

# 风沙环境下钢结构涂层低角度冲蚀特性研究

郝贞洪, 李 永\*

(内蒙古工业大学 土木工程学院, 内蒙古 呼和浩特 010051)

**摘 要:** 针对风沙环境中钢结构涂层长期受冲蚀, 涂层破坏直接降低钢结构体系耐久性的现状, 采用能模拟风沙环境的气流挟沙喷射法对钢结构涂层试件进行了低角度冲蚀试验, 用失重测量法测定涂层冲蚀失重量与沙剂量和冲击速度关系, 进而评定冲蚀程度, 用扫描电镜 (SEM) 观测分析涂层冲蚀区的微观形貌来分析冲蚀机理, 并提出了涂层冲蚀程度评价计算公式. 结果表明: 涂层冲蚀失重量随沙剂量和冲击速度的增大而增加; 低角度冲蚀主要为微切削作用, 材料硬度起决定因素, 高角度冲蚀主要为冲蚀挤压变形作用, 材料韧性起决定作用, 由于涂层材料硬度低而韧性高, 故在低冲角下其受冲蚀程度严重; 验证了评价计算公式用于评价涂层冲蚀程度的可靠性. 研究结果将为准确评价风沙区钢结构体系耐久性提供依据.

**关键词:** 风沙环境; 钢结构涂层; 冲蚀特性; 冲蚀评价; 耐久性

中图分类号: TH117.3

文献标志码: A

文章编号: 1004-0595(2013)04-0343-05

## Erosion – behaviors of the Coating on Steel Structure Eroded at Low Erosion – angle in Sandstorm

HAO Yun – hong, LI Yong\*

(School of Civil Engineering, Inner Mongolia University of Technology, Hohhot 010051, China)

**Abstract:** Aiming at investigating the deterioration of the coating on steel structure eroded in sandstorm, the erosion test to the coating on steel structure was conducted by using airflow jet with sand at low erosion – angle. The mass – loss measurement method was used to assess erosion degree of the coating. Microstructure of the erosion zone was analyzed to reveal the erosion mechanism of the coating. A formula for assessing the erosion degree of the coating was proposed. Results show that the mass – loss of coating increased with increasing sand dose and impact velocity. The main erosion mechanism was micro – cutting at a low erosion – angle and hardness of material was a decisive factor. Erosion is mainly compressive deformation at a high erosion – angle and material toughness played a decisive role. Because the coating had low hardness and high toughness, it was eroded severely at a low erosion – angle. The reliability of the assessment formula was verified to assess the erosion degree of the coating.

**Key words:** sandstorm, coating of steel structure, erosion behaviors, erosion assessment, durability

内蒙古中西部地区处于中国北方沙尘暴高活动区的中心地段<sup>[1]</sup>, 该地区的钢结构体系长期处于风沙环境的侵蚀作用中, 钢结构表面涂层对结构耐久性起首要保护作用, 故涂层材料的抗冲蚀性能成为

影响结构耐久性的一个重要因素.

风沙侵蚀过程主要是沙粒对材料的冲蚀, 冲蚀已成为材料破坏和结构失效的一个重要原因<sup>[2-7]</sup>. 目前关于土木工程材料和结构冲蚀的研究主要集中

Received 23 November 2012, revised 3 January 2013, accepted 16 April 2013, available online 28 July 2013.

\* Corresponding author. E – mail: 13947133205@163.com, Tel: +86 – 471 – 6575700.

The project was supported by the National Natural Science Foundation of China (11162011) and the Inner Mongolia Autonomous Region Natural Science Foundation (2009MS0706).

国家自然科学基金项目 (11162011) 和内蒙古自治区自然科学基金项目 (2009MS0706) 资助.

在含沙水流(液固两相流)对水工混凝土的影响方面,研究在试验方法、冲蚀机理、冲蚀估算和材料抗冲蚀措施方面的取得了进展<sup>[8-11]</sup>.而对于风沙环境(气固两相流)下,土木工程材料和结构的冲蚀特性及其微观机理的研究还不够深入.本文中对钢结构表面涂层在模拟风沙环境中进行冲蚀试验,分析研究其在不同风沙环境参数下的冲蚀特性,并通过对冲蚀表面微观形貌观测,研究了涂层受风沙环境的冲蚀行为和机理,提出评价涂层冲蚀程度的定量计算公式.本文研究成果将为揭示风沙环境对钢结构表面涂层的侵蚀规律,准确评价钢结构体系耐久性提供依据.

