doi: 10.3969/j.issn.1007-9289.2013.02.003

# WC-Co-Cr 涂层和 0Cr13Ni5Mo 基材的 气体喷砂冲蚀行为 \*

### 李 阳<sup>1,2</sup>,刘 阳<sup>1</sup>,段德莉<sup>1</sup>,李 曙<sup>1</sup>

(1. 中国科学院金属研究所 专用材料与器件研究部 沈阳 110016; 2. 河北工程大学 机电学院 河北 邯郸 056038)

**摘** 要:研究不同结构 HVOF 热喷 WC-Co-Cr 涂层和 0Cr13Ni5Mo 基材的冲蚀行为,重点分析高速粒子冲击下涂层孔洞和层状结构等缺陷在不同攻角下的作用,提出高攻角气体喷砂冲蚀模型,解释了 WC-Co-Cr 涂层和 0Cr13Ni5Mo 基材的冲蚀行为规律。结果表明:低攻角时,涂层与基材的损伤机制均以微切削去除为主,涂层还伴有少量剥落,WC-Co-Cr 涂层的耐冲蚀性能一般优于基材,但高孔隙率涂层更易切削导致冲蚀率比基材高。随攻角增大,涂层冲蚀率呈上升趋势而基材冲蚀率下降。高攻角时,层状结构明显的涂层其裂纹更易在层间萌生和扩展导致片状剥落,高孔隙率反而有利于吸收冲击能量和抑制裂纹扩展;基材则出现严重塑性变形。在气体喷砂条件下,涂层的层状结构对法向冲击极为敏感,攻角高于 45°后,WC-Co-Cr 涂层的冲蚀率为基材的 1.3~4.1 倍。

关键词:WC-Co-Cr涂层;气体喷砂试验,冲蚀,攻角 中图分类号:TG174.442 **文献标识码:A 文章编号:**1007-9289(2013)02-0014-07

## Sand-blasting Erosion Behavior of HVOF Sprayed WC-Co-Cr Coatings and 0Cr13Ni5Mo Substrate

LI Yang<sup>1,2</sup>, LIU Yang<sup>1</sup>, DUAN De-li<sup>1</sup>, LI Shu<sup>1</sup>

 Specialized Materials and Devices Division, Institute of Metal Research, Shenyang 110016; 2. College of Mechanical and Electrical Engineering, Heibei University of Engineering, Handan 056038, Hebei)

**Abstract:** The erosion behavior of HVOF sprayed WC-Co-Cr coatings with different microstructure and 0Cr13Ni5Mo substrate was investigated. Under the condition of high velocity impact condition, the effects of pores and laminar structure on erosion resistance of the coatings under different impingement angles were focused on. A sand-blasting erosion model under high impingement angle was proposed to explain the erosion behavior of WC-Co-Cr coatings and 0Cr13Ni5Mo substrate. Results show that the dominant damage mechanism of coatings and substrate is micro-cutting and some detachments occur on coatings under low impingement angle. The erosion resistance of WC-Co-Cr coatings is generally better than that of the substrate, however, high porosity coating is easy to cut which makes the erosion resistance worse. The erosion rate of coatings presents uptrend and that of substrate declines with increasing impingement angle. Under high impingement angle, the cracks in coating with obvious laminar structure are easy to initiate and prolong, which make much detachment of the coatings. The high porosity may absorb impact energy and prevent the cracks from prolonging, and serious plastic deformation occurs on the substrate. In sand-blasting condition, laminar structure of the coating is more sensitive to normal impact and the erosion rate of WC-Co-Cr coatings is 1.3-4.1 times that of the substrate above 45° impingement angle.

Key words: WC-Co-Cr coating; sand-blasting test; erosion; impingement angle

**收稿日期**:2013-01-01; 修回日期:2013-03-12; 基金项目: \*国家自然科学基金(50475159) 作者简介: 李阳(1984-), 男(汉), 河北石家庄人, 讲师, 博士; 研究方向: 冲蚀磨损

网络出版日期: 2013-03-26 09:06; 网络出版地址: http://www.cnki.net/kcms/detail/11.3905.TG.20130326.0906.001.html 引文格式: 李阳, 刘阳, 段德莉, 等. WC-Co-Cr 涂层和 0Cr13Ni5Mo 基材的气体喷砂冲蚀行为 [J]. 中国表面工程, 2013, 26(2): 14-20.

