摩擦导致磨损，最终使摩擦面产生各种形式的损伤和破坏，因此摩擦的类型也就不尽相同。根据不同的磨损机理，磨损可以分为四类：磨粒磨损、粘着磨损、疲劳磨损和腐蚀磨损。而磨损过程根据磨损量随时间的变化差异可以分为三个阶段：磨合磨损阶段、稳定磨损阶段和剧烈磨损阶段。

5.2 钢结构涂层的摩擦性能分析

涂层的摩擦性能实验主要包括：涂层的动、静摩擦系数和耐磨性测试。

5.2.1 涂层动、静摩擦系数的测试

根据库仑定律：

$$F = fw \quad (5-1)$$

式中： F ——摩擦力；

f ——摩擦系数；

W ——为正压力。

摩擦系数为系统特性，受到摩擦过程中各种因素的影响。因此，测定摩擦系数的准确值和预估其影响因素是比较困难的。涂层的摩擦系数按照《塑料薄膜和薄片摩擦系数测定方法》在 MXD-02 型摩擦系数测试仪上进行测定，实验仪器如图 5-1。



图 5-1 摩擦系数仪

Fig.5-1 The friction coefficient tester

试样尺寸为 $63\text{mm} \times 63\text{mm} \times 0.5\text{mm}$ ，摩擦副为 45 # 钢板。摩擦条件为干摩擦，法向力为 $1.96 \pm 0.02\text{N}$ ，两试样表面以 $100 \pm 10\text{mm/min}$ 的速度相对移动。测试温度 $(23 \pm 2)^\circ\text{C}$ 。

实验时，出现的第一个峰值为静摩擦力，两试样相对移动 6cm 内的力的平均值为（不包括静摩擦力）为动摩擦力。

测试结果显示：涂层的动摩擦系数为 0.37，静摩擦系数为 0.42。

5.2.2 涂层的耐磨性测试

耐磨性是衡量材料抵抗磨损的一个性能指标，采用 Taber 实验仪（型号 FR-1907 Taber 磨耗机），如图 5-2 所示，测定钢结构涂层的耐磨性能。测量条件：采用 CS17 型橡胶砂轮，转盘转速 60r/min ，加压负荷为 7.5N ，转数为 1000r。磨损量为实验前后的质量差，由分析天平精确测量，精度为 0.1mg 。



图 5-2 Taber 实验仪

Fig.5-2 Taber experiment instrument

本实验测得的涂层耐磨的 Taber 指数为 $81.9 \times 10^{-3} \text{ mg/r}$ 。

5.2.3 涂层的摩擦性能综合评价

钢结构涂层柔韧性较好，属于软质涂层，涂层与基材之间的结合强度较低，剪切强度较低，遭受冲击摩擦时易造成剪切破坏。涂层硬度为 B 级，硬度较低，涂层颗粒较软，结构致密度低，在磨损时，涂层只受到摩擦力和不变荷载的作用，由于涂层的摩擦系数处于 0.37~0.42 之间，在同等条件下涂层受到的摩擦力较大，涂层刚开始磨损时，平整的表面经受磨损使得表面变得粗糙，这样在后续的摩擦力和不变荷载的作用下，涂层更容易变形和脱落，此时的涂层的耐磨性能变差，涂层磨损的 Taber 指数为 $81.9 \times 10^{-3} \text{ mg/r}$ ，高于《HG/T3831-2006 喷涂聚脲防护材料》标准的规定 ($\leq 80 \times 10^{-3} \text{ mg/r}$)，磨损率较大，因此，涂层的耐磨性较差。

