

国家自然科学基金资助项目 (11162011, 51468049, 11662012)

内蒙古自治区自然科学基金资助项目 (2009MS0706)

内蒙古自治区人才开发基金项目

风沙环境下钢结构涂层侵蚀力学行为与损伤评价研究

FENGSHA HUANJINGXIA GANGJIEGOU TUCENG QINSHI
LIXUE XINGWEI YU SUNSHANG PINGJIA YANJIU

郝贫洪 邢永明 著

中国建筑工业出版社

国家自然科学基金资助项目 (11162011, 51468049, 11662012)

内蒙古自治区自然科学基金资助项目 (2009MS0706)

内蒙古自治区人才开发基金项目

风沙环境下钢结构涂层侵蚀 力学行为与损伤评价研究

郝负洪 邢永明 著

中国建筑工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

风沙环境下钢结构涂层侵蚀力学行为与损伤评价研究 /

郝寅洪, 邢永明著. —北京: 中国建筑工业出版社, 2017. 1

ISBN 978-7-112-20109-9

I. ①风… II. ①郝… ②邢… III. ①钢结构—金属

涂层—腐蚀—研究 IV. ①TG172.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 278118 号

本书是作者及其团队十余年研究成果的总结。书中以内蒙古中西部地区风沙环境为研究背景, 在较系统地分析了风沙环境特征、钢结构涂层材料物理和力学性能的研究基础上, 对钢结构涂层受风沙流粒子冲蚀力学行为、耐久性损伤机理及其损伤程度进行了研究。全书共分为 10 章, 包括: 绪论、内蒙古中西部地区风沙环境特征分析、钢结构涂层的制备及其物理力学性能测定、风沙冲击作用下钢结构涂层及其与基体界面冲蚀磨损理论分析、风沙环境下钢结构涂层的冲蚀试验研究、风沙环境下钢结构涂层冲蚀磨损机理分析、钢结构涂层受风沙环境冲蚀磨损损伤程度评价、钢结构涂层的摩擦学性能分析、风沙流粒子冲击钢结构涂层的有限元分析、相似理论及其在风沙侵蚀研究中的应用。本书可供土木建筑专业的研究人员、高等院校教师及研究生参考使用。

责任编辑: 王砾瑶

责任校对: 焦 乐 赵 颖

风沙环境下钢结构涂层侵蚀力学行为与损伤评价研究

郝寅洪 邢永明 著

*

中国建筑工业出版社出版、发行 (北京海淀三里河路 9 号)

各地新华书店、建筑书店经销

北京佳捷真科技发展有限公司制版

北京同文印刷有限责任公司印刷

*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 11 1/4 字数: 278 千字

2017 年 4 月第一版 2017 年 4 月第一次印刷

定价: 35.00 元

ISBN 978-7-112-20109-9

(29553)

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题, 可寄本社退换

(邮政编码 100037)



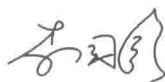
序

我国西北地区为全球现代沙尘暴的高活动区，长期以来，该区域基础设施的耐久性受风沙冲磨侵蚀作用影响严重，尤其是建在沙漠及周边的桥梁、通信塔和输电塔等钢结构体系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体系耐久性起关键保护作用的表面防腐蚀涂层冲蚀磨损破坏，涂层破坏会造成钢结构极易锈蚀、性能劣化、构件承载力下降，使其耐久性和安全性降低。开展钢结构防腐涂层受风沙环境冲蚀磨损的力学行为和损伤机理、冲蚀损伤程度评价方法、抗冲蚀磨损措施和制备抗冲蚀磨损涂层等一系列相关问题的研究，具有重要的学术和应用价值。

十多年来，郝贞洪、邢永明教授和他们的研究团队在国家自然科学基金、内蒙古自治区自然科学基金、内蒙古自治区人才开发基金、内蒙古工业大学重点基金、中国电力科学研究院国家电网公司基础前瞻性科技项目等基金项目的资助下，以我国西北地区风沙环境为研究背景，在较系统地分析了风沙环境特征、钢结构涂层材料物理和力学性能的研究基础上，对钢结构涂层受风沙流粒子冲蚀力学行为、耐久性损伤机理及其评价方法、风沙环境冲蚀理论、有限元分析及其应用等方面开展了深入系统的研究，取得了具有实用价值的研究成果，为风沙地区钢结构涂层耐久性损伤评价及其防护提供了试验和理论依据。

