doi: 10.11933/j.issn.1007-9289.20160626002

钢结构镀锌涂层冲蚀磨损表面形貌及粗糙度

郝贠洪1,2, 刘永利1, 邢永明3, 雅茹罕1

(1. 内蒙古工业大学 土木工程学院,呼和浩特 010051; 2. 内蒙古工业大学 内蒙古自治区土木工程结构与力学重点实验室,呼和浩特 010051; 3. 内蒙古工业大学 理学院,呼和浩特 010051)

摘 要:我国西北地区风沙特殊环境对该地区钢结构的耐久性和安全性影响严重。利用风沙环境侵蚀实验系统、扫描 电子显微镜(SEM)和激光共聚焦显微镜(LSCM)研究钢结构镀锌涂层受风沙冲蚀磨损损伤行为和损伤形貌,并分析其表 面粗糙度。结果表明:涂层材料的冲蚀损伤行为更加依赖于冲蚀角度,在不同冲蚀角度下风沙流对涂层材料的冲蚀 磨损过程同时存在类似表面划伤和挤压变形剥落;涂层材料的冲蚀坑深度随着冲蚀速度的增大而增加,在90°时冲蚀 坑深度大于45°时的冲蚀坑深度;在相同的冲蚀速度下,45°时表面平均粗糙度S_a和均方差S_q较90°时大,在相同的冲蚀 角度下,S_a和S_q均随速度的增大而增大。在冲蚀中后期,粒子对凹凸不平的表面冲蚀磨损破坏严重,试件表面峰谷的 形成和破坏导致冲蚀率增加。

关键词:风沙环境;镀锌涂层;冲蚀磨损;冲蚀形貌;粗糙度 **中图分类号:**TG174.44 **文献标志码:**A **文章编号:**1007-9289(2017)01-0056-07

Erosion Wear Surface Morphology and Roughness of Steel Structure Galvanized Coating

HAO Yun-hong^{1, 2}, LIU Yong-li¹, XING Yong-ming³, YA Ru-han¹

(1. School of Civil Engineering, Inner Mongolia University of Technology, Hohhot 010051; 2. The Inner Mongolia Key Laboratory of Civil Engineering Structure and Mechanics, Inner Mongolia University of Technology, Hohhot 010051; 3. School of Science, Inner Mongolia University of Technology, Hohhot 010051)

Abstract: In northwest China, the special wind-blown sand environment has a serious influence on durability and security of steel structure. Damage behavior and morphologies of steel structure galvanized coating were studied by erosion experiment simulation system of wind-blown sand environment, scanning electron microscope (SEM) and laser scanning confocal microscope (LSCM), and the surface roughness was analyzed. The results show that the erosion damage behavior of the coating greatly depends on the erosion angle. The erosion process of the coating material exists the surface scratch and the extrusion deformation spalling under different erosion angle. Erosion pits depth increases with the erosion velocity. The erosion pits depth at 90° is greater than that at 45°. The average surface roughness S_a and standard deviation roughness S_q at 45° are larger than that at 90°, and both increase with the increasing erosion velocity. At the middle and end period of the erosion, the rough surface was seriously eroded by sand particle erosion, and the formation of valleys and peaks on the specimen surface and the destruction leads to increasing of the erosion rate.

Keywords: wind-blown sand environment; galvanized coating; erosion wear; erosion morphology; roughness

收稿日期: 2016-06-26; 修回日期: 2016-11-10

网络出版日期: 2017-01-03 11:17; 网络出版地址: http://www.enki.net/kcms/detail/11.3905.TG.20170103.1117.006.html

通讯作者:郝贠洪(1977—),男(汉),教授,博士;研究方向:区域特殊环境下工程结构和材料损伤机理与评价; E-mail: 13947133205@ 163.com

基金项目: 国家自然科学基金(11162011, 51468049, 11662012)

Fund: Supported by National Natural Science Foundation of China(11162011, 51468049, 11662012)

引文格式: 郝贠洪, 刘永利, 邢永明, 等. 钢结构镀锌涂层冲蚀磨损表面形貌及粗糙度[J]. 中国表面工程, 2017, 30(1): 56-62. HAO Y H, LIU Y L, XING Y M, et al. Erosion wear surface morphology and roughness of steel structure galvanized coating[J]. China Surface Engineering, 2017, 30(1): 56-62.

