doi: 10.3969/j.issn.1007-9289.2011.06.002

HVOF 热喷 WC-Co-Cr 涂层在不同攻角下的料浆冲蚀行为*

李 阳,刘 阳,段德莉,李 曙

(中国科学院金属研究所 专用材料与器件研究部, 沈阳 110016)

摘 要:用3种高速火焰热喷涂(HVOF)设备将成分相同的6种商品粉末喷涂在0Cr13Ni5Mo不锈钢基材上,制成 9种WC-Co-Cr涂层。用自制射流冲蚀试验机对各涂层在15°、45°、75°和90°攻角下的料浆冲蚀行为进行研究,重点分 析涂层孔隙和层状结构等缺陷在不同攻角下所起的作用。结果表明:低攻角时涂层冲蚀机制以微切削去除为主,高孔 率涂层更易发生切削导致冲蚀率较高;高攻角时涂层冲蚀机制以冲击作用下裂纹萌生扩展导致涂层剥落为主,高孔率 涂层有利于对冲击能量的吸收耗散,孔隙抑制裂纹扩展,而层状结构明显的涂层其裂纹更易在层间萌生和扩展,导致涂 层呈片状剥落,冲蚀率更高。在试验的基础上提出了考虑缺陷的硬质涂层射流冲蚀模型,并讨论了涂层冲蚀率随攻角 变化的双峰值现象。

关键词:高速火焰热喷涂;WC-Co-Cr涂层; 攻角; 孔隙; 层状结构 中图分类号:TG174.442 文献标识码:A 文章编号: 1007-9289(2011)06-0011-08

Slurry Erosion Behavior of HVOF Sprayed WC-Co-Cr Coatings at Different Impingement Angle

LI Yang, LIU Yang, DUAN De-li, LI Shu

(Specialized Materials and Devices Division, Institute of Metal Research, Shenyang 110016)

Abstract: Three different HVOF/HVAF thermal spray devices and six kinds of commercial powders with various particle sizes were used to prepare specimens of WC-Co-Cr coatings with different microstructure on 0Cr13Ni5Mo stainless steel substrate. The erosion behavior of them at 15°, 45°, 75° and 90° impingement angle was investigated by slurry jet erosion tester. The effect of porosity and laminar structure on erosion resistance of WC-Co-Cr coatings at different impingement angle was researched. The results show that the dominant erosion mechanism is micro-cutting at shallow impingement angle. The high porosity coatings are easy to cut, which make the erosion resistance worse. The dominant erosion mechanism is detachment of coatings at high impingement angle. The high porosity coatings at high impingement angle. The high porosity coatings with obvious laminar structure are easy to initiate and prolong, which make the erosion resistance of coatings with obvious laminar structure worse. The model of hard coatings with defects is proposed and the dual-peak phenomenon of erosion rate at different ture worse.

Key words: HVOF; WC-Co-Cr coatings; impingement angle; pore; laminar structure

0 引 言

由于喷涂设备和工艺不同所造成的涂层结 构差异,尤其是一些难以避免的孔洞、层状结构 等缺陷,对冲蚀行为有重要影响^[1-8]。文献[9]采 用料浆罐冲蚀试验机研究了这两类缺陷在不同 工况下对涂层耐冲蚀性能的影响,结果显示普通 工况条件下孔隙率高的涂层耐冲蚀性能差,而苛 刻工况下层状结构明显的涂层耐冲蚀性能更差。

收稿日期:2011-10-30;修回日期:2011-11-03 基金项目: *国家自然科学基金(50475159) 作者简介:李阳(1984—),男(汉),石家庄人,博士生。 由于料浆罐冲蚀试验机无法准确确定攻角、粒子 速度、料浆浓度等试验条件,而涂层缺陷在不同 攻角下的响应行为又是人们非常关心的问题,有 必要采用确定攻角的冲蚀试验机对其进行研究。