#### 0 引 言

含铬钴基碳化钨涂层结合了 WC 颗粒的高 硬度与合金粘结相的高韧性,从而可能具备优良 的耐冲蚀性能,其中 HVOF 热喷 WC-Co-Cr 涂 层近年来备受关注<sup>[1-2]</sup>。研究表明影响涂层冲蚀 行为的因素很多,包括涂层本身的硬度、断裂韧 性、结合强度、硬质相和粘结相含量等,对此已有 广泛报道<sup>[3-11]</sup>。除此之外,显著影响涂层冲蚀行 为的因素还包括这类涂层难以避免的孔洞、层状 结构等缺陷,由于喷涂设备和工艺不同,这类缺陷 的严重程度也有所不同,是涂层的工程应用中必 须关注的问题。

文献[12]用料浆罐冲蚀试验机研究这类缺陷 对WC-Co-Cr涂层冲蚀行为的影响,结果显示在 液-固两相流冲刷下涂层的耐冲蚀性能总体上优 于 0Cr13Ni5Mo基材,在低参数工况下孔隙率高 的涂层冲蚀率较高,在苛刻工况下层状结构明显 的涂层其耐冲蚀性则明显恶化。试验中涂层的冲 蚀行为显现出对攻角不敏感的特点,这与试验中 攻角的综合效应有关。文献[13]采用有确定攻角 的射流冲蚀试验机研究缺陷对涂层冲蚀行为的影 响,结果显示孔隙率高和层状结构明显的涂层其 耐冲蚀性能与攻角存在不同的相关性,提出了考 虑缺陷的硬质涂层射流冲蚀模型,定性解释了涂 层在不同攻角下的冲蚀行为规律。射流冲蚀试验 机的料浆速度不高,难以研究更高冲击量下缺陷 对涂层冲蚀行为的影响。文中用气体喷砂冲蚀试 验机进一步研究高速粒子冲击下,孔洞、层状结构 等缺陷对硬质涂层冲蚀行为的影响,提出高攻角 下的气体喷砂冲蚀模型。

#### 1 试验材料与方法

#### 1.1 试验材料及表征

选用成分(86WC-10Co-4Cr)相同的几种商 品粉末,用3种典型的高速火焰喷涂(HVOF)设 备在平板状基材(0Cr13Ni5Mo)上制备3种不同 微观结构的WC-Co-Cr硬质涂层(工艺参数见 表1),与0Cr13Ni5Mo基材一起作为冲蚀试验的 靶材样品。

用气体喷砂冲蚀试验研究高速粒子冲击下涂

Table 1 Flocess parameters of three kinds of coatings									
Sample No.	Spray systems	Spray powder and its particle size/µm	Fuel	Combustion- supporting gas	Feeding gas	Powder feed Spray		S	
						rate/	distance/	style	
						$(g \cdot min^{-1})$	mm		
M2	Metco DJ-2700	Tafa 1350 VM(15-45)	Propane	$O_2$	$N_2$	50	230	Manual	
T1	TAFA JP-5000	Amdry 5847(11-53)	Aviation kerosene	$O_2$	Ar	140	380	Manipulator	
I4	Intelli-jet AC-HAVF	Amperit 558.059(5-30)	Propane	Compressed air	$N_2$	150	175	Manual	

表 1 三种涂层的工艺参数 Table 1 Presses perspectors of three kinds of costinge

层和基材的冲蚀行为,着重分析孔洞、层状结构等 缺陷对攻角的响应和对涂层耐冲蚀性能的影响。 样品的粗糙度、显微硬度、涂层孔隙率和表征层状 结构的比能耗(SEC)测定方法见文献[12-14]。 用 SHIMADZU SSX-550 型扫描电镜观察样品 冲蚀后的表面形貌。样品编号依然沿用文献[12] 中的规定,3种涂层的微观结构已经在该文献中详 细讨论,其中,M2 涂层测得的孔隙率最高;综合孔 隙率和 SEC 的测量结果并结合金相观察,可判定 层状结构最明显的 T1 涂层的层间结合最差。4 种 靶材样品的编号和性能测试结果列于表 2。

#### 表 2 靶材样品的编号和性能

Fable 2	Sample	numbers	and	properties
---------	--------	---------	-----	------------

Sample No.	Coatings thickness/ µm	Ra/ μm	Hardness/ HV <sub>0.3</sub>	Porosity/ %	(J • mm <sup>-3</sup> )
M2	450	5.41	875	13.85	14.26
T1	310	2.48	1022	2.18	20.18
<b>I</b> 4	180	3.50	1134	4.97	31.94
S		0.97	318		

