

# 离子辅助电弧沉积 ZrN 梯度涂层抗固体粒子冲蚀行为研究

刘道新<sup>1</sup>, 奚运涛<sup>1,2</sup>, 韩 栋<sup>1</sup>, 张晓化<sup>1</sup>

(1. 西北工业大学 腐蚀与防护研究室, 西安 710072; 2 中国石油长庆油田分公司 油气工艺研究院, 西安 710021)

**摘要:** 为有效提高 2Cr13 不锈钢表面大攻角固体粒子冲蚀 (SPE) 抗力, 利用离子辅助电弧沉积技术在氮化预处理的 2Cr13 钢表面制备了不同结构、不同厚度的 ZrN 梯度涂层, 研究了涂层结构和厚度对膜基结合强度、涂层显微硬度、韧性、动静态承载能力以及抗固体粒子冲蚀行为的影响。结果表明: 将合理结构的 ZrN 梯度涂层与离子氮化有机复合, 能够获得承载能力高、界面应力应变协调性好、结合强度高、强韧性配合合理, 抗多冲疲劳和抗塑性流变性能优的复合改性层, 其 90°大攻角 SPE 抗力显著高于 2Cr13 不锈钢基材。ZrN 梯度涂层的 SPE 抗力同时与涂层厚度密切相关, 当 ZrN 梯度涂层较薄时, 其协调变形能力及承载能力较低, 在冲击载荷作用下容易出现脱层失效, 因而 SPE 抗力较低; 当 ZrN 梯度涂层太厚时, 涂层韧性和内聚强度降低, 内部残余应力较大, 受外界冲击载荷作用时容易出现局部脱层, 因此 SPE 抗力亦不高。

**关键词:** ZrN 梯度涂层; 固体粒子冲蚀; 离子氮化; 2Cr13 不锈钢

DOI 10.3969/j.issn.1005-5053.2010.4.007

中图分类号: TG174.4

文献标识码: A

文章编号: 1005-5053(2010)04-0031-07

固体粒子冲蚀 (Solid Particle Erosion, SPE) 是航空发动机叶片失效的主要形式之一, 例如美军在海湾地区使用的直升机发动机寿命显著降低, 原因是直升机在沙漠中起降时发动机叶片遭受沙尘颗粒的冲蚀磨损与疲劳载荷的协同作用而过早破坏<sup>[1]</sup>。金属材料遭受小攻角冲蚀的机制为微切削, 大攻角冲蚀机制以多冲型疲劳破坏为主, 因此, 不同攻角下抗 SPE 所需要的材料表面性能不同。硬质表面改性层因抗磨和抗微切削能力好, 在解决小攻角 SPE 破坏时效果显著, 但增加表面硬度往往不利于疲劳抗力<sup>[2]</sup>, 所以硬质改性层的大攻角 (90°附近) SPE 抗力常常不及金属材料自身<sup>[3]</sup>。因此, 提高硬质改性层大攻角下 SPE 抗力是发展长寿命航空发动机等动力装置的研究热点和难点之一<sup>[1,3,4]</sup>。研究表明, 梯度膜在刀具和模具应用上有突出优势<sup>[5]</sup>。ZrN 涂层与 TiN 涂层相比, 具有更高的熔点、硬度和化学稳定性, 更好的耐磨性能和高温力学性能<sup>[6]</sup>,

小攻角 SPE 抗力也高<sup>[7]</sup>。离子辅助沉积技术将离子注入与物理气相沉积技术有机结合, 所制备涂层结合强度高、致密性好<sup>[8,9]</sup>。真空电弧离子沉积涂层具有绕射性好、沉积速率快、可制备金属-陶瓷复合涂层的优点<sup>[10]</sup>。作者前期工作表明<sup>[7]</sup>, 离子辅助真空电弧沉积 ZrN 梯度涂层与离子氮化复合, 其 SPE 抗力在小攻角下不仅高于 ZrN 单层、多层、梯度层, 而且能够显著提高不锈钢基材 90°大攻角下的 SPE 抗力, 然而关于 ZrN 梯度涂层结构细节对其 SPE 抗力影响的规律目前尚不清楚。为此, 本研究选择叶片常用马氏体不锈钢 2Cr13 为基材, 用离子氮化预处理 2Cr13 钢表面, 以达到提高表面承载能力和疲劳抗力的目的, 利用离子辅助电弧沉积技术在离子氮化预处理的 2Cr13 钢表面制备不同梯度结构和不同厚度的 ZrN 梯度涂层, 研究 ZrN 梯度涂层的结构细节因素对涂层结合强度、显微硬度、韧性、承载能力以及抗 90°大攻角固体粒子冲蚀行为的影响, 拟为提高金属材料表面固体粒子冲蚀抗力提供思路。