材料在不同攻角下的冲蚀行为早有报道。 1960年 Finnie^[10]利用气体携带 SiC 颗粒冲击塑性 和脆性靶材,发现典型塑性材料的冲蚀率在 20°攻 角左右出现极值,而后随着攻角增大逐渐下降;脆 性材料的冲蚀率极值则出现在 90°攻角附近。 Levy^[11-12]等对合金进行了料浆冲蚀试验,发现随 着攻角的变化多种合金的冲蚀率出现两个极值, 对具体原因却缺乏分析;林福严^[13]等用流体力学 理论初步解释了双峰现象。上述研究大都没有考察缺陷在攻角对材料冲蚀行为的影响,尤其硬质涂层的料浆冲蚀行为还少有深入研究报道。

立论目的是研究孔隙率、层状结构等缺陷在 攻角对硬质涂层冲蚀行为影响中所起的作用。 在不锈钢基材上用不同的高速火焰设备喷涂名 义成分相同的商品粉末,制成多种 WC-Co-Cr 涂层靶材,用自制的射流冲蚀试验机研究各涂层 在不同攻角下的料浆冲蚀行为,着眼于孔隙率、 层状结构等缺陷在不同攻角下的响应,提出考虑 缺陷的硬质涂层射流冲蚀模型,讨论涂层冲蚀率 随攻角变化的双峰值现象。

1 试验材料与方法

1.1 试验材料及表征

采用3种典型的高速火焰热喷涂(HVOF)

设备将 6 种名义成分(86WC-10Co-4Cr)相同的 商品粉末喷涂在厚度 6 mm 的 0Cr13Ni5Mo 不锈 钢平板上,得到涂层厚度范围 180~450 μ m 的 9 种 WC-Co-Cr 硬质涂层作为靶材^[9]。

用 LINKS 2206B 型表面粗糙度仪测量涂层的 Ra,取 3 次测量数据的平均值。涂层的孔隙率、显微硬度和表征层状结构的比能耗(SEC)测定方法见文献^[9,14]。用 FEI INSPECT F50 型和 HITACHI S-3400N 型扫描电镜观察靶材冲蚀前后的涂层表面形貌。

作为靶材的 9 种涂层显微结构已经在文献[9] 中提及,其中 M 系列涂层的孔隙率偏高, M2 和 M3 两种涂层孔隙率高达 13%以上, 而 M1 和 T1 涂层则观察到有明显的层状结构。

喷有涂层的 9 种靶材样品编号和测试性能 列于表 1。

				-	
样品编号	涂层厚度/ μ m	表面粗糙度/μm	硬度/(HV _{0.3})	孔隙率/%	比能耗/(J•mm ⁻³)
M1	280	4.64	925	8.69	14.29
M2	450	5.41	875	13.85	14.26
M3	260	6.07	893	13.67	10.65
T1	310	2.48	1022	2.18	20.18
Τ2	360	3.89	1226	3.79	37.36
Т3	400	4.26	1174	5.24	30.33
I 4	180	3.50	1134	4.97	31.94
I5	300	4.41	934	7.97	25.39
I 6	340	4.35	1059	7.80	24.20

表 1 靶材样品编号和性能

Table 1 Numbers and properties of samples

1.2 射流冲蚀试验

图 1 是自制的射流式料浆冲蚀设备简图。 其运行原理为:水流通过水泵加速流入射流器 内,因膨胀产生负压,将置于水箱集砂斗中的固 体粒子通过吸砂管吸入射流器内腔,与水流混合 形成料浆后从射流器喷嘴射向靶材样品的涂层 表面。流经吸砂管的粒子流量由抽吸阀调节,经 水泵加速后的水流量和压力由旁通阀调节。通 过两个阀门的匹配调节,可以获得不同速度(及 浓度)的料浆射流;改变靶材样品夹的方位,可以 确定不同的攻角。 试验采用的喷嘴直径为7.5 mm,射流器入 口直径为2.7 mm;喷嘴与靶材样品中心的距离 为36 mm,料浆射出喷嘴速度为4 m/s;料浆浓度 (固液比)为24%,固体粒子为多角形石英砂,粒 度为420~210 μ m(40~70 目);攻角为15°、45°、 75°、90°,各攻角下的冲砂量由冲蚀时间决定,分 别取3 min、8 min、15 min、30 min、60 min,其中 在15°攻角下还增加了90 min、120 min 两个冲蚀 时间;每种条件的试验完成后更换新的靶材样 品,每种样品在某一攻角下完成所有冲蚀时间的 试验后更换新砂(总量为2 kg)。



