

DOI: 10.11973/jxgccl202005011

# 激光熔覆碳纳米管增韧铁基非晶涂层的组织与 力学性能

#### 王天聪,朱彦彦,姚成武,李铸国

(上海交通大学材料科学与工程学院,上海市激光制造与材料表面改性重点实验室,上海 200240)

摘 要:采用球磨工艺将镀镍碳纳米管与铁基非晶粉体混合后,以同轴送粉激光熔覆方法在钢板上制备涂层,确定了最佳的球磨时间,并探讨镀镍碳纳米管质量分数(0~1.00%)对涂层组织与力学性能的影响。结果表明:铁基非晶粉体与镀镍碳纳米管的球磨混合时间控制在 30 min 较为适宜;涂层均包括非晶区、等轴树枝晶区和柱状树枝晶区,随着镀镍碳纳米管质量分数的增加,涂层中非晶相面积分数降低,析出的纳米晶尺寸增大;镀镍碳纳米管的含量几乎不影响涂层中 柱状树枝晶区和等轴树枝晶区的硬度;随着镀镍碳纳米管质量分数的增加,涂层中非晶区的平 均硬度由 1 615.0 HV 降低到 1 464.3 HV,断裂韧度由 5.75 MPa·m<sup>1/2</sup>提高至 7.67 MPa·m<sup>1/2</sup>。

关键词:激光熔覆;铁基非晶涂层;碳纳米管;组织;硬度;断裂韧性 中图分类号:TG17 文献标志码:A 文章编号:1000-3738(2020)05-0054-06

# Microstructure and Mechanical Properties of Laser Cladding Carbon Nanotubes Toughened Fe-based Amorphous Coating

## WANG Tiancong, ZHU Yanyan, YAO Chengwu, LI Zhuguo

(Shanghai Key Laboratory of Materials Laser Processing and Modification, School of Materials Science and Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China)

**Abstract:** After the nickel-plated carbon nanotubes and iron-based amorphous powder were mixed by ball milling process, the coating was prepared on the steel plate by coaxial powder laser cladding method. The optimal ball milling time was determined, and the effect of the mass fraction of nickel-plated carbon nanotubes (0-1.00%) on the micro structure and mechanical properties of the coating was discussed. The results show that the proper ball milling time for mixing iron-based amorphous powder and nickel-plated carbon nanotubes was not longer than 30 min. The coatings all consisted of amorphous region, equiaxed dendritic region and columnar dendritic region; with increasing mass fraction of nickel-plated carbon nanotubes, the area fraction of amorphous phase in the coating decreased, and the size of the precipitated nanocrystals increased. The content of nickel-plated carbon nanotubes hardly affected the hardness of the columnar dendrite and equiaxed dendrite regions in the coating. With increasing mass fraction of nickel-plated carbon nanotubes, the average hardness of the amorphous region in the coating decreased from 1 615.0 HV to 1 464.3 HV, and the fracture toughness increased from 5.75 MPa  $\cdot$  m<sup>1/2</sup> to 7.67 MPa  $\cdot$  m<sup>1/2</sup>.

Key words: laser cladding; iron-based amorphous coating; carbon nanotubes; microstructure; hardness; fracture toughness

收稿日期:2020-01-09;修订日期:2020-04-13

基金项目:国家自然科学基金青年科学基金资助项目(51805321);上 海市青年科技英才扬帆计划项目(17YF1408700) 作者简介:王天聪(1995-),男,黑龙江齐齐哈尔人,硕士研究生

#### 0 引 言

激光熔覆技术是一种新型的表面制造技术,该 技术利用激光束熔化材料,冷却后形成熔覆层,从而 达到材料表面改性、表面修复和直接生产零部件的 目的<sup>[1]</sup>。非晶合金(又称金属玻璃),由液态合金快 速冷却制成,其原子结构呈现短程有序而长程无序