收稿日期: 2009-06-05; 修订日期: 2009-09-07

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (50671085), 国家高技术研究发展计划 (863 计划) 资助项目 (2007AA03Z521)

作者简介: 刘道新 (1962-), 男, 教授, 博士, 博士生导师, 从事材料环境损伤与表面工程技术研究, (E-mail) liudaox@nwpu.edu.cn

## 1 实验材料及方法

### 1.1 实验材料与试样

表面改性用基材为 2Cr13 马氏体不锈钢, 其化

学成分(质量分数%)为: C 0.19, Si 0.28, Mn 0.20, S 0.007, P 0.028, Cr 12.65, Cu 0.11, Ni 0.12, 余量 Fe。热处理制度: 820°C /4h退火, 900°C /3h油淬, 600°C /6h炉冷回火。试样为  $\phi 30\text{mm} \times 10\text{mm}$  的圆片, 试样经粗磨、细磨和机械抛光处理后, 进行丙酮超声波清洗, 而后进行离子氮化预处理。离子氮化在 LD-60型渗氮炉中进行<sup>[11]</sup>, 氮化温度为 550°C, 氮化改性层深度控制为 150 $\mu\text{m}$ , 表面硬度约为 96(HK<sub>0.025</sub>)。

## 1.2 梯度涂层的制备

Zn 涂层制备利用多功能离子辅助镀设备, 电弧靶材为纯度 99.9% 的锆。涂层沉积之前通入氩气, 采用轰击能量 800V、束流 200mA 的 Ar<sup>+</sup> 平面离子源轰击清洗试样表面 20min。在涂层/基体界面制备和涂层沉积过程中均采用 Ar<sup>+</sup> 离子源辅助轰击。制备涂层时先沉积 1 $\mu\text{m}$  的 Zr 底层, 然后通入氮气, 氮气分压从 0.1Pa 分台阶(以下称为成分台阶)逐步增加到 4Pa。涂层总厚度控制约为 8 $\mu\text{m}$ 。涂层沉积工艺参数: 电弧电流 95A, 起弧电压 40V, 偏压 -200V。

(1) 研究涂层梯度结构影响按如下方式制备涂层:

① M1处理: 单层 Zn 均质涂层, 厚度 7 $\mu\text{m}$ (计为 1个 Zn 成分台阶); ② M3处理: 3台阶 Zn 梯度涂层结构, 每个固定成分区间厚约 2.3 $\mu\text{m}$ (共 3个 Zn 成分台阶); ③ M8处理: 8台阶 Zn 梯度涂层结构, 每个固定成分区间厚约 0.9 $\mu\text{m}$ (共 8个 Zn 成分台阶); ④ M15处理: 15台阶 Zn 梯度涂层结构, 每个固定成分区间厚约 0.5 $\mu\text{m}$ (共 15个 Zn 成分台阶)。

(2) 研究梯度涂层厚度影响按如下方式制备涂层:

根据(1)的结果, 确定以 3台阶 Zn 梯度涂层结构进行涂层厚度影响的研究。在氮化处理的 2Cr13 钢表面上分别制备四种不同厚度(2 $\mu\text{m}$ , 4 $\mu\text{m}$ , 10 $\mu\text{m}$  和 15 $\mu\text{m}$ )的 Zn 梯度涂层, 并分别用 H2, H4, H10 和 H15 标记。

## 1.3 涂层分析与性能测试

### 1.3.1 涂层分析

用 HITACHI S-570 型扫描电子显微镜(SEM)分析涂层表面形貌。利用 GDA750 型辉光放电光谱仪分析 Zn 梯度涂层中的元素分布情况。用 X'pert-PRO 型 X 射线分析仪(XRD)分析试样表面的组织结构。利用 MSE-3M 型 X 射线应力分析仪测定 Zn 梯度涂层表面残余应力, Cr 靶辐射, 管压 30kV, 管