设备局部放大图

图 1 射流式料浆冲蚀设备简图 Fig. 1 Schematics of the slurry jet erosion equipment

喷有涂层的平板状靶材样品尺寸为 15 mm ×15 mm。每次试验前后均用刷子蘸取酒精刷 洗,再浸泡在丙酮中超声波振动清洗 15 min,烘 干 15 min 后放入干燥箱内冷却,用精度 0.1 mg 的 电子天平称重。冲蚀试验前后测得的靶材质量差 值作为冲蚀失重,用冲蚀率(单位质量冲砂量所造 成的样品冲蚀失重)来表征涂层耐冲蚀性能。

对涂层进行低攻角冲蚀试验时,部分射流在 长度方向上可能落在样品表面之外,如图 2 所 示,即单位时间冲击在样品表面上的射流量或者 说冲砂量低于预设值,须予以考虑。样品长度在 垂直射流方向上的投影占射流直径的百分比 *P* 如式(1):

$$P = \frac{L \times \sin \alpha}{D} \times 100 \%$$
 (1)



图 2 射流冲蚀试验 15°攻角时示意图

Fig. 2 Schematics of slurry jet erosion test at 15° impingement angle

式中, L为样品长度, D为射流直径, a为攻角。

经计算,当攻角为15°时(L为15 mm,D取喷 嘴直径7.5 mm),P为51.8%;由于射流喷出后向 四周会有些扩散,抵达靶材的射流直径会略大于 7.5 mm,故P值可以取50%。上述结果表明,15° 攻角时在相同时间内冲击在样品表面的砂量为其 它攻角的一半,这也是试验对15°攻角增加冲蚀时 间的原因,以期各攻角试验承受的冲砂量相当。

2 试验结果与讨论

2.1 涂层在不同攻角下的耐冲蚀性能

图 3 是 T1 样品在 4 种攻角下其涂层冲蚀失 重随冲砂量的变化关系。其余八种样品的涂层 冲蚀行为与之类似,均可观察到在各攻角下,冲 蚀初期阶段涂层的失重随冲砂量增加快速升高, 随即增速放缓进入稳态增长阶段,涂层失重与冲 砂量成线性关系。



图 3 T1 涂层冲蚀失重随冲蚀砂量的变化

Fig. 3 Variation of erosion mass losses of T1 coating with erosion sand dose

取稳态时的冲蚀率来表征涂层的耐冲蚀性能,图3中各攻角下稳态阶段的直线斜率即为 T1涂层在各攻角下的冲蚀率。 9 种涂层的冲蚀率列于表 2,4 种攻角下高孔 率和层状结构明显的 M1、M2、M3 和 T1 涂层冲 蚀失重均较大,表明缺陷降低了涂层的耐冲蚀性 能。还可观察到某些硬度低的涂层耐冲蚀性能 优于硬度高的涂层,表明硬度对涂层耐冲蚀性能 的影响程度不如缺陷。

表 2 各涂层在 4 种攻角下的冲蚀率

Table 2 Erosion rate c	of coatings	at four	impingement	angles
------------------------	-------------	---------	-------------	--------

出口护旦。	冲蚀率/($ imes 10^3 ext{ mg} \cdot ext{kg}^{-1}$)					
竹田ヶ田 5	15°	45°	75°	90°		
M1	28.59	32.11	39.67	45.72		
M2	19.53	27.60	24.40	33.24		
M3	18.23	34.71	25.05	35.95		
T1	13.85	18.97	29.80	41.26		
T2	11.84	10.18	13.91	19.90		
Т3	10.93	13.84	18.15	21.02		
I 4	9.23	11.89	17.15	22.70		
I5	12.67	16.69	20.17	23.27		
I6	10.92	12.41	20.90	22.07		