5.3 沙粒子对钢结构涂层表面的冲击摩擦研究

5.3.1 冲击摩擦系数

冲蚀是与材料特性及接触状态有关的动态过程，冲击过程中的冲击摩擦系数反应了材料冲蚀的摩擦学特性。冲击摩擦系数为接触面切向冲量与法向冲量之比，具有静摩擦特征，并用下式表示：

$$f = \int_0^t F dt / \int_0^t N dt \quad (5-2)$$

式中：F、N ——接触面切向与法向动力。

t ——冲击接触时间。

5.3.1 涂层冲蚀率的摩擦学定量预估模型

郭源君^[76]等提出了的涂层表面材料流失的定量预估模型：

$$\varepsilon = 3\rho_c \varepsilon_1 / 4\pi r^3 \rho_l \quad (5-3)$$

$$\varepsilon_1 = \frac{8\sqrt{2}r^3}{3(\pi\sigma_0)^\beta} \left(\frac{E}{1-\mu^2} \right)^{\frac{4\beta-5}{5}} \left\{ \frac{2}{5+\beta} - \frac{1}{10+\beta} - \frac{1}{4(15+\beta)} \right\} \quad (5-4)$$

$$(ctg\alpha_0 - f)(4f)^\beta \left(\frac{5}{4} \pi \rho_l V_0^2 \sin^2 \alpha_0 \right)^{\frac{5+\beta}{5}}$$

式中： ε ——涂层冲蚀率；

r ——粒子半径；

ρ_c, ρ_l ——涂层材料与粒子密度；

E, μ ——涂层材料的弹性模量及泊松比；

σ_0, β ——涂层材料的冲蚀特性参数；

V_0, α_0 ——粒子的初始入射速度及入射角；

f ——冲击摩擦系数。

从上式可以看出，材料冲蚀损伤与材料和粒子的力学性能、冲蚀特性以及冲击摩擦系数等有关系。

5.3.2 钢结构涂层的冲击摩擦系数的分析

本节根据冲蚀率的定量预估模型，建立钢结构涂层模型，根据冲蚀试验中的冲蚀率，推导钢结构涂层的冲蚀摩擦系数的变化规律。

1. 钢结构涂层的沙粒子冲击模型

图 5-3 为粒子受力简图，由于沙粒微小，平均粒径在 $0.3mm$ 左右，可将风沙粒子简化为刚体，接触后粒子在质心速度方向的平面内运动，粒子中心运动只受接触面法向与切向力控制。

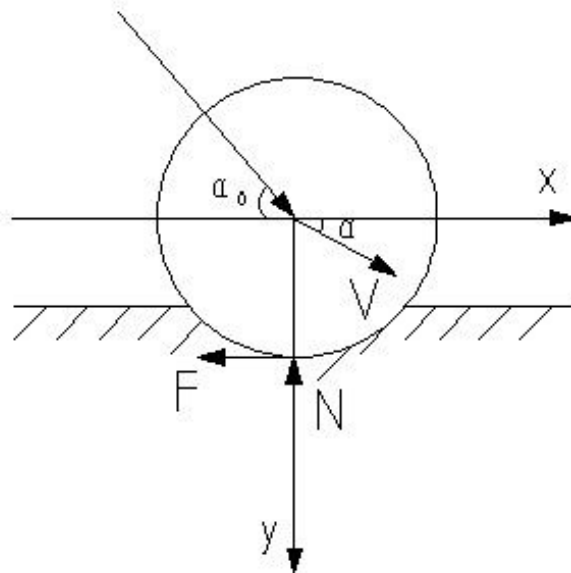


图 5-3 粒子受力简图

Fig.5-3 The particle stress diagram

2. 模型中粒子冲蚀参数

沙粒子平均直径为 $300\ \mu m$,密度 $2.7\ g/cm^3$,泊松比 0.25。涂层密度 $2.0\ g/cm^3$,弹性模量 $16\ MPa$,泊松比 0.45,硬度 $2.3\ MPa$,涂层材料的冲蚀疲劳极限应力大约为 $2\ MPa$ (取涂层的屈服极限)。由于速度与冲蚀率的拟合指数处于 2.39~2.43 之间,因此在计算冲击摩擦系数时可认为指数为速度与冲蚀率的关系指数为 2.4,由公式 (5-4)可知,冲蚀特性参数 β 取为 1。