流 8mA。

### 1.3.2 力学性能测试

用 WS-05 型划痕仪评价涂层的结合强度。用 HV-1000 型显微硬度计测定硬度, 评价静态载荷下涂层的承载能力, 使用 Knoop 压头, 加载时间 20s。用自行建立的小能量多冲试验机评价涂层在动态载荷下的承载能力和失效行为<sup>[12]</sup>, 采用标准维氏金刚石冲头, 载荷 20N。冲头与试样表面间距离固定为 0.5mm, 冲击频率 20Hz 冲击周次根据需要确定。

### 1.3.3 固体粒子冲蚀性能评价

固体粒子冲蚀试验在自制喷射式冲蚀试验机上进行, 该装置依据美国材料试验学会 ASTM-G76 标准制备。试验中试样按一定角度固定在夹具上, 固体粒子被压缩空气加速后由喷嘴喷出, 入射到试样表面, 造成试样冲蚀磨损。通过控制空气压力来调整固体粒子的速率。选用多棱形刚玉(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)磨粒(粒径范围 120~160 $\mu\text{m}$ , 硬度为 2000~2300HV)作为冲蚀介质, 粒子平均冲击速率选择为 70m/s, 粒子流量为 80g/min, 喷嘴内径 4mm, 喷嘴到试样的距离为 20mm, 冲击攻角为 90°, 冲蚀时间为 10min。

采用电子分析天平(精度 0.01mg)称量冲蚀前后试样的质量变化, 并换算为体积损失来表征冲蚀速率。用扫描电镜观察和分析冲蚀形态特征。

## 2 试验结果与讨论

### 2.1 梯度涂层的成分沿层深的分布

Zn 梯度涂层表面为单相 Zn, XRD 分析表明 Zn 涂层呈现(200)择优取向。

图 1 所示为 3 台阶(M3)和 15 台阶(M15)成分变化的 Zn 梯度涂层主要元素沿层深的分布情况。可以看到, 3 台阶 Zn 梯度涂层除了 Zr 底层外, 存在 3 个 Zr 与 N 元素成分变化明显的区域。而 15 台阶成分变化的 Zn 梯度涂层中的 Zr 原子和 N 原子沿层深分布的变化较为平滑, 成分接近连续变化, 无明显台阶。

### 2.2 涂层硬度与静态承载能力

图 2 所示为氮化预处理的 2Cr13 不锈钢表面沉积四种不同成分台阶结构的 Zn 涂层后显微硬度随静态压入载荷变化的情况。可看到, 2Cr13 不锈钢基材的表面硬度(278HK<sub>0.1</sub>)较低, 而四种 Zn 涂层与氮化复合表面处理均显著提高了 2Cr13 基材的表面硬度, 其中 Zn 涂层(M1)试样的硬度(3826HK<sub>0.1</sub>)最高, 但随载荷的增加, 硬度值降低较快, 说明其承载能力较低。M15 试样的表面硬度

(3274HK<sub>0.1</sub>)最低,其硬度值随载荷的增加减小得更快,说明该表面改性层的承载能力更低。M3试样和M8试样表面的显微硬度分别为3643HK<sub>0.1</sub>和3531HK<sub>0.1</sub>,两者随载荷的增加下降趋势基本一致,且均较缓慢,即表现出良好的静态承载能力。这主要是由于单层ZrN涂层的ZrN相较其他改性层中的ZrN相厚,底层又有氮化层支撑。因此,在静态小载荷作用时,有较高的承载能力,表面表观硬度最高;当载荷增大至一临界值时,ZrN涂层发生开裂失效,导致所测硬度值迅速减小。M15试样由于成分梯度小,不存在明显的成分界面,涂层抵抗外界变形和裂

纹扩展的能力低,在压入载荷作用下容易发生开裂或脱层。M3和M8试样的成分变化间隔较大,存在明显的成分界面,相邻区间存在一定的约束,承载能力和裂纹扩展阻力高,加之底层氮化层的支撑,使得硬度值随着载荷的增加下降缓慢。M3试样剖面的显微硬度分布测试结果见表1,可以看到复合改性层从试样基体到表面ZrN层,硬度呈现较理想的梯度分布,这对于提高表面的承载能力是十分有利的。上述结果表明,氮化2Cr13马氏体不锈钢表面离子辅助沉积数个成分台阶的ZrN梯度涂层可以显著提高钢材的静态承载能力。