2.2 涂层在不同攻角下的冲蚀机制

图4是T1涂层在15°和90°攻角下冲蚀前后

的表面形貌。对比涂层冲蚀前后的表面形貌,在 未经冲蚀的原始涂层表面只能观察到随机的高 低起伏见(图4(a)),而经15°攻角冲蚀的表面则 有很多同方向的微切削痕迹,伴有少量涂层剥落 (见图4(b));90°攻角下涂层无明显切削痕迹,但片 状剥落非常严重(见图4(c)),高倍照片图4(d)中 除有一些小的裂纹外,还可见即将剥落的鳞片状 结构。可以推断在试验中,WC-Co-Cr涂层的冲 蚀机制为微切削和涂层剥落,只是不同攻角下两 种机制所占的份额不同:低攻角时冲蚀机制以微 切削去除为主,高攻角时冲蚀机制以裂纹萌生扩 展导致的涂层剥落为主。

2.3 涂层不同缺陷对攻角的响应

图 5 是两种缺陷严重的涂层冲蚀率随攻角 变化的关系。在较低攻角范围内,高孔率涂层 M3 由于硬度较低、孔洞较多,不仅易于切削去除 而且浅表层裂纹萌生扩展较多,导致涂层材料流 失严重,冲蚀率较大且随攻角上升更快。随着攻 角增大到一定程度,层状结构明显的 T1 涂层尽 管硬度高但其冲蚀率快速增长,高攻角时其冲蚀 率已经大于高孔率涂层,表明层状结构对冲击更



(b) 15°攻角冲蚀后

(d) 90°攻角冲蚀后(局部放大)

图 4 T1 涂层被冲蚀前后表面的 SEM 照片(180kg 冲砂量)

Fig. 4 SEM morphologies of the original and eroded surfaces of T1 coating (180kg sand dose)

为敏感,高攻角时层间裂纹容易萌生和扩展,导 致涂层剥落加剧。



图 5 两种缺陷严重的 M3 和 T1 涂层冲蚀率随攻角变化 的关系

Fig. 5 Variation of erosion rate of coatings with obvious defects with impingement angle

图 6 是两种缺陷严重的涂层被冲蚀后的截 面金相照片。15°攻角时冲蚀粒子的法向冲击力



(a) 高孔率涂层 15°

较低,导致萌生的横向和径向裂纹数量不多,涂 层仅有少量裂纹扩展剥落(见图 6(a)(c))。90° 攻角时涂层剥落严重,高孔率涂层表面可观察到 剥落的涂层碎片,还可观察到很多涂层剥落后留 下的剥落坑(见图 6(b)),剥落坑底部均为孔洞, 表明裂纹是从孔洞萌生并扩展的;层状结构明显 涂层则可观察到在亚表层有大量的横向裂纹,导 致涂层发生片状剥落(见图 6(d)),表明层状结构 在强烈冲击下裂纹更易萌生扩展,造成涂层材料 流失严重。

2.4 有缺陷涂层的射流冲蚀模型

图 7 是低攻角下的涂层射流冲蚀模型。图 中 I 和 II 分别是高孔率和层状结构明显的涂层。 图 7(a)为原始涂层,粒子在水流的裹挟下小角度 冲击样品表面,涂层受力情况如图所示。图 7(b) 描述微切削和裂纹萌生,在较大的切向力 F_x 作 用下,高孔隙率涂层剪切阻力低而更易被切削, 层状结构明显涂层一般是粘结相被切削;尽管法 向力 F_y 较小,粒子冲击影响深度较浅,但在粒子



