

# 低温热循环处理 Fe 基非晶粉末对 爆炸喷涂涂层摩擦学性能的影响

李旭强, 李文生, 翟海民, 汤鹏君

(兰州理工大学 有色金属先进加工与再利用国家重点实验室, 兰州 730050)

**摘要:** **目的** 提高爆炸喷涂 Fe 基非晶涂层的摩擦学性能。**方法** 采用液氮-室温循环处理喷涂粉末, 通过爆炸喷涂制备原始粉末和处理粉末对应涂层。利用 X 射线衍射仪 (XRD) 检测涂层非晶相, 用维氏显微硬度和球-盘式摩擦试验机分别测试涂层的显微硬度和摩擦学性能, 用附带能谱仪的扫描电子显微镜 (SEM) 表征样品的组织形貌及特征区域的元素含量。**结果** 粉未经低温热循环处理后, 仍为非晶态组织, 且未发生开裂和破碎现象。与原始粉末制备的涂层相比, 低温热循环处理粉末制备的涂层孔隙率由 1.0% 降低至 0.4%; 未熔颗粒明显减少, 粉末铺展更加充分; 显微硬度略有降低 (由 845.4HV 降至 813.5HV), 但测试误差明显减小, 威布尔分布拟合直线斜率由 7.1196 升高至 9.6414; 摩擦系数由 0.76 降低至 0.73, 磨损更加稳定; 磨损率相近, 均在  $10^{-6}$  次方数量级。**结论** Fe 基非晶粉末经低温热循环处理后, 其对应涂层的组织更为均匀致密, 显微硬度分布更为均匀, 摩擦磨损性能更为稳定, 磨损机制由原始粉末制备涂层的疲劳剥层磨损, 转变为以氧化磨损和塑性变形主导。

**关键词:** 涂层; Fe 基非晶; 低温热循环; 爆炸喷涂; 摩擦

**中图分类号:** TG174.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2020)02-0151-07

**DOI:** 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2020.02.018

## Effect of Cryogenic Thermal Cycling Treatment of Fe-based Amorphous Powder on Tribological Properties of Detonation Gun Sprayed Coatings

LI Xu-qiang, LI Wen-sheng, ZHAI Hai-min, TANG Peng-jun

(State Key Laboratory of Advanced Processing and Recycling of Non-ferrous Metals,  
Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

**ABSTRACT:** The work aims to improve the tribological properties of Fe-based amorphous coatings sprayed by detonation gun. Powder-original and powder-treated (liquid nitrogen-room temperature cycling) Fe-based amorphous coatings were deposited by

收稿日期: 2019-08-16; 修订日期: 2019-12-28

Received: 2019-08-16; Revised: 2019-12-28

基金项目: 国家自然科学基金 (51674130); 国家重点研发计划国际科技合作项目 (2016YFE0111400); 甘肃省国际科技合作特派员计划 (17JR7WA017); 甘肃省重点研发计划项目 (17YF1WA159)

Fund: National Natural Science Foundation of China (51674130), The International Science and Technology Cooperation Program of China (2016YFE0111400), International Science and Technology Correspondent Program of Gansu Province (17JR7WA017) and Key Research and Development Project in Gansu (17YF1WA159)

作者简介: 李旭强 (1993—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为表面工程。

Biography: LI Xu-qiang (1993—), Male, Master, Research focus: surface engineering.

通讯作者: 李文生 (1973—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为表面工程。邮箱: liws@lut.edu.cn

Corresponding author: LI Wen-sheng (1973—), Male, Doctor, Professor, Research focus: surface engineering. E-mail: liws@lut.edu.cn

引文格式: 李旭强, 李文生, 翟海民, 等. 低温热循环处理 Fe 基非晶粉末对爆炸喷涂涂层摩擦学性能的影响[J]. 表面技术, 2020, 49(2): 151-157.

LI Xu-qiang, LI Wen-sheng, ZHAI Hai-min, et al. Effect of cryogenic thermal cycling treatment of Fe-based amorphous powder on tribological properties of detonation gun sprayed coatings[J]. Surface technology, 2020, 49(2): 151-157.

detonation spraying successfully. The amorphous phases of the two coatings were measured by X-ray diffractometer (XRD). The hardness and tribological properties of the two coatings were tested by Vickers hardness tester and ball-disk friction tester, respectively. The morphology and element content in the characteristic region of the samples were characterized by scanning electron microscopy with energy dispersive spectrometer (SEM). The result shows that the powder was still in amorphous structure after cryogenic thermal cycling treatment, and no cracking and breakage occurred. Compared with the powder-original coating, the porosity of the powder-treated coating decreased from 1.0% to 0.4%. The unmelted particles decreased obviously, and the powder spreading was more sufficient. The microhardness decreased slightly from 845.4HV to 813.5HV, but the test error significantly reduced. The slope of Weibull distribution fitting line increased obviously from 7.1196 to 9.6414. The friction coefficient decreased from 0.76 to 0.73 and became more stable. The wear rate was similar, on the order of  $10^{-6}$  power. Therefore, the microstructure of Fe-based powder-treated amorphous coating is more uniform and compact after cryogenic thermal cycling, the microhardness distribution is more uniform, the friction and wear properties are more stable, and the wear mechanism changes from fatigue delamination wear of the powder-original coating to dominant oxidative wear and plastic deformation.