0 引 言

我国西北地区分布着广泛的沙漠、沙漠及周 边地区分布着众多通信塔、输电铁塔和铁路电车输 电塔等镀锌钢结构体系,由于长期遭受风沙的侵 蚀作用,这些钢结构涂层受风沙冲蚀磨损破坏严 重,使得其容易锈蚀,导致构件承载力下降,安 全性和耐久性降低。基于以上固体粒子冲蚀磨损 问题,国内外学者对其进行了大量的研究。目 前,国外关于固体颗粒对材料的冲蚀磨损研究主 要集中在金属材料、管道、工程塑料、钢结构涂层、 混凝土和玻璃等方面,主要研究了不同试验工况 下不同材料的冲蚀磨损对比,冲蚀形貌分析和固 体颗粒对材料的冲蚀模拟研究[1-3],关于材料受单 颗粒子冲击研究也较多[4-6]。而国内关于工程材料 受单颗粒子冲击研究主要集中在玻璃、陶瓷和混凝 土方面[7-9]、关于风沙环境对工程材料的冲蚀磨损研 究主要集中在混凝土和钢结构油漆涂层方面,研 究在试验方法、冲蚀磨损机理、评价指标和 材料的抗冲蚀磨损措施等方面取得了一些进展[10-13], 而对于工程中常用的镀锌涂层受风沙气固两相流 的冲蚀磨损损伤形貌和粗糙度研究很少。

采用气流挟沙喷射法,通过模拟风沙环境侵 蚀实验系统,SEM和LSCM研究了钢结构表面镀 锌涂层在不同风沙环境下的冲蚀率与冲蚀角度关 系,冲蚀磨损损伤行为,冲蚀磨损形貌和表面粗 糙度,研究成果可为我国西北地区风沙环境下钢 结构镀锌涂层的耐久性评价及防护提供依据。

1 试 验

1.1 试样参数

基体材料选用Q235普通低碳钢薄钢板,其化 学成分为: 0.15% C、0.5% Mn、0.045% P、0.2% Si、0.01% S、0.13% Cr和0.17% Ni,其余为Fe,基 体尺寸80 mm×80 mm×3 mm。按《金属覆盖层 钢铁制件热浸镀锌层技术要求及试验方法》 (GB/T13912—2002)要求,采用热浸镀锌方法制备 镀锌涂层,镀锌层厚度150 µm,锌液各元素的质 量分数为: 0.44% Pb、0.02% Cd、0.07% Fe、 0.1% Mg、4% Al和Zn。利用纳米压痕仪对镀锌涂 层进行纳米压痕试验,随机选取3个试样,每个试 样选取10个点进行测量,结果取平均值,得到涂 层的弹性模量*E*和硬度*H*分别为90.9 GPa和 0.88 GPa。

1.2 冲蚀试验装置

试验采用气流挟沙喷射法模拟风沙环境下钢 结构镀锌涂层的冲蚀磨损,该试验方法可真实有 效地模拟实际风沙环境特征,而且试验参数易于 控制,试验周期短,是一种比较理想的试验模拟 方法。利用SEM和LSCM观测钢结构镀锌涂层的 冲蚀磨损表面形貌,对其冲蚀磨损微观SEM形貌 和冲蚀磨损LSCM三维形貌进行分析,LSCM (OLS4100)可以精确地测量一直以来无法测量的有 尖锐角的样品,有利于粗糙度的测量。风沙气固 两相流冲蚀试验装置如图1所示。



图 1 气固两相流冲蚀试验装置示意图

Fig.1 Schematic diagram of the gas-solid two-phase erosion device

1.3 沙粒特征分析

对我国西北地区巴丹吉林沙漠、腾格里沙漠、 乌兰布和沙漠和库布其沙漠现场沙粒采样的筛分 分析,得到粒径分布如图2所示。粒径小于0.05 mm 的颗粒不足10%,而大于0.25 mm的颗粒不足3%, 分布在0.05~0.25 mm高达87%以上,沙粒级配不 良。沙粒子的SEM形貌如图3所示,多数粒子形状 带有棱角,仅有少数粒子呈圆形或椭圆型。





Fig.2 Sand particle size distribution of Hobq desert



图 3 库布其沙漠沙粒SEM形貌 Fig.3 SEM morphology of sand particles from Hobq desert

2 镀锌涂层冲蚀磨损试验分析

2.1 不同冲蚀角度下镀锌涂层冲蚀磨损损伤行为

图4所示是在冲蚀速度35 m/s,沙流量 90 g/min,冲蚀时间10 min条件下冲蚀率随冲蚀角 度的变化关系。由图可知,随着冲蚀角度的增 加,冲蚀率呈先增大后减小趋势,在37°左右时达 到最大,这个试验结果和其他研究者对金属材料