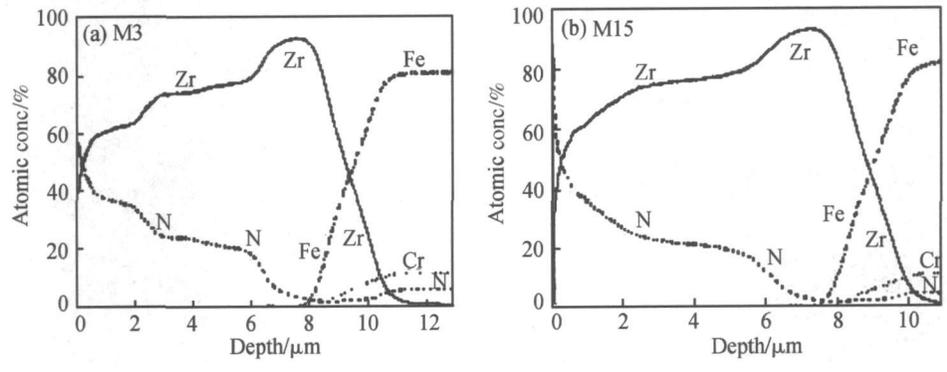


图 1 ZrN 梯度涂层元素沿层深分布 (a) M3 (b) M15  
Fig 1 Element distribution along the layer depth of ZrN (a) M3 (b) M15

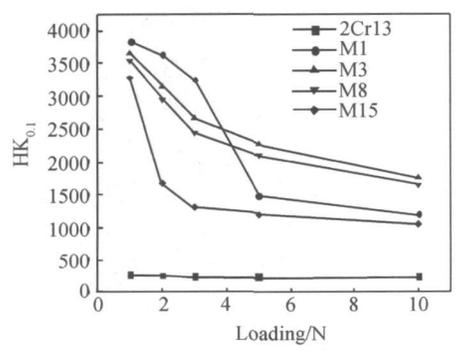


图 2 不同结构 ZrN 梯度涂层的显微硬度随载荷的变化  
Fig 2 Microhardness of ZrN gradient coatings with different structure vs loading curves

表 1 复合处理试样剖面硬度测试结果

Table 1 Hardness distribution of duplex treatment sample					
Cross section location	Substrate	Nitrided layer		Coating	
	2Cr13	Nitrogen diffusion layer	Compound layer	Gradient layer	ZrN layer
Hardness HK <sub>0.1</sub>	278	687	956	2192	3643

15μm, 分别用 H2 H4 H10 和 H15 标记) ZrN 梯度涂层的显微硬度测试值随压入载荷变化的情况。可以看到,四种 ZrN 梯度涂层与氮化复合表面改性均显著提高了 2Cr13 钢材的表面硬度和承载能力,其中 H2 和 H4 的表面硬度较低,分别为 2467HK<sub>0.1</sub>和 2935HK<sub>0.1</sub>,且均随载荷的增加而显著减小,承载能力相对较低。而 H10 和 H15 试样的表面硬度较高,分别为 3765HK<sub>0.1</sub>和 3806HK<sub>0.1</sub>,且随载荷的增加下降较平缓,由此说明两种试样有更高的承载能力,即梯度涂层厚度愈大,其表面承载能力愈高。

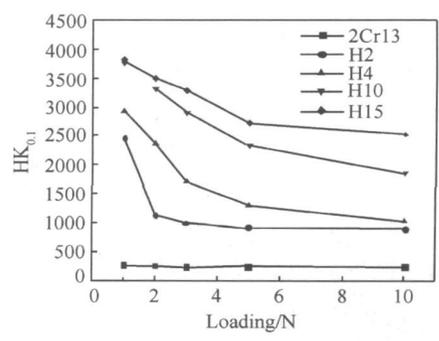


图 3 不同厚度 ZrN 梯度涂层的显微硬度随载荷的变化  
Fig 3 Microhardness of ZrN gradient coatings with different thickness vs loading curves

图 3 为四种不同厚度 (2μm, 4μm, 10μm 和

### 2.3 动态冲击载荷下的承载能力与失效行为

固体粒子大攻角冲蚀过程与多冲疲劳过程类似,故采用小能量多冲试验法研究了 Zn 梯度涂层在动态冲击载荷下的承载能力与失效行为。四种不同成分台阶的 Zn 梯度涂层试样在动态冲击载荷下的多冲试验结果表明, M1(单层 Zn)和 M15(15个成分台阶)试样在 3000 次冲击时就出现了较多的裂纹和脱层现象; M3(3个成分台阶)和 M8(8个成分台阶)试样在 10000 次冲击时才出现较明显的脱层现象,能谱面扫描分析表明脱层区主要为涂层内聚破坏,而涂层/基体结合力较高。图 4 为相同的冲击次数(5000 次)下, M1 和 M3 试样多冲表面 SEM 形貌。可以看到, M1 试样在多冲试验后冲坑周围出现了大面积的脱层现象。这是由于 M1 试样表层 Zr