**KEY WORDS:** coating; Fe-based amorphous; cryogenic thermal cycling; detonation spraying; wear

非晶合金因结构无序性,克服了传统晶态合金中的晶界和位错等缺陷,具有优越的机械、物理和化学性能<sup>[1-3]</sup>。在众多非晶合金体系中,Fe基非晶合金的显微硬度高,耐磨性能好,成本相对低廉<sup>[4]</sup>,是极具潜力的工程候选材料。然而有限的冷却速率使得Fe基非晶合金仅限于粉末状、带状及有限形状和尺寸的块体,严重限制了其工业应用<sup>[5]</sup>。近年来,热喷涂技术已经成功应用于Fe基非晶涂层的制备,实现了Fe基非晶在大尺寸工件上的应用。如劳伦斯利物莫国家实验室及相关合作单位<sup>[6]</sup>系统地设计合成了40多种高性能(高显微硬度、良好的耐腐蚀性和热中子吸收能力)铁基非晶合金,其中牌号为SAM2X5和SAM1651的两种Fe基非晶粉末制备的热喷涂防护涂层,已应用于许多样品和零件上,如船舶防滑甲板、核废料储存罐护罩和隧道掘进机刀具盘等。

Liao等<sup>[7]</sup>研究了大块非晶的耐磨性与显微硬度、杨氏模量、屈服强度、玻璃化转变温度以及塑韧性等之间的关系,发现提高非晶合金的塑韧性可明显改善其耐磨性能。最近研究表明,非晶合金通过低温热循环处理(液氮-室温循环处理),塑韧性可得到明显改善,且显微硬度受到的影响较小<sup>[9]</sup>。这使得通过增加非晶合金塑韧性提高其耐磨性能成为可能。目前对于提高非晶涂层耐磨性,主要通过调整工艺参数<sup>[5]</sup>和改变喷涂方法<sup>[8]</sup>等来实现,但均无法改变非晶涂层的本质塑性,对其耐磨性的提高仍存在一定局限性。本文利用低温热循环处理Fe基非晶粉末,提高其塑韧性,同时利用爆炸喷涂产生的高速焰流(4000℃)将粉末加速至1200m/s(在极短时间内仅能将其表面熔化,内部仍然保持原始粉末组织<sup>[10]</sup>),与基体高速撞击后形成涂层,通过与原始涂层的组织结构、物相组成、元素分布、显微硬度和摩擦学性能等对比,研究Fe基非晶粉末低温热循环处理对其涂层摩擦学性能的影响。

## 1 实验

### 1.1 实验材料及涂层制备

选用商用Fe基非晶粉末,粉末粒径为15~50 $\mu\text{m}$ ,主要成分(以质量分数计)为:Cr 25%~27%,Mo 16%~18%,C 2.0%~2.5%,B 2.0%~2.2%,Fe余量。低温热循环处理工艺路线如图1a所示,具体操作工艺如下:将粉末浸入液氮2min后取出,风干至室温,保温1min后继续浸入液氮,循环60次。处理后的粉末物相与原始粉末保持一致,仍然为完全非晶相(图1b),呈很好的椭球形,未发生开裂或破碎(图1d)。

基体选用尺寸为 $\phi 25\text{mm}\times 5\text{mm}$ 的殷瓦钢。喷涂前将基体喷涂面用砂纸打磨平整,并在丙酮中超声清洗,以去除油污,随后进行喷砂处理。利用ADM-4D型爆炸喷涂设备制备原始粉末和低温热循环处理粉末对应的非晶涂层,热源气体选用乙炔,送粉气体选用氮气,具体喷涂工艺参数如表1所示。