该书涉及土木工程、材料科学与工程、环境工程以及工程力学等学科，有较高的学术价值和工程应用价值，对从事工程结构及材料耐久性研究的科研人员与技术工作者有重要参考价值，相信该专著的出版会对工程结构耐久性领域的研究与应用起到促进作用。

中国钢结构协会 副会长
中国钢结构协会防火与防腐分会 理事长
同济大学 教授


李国强

2017 年 2 月

前 言

中国北方地区处于全球四大沙尘暴区之一的中亚沙尘暴区，为全球现代沙尘暴的高活动区之一，而内蒙古中西部地区地跨西北和华北地区，沙漠分布较多，是该高活动区的中心地段。该区域基础设施的耐久性受风沙冲磨侵蚀作用影响严重，尤其是建在沙漠及周边的桥梁、通信塔和输电塔等钢结构体系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，由于涂层对钢结构体系耐久性起关键保护作用，钢结构表面涂层破坏，钢结构极易锈蚀、性能劣化、构件承载力下降，造成其耐久性和安全性降低。深入研究冲蚀磨损，分析钢结构涂层受风沙流粒子冲蚀磨损的力学行为和损伤机理，研究评价其受冲蚀程度的准则和方法、抗冲蚀磨损措施和制备抗冲蚀磨损涂层等一系列相关问题成为工程界和学术界一项迫切需要研究的任务。

本书是国家自然科学基金资助项目（No. 11162011, 51468049, 11662012）、内蒙古自治区自然科学基金资助项目（No. 2009MS0706）、内蒙古自治区人才开发基金项目、内蒙古工业大学重点基金项目、中国电力科学研究院国家电网公司基础前瞻性科技项目（《输电线路环境荷载作用机理及灾害防治技术》）输电线路环境因素若干问题研究子课题（项目编号：1508-00492）的研究成果之一。

上述项目是针对我国西北地区风沙环境严重影响工程结构和材料耐久性和安全性的背景下展开的。这项工作从 2005 年开始，已历时 10 余年，项目以内蒙古中西部地区风沙环境为研究背景，在较系统地分析了风沙环境特征、钢结构涂层材料物理和力学性能的研究基础上，对钢结构涂层受风沙流粒子冲蚀力学行为、耐久性损伤机理及其损伤程度进行了研究。本书是在上述成果的基础上总结而成的，本书共分 10 章，主要内容包括绪论、内蒙古中西部地区风沙环境特征分析、钢结构涂层的制备及其物理力学性能测定、风沙冲击作用下钢结构涂层及其与基体界面冲蚀磨损理论分析、风沙环境下钢结构涂层的冲蚀试验研究、风沙环境下钢结构涂层冲蚀磨损机理分析、钢结构涂层受风沙环境冲蚀磨损损伤程度评价、钢结构涂层的摩擦学性能分析、风沙流粒子冲击钢结构涂层的有限元分析、相似理论及其在风沙侵蚀研究中的应用。上述内容是在认真学习国内外专家、学者和工程技术人员研究成果的基础上，由作者及其研究团队完成的，按照参与项目研究时间的先后顺序，他们分别是赵燕茹、何晓雁、白明海、杨诗婷、靳铁顺、段国龙、任莹、冯玉江、朱敏侠、樊金承、江南、刘永利、郭健、刘艳晨、韩燕、雅茹罕和中国电力科学研究院杨风利、张宏杰等。