54

导师:李铸国教授

020 机械工程材料 MATERIALS FOR MECHANICAL ENGINEERING

的特点<sup>[2]</sup>。非晶合金具有优异的力学性能和耐腐蚀 性能,在电力电子、半导体和建筑等领域得到广泛的 应用<sup>[3-4]</sup>。铁基非晶合金具有经济性好、强度高<sup>[5]</sup>、 耐磨性能<sup>[6]</sup>和耐腐蚀性能优良<sup>[7]</sup>等优点,是一种良 好的表面改性材料,但铁基非晶涂层的临界冷却速 率要求较高<sup>[8]</sup>,制备相对困难。采用激光熔覆技术 制备铁基非晶涂层可以满足该涂层快速冷却的制备 要求,同时可实现与基体的良好结合<sup>[9]</sup>。

铁基非晶合金的韧性较差,在制备和使用过程 中容易产生裂纹,断裂形式为显著的脆性断裂<sup>[10]</sup>。 研究表明:非晶合金的变形集中于纳米尺度的剪切 带内,剪切带的扩展导致材料失稳断裂[11];第二相 粒子和析出晶能阻碍剪切带的扩展,从而增强非晶 合金的韧性[12],其中较常见的方法是引入碳纳米 管。HSU 等[13-14] 和 LIN 等[15] 研究发现,碳纳米管 增强钛基大块非晶复合材料的耐腐蚀性能较好,当 碳纳米管体积分数为12%时,复合材料的硬度达到 9.34 GPa,断裂强度达到 1 937 MPa。齐云鹏<sup>[16]</sup>研 究发现,当碳纳米管的体积分数达到2%时,碳纳米 管增强镁基大块非晶复合材料的应力和压缩形变位 移均最大,但复合材料仍发生脆性断裂。目前,有关 碳纳米管增韧非晶合金的研究主要集中在锆基、镁 基等大块非晶材料上,关于碳纳米管增韧铁基非晶 涂层的研究较少。

基于此,作者采用球磨工艺将镀镍碳纳米管与 铁基非晶粉体混合,再以同轴送粉激光熔覆方法在 钢板上制备涂层,研究了球磨工艺,并探讨镀镍碳纳 米管质量分数对涂层组织与力学性能的影响,为铁 基非晶涂层的韧化提供试验依据。

# 1 试样制备与试验方法

基体材料为经机械打磨和丙酮清洗的 CCS-B 低碳合金钢板,尺寸为 100 mm×100 mm×30 mm,其 化学成分(质量分数/%)为 0.13C,0.68Mn,0.21Si, 0.03Ni,0.025P,余 Fe。熔敷用原料粉为高压氩气雾 化法制备的铁基非晶粉体,粒径为 100150 μm,化学 成分(原子分数/%)为 40Fe,40Co,4B,4Si,4C,8Nb。 镀镍碳纳米管(NiCNTs)的内径为 512 nm,外径为 3050 nm,长度为 1020 μm,由上海阿拉丁生化科技股 份有限公司提供。铁基非晶粉体和镀镍碳纳米管的 微观形貌如图 1 所示,可见非晶粉体呈球形,表面光 滑,镀镍碳纳米管管状结构较明显。镀镍层可防止 碳纳米管在激光照射下发生烧损,同时镍层与铁基 非晶熔覆层具有较好的材料相容性,可实现碳纳米



(a) 铁基非晶粉体颗粒



(b) 镀镍碳纳米管

图 1 铁基非晶粉体颗粒和镀镍碳纳米管的微观形貌 Fig.1 Microscopic morphology of (a) Fe-based amorphous powder particles and (b) nickel-plated carbon nanotubes

管与铁基非晶熔覆层的良好结合。

将镀镍碳纳米管和铁基非晶粉体混合,镀镍碳 纳米管的质量分数为1%,放入球磨罐中分别研磨 30,60,90 min,球磨速度为150 r•min<sup>-1</sup>。采用JSM 7600F型扫描电子显微镜(SEM)观察球磨后复合粉 体的微观形貌,使用 inVia Qontor 型共焦显微拉曼 光谱仪对复合粉体的拉曼光谱进行表征以确定最佳 的球磨时间,测试波长为532 nm,He-Ne 激光能量 为5 mW,并在测试前用硅片进行校准。