3. 冲击摩擦系数随冲蚀速度的变化

表 5-3 和表 5-4 是下沙率为 $150g/min$,冲蚀角度为 45° 和 30° 时不同冲蚀速度下对应的冲击摩擦系数,由表 5-3 可知, 45° 时,冲击摩擦系数处于 0.22~0.33 范围内,平均值为 0.29,冲击摩擦系数以 0.29 为基准上下波动,离散性较大;由表 5-4 可知, 30° 时,冲击摩擦系数处于 0.24~0.37 范围内,平均值为 0.32,冲击摩擦系数以 0.32 为基准上下波动,离散性较大。两种情况下的冲击摩擦系数比通常意义下的摩擦系数要小。此外,由表中数据可知, 30° 下的冲击摩擦系数要大于 45° 下的冲击摩擦系数。

综上,冲击摩擦系数随速度并没有固定的变化规律,这可能是由于不同速度时,冲蚀的系统特性不相同所造成的。

表 5-3 45° 时风沙流速度 V 所对应的所对应的冲击摩擦系数 f

Fig.5-3 The erosion speed with the corresponding concentration impact friction coefficient at 45°

$V\ (m/s)$	13	16	18	20	23	26	30
ε (实验值 mg/g)	0.040	0.051	0.089	0.106	0.16	0.2	0.252
f (计算值)	0.33	0.22	0.33	0.28	0.33	0.29	0.24

(注: 公式 5-3 中冲蚀率的计算单位为 mg/kg)

表 5-4 30° 时风沙流速度 V 所对应的所对应的冲击摩擦系数 f

Fig.5-4 The erosion speed with the corresponding concentration impact friction coefficient at 30°

$V\ (m/s)$	13	16	18	20	23	26	30
ε (实验值 mg/g)	0.039	0.047	0.088	0.099	0.141	0.19	0.223
f (计算值)	0.37	0.24	0.37	0.31	0.35	0.32	0.25

4. 冲击摩擦系数随冲蚀角度的变化

表 5-5 和表 5-6 是在下沙率分别为 $150g/min$ 和 $240g/min$,冲蚀速度为 $20m/s$ 时,不同冲蚀角度时所对应的冲击摩擦系数。由表可知,冲击摩擦系数随冲蚀角度呈降低

趋势，在 30° 时冲击摩擦系数最大，这主要是由于在低角度 30° 时，切向动力达到最大，而法向动力最小，由公式（5-2）可知，此时的冲击摩擦系数最大；随着角度的不断增大，粒子冲蚀涂层的切向动力逐渐减小，法向动力不断增大，因而冲击摩擦系数随角度增长呈降低趋势。

此外，由表可知，冲击摩擦系数与冲蚀率随角度的变化并不一致，当 $\alpha_0 < 45^\circ$ 时，冲击摩擦系数减小而冲蚀率增大，当 $\alpha_0 \geq 45^\circ$ 时，冲击摩擦系数减小冲蚀率也随之减小。

表 5-5 下沙率 150g/min 时不同角度所对应的冲击摩擦系数 f

Fig.5-5 The different angle with the corresponding concentration impact friction coefficient at 150g/min

角度 ($^\circ$)	30	45	60	75
ε (实验值 mg/g)	0.099	0.106	0.048	0.016
f (计算值)	0.31	0.28	0.13	0.07

表 5-6 下沙率 240g/min 时不同角度所对应的冲击摩擦系数 f

Fig.5-6 The different angle with the corresponding concentration impact friction

角度 ($^\circ$)	30	45	60	75
ε (实验值 mg/g)	0.108	0.116	0.063	0.020
f (计算值)	0.35	0.34	0.21	0.14

对比表 5-5 和表 5-6，下沙率为 240g/min 时的冲击摩擦系数较下沙率为 150g/min 时大；事实上，本文中所计算的冲击摩擦系数是“平均冲击摩擦系数”，下沙率大时，同一时刻冲击到涂层表面的沙粒子较多，冲击摩擦次数也较多，因而平均冲击摩擦系数较大，反之则较小。

由于冲击摩擦系数受接触点生长、冲击荷载、粒子滑动速度以及温度效应等因素的影响，直接研究冲击摩擦系数有一定的难度，本文借助冲蚀实验，从宏观上对冲击摩擦系数进行分析，其结果可为工程实际提供参考。