(b) 高孔率涂层 90°



(c) 层状结构明显涂层 15°

(d) 层状结构明显涂层 90°

15

图 6 有明显缺陷涂层冲蚀后的截面金相照片 Fig. 6 Micrograph of cross-sections of the eroded coatings with obvious defects 反复作用下,孔洞、表面以及浅表层间仍会有裂 纹萌生,冲击对孔隙的影响比对层状结构的影 响更大些。图7(c)表示微切削和涂层剥落,随 着冲蚀时间和攻角的增加,除了切削去除材料 外,大量粒子多次冲击和涂层中表层能量的积 累,裂纹不断扩展和连通,涂层也会发生一定程 度的剥落。

低攻角下,在易于切削和较多裂纹萌生的双 重作用下,高孔隙率涂层比层状结构明显涂层更 不耐冲蚀。





图 8 是高攻角下的涂层射流冲蚀模型。图 中 I 和 II 分别是高孔率和层状结构明显的涂层。 图 8(a)为原始涂层,粒子在水流的裹挟下大角度 冲击样品表面,涂层受力情况如图所示。图 8(b) 表示裂纹萌生、扩展和少量微切削,在较大的法 向力 F,作用下,粒子冲击的影响较深,层状结构 明显的涂层更易在层间萌生裂纹并沿其扩展,高 孔率涂层的大量孔洞不仅有缓冲作用,而且当裂 纹扩展到孔洞处时或者终止于孔洞(见图中 A), 或者绕过孔洞(见图中 B);此外,当射流冲击到 靶材时会有一些沿表面流动,使粒子施加的切向 力 F_x 不像预计的那么小,仍会对涂层有少量微 切削。图 8(c)描述涂层的剥落,法向冲击量较大 并随着冲蚀时间的增加,层状结构明显的涂层一 方面其缓冲能力差,另一方面由于大量粒子多次 冲击和涂层中表层能量的积累,萌生的裂纹会沿 着层间快速横向扩展,互相连通并抵达表面,导 致涂层呈层间片状剥落;高孔率涂层由于对冲击 能量的吸收耗散有利,以及孔洞对裂纹扩展的阻 碍作用,涂层剥落的尺寸较小,即使加上较多的





Fig. 8 Slurry jet erosion model of coatings at high impingement angle

切削,总的材料流失量也较低。

高攻角下,由于裂纹萌生在较深的层间、容易沿层间扩展和片状剥落的规模较大,层状结构 明显的涂层比高孔隙率涂层耐冲蚀能力更差。

提出的两个模型可以定性解释试验得到的 WC-Co-Cr硬质涂层的冲蚀行为以及缺陷的影 响,低攻角时高孔率涂层易发生切削,冲蚀率较 高;高攻角时层状结构明显涂层裂纹更易萌生和 扩展,耐冲蚀性能较差。

2.5 涂层冲蚀率双峰值现象的讨论

图 9 是 M2、M3 和 I4 涂层冲蚀率随攻角的 变化关系。可以观察到 M3 涂层冲蚀率随攻角 增大在 45°和 90°有明显的两个峰值, M2 涂层冲 蚀率变化也有类似倾向,其余涂层与 I4 涂层规律 一致,均随着攻角的增大冲蚀率增加。

M3 涂层不同于结构致密的硬质涂层随攻角 增大冲蚀率增加的一般规律,其冲蚀率在 45°攻 角时出现峰值主要由于其高孔率和相对严重的 层状结构所致。低攻角射流模型表明高孔率涂 层在低攻角冲蚀时易发生切削,45°攻角时切削分 力仍足以切削高孔率涂层,与冲击分量增大导致 的涂层剥落联合作用使其冲蚀率在 45°攻角以前 增长的很快。75°攻角时切削分量急剧降低,由切 削导致的材料流失减少,冲击分量增大引起的涂 层剥落增加不足以弥补这一减少,冲蚀率反而降 低。90°攻角时剧烈的冲击导致层状结构相对严 重的涂层裂纹萌生和扩展增多,造成片状剥落, 加上射流沿着样品表面流动所增加的切削,冲蚀 率再次达到最大值。