由于编者在这一领域内研究的深度和广度有限，书中错误和遗漏在所难免，恳请读者批评指正，谢谢！

郝负洪 邢永明

2017 年 2 月于内蒙古工业大学

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 研究的背景及意义	1
1.2 国内外冲蚀磨损研究现状	4
1.2.1 磨损及冲蚀磨损概述	4
1.2.2 粒子与材料冲蚀接触过程研究综述	5
1.2.3 冲蚀磨损理论研究进程综述	5
1.2.4 冲蚀磨损影响因素的研究进展	6
1.2.5 冲蚀磨损性能的评价方法研究	8
1.3 有机复合材料冲蚀研究现状分析	11
1.4 土木工程材料受冲磨侵蚀研究现状	11
1.5 本书的研究内容	12
本章参考文献	14
第 2 章 内蒙古中西部地区风沙环境特征分析	18
2.1 内蒙古中西部地区地理环境	18
2.2 内蒙古中西部地区风沙气候条件	20
2.2.1 沙尘天气的分级	20
2.2.2 内蒙古中西部地区沙尘暴时间分布	21
2.2.3 内蒙古中西部地区沙尘暴空间分布	23
2.2.4 不同范围强和特强沙尘暴发生频数分析	24
2.3 风沙环境主要冲蚀力学参数	24
2.3.1 风沙流粒子特征	24
2.3.2 风沙流速度	25
2.3.3 沙尘浓度	25
2.4 本章小结	25
本章参考文献	26
第 3 章 钢结构涂层的制备及其物理力学性能测定	27
3.1 钢结构涂层的种类	27

3.2 钢结构涂层的制备	28
3.2.1 试件材料的选择	28
3.2.2 涂层的喷涂	29
3.2.3 涂层的制备	29
3.3 钢结构涂层的物理力学性能指标的测定	30
3.3.1 涂层厚度和密度的测定	30
3.3.2 涂层的硬度测定	31
3.3.3 涂层的柔韧性测定	34
3.3.4 涂层附着力等级的测定	34
3.3.5 涂层/基材的结合强度测定	35
3.4 本章小结	36
本章参考文献	36

第 4 章 风沙冲击作用下钢结构涂层及其与基体界面冲蚀磨损理论分析

4.1 风沙冲击作用下钢结构涂层冲蚀磨损力学行为及其理论分析	38
4.1.1 风沙流粒子冲蚀接触力学模型	38
4.1.2 撞击接触分析理论	38
4.1.3 风沙流粒子冲蚀接触动力分析	44
4.1.4 风沙流粒子冲蚀接触应力场分析	46
4.1.5 钢结构涂层屈服的临界速度判定	51
4.2 风沙冲击作用下涂层与钢结构基体界面的应力分析	51
4.2.1 Dundurs 参数	51
4.2.2 镜像点法简介	53
4.2.3 冲击荷载作用下涂层基体界面应力分析	54
4.3 风沙冲击作用下涂层与钢结构基体界面的位移分析	67
4.3.1 风沙冲击作用下涂层与钢结构基体界面的位移表达式	67
4.3.2 风沙冲击作用下涂层与钢结构基体界面的位移分析	68
4.4 本章小结	74
本章参考文献	75

第 5 章 风沙环境下钢结构涂层的冲蚀试验研究

5.1 试验方法及试验装置	76
5.1.1 试验方法及分析	76
5.1.2 试验装置	77
5.2 风沙冲蚀磨损性能的评价方法分析	77
5.3 内蒙古中部区域风沙环境冲蚀磨损试验研究	78

5.3.1 内蒙古中部区域风沙环境特征分析	78
5.3.2 风沙流冲蚀速度对钢结构涂层冲蚀磨损失重量的影响	82
5.3.3 风沙流冲蚀角度对钢结构涂层冲蚀磨损失重量的影响	84
5.3.4 沙尘浓度(下沙率)对钢结构涂层冲蚀磨损失重量的影响	84
5.3.5 钢结构涂层冲蚀磨损过程的分析研究	85
5.4 内蒙古西部区域风沙环境冲蚀磨损试验研究	86
5.4.1 内蒙古西部区域风沙环境特征分析	86
5.4.2 风沙流冲蚀速度对钢结构涂层冲蚀磨损的影响	88
5.4.3 风沙流冲蚀角度对钢结构涂层冲蚀磨损失重量的影响	90
5.4.4 沙尘浓度(下沙率)对钢结构涂层冲蚀磨损失重量的影响	91
5.4.5 风沙冲蚀时间对钢结构涂层冲蚀磨损失重量的影响	92
5.5 本章小结	95
本章参考文献	95