5.4 本章小结

本章通过实验研究和理论分析，考察了钢结构涂层在静力条件下的摩擦性能，和动力冲击条件下的摩擦性能，主要得出以下几方面结论：

1. 涂层的动摩擦系数为 0.37，静摩擦系数为 0.42。涂层耐磨的 Taber 指数为 $81.9 \times 10^{-3} \text{mg/r}$ 。
2. 在摩擦力和不变荷载的作用下，涂层更容易变形和脱落，涂层的耐磨性能差。
3. 45° 时，冲击摩擦系数在 0.22~0.33 范围内波动， 30° 时，冲击摩擦系数在 0.24~0.37 范围内波动， 30° 时的冲击摩擦系数大于 45° 时的冲击摩擦系数，两种情况下，冲击摩擦系数离散性较大。
4. 冲击摩擦系数随冲蚀角度呈降低趋势，在 30° 时冲击摩擦系数最大；由于随着角度的不断增大，粒子冲蚀涂层的切向动力逐渐减小，法向动力不断增大，因而冲击摩擦系数随角度增长呈降低趋势。
5. 冲击摩擦系数与冲蚀率随角度的变化并不一致，当 $\alpha_0 < 45^\circ$ 时，冲击摩擦系数减小而冲蚀率增大，当 $\alpha_0 \geq 45^\circ$ 时，冲击摩擦系数减小冲蚀率也随之减小。

第六章 结论与展望

6.1 结论

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,采用气流挟沙喷射法,组建了一套模拟风沙环境的实验系统,研究了不同风沙冲蚀力学参数下涂层受冲蚀磨损等摩擦学行为,分析了涂层在不同冲蚀力学参数下的冲蚀磨损失重量变化规律;最后采用摩擦学性能实验和理论计算分析,分析了钢结构涂层的摩擦学性能。从实验研究和理论计算中得出了如下结论:

1. 分析了内蒙古中西部地区沙尘气象及冲蚀力学参数。测定了库布齐沙漠和腾格里沙漠的风沙冲蚀力学参数:沙粒的粒径、沙粒的形状、沙粒的硬度和沙粒的密度。并根据内蒙古中西部地区风速和沙尘浓度特征,设置了实验的风沙流速度和沙尘浓度。

2. 测定了钢结构涂层的物理力学性能。采用千分尺测定了涂层的厚度,利用体积和质量的传统方法测定了涂层的密度,采用铅笔法测定了涂层的硬度,利用漆膜柔韧性测定仪测定了涂层的柔韧性,使用漆膜附着力等级测定仪测试了涂层的附着力等级,应用电子拉力机测定了涂层/基材的结合强度。测试结果显示:涂层的平均厚度为 $1000\mu\text{m}$,同一试件的厚度均匀、平整度好,满足实验要求;涂层的密度为 $2.0\text{g}/\text{cm}^3$,硬度为 B 级,柔韧性值为 4mm ,涂层与基材的附着力等级为 0 级,涂层的结合强度为 2.3MPa 。

3. 采用气流挟沙喷射法,模拟了风沙环境下钢结构涂层受冲蚀磨损实验,主要得到以下结论:(1)研究了钢结构涂层冲蚀失重量与不同风沙冲蚀力学参数的关系,并探讨了相应的原因,分析了涂层的抗冲蚀磨损性能。(2)采用扫描电镜观测了钢结构涂层在不同冲蚀角度下的微观失效表面,分析了涂层受冲蚀磨损的损伤机理。(3)涂层在冲蚀过程中存在明显的潜伏期、加速期和稳定期,研究了在不同冲蚀力学参数下三个阶段的历时及特征,并探讨了各个阶段的冲蚀机理。

4. 研究了钢结构涂层的摩擦学性能。采用摩擦系数仪和摩擦磨损仪,测试了钢结构涂层的动、静摩擦系数和耐磨性指标,评价了钢结构涂层的摩擦学性能;运用涂层冲蚀率的摩擦学定量预估模型,通过实验数据,对涂层的冲击摩擦系数进行了理论计算,分析了涂层的冲击摩擦性能。结果显示:钢结构涂层的动摩擦系数为 0.37,静摩擦系数为 0.42,耐磨性 Taber 指数为 $81.9\times 10^{-3}\text{mg}/\text{r}$;涂层的冲击摩擦系数随速度