## 1 实验部分

由于气流挟沙喷射法可以较真实地模拟实际风沙环境特征,且具有试验参数易于控制、操作简单易行,试验周期短等特点,是1种比较理想的模拟试验方法,在本文中得以采用.

### 1.1 冲蚀试验装置

试验装置如图1所示,由高压气源系统、供沙系统、冲蚀系统和冲蚀室四部分组成.冲蚀试验过程中,攻角、冲击速度和沙剂量参数可控.

冲蚀室内喷嘴口径为1.5 cm、喷砂距离(喷嘴口到试件距离)为10~20 cm,喷砂范围可以完全覆盖整个试件表面,故试件在不同攻角下的受冲蚀面积为其表面积,且同一试件在同一冲蚀条件下其表面各处冲蚀痕迹相同.

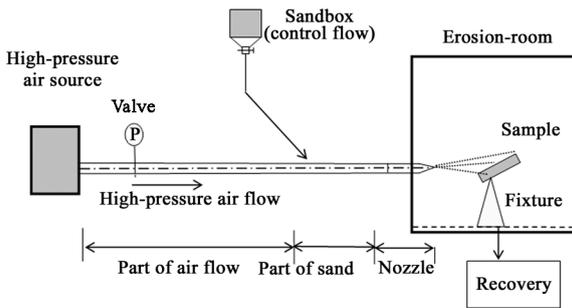


Fig. 1 Schematic diagram of the erosion device

图1 冲蚀试验装置示意图

### 1.2 冲蚀程度及机理的测量与评定

用失重测量法即利用精密分析天平(精度0.1 mg)测定涂层冲蚀失重量来评定冲蚀程度,用扫描电镜观测分析涂层冲蚀区的微观形貌来分析冲蚀机理.

### 1.3 风沙环境特性分析

沙粒特征和风速是影响风沙环境侵蚀过程的主要因素.

#### 1.3.1 沙粒特征分析

试验用沙取自内蒙古鄂尔多斯高原北部库布其沙漠.库布其沙漠是中国第七大沙漠,是影响内蒙古中西部乃至华北地区沙尘天气的主要沙源之一,选取该沙漠沙粒有较好工程背景和实际意义.

采用筛分试验分析沙颗粒粒径分布情况,结果见表1所示.其粒径分布大于0.250 mm的颗粒约6%,而小于0.074 mm也只有不足12%,主要分布在0.074~0.250 mm之间,含量高达80%以上.

表1 试验用沙的颗粒粒径分布

Table 1 The particle size of the sand

Diameter of sand particle/mm	Range/%
>0.500	0~1.34
0.500~0.250	2.54~4.83
0.250~0.100	55.34~71.28
0.100~0.074	16.66~23.08
<0.074	6.69~11.93

采用光学显微镜观测分析出沙粒形状近似呈圆形和椭圆形的可达80%以上.

#### 1.3.2 试验风速段设置

在试验过程中根据风力等级表设置试验风沙流冲击速度,分别设为9、12、16、19、23、26、31和35 m/s八个等级.

### 1.4 试件制备

试件尺寸为30 mm×30 mm,基体材料采用普通低碳钢板,涂层材料选用工程中普遍使用的F53-31红丹酚醛防锈漆和TGL-1高氯化聚乙烯面漆,喷涂工艺要求按《钢结构工程施工及验收规范》(GB50205-2001)进行.涂层材料密度1.6 g/cm<sup>3</sup>,厚度1 000 μm,硬度2.3 MPa.

## 2 结果与分析

图2是涂层在冲蚀时间为10 min、下沙率为90 g/min和风沙流冲击速度为23 m/s的条件下,涂层的冲蚀失重量与攻角的关系.由图2可知,在约 $\alpha$ 为30°时,冲蚀失重量达到最大值,约 $\alpha$ 为90°时,冲蚀失重量最小.这是由于在低角度冲蚀时,硬度是决定材料耐冲蚀性能的主要因素,而在高角度冲蚀时,材料的耐冲蚀性能主要取决于其韧性,试件涂层为塑性材料,其硬度低而韧性高,故其在低角度冲蚀的