第 6 章 风沙环境下钢结构涂层冲蚀磨损机理分析

6.1 钢结构涂层冲蚀磨损形貌分析方法	97
6.2 钢结构涂层原始表面形貌	97
6.3 钢结构涂层冲蚀磨损 SEM 形貌及其损伤机理分析	98
6.4 风沙环境不同冲蚀力学参数对钢结构涂层冲蚀损伤机理影响	102
6.4.1 不同冲蚀角度条件对钢结构涂层冲蚀损伤机理影响	102
6.4.2 不同冲蚀速度条件对钢结构涂层冲蚀损伤机理影响	104
6.4.3 不同沙尘浓度条件对钢结构涂层冲蚀损伤机理影响	105
6.5 钢结构涂层冲蚀磨损 LSCM 形貌及粗糙度分析	107
6.5.1 激光共聚焦显微镜在材料表征中的应用	107
6.5.2 风沙流作用下钢结构涂层冲蚀磨损 LSCM 形貌	107
6.5.3 钢结构涂层受风沙冲蚀磨损表面粗糙度分析	110
6.6 本章小结	113
本章参考文献	113

第 7 章 钢结构涂层受风沙环境冲蚀磨损损伤程度评价

7.1 材料冲蚀磨损损伤程度的评价方法及研究进展	115
7.2 钢结构涂层冲蚀磨损损伤程度的评价方法及其评价计算公式	116
7.3 钢结构涂层冲蚀磨损损伤程度评价的实例分析	119
7.4 本章小结	121
本章参考文献	121