图 9 M2、M3 和 I4 涂层的冲蚀率随攻角的变化 Fig. 9 Variation of erosion rates of M2, M3 and I4 with impingement angle

M2 涂层冲蚀率随攻角增大的变化也显示出 类似双峰特征,但 45°攻角时的峰值不够明显。 单摆冲击划痕测得的比能耗在一定程度上(涂层 孔隙率相近时)可以表征涂层层状结构的严重程 度^[9],M2 涂层孔隙率与 M3 涂层相近,但比能耗 值略高,表明 M2 涂层的层状结构程度轻于 M3 涂层。高攻角冲蚀模型表明,层状结构明显的涂 层其裂纹更易萌生和扩展,故 M2 涂层剥落倾向 低于 M3 涂层,使其冲蚀率随着攻角的增大上升 的较缓,双峰值规律不如 M3 涂层明显。

3 结 论

(1)硬质涂层缺陷如孔隙和层状结构等的影响超过涂层硬度的影响,在不同攻角下均降低涂层的耐冲蚀性能。

(2)低攻角射流冲蚀时,高孔隙率涂层由于 材料抗剪切能力低,更易发生微切削,耐冲蚀性 能最差。

(3)高攻角射流冲蚀时,层状结构明显涂层的裂纹更易萌生和扩展,冲击量较大时涂层剥落 严重;而高孔率涂层的较多孔洞有缓冲能力,有 利于冲击能量的吸收耗散并阻碍裂纹的扩展,其 耐冲蚀性能较优。

(4)提出了考虑缺陷的硬质涂层射流冲蚀模型,不仅可以定性说明涂层冲蚀行为随攻角变化的规律,而且解释了本文出现的涂层冲蚀率随攻角变化的双峰值现象。

参考文献

- [1] 张光华,李曙,刘阳,等. HVOF 热喷 WC-10Co-4Cr 涂层的砂浆冲蚀行为 [J]. 中国表面工程, 2007, 20(4): 16-22.
- [2] Barber J, Mellor B G, Wood R J K. The development of sub – surface damage during high energy solid particle erosion of a thermally sprayed WC-Co -Cr coating [J]. Wear, 2005, 259: 125-134.
- [3] 戎磊,黄坚,李铸国,等.激光熔覆 WC 颗粒增强 Ni 基合金涂层的组织与性能 [J].中国表面工程, 2010,23(6):40-44.
- [4] Sugiyama K, Nakahama S, et al. Slurry wear and cavitation erosion of thermal-sprayed cermets [J].
 Wear, 2005, 258: 768-775.
- [5] 吴向清,胡慧玲,谢发勤,等.等离子喷涂镍基合金涂层的组织与耐蚀性[J].中国表面工程, 2011,24(5):13-17.
- [6] Hawthorne H M, Arsenault B, et al. Comparison of slurry and dry erosion behaviour of some HVOF thermal sprayed coatings [J]. Wear, 1999, 225-229: 825-834.
- [7] Li C J, Wang W Z. Quantitative characterization of lamellar microstructure of plasma-sprayed ceramic coatings through visualization of void distribution [J]. Materials science and engineering A, 2004, 386; 10-19.
- [8] 马光,孙冬柏,樊自拴.纳米结构 NiCrFeBSi 喷涂 涂层组织及磨损性能 [J].中国表面工程,2011, 24(2):37-40.
- [9] 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.
- [10] Finnie I. Erosion of surfaces by solid particles [J]. Wear, 1960, 3: 87-103.
- [11] Levy A V, Yau P. Erosion of steels in liquid slurries [J]. Wear, 1984, 98: 163-182.
- [12] Levy A V, Jee N, Yau P. Erosion of steels in coal -solvent slurries [J]. Wear, 1987, 117: 115-127.
- [13] Lin F Y, Shao H S. The effect of impingement angle on slurry erosion [J]. Wear, 1991, 141: 279-289.
- [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 Tel: (024) 2397 1775(李曙) E-mail: shuli@imr. ac. cn