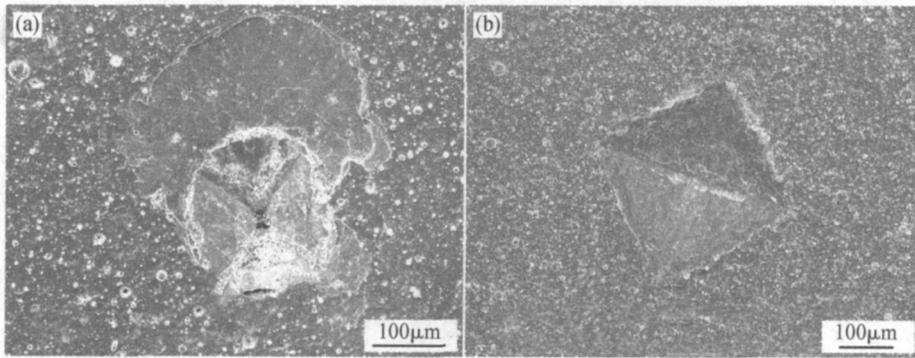


图 4 带涂层试样多冲微观形貌 (a) M1; (b) M3

Fig 4 Multi-impact morphology of coated samples (a) M1; (b) M3

小能量多冲法对四种不同厚度的 Zn 梯度涂层在动态冲击载荷下的承载能力评价结果表明, H2(2 $\mu$ m 厚 Zn 梯度涂层)和 H15(15 $\mu$ m 厚 Zn 梯度涂层)均在 1000 次冲击时就出现了涂层开裂及脱层现象,其中 H2 试样的脱层相对较轻,但冲坑较深,而 H15 的冲坑较浅,但出现大面积脱层。H4 试样在 3000 次冲击时表面出现了开裂和脱层现象,冲坑较深。H10 试样在 10000 次冲击时才出现明显的脱层现象。由此说明当涂层厚度较薄时,动态承载能力较差,而当涂层厚度较大时,由于涂层脆性增大,疲劳抗力较低,界面结合强度低,易于出现脱层现象,只有当涂层厚度适当时,涂层与基体之间的结合强度高,涂层内聚强度也高,涂层强韧综合性能好,从而能够保证高的动态冲击损伤抗力。

### 2.4 固体粒子冲蚀行为

#### 2.4.1 成分梯度的影响

图 5 所示为 90°冲蚀攻角下 2Cr13 不锈钢基材和四种不同梯度结构的 Zn 涂层试样的固体粒子冲蚀体积损失试验结果。可以看到,在 90°大攻角下,

过渡层与 Zn 单层均质涂层之间存在较大的硬度差和弹性模量差,外载荷作用下界面处存在较大的应力梯度,因而易于在界面处产生开裂脱层现象。另外, Zn 单层涂层韧性较低,疲劳抗力较低,在冲头的反复作用下裂纹比较容易萌生和扩展。M3 和 M8 试样在 5000 次多冲试验后均未出现明显的裂纹和脱层现象,但是 M8 的冲坑周围有磨屑堆积。这说明 M3 和 M8 试样表面涂层有更好的动态承载能力,涂层强韧综合性能较好,并且成分台阶数少的 M3 比成分台阶数多的 M8 有更高的抗动态冲击性能,这与图 2 的静态承载能力试验结果是一致的。M15 试样的冲坑周围出现了较严重的脱层现象,表明试样涂层内变形约束能力弱,疲劳裂纹容易向内部发展。此外,划痕试验表明该试样涂层结合强度也较低。