失重量要大于高角度冲蚀的失重量。

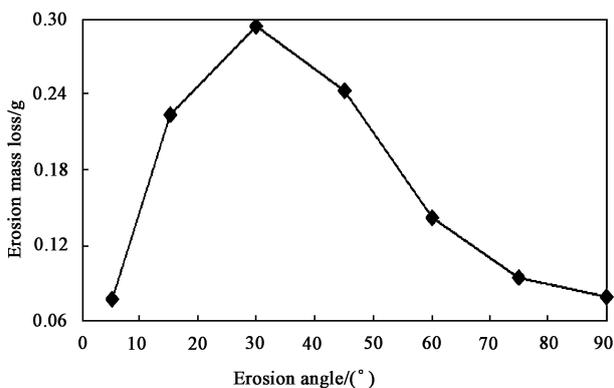


Fig. 2 Relation between erosion mass - loss and erosion angle

图2 涂层冲蚀失重量与攻角关系

### 2.1 不同沙剂量和冲击速度对涂层失重量的影响

图3是涂层在攻角为 $\alpha$ 为 $30^\circ$ ,冲击速度为 $12\text{ m/s}$ 条件下,在不同沙剂量情况下的涂层冲蚀失重量图。由图3可知,下沙率 $M_s$ 为 $120\text{ g/min}$ 时涂层冲蚀失重量要大于下沙率 $M_s$ 为 $45\text{ g/min}$ 时的失重量。图4是涂层材料在攻角 $\alpha$ 为 $30^\circ$ 、冲蚀时间为 $10\text{ min}$ 和下沙率为 $90\text{ g/min}$ 的条件下,涂层的冲蚀失重量与冲击速度的关系。由图4可知冲蚀失重量均随着冲击速度的增大而显著增加。这是由于去除材料所需能量的唯一来源是沙粒的动能,沙粒的质量和速度的增大,其动能相应增加,导致涂层材料冲蚀加剧。

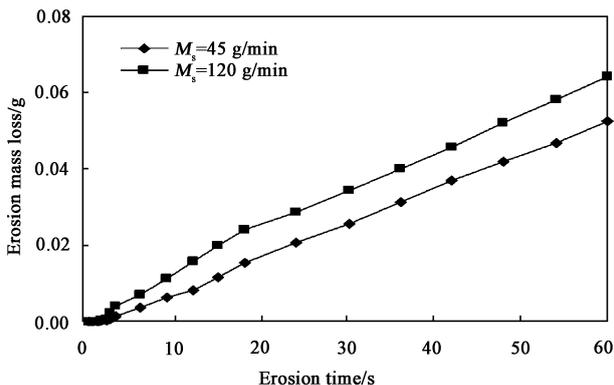


Fig. 3 Relation between erosion mass - loss and sand rate

图3 涂层冲蚀失重量与沙剂量关系

### 2.2 涂层冲蚀机理分析

利用扫描电子显微镜,观测涂层的冲蚀部位微观形貌,探讨分析涂层受侵蚀的行为和机理。

图5是涂层在攻角 $\alpha$ 为 $30^\circ$ 、冲击速度为 $23\text{ m/s}$ 和冲蚀时间为 $10\text{ min}$ 的冲蚀条件下,冲蚀表面的SEM形貌照片。由图5可知:在低角度冲蚀时,涂层大部分损坏表面都出现波纹状或顺风沙流方向的犁耕状沟槽及鱼鳞状剥落坑的形貌。分析可知,破坏形貌主要是微切削痕迹,同时伴有微裂纹,微裂纹扩展产生微破坏区,部分材料从表面剥离留下清晰的剥落坑。这表明在低角度冲蚀时,冲蚀机理以微切削为主,微切削作用主要取决于风沙流作用于涂层表面的水平作用力。由于沙粒硬度远高于涂层硬度,

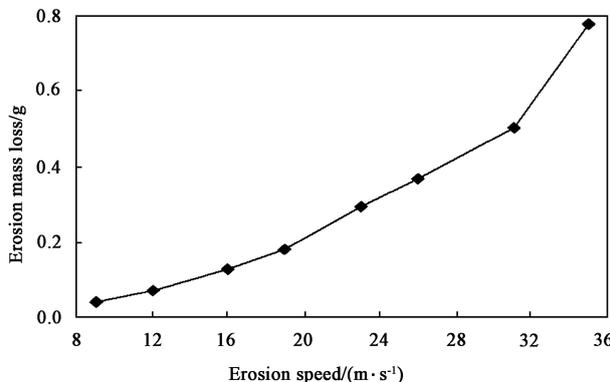


Fig. 4 Relation between erosion mass - loss and sand speed

图4 涂层冲蚀失重量与冲击速度关系

剪切力越大,切削作用越强,破坏越严重。另外,垂直方向的力分量虽然较小,也可使涂层材料表面产生初始微裂纹并使其扩展和交叉并最终导致破坏。裂纹源可能是涂层材料内部初始的孔穴和微裂纹等缺陷。总之,当冲击角度较低时,涂层材料的冲蚀机理主要表现为硬质沙粒水平方向的切削作用;其次还有其垂直方向的冲蚀导致的微裂纹与剥落。切削与剥落同时存在,并相互促进。