图1是自制的气体喷砂冲蚀试验机简图。该 设备的喷嘴内径逐段放大,各段具有很高的同心 度。当压缩气体通过喷嘴时由于伯努利效应形成 负压,将通过漏斗进入混合腔的砂粒吸入到喷嘴 内,飞出喷嘴的砂粒在高速气流带动下射向靶材 样品表面。气体的流量通过转子流量计调节,可 以改变粒子速度;通过调节攻角调节器,可以确定 不同的攻角。



1—Air compressor 2—Water oil separator 3—Rotermeter 4—Windpipe 5—Funnel 6—Mixing chamber 7—Nozzle 8—Sample 9—Impingement angle adjustor 10—Shield 图 1 气体喷砂冲蚀试验机示意图

Fig. 1 Schematic diagram of sand-blasting erosion tester

试验采用的喷嘴出口直径为 1.8 mm,喷嘴 中心与靶材样品的距离为 10 mm;粒子速度经双 转盘测速仪标定为 90 m/s;固体粒子为多角形棕 刚玉,粒度约为 51 μm(280 目)。根据冲蚀情况 (以涂层不被冲透为准)确定四种攻角下的不同冲 砂量,15°攻角的冲砂量为 10、15 和 20g,45°和 75° 攻角的冲砂量为 5、10 和 15g,90°攻角的冲砂量为 5、8 和 10g。冲蚀试验中随时检测并及时更换喷 嘴,以避免内径增大导致粒子速度改变。

靶材样品尺寸为 30 mm×25 mm×6 mm。 试样的清洗、称重方法以及表征样品耐冲蚀性能 的物理量(冲蚀率)均与文献[13]相同。

#### 2 试验结果与讨论

#### 2.1 冲蚀失重与冲蚀率

图 2 是 4 种攻角下靶材样品冲蚀失重随冲砂 量的变化。可观察各攻角下各样品的冲蚀失重与 冲砂量均近似呈线性关系。各拟合直线的斜率可 作为每种靶材样品在各攻角下的冲蚀率,以表征 靶材的耐冲蚀性能。



图 2 不同攻角下各靶材样品的冲蚀失重随冲砂量的变化

2013 年

Fig. 2 Variation of erosion mass loss of samples with sand dose under different impingement angle

各样品冲蚀率随攻角的变化如图 3 所示。可 见涂层的冲蚀率随着攻角的增大均大致呈上升趋 势,显现脆性材料特征。其中,孔隙率最高的 M2 涂层和层状结构最明显的 T1 涂层冲蚀率在各攻 角下均高于两种缺陷都不明显的 I4 涂层,表明缺 陷确实降低了涂层的耐冲蚀性能。高攻角下层状 结构明显的 T1 涂层冲蚀率反超高孔隙率的 M2 涂层,反映层状结构对攻角响应的敏感程度高于 孔隙率。此外,基材的冲蚀率随攻角增大而降低, 显现塑性材料特征。当攻角高于 45°后,各涂层的 耐冲蚀性能都不如 0Cr13Ni5Mo 基材,由图 3 可知 45°后涂层冲蚀率为基材冲蚀率的 1.3~4.1 倍。



图 3 各靶材样品冲蚀率随攻角的变化



#### 2.2 不同攻角下的冲蚀机制

图 4 是 4 种靶材样品在 15° 攻角下冲砂量为 10 g 的冲蚀后表面损伤形貌,图中箭头指向为冲 击粒子的宏观运动方向。可观察到涂层样品的材 料流失机制以微切削为主,伴有少量剥落。其中, 高孔隙率的 M2 涂层切削痕迹明显,材料剥落坑 既大且深;致密性最好的 I4 涂层切削和剥落在三 种涂层中最不明显;0Cr13Ni5Mo 基材仅观察到 微切削但去除程度严重。

图 5 是四种靶材样品在 90°攻角下冲砂量 10 g 的冲蚀后表面损伤形貌。可观察到涂层样品的材 料流失机制为裂纹萌生和扩展所导致的涂层片状 剥落。其中,层状结构明显的 T1 涂层剥落最为 严重;高孔隙率的 M2 涂层与 T1 相比剥落程度 较轻;高攻角下可见 0Cr13Ni5Mo 基材发生了严 重的塑性变形,但材料去除较少。

在文中试验中,可以推断WC-Co-Cr涂层的 冲蚀机制与低速粒子冲击的射流冲蚀相同<sup>[13]</sup>,只 是涂层切削和剥落的程度更为严重;0Cr13Ni5Mo 基材在低攻角下的冲蚀机制为微切削去除,高攻 角时发生严重的塑性变形,材料去除较少。