第 8 章 钢结构涂层的摩擦学性能分析 122

8.1 摩擦学的基本概念 122

8.2 钢结构涂层的摩擦性能分析 122

8.2.1 涂层动、静摩擦系数的测试 122

8.2.2 钢结构涂层的耐磨性测试 123

8.2.3 钢结构涂层的摩擦性能综合评价 123

8.3 沙粒子对钢结构涂层表面的冲击摩擦研究 124

8.3.1 冲击摩擦系数 124

8.3.2 涂层冲蚀率的摩擦学定量预估模型 124

8.3.3 钢结构涂层的冲击摩擦系数分析 124

8.4 本章小结 126

本章参考文献 126

第 9 章 风沙流粒子冲击钢结构涂层的有限元分析 127

9.1 动力学数值分析的基本理论 127

9.1.1 风沙粒子冲击钢结构涂层模型 127

9.1.2 风沙粒子冲击钢结构涂层的表面及内部应力 128

9.1.3 风沙粒子冲击后涂层基体界面处应力的理论解 130

9.1.4 风沙粒子冲击涂层基体模型 131

9.1.5 受风沙粒子冲击后涂层基体界面上 Z 向应力理论分析 132

9.1.6 受风沙粒子冲击后涂层基体界面上剪应力理论分析 132

9.2 有限元模拟程序简介 133

9.2.1 LS-DYNA 简介 133

9.2.2 ANSYS 简介 134

9.3 风沙流粒子冲击涂层的有限元模拟计算 134

9.3.1 风沙流粒子冲击涂层的有限元计算模型一 134

9.3.2 风沙流粒子冲击涂层的有限元计算模型二 139

9.4 本章小结 148

本章参考文献 149

第 10 章 相似理论及其在风沙侵蚀研究中的应用 150

10.1 量纲分析的基本概念 150

10.2 相似理论 152

10.2.1 相似第一定理 152

10.2.2 相似第二定理 153

10.2.3 相似第三定理 154

10.3 用方程式分析结构相似 155

10.4 用量纲分析法分析结构相似 157

10.5 弹性结构中的相似性 159

10.6 相似理论在钢结构涂层受风沙冲蚀研究中的应用 163

 10.6.1 沙尘天气分级 164

 10.6.2 沙尘浓度转化 165

 10.6.3 室内试验与实际工况下冲蚀时间的转化 166

 10.6.4 计算实例 167

10.7 本章小结 168

本章参考文献 169

第 1 章

绪 论

1.1 研究的背景及意义

全球沙漠总面积已达陆地总面积的十分之一左右，全球典型的沙漠分布图如图 1-1 所示。

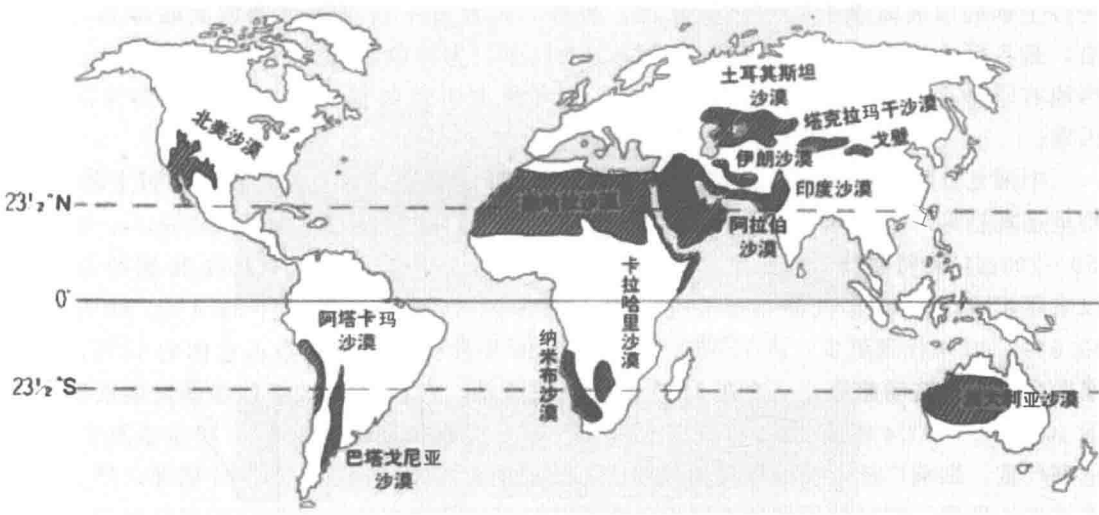


图 1-1 全球典型沙漠分布图

沙尘暴是沙漠及其邻近地区特有的一种灾害性天气。沙尘暴是指强风将地面大量沙尘吹起或被高空气流带到下游地区而导致空气浑浊，水平能见度小于 1km 的天气现象。它极大的危害着环境、交通、人们的生活、生命财产等，它的发生发展既是土地荒漠化加速的标志，也是土地荒漠化发展到一定程度的具体表现。沙尘暴的发生需具备 3 个基本条件：沙尘物质、大风和不稳定的空气。其中，足够的沙尘物质是形成沙尘暴的物质基础，大风是形成沙尘暴的动力条件，不稳定的空气是重要的热力条件。

从沙尘暴分布地区来看,全球有 4 大沙尘暴多发区,分别位于中非(非洲撒哈拉沙漠地区)、北美(美国中西部地区)、澳大利亚(澳大利亚中部地区)和中亚(独联体中亚部分及中国西北部)。中国北方地区处于全球四大沙尘暴区(中非、北美、澳大利亚和中亚)之一的中亚沙尘暴区,为全球现代沙尘暴的高活动区之一,其主要发生在西北、华北和东北西部,尤以西北地区的沙尘暴发生频繁、危害严重和影响范围广泛。内蒙古中西部地区处于中国北方地区沙尘暴高活动区的中心地段,自 20 世纪 60 年代以来,内蒙古中西部地区共发生强和特强沙尘暴 184 次,平均每年 4.6 次,是我国西北五省(区)发生次数总和的 3.8 倍^[1],80 年代至 90 年代明显下降,2000~2014 年波动呈递减趋势^[2],2015 年沙尘天气影响总体偏轻^[3]。

我国是沙漠分布较多的国家之一,据统计显示,我国沙漠总面积约 130 万 km²,为可耕地面积的 2.5 倍,约占全国土地面积的 13%。其中比较大的沙漠有 12 处,面积从大到小依次为:塔克拉玛干沙漠、古尔班通古特沙漠、巴丹吉林沙漠、腾格里沙漠、柴达木沙漠、库姆塔格沙漠、乌兰布和沙漠、库布齐沙漠、毛乌素沙地、浑善达克沙地、科尔沁沙地、呼伦贝尔沙地。

内蒙古地区在我国属于沙漠分布较多的地区,内蒙古中西部地区地跨西北和华北地区,地域辽阔,属于干旱、半干旱地区,该地区自西向东分布着六大沙漠: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,这些沙漠为沙尘暴的形成提供足够的物质基础,另外,内蒙古中西部地处蒙古大陆冷高压的前沿,是各路冷空气入侵我国的必经之地,大风多,为沙尘暴形成提供了动力条件;加之当地有干旱少雨的气候特征,这些构成了内蒙古中西部强和特强沙尘暴多发的三大因素。