将质量分数分别为 0,0.25%,0.50%,1.00%的 镀镍碳纳米管加入到铁基非晶粉体中,采用确定的 最佳球磨工艺制备复合粉体。将复合粉体置于 DPSF-2H型送粉器内,在激光熔覆过程中进行同轴 送粉。采用 LDF 8000-60型半导体激光器进行激光 熔覆,波长为 980~1 060 nm,最大功率为 8 000 W, 圆形光斑直径为 7.4 nm。采用单层单道的熔覆方 式,工艺参数为激光功率 3 000 W,激光扫描速度  $25 \text{ nm} \cdot \text{s}^{-1}$ ,送粉速率 30 g · min<sup>-1</sup>,送粉气体流量 10 L · min<sup>-1</sup>,保护气体流量 15 L · min<sup>-1</sup>,尾吹气体 流量 15 L · min<sup>-1</sup>,气体均为纯度 99.9%的氩气。

将涂层试样横截面磨光,用王水腐蚀 10 s 后, 采用 Zeiss Axioimager A2m 型光学显微镜和 JSM 7600F 型扫描电子显微镜观察截面的微观形貌,采 用扫描电子显微镜附带的 X-MAX 20 型能谱仪



王天聪,等:激光熔覆碳纳米管增韧铁基非晶涂层的组织与力学性能

(EDS)进行微区化学成分分析。采用 ADVANCE Da Vinci型X射线衍射仪(XRD)对涂层进行物相 分析,扫描范围为20°~100°。采用 inVia Qontor型 共焦显微拉曼光谱仪测涂层的拉曼光谱,测试波长 为532 nm,He-Ne激光能量为5 mW。采用 Zwick Z100型维氏显微硬度计测涂层试样的截面硬度,载 荷为2.94 N,保载时间为10 s,测试间隔为20 μm。 采用 Zwick Z100型维氏显微硬度计,应用压痕法研 究涂层的断裂韧性,载荷为4.9 N,测压痕点处的 4条裂纹扩展长度,如图2所示,共测10个点取平均



图 2 压痕法测裂纹扩展长度示意 Fig.2 Diagram of crack growth length measurement by indentation method 值,断裂韧度的计算公式[17]为

$$K_{\rm IC} = 0.031 \ 9 \left(\frac{E}{H_{\rm V}}\right)^{1/2} \frac{P}{C^{3/2}}$$
 (1)

式中: $K_{1C}$ 为断裂韧度, $MPa \cdot m^{1/2}$ ;E为弹性模量,取 300 GPa; $H_v$ 为显微硬度,由硬度测试结果换算得 到,GPa;P为压痕载荷,取 4.9 N;C为裂纹扩展长 度, $\mu$ m。

# 2 试验结果与讨论

#### 2.1 球磨时间的确定

由图 3 可以看出,复合粉体颗粒表面粗糙,镀 镍碳纳米管被冷焊在非晶粉体颗粒表面,这有利 于质量较轻的碳纳米管随非晶粉体一同进入熔池 中。球磨 30 min后,碳纳米管的管状形态保存良 好,平均长度在 500 nm 以上,碳纳米管均匀分布 在非晶颗粒表面;球磨 60 min后,碳纳米管的管状 形态受到轻微破坏,平均长度在 200 nm 左右;球 磨 90 min后,碳纳米管的管状形态受到严重破坏, 平均长度小于 100 nm。



图 3 球磨不同时间后复合粉体的微观形貌

Fig.3 Microscopic morphology of composite powder after ball milling for different times: (a, c, e) particle morphology and