#### 2.3 涂层不同缺陷对攻角的响应

由图 3 可见缺陷严重的 M2 和 T1 涂层其耐 冲蚀性能最差,不过它们随攻角变化的行为规律



(a) M2 (b) T1 (c) I4 (d) S
图 4 靶材样品冲后损伤表面的 SEM 形貌 (攻角 15°,冲砂量 10 g)
Fig. 4 SEM morphologies of the eroded surface of samples (15° impingement angle, 10 g sand dose)



(a) M2 (b) T1 (c) I4 (d) S
图 5 靶材样品冲后损伤表面的 SEM 形貌(攻角 90°,冲砂量 10 g)
Fig. 5 SEM morphologies of the eroded surface of samples (90° impingement angle, 10 g sand dose)

有所不同。与射流冲蚀试验<sup>[13]</sup>对比,高速粒子冲 击下,高孔隙率的 M2 涂层在较低攻角范围内材 料的去除依然最多。随着攻角的增大,涂层的层 状结构对冲击量的敏感响应导致层状结构明显的 T1 涂层冲蚀率随攻角增大快速上升,当攻角为 45°时,其冲蚀率就已经超过高孔隙率的 M2 涂 层,而在射流冲蚀中这种转变要在攻角达到 75° 才会出现。还应注意到在气体喷砂条件下,随攻 角增大,各涂层耐冲蚀性能均不如基材,包括致密 性较好的 I4 涂层在内。

研究表明,冲蚀过程中粒子对靶材的冲击量 大小主要取决于法向冲击分量和冲击速度,显然 攻角越大,速度越高,冲击量就越大。在冲击粒子 速度高的气体喷砂冲蚀试验中,即使在较低攻角 时冲击量就已经相当大,高攻角时冲击量更大。 尽管文中研究的3种WC-Co-Cr涂层的硬度远 高于 0Cr13Ni5Mo 基材,但高速粒子冲击下涂层 的层状结构缺陷对法向冲击量敏感的特点凸显出 来,致使硬质涂层的耐冲蚀性能随攻角增加而迅 速恶化。

#### 2.4 高攻角气体喷砂冲蚀模型

文献[13]提出了有缺陷涂层的射流冲蚀模

型,定性解释了孔洞和层状结构两种缺陷在不同 攻角冲蚀下的响应行为。文中针对气体喷砂冲蚀 试验中新的试验现象和规律,就硬质涂层和较低 硬度基材,提出高攻角下气体喷砂冲蚀模型。

图 6 是高攻角下的气体喷砂冲蚀模型。图中 I、II 和 III 的靶材分别是高孔隙率涂层、层状结构 明显涂层和基材。粒子在气体的带动下高速冲击 样品表面,攻角及靶材受力情况如图所示。

Ⅰ、Ⅱ中的(a<sub>1</sub>)(a<sub>2</sub>)表示涂层裂纹的萌生和 扩展。由于冲击速度高、攻角大,涂层受到的载荷 变化率和法向冲击量均很大,无论裂纹萌生数量 还是影响区域深度均较射流冲蚀<sup>[13]</sup>严重,层状结 构明显的涂层易于在层间萌生和扩展裂纹;高孔 隙率涂层的孔洞不仅有缓冲作用,而且对裂纹的 扩展具有阻碍作用。

Ⅰ、Ⅱ中的(b<sub>1</sub>)(b<sub>2</sub>)描述涂层的剥落。由于 层状结构明显的涂层一方面其缓冲能力差,另一 方面大量粒子多次冲击使表层能量不断积累,萌 生的裂纹会沿着层间横向扩展,互相连通并抵达 表面,导致涂层呈层间片状剥落;高孔隙率涂层有 利于吸收耗散冲击能量,孔洞一定程度上阻碍裂 纹扩展,涂层剥落的程度反而较小。 由于 HVOF 热喷涂层均具有层状结构,在气体喷砂试验试验中,即使致密性很好的涂层也会 在高攻角高速冲击下发生涂层的层间片状剥落, 只是剥落程度比层状结构明显的涂层轻些,但冲 蚀率可能上升较多。