### 3 涂层冲蚀程度的评价研究

国内外研究人员对固体粒子冲蚀程度的评价方法进行的研究<sup>[3,12-15]</sup>,目前Bitter<sup>[13-14]</sup>的变形磨损理论及其基于冲蚀过程中的能量平衡归纳出的表达式在单颗粒冲蚀磨损试验机上得到了验证,可较好地解释材料的冲蚀现象,而被广泛采用。他认为固体颗粒对材料的冲蚀磨损有变形冲蚀磨损和切削冲蚀磨损两种方式:①变形冲蚀量 $W_d$ ,为冲蚀法向速度的函数;②切削冲蚀量 $W_c$ ,为颗粒冲蚀试件的切向速度的函数。实际中这2种冲蚀方式是同时发生的,总冲蚀量 $W_t$ 等于这2种冲蚀量的和。

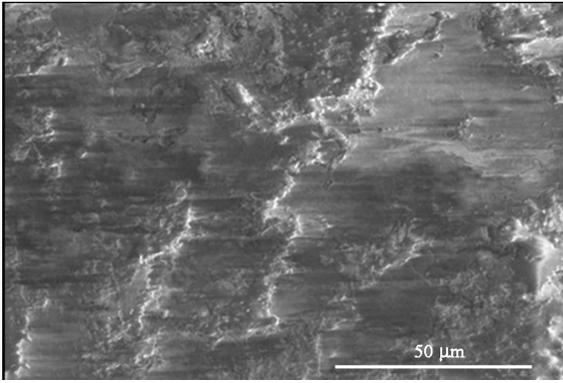


Fig. 5 SEM micrographs of the coating

图5 涂层冲蚀表面形貌 SEM 照片

### 3.1 冲蚀磨损评价的计算公式

本文在 Bitter 公式和文献[14-15]的基础上,提出了适合于钢结构涂层冲蚀程度评价计算公式:

$$W_t = W_d + W_c$$

$$W_t = \left[ \frac{\frac{1}{2}M_s (Vs \sin \alpha)^2}{\eta} \right] + \left[ \frac{\frac{1}{2}M_s (V \cos \alpha)^2 \sin(n\alpha)}{\psi} \right]$$

$$(0 < \alpha \leq \alpha_0)$$

$$W_t = \left[ \frac{\frac{1}{2}M_s (Vs \sin \alpha)^2}{\eta} \right] + \left[ \frac{\frac{1}{2}M_s (V \cos \alpha)^2}{\psi} \right]$$

$$(\alpha_0 < \alpha \leq \frac{\pi}{2}) \quad (1)$$

式中:  $W_t$ 、 $W_d$ 、 $W_c$  为总冲蚀量、变形冲蚀量、切削冲蚀量,单位 g;  $M_s$  为冲蚀试件的有效沙尘质量,单位 g;  $V$  为冲击速度,单位 cm/s;  $\alpha$  为沙粒的攻角;  $\alpha_0$  为最大冲蚀临界角,涂层由试验分析为  $30^\circ$ ;  $n$  为水平回弹率因素[当  $\alpha = \alpha_0$  时,  $\sin(n\alpha_0) = 1$ , 则有  $n = \frac{\pi}{2\alpha_0}$ ], 无量纲常数;  $\eta$  为冲蚀变形能耗因数,单位  $\text{cm}^2/\text{s}^2$ ;  $\psi$  为切削能耗因数,单位  $\text{cm}^2/\text{s}$ .

上述公式中的冲蚀变形能耗因数  $\eta$  和切削能耗因数  $\psi$  是与沙粒特征和冲蚀材料性能相关的参数,由于影响因素多,准确测量计算较困难. 本文在分析试验数据的基础上,通过计算拟合得到涂层的经验计算值:  $\eta = 2.966 \times 10^{10} \text{ cm}^2/\text{s}^2$ 、 $\psi = 6.524 \times 10^9 \text{ cm}^2/\text{s}$ .