变化不呈现规律性，随角度增大呈降低趋势，与冲蚀率的变化规律不一致。

本文的研究成果，将为涂层的设计、应用和防护提供依据。

6.2 展望

1. 本文研究钢结构涂层材料随风沙冲蚀力学参数的变化规律。分析了不同角度下的冲蚀机理，下一步将研究抗冲蚀的钢结构涂层材料。

2. 本文研究了钢结构涂层的静态和动态的冲击摩擦性能，下一步将对钢结构涂层掺入不同的添加剂来研究其摩擦学性能。

参 考 文 献

- [1] ALLEN C , BALL A. A review of the performance of engineering materials under prevalent tribological and wear situations in South Africa industries [J]. Tribo Inter. 1996(29): 105-116
- [2] 董刚, 张九渊. 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): 307-312
- [3] 刘娟, 许洪元, 齐龙浩等. 几种水机常用金属材料的冲蚀磨损性能研究[J]. 摩擦学学报. 2005, 25(5): 470-474
- [4] 蔡森, 王贵森, 金日光等. 影响涂料耐磨性能的主要因素[J]. 材料保护. 2003, 36(1): 51-53
- [5] 韩志武, 张俊秋, 戈超. 仿生形态表面气固冲蚀磨损性能[J]. 吉林大学学报(工学版). 2009, 39(6): 1512-1515
- [6] 高峰, 黄河, 任露泉. 新疆岩蜥三元耦合耐冲蚀磨损特性及其仿生试验[J]. 吉林大学学报(工学版). 2008, 38(3): 586-590
- [7] 张俊秋, 韩志武, 江佳廉. 柔性形态耦合仿生抗冲蚀三维数值模拟[J]. 吉林大学学报(工学版). 2011, 41(1): 139-143
- [8] 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. 2011(4): 57-63
- [9] 李亚杰. 水工建筑物砂粒磨损估算方法[J]. 水利学报. 1989(7): 60-66
- [10] 刘娟, 许洪元, 齐龙浩. 水力机械中冲蚀磨损规律及抗磨措施研究进展[J]. 水力发电学报. 2005, 24(1): 113-117
- [11] 郝贞洪, 邢永明, 杨诗婷. 风沙环境下钢结构表面涂层冲蚀行为与侵蚀机理研究[J]. 摩擦学学报. 2010, 30(1): 26-31
- [12] 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
- [13] 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
- [14] 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(4): 607-612
- [15] 陈冠国, 褚秀萍, 张宏亮等. 关于冲蚀磨损问题[J]. 河北理工学院学报. 1997, 19(4): 27
- [16] 代廷海. 不同试验参数下过共晶铝锰基复合材料冲蚀磨损性能研究[D]. 新疆大学. 2011, 2-3
- [17] 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