M1 和 M15 试样的冲蚀体积损失均高于不锈钢基材,而 M3 和 M8 试样的冲蚀体积损失分别仅为 2Cr13 不锈钢基材的 18.1% 和 22.5%。图 6 为 M3 试样在固体粒子 90°攻角下冲蚀的宏观和微观形貌,同样可以看到试样表面冲蚀损伤较轻。由此表明,2Cr13 不锈钢基材离子氮化后再沉积成分变化台阶较少的 Zn 梯度涂层可以明显改善其表面抗大攻角 SPE 性能,而沉积 Zn 单层涂层或成分接近连续变化的 Zn 梯度涂层则均不能有效地控制大攻角 SPE 损伤。这与 Zn 单层涂层结合强度、韧性及动态承载能力较低,多冲疲劳破坏抗力低有直接关系。合理结构的 Zn 梯度涂层试样表面承载能力高,涂层与基体之间的结合强度高,尤其是从基材到表面硬度呈现梯度分布,外载荷作用下的界面应力梯度小,应力分布的连续性好,因而表面抗多冲疲劳性能和抗塑性流变性能优,由此导致 M3 和 M8 复合处理试样表现出优异的抗 90°大攻角固体粒子冲蚀性能。然而,由于 M15 梯度涂层内聚强度、韧性及动静态承载能力均较低,因此在固体粒子大攻角动态冲击作用

下, 涂层容易开裂和脱落, 故其冲蚀抗力较低。

上述研究结果表明, 通过“氮化预处理 + 结构合理的 Zn 梯度涂层”复合改性, 能够实现有效改善不锈钢大攻角下抗 SPE 性能的目标。

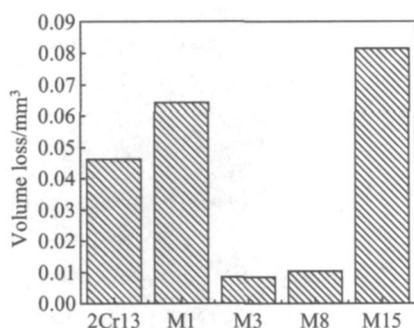


图 5 不同表面处理试样在 90° 攻角下的 SPE 体积损失

Fig. 5 Volume loss of samples with different Zn coatings after SPE testing at 90° impingement angle

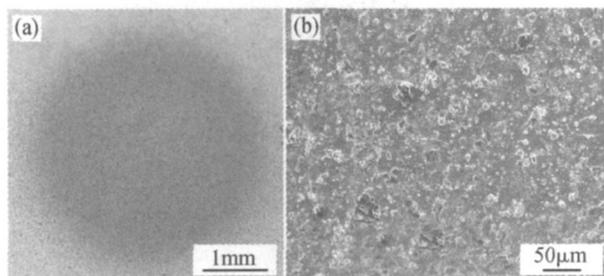


图 6 M3 试样在固体粒子 90° 攻角下冲蚀的形貌特征 (a) 宏观形貌; (b) 微观形貌

Fig. 6 Erosion morphologies of M3 sample at 90° impingement angle (a) macro-morphology; (b) micro-morphology

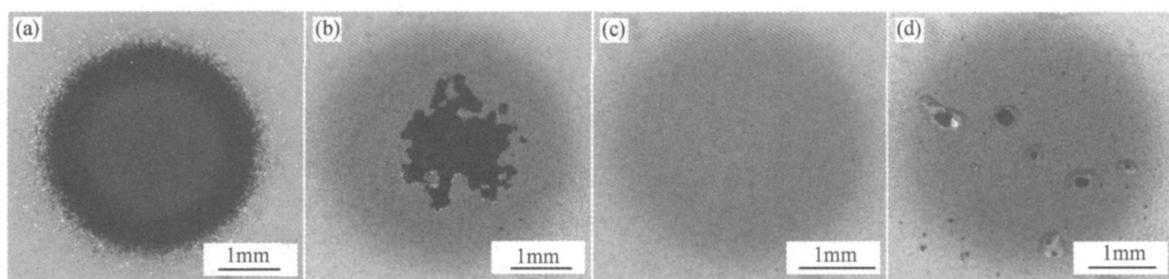


图 8 不同厚度的 Zn 梯度涂层试样在固体粒子 90° 攻角下冲蚀表面形貌 (a) H2 (b) H4 (c) H10 (d) H15

Fig. 8 Erosion morphology of sample with different thickness Zn gradient coating at 90° impingement angle (a) H2 (b) H4 (c) H10 (d) H15

由于 90° 大攻角下 SPE 的失效机制主要表现为多冲型疲劳破坏, 为此要求材料表面应具有较高的冲击疲劳抗力和动态承载能力。H2 和 H4 试样的涂层较薄, 使得承载能力较低, 硬度梯度较大, 在固体粒子大攻角冲击载荷作用下, 容易产生脱层失效。H10 与 M3 试样的涂层厚度相近且适中, 并具有较