### 3.2 评价公式计算结果与试验结果对比分析

利用本文的冲蚀程度评价计算公式计算涂层冲蚀失重量,并与试验数据进行分析比较,验证评价公式的可靠性. 已知条件:攻角  $\alpha$  为  $0^\circ \sim 90^\circ$ ,冲击速度  $v$  为  $9 \sim 35 \text{ m/s}$ ,冲蚀时间  $10 \text{ min}$ 、下沙率  $90 \text{ g/min}$ ,最大攻角  $\alpha$  为  $30^\circ$ ,常数  $n = \frac{\pi}{2\alpha_0} = 3$ ,能耗因数  $\eta$  为  $2.966 \times 10^{10} \text{ cm}^2/\text{s}^2$ , $\psi$  为  $6.524 \times 10^9 \text{ cm}^2/\text{s}$ .

图6是涂层在冲蚀时间为  $10 \text{ min}$ 、下沙率  $M_s$  为  $90 \text{ g/min}$  和冲击速度为  $23 \text{ m/s}$  的条件下,由评价计

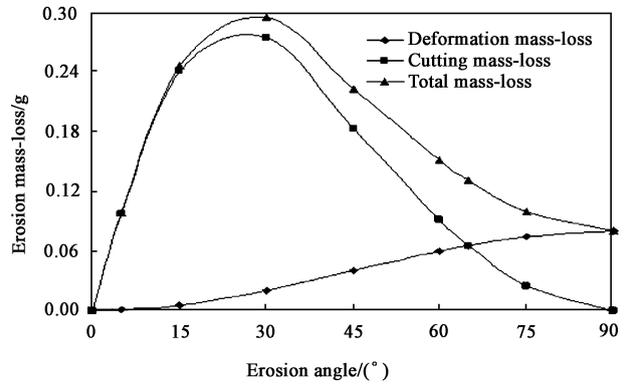


Fig. 6 Relation between erosion mass-loss and erosion angle

图6 涂层冲蚀失重量与攻角关系

算公式(1)得到涂层冲蚀失重量与攻角的关系. 由图6可知:涂层的切削冲蚀失重量和总冲蚀失重量对攻角的敏感性大,两者变化趋势基本一致,在攻角  $\alpha$  为  $30^\circ$  时,两者均达到了最大值;而变形冲蚀失重量的变化趋势不同于前两者,其随着攻角的增加而增加,基本呈线性关系. 在攻角较小时,变形冲蚀失重量很小,切削冲蚀失重量较大,此时涂层的总冲蚀失重量几乎都为切削冲蚀失重量,这是由于在小角度冲蚀时,冲蚀作用主要为切削作用力,材料的耐冲蚀性主要取决于其硬度,而涂层为塑性材料,其韧性大而硬度小,故此时主要为切削冲蚀失重量. 随着攻角增大,切削作用力减小,而冲蚀变形作用增加,故此时切削冲蚀失重量减小,而变形冲蚀失重量增加,两者约在攻角  $\alpha$  为  $65^\circ$  时达到了相同的冲蚀失重量,在  $\alpha$  为  $90^\circ$  时切削冲蚀失重量为零,变形冲蚀失重量达到最大值.

图7是在冲蚀时间为  $10 \text{ min}$ 、下沙率  $M_s$  为  $90 \text{ g/min}$  和冲击速度为  $23 \text{ m/s}$  的条件下,涂层冲蚀失重量与攻角关系的试验数据与评价公式(1)计算数据对比图. 由图7可知评价计算公式(1)分析结

果基本与试验结果相吻合。

图8是在攻角 $\alpha$ 为 $30^\circ$ ,冲蚀时间为10 min,下沙率 $M_s$ 为90 g/min的条件下,由评价计算公式(1)得到的涂层冲蚀失重量与冲击速度关系.由图8可知:涂层的变形冲蚀失重量、切削冲蚀失重量和总冲蚀失重量随冲击速度增加而增加.在低角度冲蚀状态下,切削冲蚀失重量和总冲蚀失重量对冲击速度的敏感性要比变形冲蚀失重量大的多,切削冲蚀失重量和总冲蚀失重量的变化趋势基本一致,均呈指