(b, d, f) amplification of particle surface

由图 4 可知,1 350 cm<sup>-1</sup> 处(D 峰)和1 580 cm<sup>-1</sup> 处(G 峰)均为碳的特征峰,其中 D 峰是碳纳米管中 sp<sup>2</sup> 型 C-C 键中缺陷产生的无序诱导峰,G 峰是由 sp<sup>2</sup> 型 C-C 键中碳原子振动形成的。D 峰与 G 峰 的相对强度比值( $I_{\rm D}/I_{\rm G}$ )可用于表征碳纳米管的结 构完整度, $I_{\rm D}/I_{\rm G}$  越小,碳纳米管结构的完整度越 56 高。计算得到:原始镀镍碳纳米管的  $I_D/I_G$  为 0.72, 说明原始镀镍碳纳米管中缺陷较少;球磨 30 min 后 复合粉体的  $I_D/I_G$  为 0.89,与原始镀镍碳纳米管的 较为接近,说明其破坏程度很小;60 min 球磨后,复 合粉体的  $I_D/I_G$  为 1.05,说明镀镍碳纳米管受到较 大破坏;90 min球磨后,复合粉体的 $I_D/I_G$  为 1.32,







图 4 原始镀镍碳纳米管和球磨不同时间后复合粉体的拉曼光谱 Fig.4 Raman spectrum of original nickel-plated carbon nanotubes and composite powder after ball milling for different times

说明镀镍碳纳米管受到严重破坏。由此可知,过长时间的球磨会破坏碳纳米管的管状结构,从而减弱碳纳米管的增韧效果,因此混合粉体的球磨时间应控制在 30 min 内较为合适。后续试验中将混合粉体的球磨时间设定为 30 min。

#### 2.2 涂层的宏观形貌与微观结构

由图 5 可以看出:激光熔覆复合粉体形成的涂 层表面均呈现金属光泽,涂层成形良好,无明显的裂 纹等缺陷。

由于不同质量分数镀镍碳纳米管复合粉体激光 熔覆涂层的截面形貌相似,因此以不含镀镍碳纳米 管(质量分数为0)的铁基非晶涂层截面形貌为例进 行分析。由图6可以看出,铁基非晶涂层组织呈现



图 5 含不同质量分数镀镍碳纳米管复合粉体激光熔覆后涂层 的表面宏观形貌

Fig.5 Surface macroscopic morphology of the coatings by laser cladding of composite powders containing nickel-plated carbon nanotubes of different mass fractions

梯度分布。表层为无明显纹路的非晶区域,该区域 中存在弥散分布的白色颗粒,颗粒直径约为1µm; 涂层与基体的结合界面处为晶粒外延生长的柱状晶 区,该区域宽度约为20µm,涂层与基体形成了良好 的冶金结合;非晶区与柱状树枝晶区之间为等轴树 枝晶区,该区域的宽度约为20µm。采用 EDS 对涂 层非晶区域中白色颗粒的化学成分进行分析,结果 如表1所示。由表1可知,白色颗粒的主要成分为 铌和碳,结合颗粒形貌和元素成分可知,该白色颗粒 为 NbC。

由图 7 可知,不同涂层均存在非晶材料特有的 漫散射峰,并且在2θ为45°处均可标定出bcc(体心立



图 6 激光熔覆铁基非晶涂层的截面形貌

Fig.6 Cross section morphology of the Fe-based amorphous coating by laser cladding: (a) overall morphology; (b) amorphous region; (c) equiaxed dendrite region and (d) columnar dendrite region



MATERIALS FOR MECHANICAL ENGINEERING

#### 表 1 涂层非晶区域中白色颗粒的 EDS 分析结果 (原子分数)

 Table 1
 EDS analysis results of white particles in the





Fig.7 XRD patterns of the coatings by laser cladding of composite powders containing nickel-plated carbon nanotubes of different mass fractions