## 2.4.2 梯度涂层厚度的影响

图 7 所示为 90° 攻角下, 2Cr13 钢和四种不同厚度 Zn 梯度涂层 (均为 3 台阶梯度结构) 复合处理试样 (H2, H4, H10, H15) 的固体粒子冲蚀体积损失测试结果, 可以看到, H2 试样的 SPE 体积损失最大, 其次为 H4 试样, 两者的体积损失均高于 2Cr13 钢基材。而 H10 和 H15 试样 SPE 抗力均明显高于 2Cr13 钢基材, 并以 H10 条件的 SPE 抗力最高。

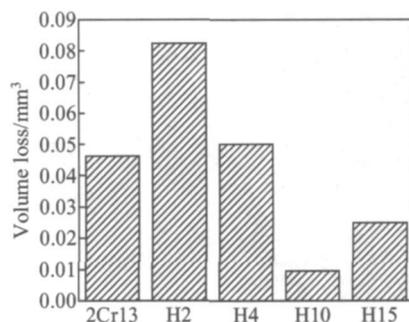


图 7 不同表面处理试样在 90° 攻角下的 SPE 体积损失

Fig. 7 Volume loss of different surface treated samples induced by solid particle erosion at 90° impingement angle

图 8 给出 90° 攻角下四种复合表面改性层试样的 SPE 宏观形貌。可以看到, 固体粒子垂直冲击后, H2 试样冲蚀痕处的涂层已经完全脱落; H4 试样冲蚀区中心的涂层严重脱落, 但边缘处涂层冲蚀损伤较轻; H10 试样表面涂层损伤最轻; H15 试样表面整体损伤虽然较轻, 但是表面存在局部脱层和破坏现象。

好的强韧性, 从而表现出较高的抗大攻角固体粒子冲蚀抗力。H15 试样虽然静态承载能力高, 且具有一定的协调变形能力, 但是由于其韧性和疲劳抗力稍低, 动态冲击承载能力稍差, 在较高冲击载荷下表面裂纹容易萌生和扩展, 因而会出现局部脱层破坏现象。另外, 虽然涂层中存在一定的残余压应力有

利于阻止裂纹的萌生和早期扩展<sup>[2]</sup>, 有利于提高改性层的 SPE 抗力<sup>[13]</sup>。然而, 并不是涂层中残余压应力愈高, 其抗 SPE 性能愈好(表 2 所示)。当涂层较薄或韧性较低时, 涂层中过高的残余压应力存在可能反而促进涂层在冲击载荷作用下的雪崩式破坏, 并导致其 SPE 抗力下降。由此可见, 影响改性层 SPE 抗力的因素是多方面的, 有些因素(如涂层厚度、残余应力)的影响也不是单调变化的, 并且各因素之间还存在交互影响作用。

表 2 ZrN 梯度涂层表面残余应力测试结果

Table 2 Residual stress of ZrN gradient coatings

Sample	Thickness of ZrN gradient coating / $\mu\text{m}$	Surface residual stress /MPa
H2	2	-1753
M3	8	-1468
H10	10	-1899
H15	15	-2135

### 3 结 论

(1) 对于“离子预氮化 + ZrN 梯度涂层”复合表面改性处理, 当以适当的少数成分变化台阶调整由内层 Zr 向外层 ZrN 的过渡时, 能够获得承载能力高、界面应力应变协调性好、膜基结合强度高、强韧性配合合理, 抗多冲疲劳和抗塑性流变性能优的复合改性层, 实现了显著提高 2Cr13 钢基材 90°大攻角固体粒子冲蚀 (SPE) 抗力。

(2) “离子预氮化 + ZrN 梯度涂层”复合表面改性的 SPE 抗力与 ZrN 梯度涂层的厚度有密切关系, 当 ZrN 梯度涂层较薄时, 其协调变形能力及动态承载能力较低, 冲击载荷作用下容易出现脱层失效, 因而 SPE 抗力低; 当 ZrN 梯度涂层太厚时, 涂层韧性降低, 内部残余应力较高, 受外界冲击载荷作用时容易出现局部脱层, 因此 SPE 抗力同样不高。本试验条件下, ZrN 梯度涂层厚度控制在 8~10 $\mu\text{m}$  为宜。