图 4 冲蚀率与冲蚀角度的关系

Fig.4 Relationships between the erosion rate and erosion angle

的研究结果一致。在低冲蚀角15°时冲蚀率较低, 这是由于沙粒与试件的有效接触面积较小^[14]。当 冲蚀角度增加,镀锌涂层冲蚀率增加主要是由于 冲击粒子的切削作用,在37°左右冲蚀率达到最 大,这时几乎所有粒子都能冲击到试件表面,而 且入射粒子和回弹粒子相互作用不是那么明显^[15]。 另外,由于涂层材料的特性,导致材料容易去除 的滑移面和水平方向的角度大约在37°左右。当冲 蚀角度继续增大时,切削作用减轻,垂直方向的 冲击作用加强,入射粒子和回弹粒子的碰撞显 著,严重减小接触粒子的动能,这种干涉行为作 为一个屏障,去阻止入射粒子以减少粒子对试件 表面的冲击影响,最终导致冲蚀率的下降。

2.2 风沙流作用下涂层冲蚀磨损SEM形貌

当粒子冲击镀锌涂层时,涂层表面受粒子正 应力和切应力相互作用。在切应力的作用下,涂 层表面很容易形成水平切削划痕和犁沟。冲蚀过 程中高速粒子对涂层表面的冲击是间断的,涂层 表面每受到一次冲击,便承受一次加载与卸载, 因此涂层表面承受的载荷为压-压脉动载荷,在该 载荷作用下产生的法向正应力,迫使涂层表面产 生冲蚀坑。涂层表面冲蚀坑是在粒子的高速冲击 下表面出现了非均匀循环塑性变形和材料的挤压 变形剥落形成的^[16]。

图5(a)是镀锌涂层在冲蚀磨损试验前的SEM形 貌,由图可知涂层表面有较少的制作缺陷和原始 表面网状裂纹。图5(b)(c)(d)是镀锌涂层在冲蚀速 度31 m/s, 沙流量90 g/min, 冲蚀角度15°、45°和 90°,冲蚀时间10 min时的冲蚀磨损SEM形貌。钢 结构涂层在风沙环境下的冲蚀磨损损伤行为由风 沙流的冲击角度决定。图6是涂层在不同冲击角度 下的损伤行为,斜角冲击时,材料的冲蚀磨损去 除机理主要有两类:一类是切削划痕过程,另一 类是犁沟和挤出唇过程。在典型的切削过程中, 材料在磨粒(见图3)尖端的微切削作用下,大部分 被一次去除而形成磨屑, 磨痕的大小与磨屑的大 小在尺寸上几乎相当。在典型的犁沟和挤出唇过 程中,多次冲击变形后形成磨屑,堆积在犁沟出 口端。在垂直试件表面冲击时,材料的破坏以挤 压变形为主, 磨屑材料主要堆积在冲蚀坑四周。

在冲蚀角度15°时,由于粒子冲击的水平分力 较大,涂层表面出现了水平切削划痕和较浅的犁 沟,磨屑材料主要堆积在切削划痕的两侧和犁沟



(a) Before erosion

(b) 15°









的出口端形成挤出唇。在冲蚀角度45°时,切削作 用明显减轻,切削划痕较短,犁沟较深,同时伴 有冲蚀坑形成,涂层材料主要堆积在犁沟的出口 端和冲蚀坑周围形成挤出唇。在冲蚀角度90°时, 此时材料表面不存在切削作用,垂直方向的作用 力达到最大,局部应力集中比较明显,靶材表面 主要受正向的冲击作用,材料从冲蚀坑的四周被 挤出,破坏以挤压变形剥落为主。以试件表面网 状裂纹为策源地,涂层在正应力和切应力的作用 下,裂纹沿着涂层中粒子晶界和层状结构界面进 行萌生、扩展,最终导致冲蚀破坏。通过以上分析 可以得出,风沙流对镀锌涂层的冲蚀磨损过程同 时存在类似表面划伤作用和挤压变形剥落作用。