方)-(Fe,Co)相,说明涂层中均有晶体相析出。根据 XRD 的标定结果,采用 Jade 软件对涂层中非晶相面积分数进行拟合计算,即非晶相含量为非晶衍射峰的积分强度与涂层整体积分强度之比。采用 Scherrer 公式计算析出晶体相的平均晶粒尺寸,计算公式<sup>[18]</sup>为

$$D = \frac{k\lambda}{\beta\cos\theta} \tag{2}$$

式中:D为晶体相的平均晶粒尺寸;k为 Scherrer 常数, 取 0.89; $\lambda$ 为 X 射线入射光波长,取 0.154 06 nm; $\beta$ 为衍射峰半高宽; $\theta$ 为布拉格衍射角。

计算得到,含质量分数 0,0.25%,0.50%,1.00% 镀镍碳纳米管复合粉体激光熔覆后,涂层中非晶相 面积分数分别为 81%,76%,73%,65%,晶体相的平 均晶粒尺寸分别为 13.0,13.8,14.4,16.0 nm。可知, 随着镀镍碳纳米管质量分数的增加,涂层中非晶相 含量降低,晶体相尺寸增大。碳纳米管的加入改变 了铁基非晶粉体中的元素比例,复合粉体的非晶形 成能力下降,从而导致涂层中的非晶相含量降低。

碳纳米管是三维的管状结构,其结构更容易在 裂纹内或裂纹边缘处进行观察。由图 8 可知,在涂 层中的微裂纹内和微裂纹边缘均存在碳纳米管。由 图 9 可知,微裂纹内的外露式碳纳米管和微裂纹边缘 内嵌式碳纳米管的结构完整,碳纳米管与基体组织结 合良好。由此可知,尽管激光照射下的高温作用使部 分碳纳米管结构遭到破坏,但大部分碳纳米管结构被 完整地保存下来,这有助于提高涂层的断裂韧性。



图 8 含质量分数 1.00%镀镍碳纳米管复合粉体激光熔覆后涂 层中微裂纹内和微裂纹边缘处的拉曼光谱

Fig.8 Raman spectra of the positions in microcracks and at the edge of microcracks in the coatings by laser cladding of composite powders containing 1.00wt% nickel-plated carbon nanotubes

#### 2.3 涂层的硬度与断裂韧性

由图 10 可以看出:涂层试样的硬度呈现梯度分 布,镀镍碳纳米管的含量几乎不影响柱状树枝晶区和 等轴树枝晶区的硬度;基体的平均硬度为 279.9 HV, 柱状树枝晶区的平均硬度为 592.8 HV,等轴树枝晶 区的平均硬度为 895.7 HV,非晶区的硬度随着镀镍 碳纳米管含量的增加而降低,当镀镍碳纳米管的质



(a) 整体形貌
 (b) 微裂纹内的碳纳米管
 (c) 微裂纹边缘的碳纳米管
 图 9 含质量分数 1.00% 镀镍碳纳米管复合粉体激光熔覆后涂层中镀镍碳纳米管的微观形貌



58



MATERIALS FOR MECHANICAL ENGINEERING

图 10 含不同质量分数镀镍碳纳米管复合粉体激光熔覆后涂层 试样的截面硬度分布曲线

Fig.10 Cross section hardness distribution curve of coating samples by laser cladding of composite powder containing nickel-plated carbon nanotubes of different mass fractions

量分数为 0,0.25%,0.50%,1.00%时,非晶区的平均 硬度分别为 1 615.0,1 569.3,1 543.5,1 464.3 HV。

复合材料的显微硬度由各相的硬度和各相的体 积分数决定,其计算公式<sup>[19]</sup>为

$$H_{\rm C} = H_{\rm a}\varphi_{\rm a} + H_{\rm b}\varphi_{\rm b} \tag{3}$$

式中: $H_c$ 为涂层的显微硬度; $H_a$ 为涂层中A相的 显微硬度; $\varphi_a$ 为A相的体积分数; $H_b$ 为涂层中B 相的显微硬度; $\varphi_b$ 为B相的体积分数。