### 参考文献:

[1] HENDERSON R E, HENNECKE D K. Erosion corrosion

- and foreign object damage effects in gas turbines [R]. ADA28982Q 1998
- [2] 刘道新, 陈华, 何家文. 等离子渗氮与喷丸强化复合改进钛合金抗微动损伤性能 [J]. 材料热处理学报, 2001, 22(3): 49-54
- [3] OKA Y I, YOSHIDA T, YAMADA Y. Evaluation of erosion and fatigue resistance of ion plated chromium nitride applied to turbine blades [J]. Wear, 2007, 263: 379-385
- [4] WEI R, EDWARD L. Deposition of thick nitriles and carbonitriles for sand erosion protection [J]. Surface and Coatings Technology, 2006, 201: 4453-4459
- [5] DOBRZANSKI L A, ZUKOWSKA L W. Structure and mechanical properties of gradient PVD coatings [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2008, 201: 310-314
- [6] JOHANSEN A, DONTJE J H, ZENNER L D. Reactive arc vapor ion deposition of TiN, ZrN and HfN [J]. Thin Solid Films, 1987, 153: 75-82
- [7] 奚运涛, 刘道新, 韩栋. ZrN 单层、多层、梯度层及复合处理层对不锈钢固体粒子冲蚀行为的影响 [J]. 摩擦学学报, 2008, 28(4): 293-298
- [8] 刘道新, 唐宾, 何家文. 钛合金表面离子束增强沉积涂层的环境适应性和接触相容性 [J]. 稀有金属材料与工程, 2005, 34(7): 1009-1012
- [9] LU D X, TANG B, HE Jia-wen *et al*. Improvement of the fretting fatigue and fretting wear of Ti6Al4V by duplex surface modification [J]. Surface and Coatings Technology, 1999, 116: 234-238
- [10] 奚运涛, 刘道新. 钛合金表面磁控溅射与多弧离子镀 TiN 膜的摩擦学性能比较 [J]. 中国表面工程, 2007, 20(6): 14-18
- [11] 奚运涛, 刘道新, 韩栋, 等. 离子渗氮 AISI 420 马氏体不锈钢耐蚀行为研究 [J]. 材料热处理学报, 2007, 28(5): 109-114
- [12] 王小锋, 刘道新, 唐长斌. 小能量多冲法对物理气相沉积涂层机械性能的评价 [J]. 机械科学与技术, 2008, 27(4): 451-455
- [13] GACHON Y, IENNY P, FORNER A, *et al*. Erosion by solid particles of W-N multilayer coatings obtained by PVD process [J]. Surface and Coatings Technology, 1999, 113: 140-148

## Study on Solid Particle Erosion Behaviors of Zn Gradient Coatings Prepared by Ion Assisting Arc Deposition

LIU Dao-xin<sup>1</sup>, XI Yun-tao<sup>2</sup>, HAN Dong<sup>1</sup>, ZHANG Xiao-hua<sup>1</sup>

(1. Corrosion and Protection Research Lab, Northwest Polytechnical University, Xi'an 710072, China; 2. Oil & Gas Technology Research Institute, PetroChina Changqing Oilfield Company, Xi'an 710021, China)

**Abstract** Zn gradient coatings with different structure and thickness were prepared on nitrified 2Cr13 stainless steel surface by ion assisting arc deposition method for improving solid particle erosion (SPE) resistance of the steel at high impingement angle. The influence of Zn gradient coating structure and thickness on bonding strength, micro-hardness, ductility, supporting capacity under static and dynamic load conditions and the SPE behaviors of the coatings was investigated. The results show that the duplex surface treatment layer with high supporting capacity, continuous interface stress and strain distribution, good bonding strength, reasonable strength and toughness, and excellent plastic deformation resistance and multi-impact fatigue resistance are obtained by combined suitable Zn gradient coating with plasma nitriding. The SPE resistance of the 2Cr13 martensite stainless steel substrate is significantly improved by the duplex surface treatment layer at 90° impingement angle. The SPE resistance of the Zn gradient coatings is also related to the coating thickness. The thin Zn gradient coatings have low SPE resistance because these coatings have poor coordinate deformation capacity and supporting capacity, meanwhile these coatings are easily detached from substrate under impact load. The thick Zn gradient coatings also have low SPE resistance because these coatings have low toughness and poor adhesion strength and high residual stress, which easily result in these coatings local breaking off from the substrate under impact load.

**Key words** Zn gradient coating; solid particle erosion; plasma nitriding; 2Cr13 stainless steel