2.3 风沙流作用下涂层冲蚀磨损LSCM三维形貌

利用激光共聚焦显微镜测得镀锌涂层材料在 相同的冲蚀角度90°,沙流量150 g/min,冲蚀时间 10 min条件下,冲蚀速度分别为27 m/s和35 m/s时 的冲蚀LSCM三维形貌如图7(a)(b)所示。由冲蚀形 貌可以看出,粒子的运动轨迹使得冲蚀轮廓近似 呈圆形,它的剖面轮廓大致呈抛物线形(见图8(a)), 和液固两相流冲蚀磨损不同,在气固两相流冲蚀 试件表面时,由于静背压,气固两相流中气体的 方向被改变,但是,沙粒子流保持初始的运动方 向冲击试件表面,在试件表面形成了抛物线形的 冲蚀形貌^[17]。冲蚀坑深度随速度增大而增加,高 速运动粒子的动能导致更多的材料去除,如表1。

在相同的冲蚀速度35 m/s,沙流量150 g/min, 冲蚀时间10 min条件下,冲蚀角度分别为90°和



图 8 不同冲蚀速度和角度下的冲蚀轮廓

Fig.8 Erosion profiles with different erosion velocity and angle

Table 1	Erocian nit donth	area and valuma	of columnized	agating unde	" different	aronian	no roma atora
Table 1	Elosion di dedin	area and volume	or garvanized	COMING INCE	i annerem	erosion	Darameters
1 4010 1	Liobion pit depuis	, area ana voranie	or garranneed	eoung anac	- anneren		parameters

Erosion parameters		Surface characteristic parameters (after erosion)					
Angle	$Velocity / (m \cdot s^{\scriptscriptstyle -l})$	$Depth / \mu m$	Area / ($10^8 \mu m^2$)	Superficial area / $(10^8 \mu m^2)$	Volume / $(10^{10} \mu m^3)$	Surface area ratio	
45°	35	89.180	5.86	8.05	2.37	1.374	
90°	35	101.727	4.98	6.60	2.02	1.326	
90°	27	64.009	4.42	6.42	1.40	1.453	

45°时的冲蚀三维形貌如图7(b)(c)所示。由于斜角 冲蚀,冲蚀粒子沿着和入射方向同一平面的方向 反弹出去^[15,18],导致在冲蚀角度45°时冲蚀坑形貌 呈椭圆形。当垂直冲蚀时,冲蚀粒子沿着冲蚀区 域四周均匀扩散,冲蚀坑形貌近似呈圆形,且90° 的冲蚀坑深度大于45°的冲蚀坑深度,但材料在 45°时的损伤程度大于90°时的损伤程度,这是由 于在低角度较大切应力作用下涂层材料发生了更 大的破坏。对应的二维轮廓形貌如图8(b)所示。

3 镀锌涂层受风沙冲蚀磨损粗糙度分析

粗糙度是数字化描述磨损表面形貌特征常用的参数,常用的评定参数有表面平均粗糙度*S*_a、均方根*S*_q、表面斜度*S*_{sk}和表面峭度*S*_{ku}^[19-20]。

$$S_{a} = \iint_{a} |Z(x, y)| dx dy$$
(1)

$$S_{q} = \sqrt{\iint_{a} (Z(x, y))^{2} dx dy}$$
(2)

$$S_{\rm sk} = \frac{1}{S_q^3} \iint_a (Z(x, y))^3 dx dy$$
 (3)

式中a表示被测区域计算面积, Z(x, y)是在测量面积上的高度函数。

在不同冲蚀速度和冲蚀角度下S_a、S_q、S_{sk}、 S_{ku}(表2)和对应的线粗糙度、冲蚀轮廓通过使用激 光共聚焦显微镜被测量出来用于分析涂层的冲蚀 损伤破坏。 由表2可知,在相同的冲蚀速度下,45°时S_a和 S_q大于90°时的,这是由于在90°时粒子在涂层表面 形成的尖峰和山谷分布较均匀,导致S_a和S_q减小。 在冲蚀角45°时S_{sk}>0,则表示涂层表面上有尖峰, 表明在45°时尖峰的密度大于山谷的密度。在 90°时S_{sk}<0,则是表示有孔洞的支撑曲面,表明在 90°时山谷的形成多于尖峰,由此可知在90°时相 比于最大尖峰高度S_n,最大山谷深度S_v增加了。

随着冲蚀角度的增大, *S*_{ku}增大, 表明高度分 布变窄。在相同的冲蚀角度下, 随着冲蚀速度的 增大, *S*_a和*S*_q均增大, *S*_{ku}减小, 表明高度分布变 宽。相比于冲蚀角90°, 45°时涂层受冲蚀表面粗 糙度大, 涂层表面受到水平方向的有效切应力越 大, 在冲蚀磨损的情况下切应力会导致涂层形成 切削划痕、犁沟,磨屑材料堆积严重,导致Sa和 Sq较大。经过初期冲蚀在试件表面形成凹凸不平 的峰谷,试件表面粗糙度增大,使得冲蚀中后期 粒子对凹凸不平的表面冲蚀磨损破坏严重,试件 表面峰谷的形成和破坏导致冲蚀中后期冲蚀率的 增加^[21-22]。