碳纳米管/铁基非晶复合粉体激光熔覆后的涂 层非晶区中主要包括非晶相、非晶相中析出的纳米 晶相、碳纳米管和碳化物。由图 10 粗略估计,非晶相 的硬度约为 1 800 HV,晶体相的硬度约为 900 HV。 由 XRD 分析结果可知,与不含镀镍碳纳米管的相 比,含质量分数 1.00%镀镍碳纳米管复合粉体激光 熔覆后涂层中非晶相的面积分数降低了 16%,即体 积分数近似下降了 16%,说明晶体相的体积分数提 高了 16%。由式(2)计算得到该变化会使涂层硬度 下降约 144 HV,与实际的硬度下降值(150 HV)相 近。因此,涂层非晶区硬度的变化主要与非晶相含 量的变化有关。

由表2可知,涂层非晶区的断裂韧性随着镀镍 表2 含不同质量分数镀镍碳纳米管复合粉体激光熔覆后 涂层非晶区的断裂韧性

 Table 2
 Fracture toughness of the amorphous region of the coating by laser cladding of composite powders containing nickel-plated carbon nanotubes of different mass fractions

| 碳纳米管   | 显微硬度/ | 单侧裂纹长度/         | 断裂韧度/                 |
|--------|-------|-----------------|-----------------------|
| 质量分数/% | GPa   | $\mu\mathrm{m}$ | $(MPa \cdot m^{1/2})$ |
| 0      | 17.43 | 23.1            | 5.75                  |
| 0.25   | 16.94 | 22.0            | 6.28                  |
| 0.50   | 16.66 | 21.2            | 6.69                  |
| 1.00   | 15.81 | 19.7            | 7.67                  |

碳纳米管质量分数的增加而增大,含质量分数 1.00%镀镍碳纳米管复合粉体激光熔覆涂层非晶区 的断裂韧度比不含镀镍碳纳米管的提高了 33.4%。 添加镀镍碳纳米管后的涂层中形成了韧性较好的非 晶-纳米晶复合组织,同时镀镍、球磨工艺可有效避 免激光熔覆过程中大量脆性碳化物的生成,从而保 证涂层具有较好的断裂韧性。

# 3 结 论

(1) 铁基非晶粉体与镀镍碳纳米管的球磨混合 时间控制在 30 min 较为适宜,球磨时间过长会破坏 碳纳米管的管状结构,减弱碳纳米管的增韧效果。

(2)镀镍碳纳米管/铁基非晶复合粉体激光熔 覆后涂层的截面形貌与不含镀镍碳纳米管的铁基非 晶涂层的相似,均包括非晶区、等轴树枝晶区和柱状 树枝晶区,随着镀镍碳纳米管质量分数的增加,涂层 中非晶相含量降低,而析出的纳米晶尺寸增大。

(3) 镀镍碳纳米管的含量几乎不影响涂层中柱 状树枝晶区和等轴树枝晶区的硬度;当镀镍碳纳米 管质量分数由0增加1.00%,涂层中非晶区的平均 硬度由1615.0 HV降低到1464.3 HV,断裂韧度 由5.75 MPa•m<sup>1/2</sup>提高至7.67 MPa•m<sup>1/2</sup>,提高约 33.4%。