中国北方除青藏高原的部分地区以外,沙尘暴的爆发日数总体上(75%以上的站点)均呈递减趋势,但处在中蒙边疆地区有增加的趋势。强沙尘暴(风速 $\geq 20\text{m/s}$,能见度 50~200m)和特强沙尘暴(风速 $\geq 20\text{m/s}$,能见度 $< 50\text{m}$)的发生频数自 20 世纪 60 年代以来逐年减少,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%。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^[1-4],2014 年及 2015 年我国沙尘天气爆发次数和日数偏少^[2-3]。沙尘暴发生频繁,危害严重,影响广泛,我国每年由风沙灾害造成的直接经济损失高达 540 亿元,严重制约着经济的发展,同时草地和林地减少,生态环境持续恶化,风沙灾害在我国已经成为重大环境问题^[5]。

内蒙古中西部地区基础设施的耐久性受风沙冲蚀磨损作用影响严重,尤其是建在沙漠及周边的桥梁(图 1-2、图 1-3)、通信塔(图 1-4)、输电塔(图 1-5)、公路(图 1-6)等受到的影响更为显著,这种影响主要体现为风沙流粒子对结构体系表面的冲蚀磨损破坏。由于结构表面对结构体系耐久性起关键保护作用,表面层破坏,结构极易磨蚀、性能劣化、构件承载力下降,造成其耐久性和安全性降低。特殊区域环境下工程结构体系耐久性损伤问题已经引起了工程界和学术界的普遍关注。



图 1-2 沙漠地区的桥梁结构体系（混凝土+钢结构）

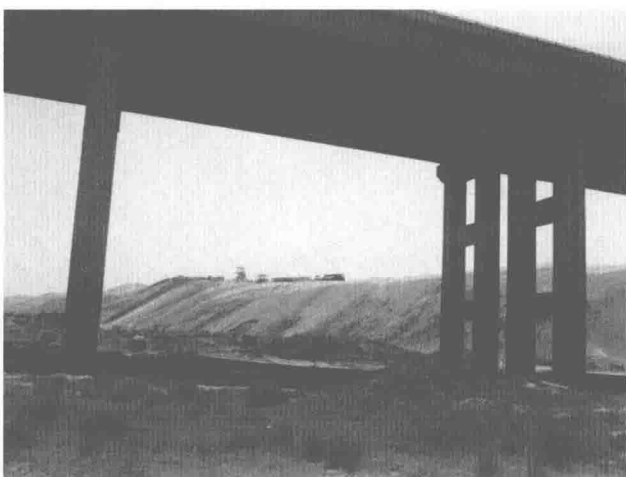


图 1-3 沙漠地区的桥梁结构体系（混凝土）

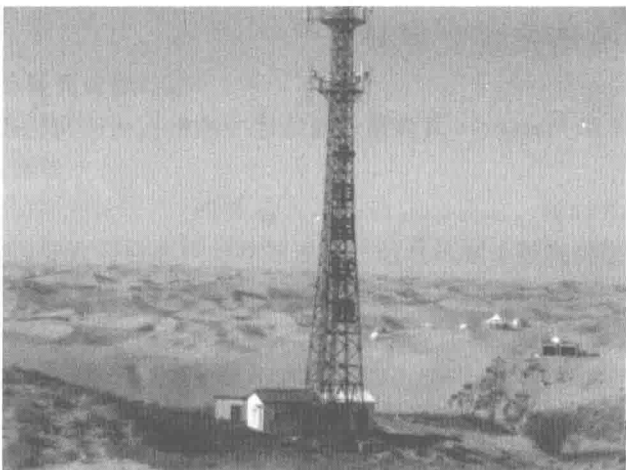


图 1-4 沙漠地区的钢结构通信塔

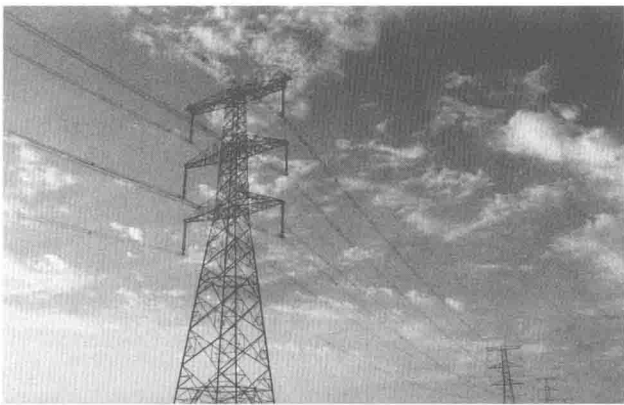


图 1-5 沙漠地区的钢结构输电塔



图 1-6 沙漠地区的公路

1.2 国内外冲蚀磨损研究现状

自 1946 年 Wahl 和 Hartstein 发表第一篇论述冲蚀损伤的论文到现在，该领域的研究已有 70 年的历史。

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，是指当摩擦副表面做相对运动时，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。本书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 μm ，冲蚀的速度一般不超过 550m/s。