Ⅲ表示基材的塑性变形。法向冲击量很大时, 硬度较低的基材只发生严重的塑性变形,而材料去 除量不大,表现出优于硬质涂层的耐冲蚀性能。



I High porosity coating  $(a_1)$  Initiation and prolongation of crack  $(b_1)$  Detachment of coating II Coating with obvious laminar structure  $(a_2)$  Initiation and prolongation of crack  $(b_2)$  Detachment of coating II Plastic deformation of substrate

图 6 高攻角下的气体喷砂冲蚀模型

Fig. 6 Sand-blasting erosion model under high impingement angle

冲击量很大时,涂层层状结构对冲击量敏感的特点更充分显现出来。该模型定性解释了文中

试验中高速粒子冲击下,高攻角冲蚀时层状结构 明显涂层的耐冲蚀性能比高孔隙率涂层更差,以 及硬质涂层耐冲蚀性能不及低硬度基材的冲蚀行 为规律。

#### 3 结 论

(1) HVOF 热喷 WC-Co-Cr 涂层固有的孔 洞和层状结构等缺陷均降低涂层的耐冲蚀性能。

(2)冲击量很大时,涂层的层状结构更易萌 生和扩展裂纹,涂层的孔洞则有缓冲能力,有利于 吸收耗散冲击能并阻碍裂纹扩展,耐冲蚀性能 较优。

(3) 气体喷砂冲蚀试验中,涂层的层状结构 对冲击量敏感的特点显现出来,攻角高于45°后, 硬质涂层的冲蚀率为基材的1.3~4.1倍。

(4)文中提出的高攻角气体喷砂冲蚀模型, 不仅定性解释了文中试验中靶材的冲蚀行为规律,而且解释了高冲击量时硬质涂层耐冲蚀性能 不及低硬度基材的现象。

#### 参考文献

- Wood R J K. Tribology of thermal sprayed WC-Co coatings [J]. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, 2010, 28: 82-94.
- [2] Berget J, Rogne T, Bardal E. Erosion-corrosion properties of different WC-Co-Cr coatings deposited by the HVOF process-influence of metallic matrix composition and spray powder size distribution [J]. Surface and Coatings Technology, 2007, 201: 7619-25.
- [3] Pugsley V A, Allen C. Microstructure/property relationships in the slurry erosion of tungsten carbide-cobalt [J].
  Wear, 1999, 225-229; 1017-24.
- [4] Hussainova I, Kubarsepp J, Pirso J. Mechanical properties and features of erosion of cermets [J]. Wear, 2001, 250: 818-825.

- [5] Kulu P, Hussainova I, Veinthal R. Solid particle erosion of thermal sprayed coatings [J]. Wear, 2005, 258: 488-496.
- [6] Oka Y I, Matsumura M, Kawabata T. Relationship between surface hardness and erosion damage caused by solid particle impact [J]. Wear, 1993, 162-164: 688-695.
- [7] Scrivani A, Ianelli S, et al. A contribution to the surface analysis and characterisation of HVOF coatings for petrochemical application [J]. Wear, 2001, 250: 107-113.
- [8] Shetty D K, Wright I G, Clauer A H. Effects of composition and microstructure on the slurry erosion of WC - Co cermets [J]. Wear, 1987, 114: 1-18.
- [9] Zhou R, Jiang Y H, Lu D H. The effect of volume fraction of WC particles on erosion resistance of WC reinforced iron matrix surface composites [J]. Wear, 2003, 255: 134 -138.
- [10] 黄祖凤,张冲,唐群华,等. WC 颗粒对激光熔覆 Fe-CoCrNiCu高熵合金涂层组织与硬度的影响 [J].中国表面 工程,2013,26(1):13-19.
- [11] 侯国梁,安宇龙,陈杰,等.两种 WC 基涂层在 600℃下的 摩擦学性能 [J].中国表面工程,2012,25(6):61-67.
- [12] 李阳,李曙,刘阳,等. WC-Co-Cr 涂层的孔率和层状结 构对冲蚀行为的影响 [J]. 摩擦学学报,2011,31(3):228 -234.
- [13] 李阳,刘阳,段德莉,等. HVOF 热喷 WC-Co-Cr 涂层在 不同攻角下的料浆冲蚀行为 [J]. 中国表面工程,2011,24 (6):11-18.
- [14] Hu W Y, Li S, Li S Z, et al. Determination of dynamic mechanical properties of metals from single pendulum scratch tests [J]. Tribology International, 1999, 32: 153-160.

作者地址: 辽宁省沈阳市沈河区文化路 72 号 110016 中国科学院金属研究所专用材料与器件研究部 Tel: (024) 2397 1775 (李曙) E-mail: shuli@imr. ac. cn