在冲蚀速度35 m/s时,45°时平均线粗糙度 R_a 和均方根 R_q 分别为2.628 µm和3.499 µm,最大轮 廓深度 $R_z(R_P + R_v)$ 为23.503 µm。90°时 R_a 和 R_q 分别 为1.338 µm和1.72 µm, R_z 为10.598 µm。在冲蚀速 度27 m/s,冲蚀角90°时, R_a 和 R_q 分别为0.671 µm 和0.821 µm, R_z 为3.344 µm,这种趋势和涂层受冲 蚀磨损表面粗糙度一致。不同试验参数下涂层线 粗糙度如图9所示。

表 2	图7所示试件的表面粗糙度特征参数	
-----	------------------	--

Table 2 Surface roughness parameters of the specimen show in Fig. 7					
Erosio	n parameters	5	n)		
Erosion angle	Erosion velocity / $(m \cdot s^{-1})$	$S_{ m a}$ / $\mu{ m m}$	$S_{ m q}$ / $\mu{ m m}$	$S_{ m sk}$	$S_{ m ku}$
45°	35	2.079	2.843	0.641	33.431
90°	35	1.086	1.555	-1.122	61.868
90°	27	0.149	0.192	1.343	97.52









Fig.9 Part line roughness of the layers after erosion

4 结 论

(1)随着冲蚀角度的增加,镀锌涂层的冲蚀率 呈现先增大后减小趋势。

(2)涂层材料的冲蚀损伤更加依赖于冲蚀角度,风沙流对涂层材料的冲蚀磨损损伤行为同时存在类似表面划伤作用和挤压变形剥落作用。

(3)冲蚀角45°时冲蚀试件表面时冲蚀损伤形 貌呈椭圆形,当垂直(90°)冲蚀试件表面时,冲蚀 损伤形貌近似呈圆形,在90°时的冲蚀坑深度大于 45°时的冲蚀坑深度;冲蚀坑深度随着冲蚀速度的 增大而增加。

(4) 在相同的冲蚀速度下,45°时表面粗糙度 较90°时大,在相同的冲蚀角度下,速度越大粗糙 度越大;在冲蚀中后期,粒子对凹凸不平的表面 冲蚀磨损破坏严重,试件表面峰谷的形成和破坏 导致冲蚀率的增加。

参考文献

 [1] ÇOBAN O. Solid particle erosion behavior of volcanic ash/PVC composites[J]. Acta Physica Polonica A, 2015, 127: 998-1001.

- [2] NAVEED M, RENTERIA A F, NEBEL D, et al. Study of high velocity solid particle erosion behavior of Ti₂AlC MAX phase coatings[J]. Wear, 2015, 342-343: 391-397.
- [3] BOUSSER E, MARTINU L, KLEMBERG-SAPIEHA J E. Solid particle erosion mechanisms of protective coatings for aerospace applications[J]. Surface & Coatings Technology, 2014, 257: 165-181.
- [4] DARYADEL S S, MANTENA P R, KIM K, et.al. Dynamic response of glass under low-velocity impact and high strainrate SHPB compression loading[J]. Journal of Non-Crystalline Solids, 2016, 432: 432-439.
- [5] MOHAJERANI A, SPELT J K. Erosive wear of borosilicate glass by low velocity unidirectional impact of abrasive spheres[J]. Wear, 2011, 270: 866-875.
- [6] MOHAJERANI A, SPELT J K. Erosive wear of borosilicate glass edges by unidirectional low velocity impact of steel balls[J]. Wear, 2010, 269: 900-910.
- [7] 马振珠, 岳汉威, 包亦望, 等. 岩石、混凝土受颗粒冲击后 接触损伤形貌的特征[J]. 燕山大学学报, 2009, 6: 510-516. MA Z Z, YUE H W, BAO Y W, et al. A fracture of contact damage of rock and concrete impacted by particles[J]. Journal of Yanshan University, 2009, 6: 510-516 (in Chinese).
- [8] 包亦望. 陶瓷及玻璃力学性能评价的一些非常规技术[J]. 硅酸盐学报, 2007, 35(S1): 117-124.
 BAO Y W. Some non-traditional techniques for evaluating mechanical properties of ceramics and glasses[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2007, 35(S1): 117-124 (in Chinese).
- [9] 岳汉威, 马振珠, 刘叶栋, 等. 利用冲击球压法评价混凝土 表面的硬化特征[J]. 硅酸盐通报, 2010, 29(2): 491-495. YUE H W, MA Z Z, LIU Y D, et al. Evaluation of harding characteristic of concrete surface by sphere impact at harding stage[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2010, 29(2): 491-495 (in Chinese).
- [10] 郝贠洪, 任莹, 段国龙, 等. 钢结构表面涂层受风沙冲蚀机 理和评价方法[J]. 摩擦学学报, 2014, 34(4): 357-363.
 HAO Y H, REN Y, DUAN G L, et al. Erosion mechanism and evaluation of steel structure coating eroded under sandstorm environment[J]. Tribology, 2014, 34(4): 357-363 (in Chinese).
- [11] 郝贠洪, 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.
 HAO Y H, LI Y. Erosion-behaviors of the coating on steel structure eroded at low erosion-angle in sandstorm[J]. Tribology, 2013, 33(4): 343-347 (in Chinese).
- [12] 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.
 WANG Y P, JU C C, WANG Q C. Influence of impact parameters on the erosion wear of lanxin railway concrete structure[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2013,