- [18] 马颖, 任俊, 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): 21-25
- [19] I. Hussainova. Some aspects of solid particle erosion of cermets [J]. Tribology International, 2001(34): 89-93
- [20] 赵田臣, 樊云昌, 付华, 于旭光. 砂浆冲蚀磨损特性研究[J]. 润滑与密封. 2003(2): 58-59
- [21] 王恩万, 祁小群. 颗粒增强金属基复合材料耐浆料冲蚀磨损性能的研究[J]. 热加工工艺. 2001(2): 15-16
- [22] 陈孙艺. 流体对管件冲蚀的研究和防护[J]. 石油化工腐蚀与防护. 2003, 20(5): 59-62
- [23] BALLOUT Y, MATHIS J A, TALIA J E. Solid particle erosion mechanism in glass [J]. Wear. 1996, 196(1-2): 263-269
- [24] LEVY A, CHIK P. The effects of erodent composition and shape on the erosion of steel [J]. Wear. 1983, 89(2): 151-162
- [25] ZHOU J R, BAHADUR S. Effect of blending of silicon carbide particles in varying sizes on the erosion of Ti6Al4V [J]. Wear. 1989, 132(2): 235-246
- [26] YERRAMAREDDY S, BAHADUR S. Effect of operational variables microstructure and mechanical properties on the erosion of Ti6Al4V [J]. Wear. 1991, 142(2): 253-263
- [27] LIEBHARD M, LEVY A. The effect of erodent particle characteristics on the erosion of metals [J]. Wear. 1991, 151(2): 381-390
- [28] 董刚, 张九渊. 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): 307-312
- [29] 任振安, 宣兆志, 刘海军等. 高铬铸铁堆焊层组织对冲蚀磨损性能的影响[J]. 焊接学报. 1999, 20(2): 126-130
- [30] MCLP, CABE S G. Effect of microstructure on the erosion of steel by solid particles [J]. H Conrad Wear. 1985, 105: 257-277
- [31] 康进兴, 赵文轸, 朱金华. 材料抗冲蚀性的研究进展[J]. Erosion Resistance of Materials. 2001, 34(10): 22-24
- [32] 魏秀鹏, 陈家富. 20g 钢的冲蚀磨损性能的研究[J]. 辽宁石油化工大学学报. 2006, 24(2): 82-84
- [33] 刘英杰, 成克强. 磨损失效分析基础[M]. 北京: 机械工业出版社, 1991
- [34] GAT N, TABAKOFF W. Some effects of temperature on the erosion of metals [J]. Wear. 1978, 50(1): 85-94
- [35] 赵文轸. 热喷涂喷焊层的抗磨性研究[J]. 材料工程. 1998(10): 33-36
- [36] MCPHERSON R. The relationship between the mechanism of formation, microstructure and

- properties of plasma-sprayed coatings [J]. Thin Solid Films. 1981, 83: 297-310
- [37] Hutchings I M A. Model for the Erosion of Metals by Spherical Particles at Normal Incidence [J]. Wear. 1981, 70(3): 269-281
- [38] Foley T, Levy A. The Erosion of Heat Treated Steels[J]. Wear. P. 1983, 91(1): 45-64
- [39] Peterson L G, Sergeant G A, Conrad H. Effect of Microstructure on the Erosion of Steel by Solid Particles [J]. Wear of Materials. 1985: 661-670
- [40] Ruff. A W, Ives L K, Glaeser W A. Characterization of Wear Surfaces and Wear Debris[J]. American Society for Metals. 1981: 235-289
- [41] 冯艳玲, 魏琪, 李辉等. 高温冲蚀磨损测试方法及机理的研究概述[J]. 锅炉技术. 2008, 39(4): 63-65
- [42] Noriyuki, Hayashi, et al. Development of new testing method by centrifugal erosion tester at elevated temperature [J]. Wear. 2005, (258): 443-457
- [43] 张凤雷, 贺琦, 郭会斌. 喷射式冲蚀磨损实验系统及红外光学材料冲蚀行为研究[J]. 红外技术. 2007, 29(4): 196-197
- [44] 汤文博, 徐继达, 陶玲. 固体粒子冲蚀磨损试验机改进[J]. 郑州工业大学学报, 2001, 22(3): 69-71
- [45] Bitter J G A. A study of erosion phenomena: Part I [J]. Wear. 1963, 6(1): 5-21
- [46] 王顺森, 刘观伟, 毛靖儒等. 汽轮机喷嘴固粒冲蚀模化试验系统及测试方法[J]. 中国电机工程学报. 2007, 27(11): 103-108
- [47] Wood R J K. Wheeler D W. Design and performance of a high velocity air-sand jet impingement erosion facility [J]. Wear. 1998, 220(2): 95-112
- [48] Kleis I, Kulu P, Solid particle erosion occurrence, prediction and control[M]. Springer. 2008: 1-47
- [49] Wood F W. Erosion by solid-particle impacts: A Testing Update [J]. Journal of Testing and Evaluation. 1986, 14(1): 23-27
- [50] 马志宏, 汪俊. 砂尘环境中军用装备磨损腐蚀进展的研究[J]. 腐蚀科学与防护技术. 2005, 17(2): 112-115
- [51] 马志宏, 苏兴荣. 砂尘环境对军用装备磨损和腐蚀的影响[J]. 兵工学报. 2005, 26(4): 553-556
- [52] 高峰, 黄河, 任露泉. 新疆岩蜥三元耦合耐冲蚀磨损特性及其仿生试验[J]. 吉林大学学报(工学版). 2008, 38(3): 586-590
- [53] 韩志武, 张俊秋, 戈超. 仿生形态表面气固冲蚀磨损性能[J]. 吉林大学学报(工学版). 2009,