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。

冲蚀的分类		表 1-1
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

1.2.2 粒子与材料冲蚀接触过程研究综述

1897 年 Lauth 研究得到了固体在冲击过程中法向与切向冲量的关系，提出了冲击摩擦的概念^[6]。1981 年 Ratner 和 Hutching 研究提出了冲击摩擦的理论模型^[7] 与数值计算模型^[8]，其中 Ratner 的模型基于能量原理导出，而 Hutching 的理论基于界面力学分析计算。1988 年 Lewis 等学者研究表明摩擦在冲击过程中有一个平台最大值^[9]。1994 年 Stronge 研究得出了斜冲击过程中的切向力和摩擦能耗，得出与 Lewis 测量值相近的分析结果^[10]。

1997~2006 年，陈大年和愈宇颖等学者^[11-13] 研究提出冲击摩擦模型，分析了泥沟摩擦系数，得出摩擦系数由泥沟效应决定的结论。2002 年以来，郭源君和庞佑霞等学者^[14-17] 研究得到冲击摩擦系数与冲击角度有关，并分析了摩擦的影响作用。2010~2015 年，郝负洪等人^[18-22] 通过研究风沙颗粒冲蚀钢结构涂层材料试验，测定了涂层的厚度密度、硬度、弹性模量、柔韧性和涂层与基材的附着力等级；同时利用非线性动力学有限元分析程序 LS-DYNA 对风沙流粒子冲击钢结构涂层进行了有限元模拟分析，得到冲蚀时涂层的应力、应变分布规律，涂层全场应力分布随粒子反弹过程的变化特征。

1.2.3 冲蚀磨损理论研究进程综述

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^[23-24] 的奠基人，该理论的提出，较好地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) 冲蚀变形磨损理论

在 1963 年，Bitter 经过大量的试验和研究，提出了冲蚀变形磨损理论^[25-26]，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总和。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。该理论较好地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（子）寻求法和分步冲蚀试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^[27]。该理论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”，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 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^[28]，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^[29] 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^[30] 运用钢球冲击低碳钢的试验模型，对试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度，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。谭成文等人^[31-33] 通过大量的试验研究分析绝热剪切带内微孔洞的演化规律，并对 Hutchings 的模型进行修正，且修正后的模型可以定量的描述绝热剪切带内微孔洞的演化直至破坏的全过程，模型的描述与微观分析获得的试验结果有较好的一致性。

5. 低周疲劳理论

低周疲劳理论^[34] 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

环境因素主要包括冲蚀角度、冲蚀速度、冲蚀时间、冲蚀粒子流量、环境温度。

(1) 冲蚀角度

冲蚀角度是指粒子入射方向与靶材表面之间形成的夹角。经试验研究表明，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°~30°，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：

$$\epsilon = A \cos^2 \alpha \sin n \alpha + B \sin^2 \alpha \tag{1-1}$$

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：

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

式 (1-2) 中 v 表示冲蚀速度， n 是常数。

Finnie 早期试验结果认为： $n \approx 2.0$ ，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。经大量试验研究发现，速度指数 n 在 $2.05 \sim 2.44$ 之间，脆性材料 n 值有时高达 6.5 ，不过更多试验测出 n 值出现最大范围是 $2.3 \sim 2.4$ 。 n 值随着冲蚀角的增大而稍有上升^[35]。

(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 Gilchriot 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^[36]。

(4) 冲蚀粒子流量

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^[37-38]。

(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，材料的门槛冲蚀速度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，理论和试验方面有较大偏差。

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^[39] 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^[40]。

(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”^[41]。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 。

因此，深入研究冲蚀磨损，分析钢结构涂层受风沙流粒子冲蚀磨损的力学行为和损伤机理，研究评价其受冲蚀程度的准则和方法、抗冲蚀磨损措施和制备抗冲蚀磨损涂层等一