#### 参考文献:

- [1] CAI Y C, CHEN Y, LUO Z, et al. Manufacturing of FeCoCrNiCu<sub>x</sub> medium-entropy alloy coating using laser cladding technology[J]. Materials & Design, 2017, 133; 91-108.
- [2] KING D J M, MIDDLEBURGH S C, LIU A C Y, et al. Formation and structure of V-Zr amorphous alloy thin films
   [J].Acta Materialia, 2015.83:269-275.
- [3] 王晓军,陈学定,夏天东,等.非晶合金应用现状[J].材料导报, 2006,20(10):75-79.
- [4] NIERODA J.RYBAK A.KMITA G.et al. Investigation of the influence of pretreatment parameters on the surface characteristics of amorphous metal for use in power industry [J].Journal of Molecular Structure, 2018,1160;360-367.
- [5] INOUE A, SHEN B L, CHANG C T. Super-high strength of over 4 000 MPa for Fe-based bulk glassy alloys in [(Fe<sub>x</sub> Co<sub>x</sub>)<sub>0.75</sub> B<sub>0.2</sub> Si<sub>0.05</sub>]<sub>96</sub> Nb<sub>4</sub> system [J]. Acta Materialia, 2004,52(14):4093-4099.
- [6] CHENG J B, LIANG X B, XU B S, et al. Microstructure and wear behavior of FeBSiNbCr metallic glass coatings [J]. Journal of Materials Science and Engineering, 2009, 25(5): 687-690.

(下转第 65 页)

#### 李成龙,等:降低等离子喷涂涂层孔隙率的研究进展

MATERIALS FOR MECHANICAL ENGINEERING

显微结构和性能的影响[J].材料保护,2011,44(3):71-73.

- [45] 宫文彪.等离子喷涂三元纳米 ZrO<sub>2</sub>-Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/CeO<sub>2</sub> 热障涂层的 组织与性能研究[D].长春:吉林大学,2007:45-46.
- [46] 何臣,侯书恩.纳米材料在纳米热喷涂中的应用[J].湖北汽车 工业学院学报,2005,19(1):27-29.
- [47] 栗卓新,汤春天,蒋建敏,等.纳米陶瓷材料在热喷涂中应用的 研究进展[J].新技术新工艺,2005(10):56-59.
- [48] 张燕,张行,刘朝辉,等.热喷涂技术与热喷涂材料的发展现状 [J].装备环境工程,2013,10(3):59-62.
- [49] 魏璐,李京龙,李贺军.热喷涂纳米结构涂层的研究[J].焊接, 2007(3):18-23.
- [50] 何庆兵,李忠盛,吴护林,等.等离子喷涂 ZrO<sub>2</sub> 基纳米涂层研 究进展[J].兵器装备工程学报,2016,37(11):128-132.
- [51] 王红英,李志军,汤伟杰,等.等离子喷涂氧化锆涂层及激光重 熔涂层的摩擦磨损性能[J].焊接学报,2014,35(4):41-44.
- [52] 成志芳,马壮,卢林.等离子喷涂 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-13% TiO<sub>2</sub> 涂层微观 组织形貌分析[J].表面技术,2012,41(3):9-11.
- [53] LI B, JIA J H, HAN M M, et al. Microstructure, mechanical and tribological properties of plasma-sprayed NiCrAlY-Mo-Ag coatings from conventional and nanostructured powders [J].Surface and Coatings Technology, 2017,324:552-559.
- [54] 李万青,林铁松,宋超群,等.超音速等离子喷涂 WC-17Co 纳 米涂层的性能[J].稀有金属材料与工程,2017,46(3):807-811.
- [55] 于惠博,孙宏飞,武彬,等.降低涂层孔隙率的研究进展[J].材 料导报,2007,21(1):68-71.
- [56] 周红霞,王亮,彭飞,等.纳米稀土对热喷涂 WC-12Co 涂层的

改性作用[J].材料热处理学报,2009,30(2):162-166.