- 39(6): 1512-1515
- [54] 张俊秋, 韩志武, 江佳廉. 柔性与时态耦合仿生抗冲蚀三维数值模拟[J]. 吉林大学学报(工学版). 2011, 41(1): 139-143
- [55] 江佳廉. 红柳抗风沙冲蚀机理及其仿生应用[D]. 长春市: 吉林大学硕士学位论文. 2012 年 6 月
- [56] 芦信. 风沙两相流对架空导线磨损的实验研究[D]. 北京市: 华北电力大学硕士学位论文. 2013 年 3 月
- [57] Hogmark S, Jacobson S. Friction lubrication and wear technology [K]. [s 1]: ASM Handbook, 1992
- [58] Blomberg A, Olsson M, Hogmark S. Wear mechanism and tribomapping of Al_2O_3 and SiC in dry sliding [J]. Wear. 1994, 171: 77-89
- [59] Sproul W D. Physical vapour deposition tool coatings [J]. Surface Coating Technology. 1996, 81: 56-62
- [60] Johansson E. Surface modification in tribology [D]. [s 1]: Acta Universitatis Upsaliensis Dissertation in Science and Technology. 1993
- [61] Bell T. New direction in tribology [A]. London: Mechanical Engineering Publication Ltd. 1997
- [62] 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
- [63] 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
- [64] 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
- [65] 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
- [66] 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): 220-229
- [67] 王文彪, 范悦会. 库布齐沙漠流动沙丘与固定沙丘沙物质粒径分析的研究[J]. 内蒙古林业科技. 2011, 37(1): 23-27
- [68] 李恩菊. 巴丹吉林沙漠与腾格里沙漠沉积物特征的对比研究[J]. 西安: 陕西师范大学博士学位论文. 2011
- [69] 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

- [70] 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
- [71] 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]. 中国环境监测. 2004, 20(3): 8-11
- [72] 钱正安, 蔡英, 刘景涛. 中蒙地区沙尘暴研究的若干进展[J]. 地球物理学报. 2006, 40(12): 83-92
- [73] Momber A and Kovacevie R. Fundamental Investigations on Concrete Wear by High Velocity Water Flow [J]. Wear. 1994(1): 55-62
- [74] 尹延国, 朱元吉, 胡献国. 水工混凝土冲蚀磨损试验方法的研究[J]. 水力水电技术. 2001, 32(3): 15-18
- [75] 矫梅燕, 赵琳娜, 卢晶晶等. 沙尘天气定量分级方法研究与应用[J]. 气候与环境研究. 2007, 1(3): 350-353
- [76] 郭源君, 庞佑霞. 弹性涂层的冲蚀损伤特性研究[J]. 应用力学学报. 2003, 20(4): 51-53

致 谢

三年的研究生生活在这个季节即将划上句号，回忆着三年的点点滴滴，我思绪万千。三年里，我的导师郝负洪教授以其艰苦奋斗和一丝不苟的工作作风和严谨求实的治学态度深深地感染着我，授我以文，教我做人，使我终生受益。在论文完成之际，谨向导师致以衷心的感谢和崇高的敬意。

在这里还要感谢内蒙古工业大学土木工程学院的白明海老师对我实验的指导，感谢我的师弟冯玉江、宿廷以及师妹朱敏侠在实验过程中对我的支持和帮助，感谢我的舍友王利强、王小磊、贾宗明、高利才对我的帮助。

最后特别感谢我的父母和爱人任莹，他们的理解、关心和支持，是我顺利完成学业、不断前行的动力与支柱。

在读期间取得的科研成果

本研究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, 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)
- [2] 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)
- [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