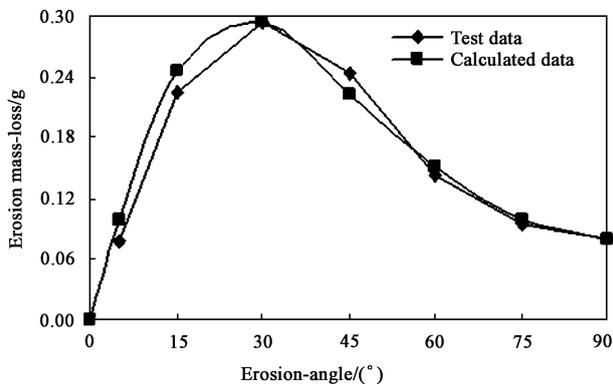


Fig. 7 Comparison on test data and calculated data

图7 试验数据与计算数据对比

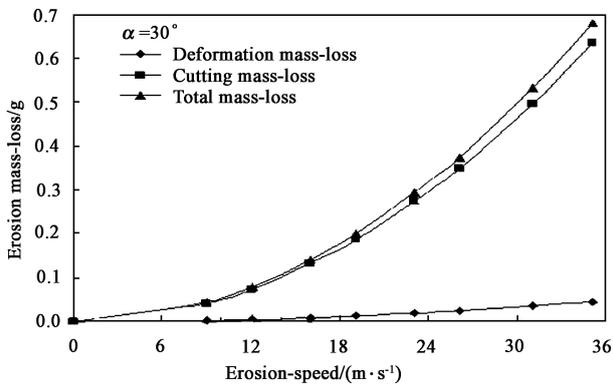


Fig. 8 Relation between erosion mass-loss and erosion speed

图8 涂层冲蚀失重量与冲击速度关系

数型变化规律,变形冲蚀失重量呈线性变化规律.在攻角较小时,变形冲蚀失重量很小,切削冲蚀失重量较大,此时材料的总冲蚀失重量几乎都为切削冲蚀失重量,其原因如前3.2部分所述。

图9是在攻角 $\alpha$ 为 $30^\circ$ ,冲蚀时间为10 min,下沙率 $M_s$ 为90 g/min的条件下,涂层冲蚀失重量与冲击速度关系的试验数据与评价公式(1)计算数据对比图.由图9可知评价计算公式(1)的结果基本与试验结果相吻合。

由以上涂层冲蚀失重量的试验数据与评价公式(1)计算数据对比分析的结果,可以说明利用评

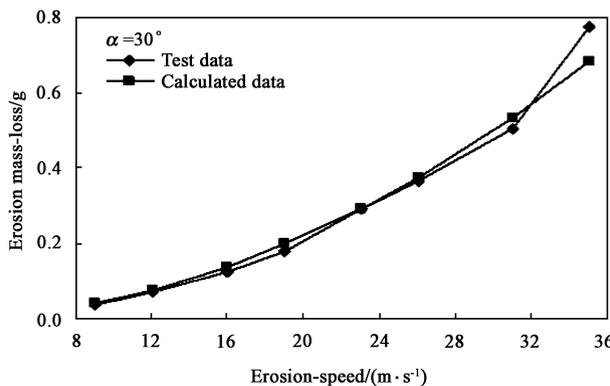


Fig. 9 Comparison on test data and calculated data

图9 试验数据与计算数据对比图

价公式(1)进行涂层冲蚀程度评价的可靠性。

### 4 结论

a. 通过对钢结构涂层在模拟风沙环境中的冲蚀试验,研究了涂层冲蚀失重量与攻角、冲击速度和沙剂量关系:涂层冲蚀失重量在攻角 $\alpha$ 为 $30^\circ$ 时达到最大;涂层冲蚀失重量随冲击速度和沙剂量的增加而增大。

b. 研究了钢结构涂层受风沙冲蚀机理为在低角度冲蚀条件下,硬质沙粒水平方向的切削作用起主导地位,由微切削及裂纹萌生和扩展共同作用导致材料的流失,此时硬度是决定材料耐冲蚀性能的决定因素;而在高角度冲蚀条件下,由于切削作用逐渐减弱或消失,而主要受冲蚀挤压变形作用,此时材料的耐冲蚀性能主要取决于其韧性.由于试件涂层为塑性材料,其硬度低而韧性较好,故在低角度冲蚀时其失重量较高角度冲蚀更为严重。

c. 提出钢结构涂层冲蚀程度评价计算公式,利用评价计算公式分析计算了涂层冲蚀失重量(变形冲蚀失重量、切削冲蚀失重量和总冲蚀失重量)与不同冲击速度的关系,并把冲蚀程度评价公式计算结果与试验结果进行了对比分析,验证了评价计算公式的可靠性。

### 参考文献:

[ 1 ] Liu J T, Zheng M Q. Climatic characteristics of strong and very strong sandstorms in the middle and west parts of Inner Mongolia [J]. Plateau Meteorology, 2003, 22 ( 1 ): 51 - 64 ( in Chinese )  
 [刘景涛,郑明倩. 内蒙古中西部强和特强沙尘暴的气候学