32(4): 607-612 (in Chinese).

[13] 王彦平,居春常,王起才.风沙环境下混凝土、砂浆和水泥石的固体颗粒冲蚀磨损试验研究[J].中国铁道科学,2013,34(5):22-27.

WANG Y P, JU C C, WANG Q C. Experimental study on the solid particle erosion of concrete, mortar and cement paste under blown sand environment[J]. China Railway Science, 2013, 34(5): 22-27 (in Chinese).

- [14] NAVEED M, RENTERIA A F, NEBEL D, et al. Study of high velocity solid particle erosion behavior of Ti2AlC MAX phase coatings[J]. Wear, 2015, 342-343: 391-397.
- [15] NGUYEN V B, NGUYEN Q B, LIM C Y H, et al. Effect of air-borne particle-particle interaction on materials erosion[J]. Wear, 2015, 322-323: 17-31.
- [16] 张小锋,周克崧,张吉阜,等. 粗糙度对热障涂层冲蚀失效的 影响及模型建立[J]. 无机材料学报, 2014, 29(3): 294-300. ZHANG X F, ZHOU K S, ZHANG J F, et al. Erosion failure mechanism and model establishment of thermal barrier coatings based on roughness[J]. Journal of Inorganic Materials, 2014, 29(3): 294-300 (in Chinese).
- [17] GNANAVELU A, KAPUR N, NEVILLE A, et al. An integrated methodology for predicting material wear rates due to erosion[J]. Wear, 2009, 267(11): 1935-1944.
- [18] ASHRAFIZADEH H, ASHRAFIZADEH F. A numerical 3D simulation for prediction of wear caused by solid particle impact[J]. Wear, 2012, 276-277: 75-84.
- [19] 袁成清, 严新平, 彭中笑. 基于激光共聚焦显微镜方法的磨 损表面三维数字化描述[J]. 润滑与密封, 2006, 12: 33-36. YUAN C Q, YAN X P, PENG Z X. Numerical characterization of 3D worn surface topography using confocal laser scanning microscopy[J]. Lubrication Engineering, 2006, 12: 33-36 (in Chinese).
- [20] 袁成清,李健,严新平. 摩擦学测试技术及其发展[J]. 摩擦 学学报, 2002, 22(4): 447-450. YUAN C Q, LI J, YAN X P. Tribological testing technology and its development[J]. Tribology, 2002, 22(4): 447-450 (in Chinese).
- [21] KUMAR R K, SEETHARAMU S, KAMARAJ M. Quantitative evaluation of 3D surface roughness parameters during cavitation exposure of 16cr-5ni hydro turbine steel[J]. Wear, 2014, 320: 16-24.
- [22] 冀盛亚,孙乐民,上官宝,等.表面粗糙度对黄铜/铬青铜摩 擦副载流摩擦磨损性能影响的研究[J]. 润滑与密封, 2009, 34(1): 29-31.

JI S Y, SUN L M, SHANG G B, et al. Tibological characteristics of H68/QCr0.5 rubbing pairs under electric current with different surface roughness[J]. Lubrication Engineering, 2009, 34(1): 29-31 (in Chinese).