- [57] 贾近,刘赛月,孟君晟,等.面向高端装备零部件的稀土改性 MCrAlY涂层[J].中国表面工程,2018,31(5):54-62.
- [58] 贺定勇,阎玉芹,蒋建敏,等.含稀土元素的奥氏体不锈钢型耐腐蚀热喷涂粉芯线材的研究[J].北京工业大学学报,1998,24 (3):71-75.
- [59] 陈琳,张三平,周学杰.降低热喷涂涂层孔隙率的工艺技术 [J].上海金属,2004,26(4):41-43.
- [60] HE L,TAN Y F,WANG X L,et al.Microstructure and wear properties of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-CeO<sub>2</sub>/Ni-base alloy composite coatings on aluminum alloys by plasma spray[J]. Applied Surface Science,2014,314:760-767.
- [61] 孙永兴,王引真,何艳玲.稀土氧化物添加剂对 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 等离子 喷涂层的影响[J].材料保护,2001,34(6):8-9.
- [62] 施晓雨.Ce对高铝青铜超音速等离子喷涂层组织及性能的影 响[D].兰州:兰州理工大学,2013:20-21.
- [63] 张金星,肖舒,马得贵,等.等离子喷涂镍基 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 梯度涂层的 组织与结合性能[J].热加工工艺,2013,42(16):113-116.
- [64] 宋洪源,乌日开西•艾依提,尹瀛月.等离子喷涂 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 涂层质 量的研究现状[J].热加工工艺,2017,46(12):44-47.
- [65] 陈燕,芦笙,陈静,等. AZ91D 镁合金等离子喷涂 Ni-Al/陶瓷 涂层的组织和性能[J].中国有色金属学报,2012,22(4): 1094-1101.
- [66] KIRBIYIK F, GOK M G, GOLLER G. Microstructural, mechanical and thermal properties of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/CYSZ functionally graded thermal barrier coatings[J]. Surface and Coatings Technology, 2017, 329:193-201.

#### (上接第 59 页)

- [7] QIAO J H, JIN X, QIN J H, et al. A super-hard superhydrophobic Fe-based amorphous alloy coating [J]. Surface and Coatings Technology, 2018,334:286-291.
- [8] 朱彦彦.半导体激光熔覆铁钴基非晶层的研究[D].上海:上海 交通大学,2013.
- [9] 戴德平,蒋小华,蔡建鹏,等.激光熔覆 Inconel718 镍基合金温 度场与应力场模拟[J].中国激光,2015,42(9):0903005.
- [10] INOUE A, SHEN B L, YAVARI A R, et al. Mechanical properties of Fe-based bulk glassy alloys in Fe-B-Si-Nb and Fe-Ga-P-C-B-Si systems[J]. Journal of Materials Research, 2003,18(6):1487-1492.
- [11] SHEN L Q,LUO P,HU Y C, et al. Shear-band affected zone revealed by magnetic domains in a ferromagnetic metallic glass[J].Nature Communications, 2018,9:4414.
- [12] XU Y K, XU J. Ceramics particulate reinforced Mg<sub>65</sub> Cu<sub>20</sub> Zn<sub>5</sub> Y<sub>10</sub> bulk metallic glass composites[J]. Scripta Materialia, 2003, 49(9):843-848.
- [13] HSU C F, LIN H M, LEE P Y. Characterization of mechanically alloyed Ti-based bulk metallic glass composites

containing carbon nanotubes [J]. Advanced Engineering Materials, 2008,10(11):1053-1055.

\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*

- [14] HSU C F,KAI W,LIN H M,et al.Fabrication and corrosion behavior of Ti-based bulk metallic glass composites containing carbon nanotubes [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2010,504: 176-179.
- [15] LIN Y S, HSU C F, CHEN J Y, et al. Wear behavior of mechanically alloyed Ti-based bulk metallic glass composites containing carbon nanotubes[J].Metals, 2016,6(11):289.
- [16] 齐云鹏.镁基块体非晶的制备及其碳纳米管复合材料的增韧 研究[D].天津:河北工业大学,2011.
- [17] NOLAN D, LESKOVSEK V, JENKO M. Estimation of fracture toughness of nitride compound layers on tool steel by application of the Vickers indentation method[J].Surface and Coatings Technology, 2006,201(1/2):182-188.
- [18] CULLITY B D. Elements of X-ray diffraction[M]. London: Addison-Wesley Publishing Company, 1978.
- [19] GOYAL R K, SAHU J N. Fabrication of advanced poly (etheretherketone)/clay nanocomposites and their properties
   [J]. Advanced Materials Letters, 2010, 1(3):205-209.