### 1.2 性能测试

采用HV-1000型维氏显微硬度计测定涂层截面显微硬度,加载载荷5N,保压10s,每种涂层样品随机测试5次,并求取平均显微硬度值。摩擦性能测试前对涂层进行打磨抛光,并在酒精中超声清洗,采用HT-1000销-盘式摩擦试验机测试涂层摩擦学性能。对磨材料选用直径为6mm的 $\text{Si}_3\text{N}_4$ 小球,滑动速度0.25m/s,载荷5N,滑动时间60min。采用MT-500探针式磨痕测量仪测量材料表面磨痕磨损体积,通过公式(1)计算磨损率。

$$W=V/(FS) \quad (1)$$

式中, $W$ 为磨损率, $V$ 为材料的磨损体积( $\text{mm}^3$ ), $F$ 为外加载荷(N), $S$ 为滑动距离(m)。每种条件下

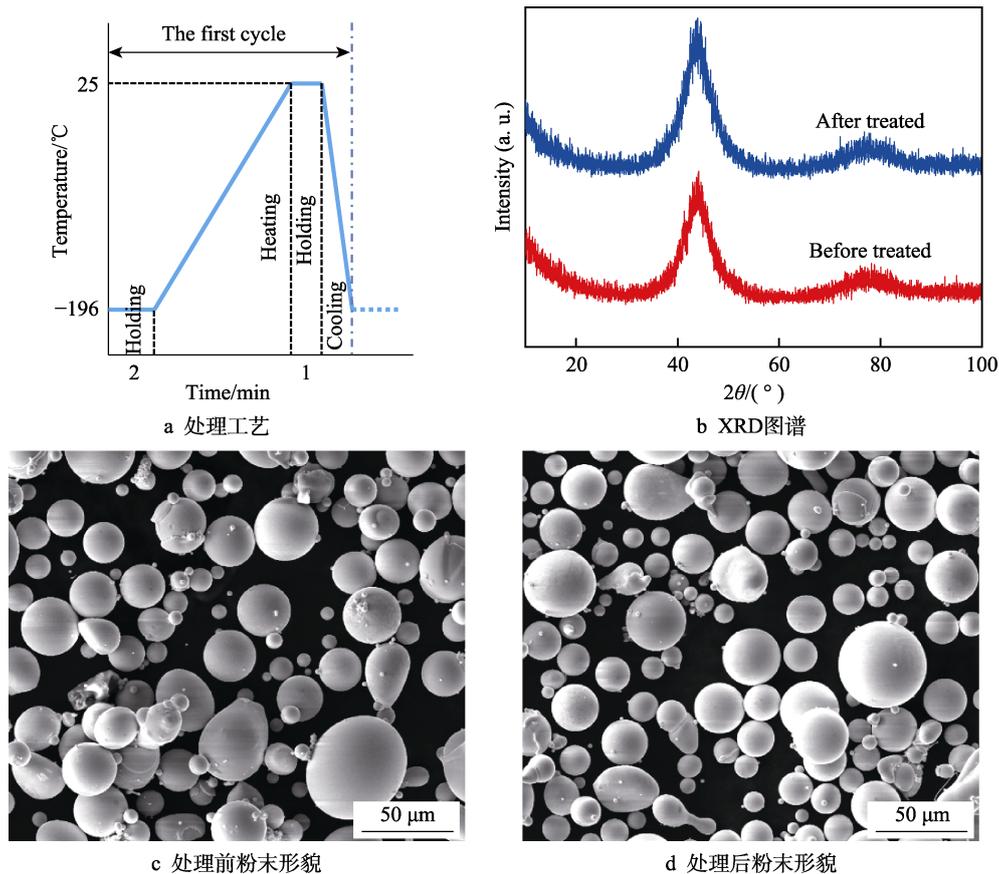


图 1 粉末低温热循环处理工艺路线图、XRD 图谱和 SEM 形貌

Fig.1 Process of cryogenic thermal cycling treatment, XRD patterns and SEM morphology of powder: a) process of treatment; b) XRD patterns; c) before treatment; d) after treatment

表 1 爆炸喷涂工艺参数  
Tab.1 Detonation gun spray parameters

Parameters	Values
Working gas	O <sub>2</sub> +H <sub>2</sub> C <sub>2</sub>
Oxygen flow/(m <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup> )	0.5
Acetylene flow/(m <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup> )	0.23
Nitrogen flow/(m <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup> )	0.05
Working frequency/Hz	3.9
Spraying distance/mm	140

摩擦学性能实验重复三次，取平均值。

采用 Image-Pro Plus 6.0 专业分析软件统计涂层截面孔隙率，每种样品进行 5 次不同区域的孔隙统计，然后求其平均值。采用 D/max-2400 型 X 射线衍射仪 (XRD, 100 mA、40 kV) 分析粉末及涂层物相，扫描步长 0.02°，范围 10°~100°。采用附带 EDS 能谱仪的 JSM-6700F 型场发射扫描电子显微镜表征摩擦实验前后试样特征区域的形貌和元素分布。

## 2 结果与讨论

### 2.1 涂层显微组织与形貌

图 2 为涂层截/表面 SEM 形貌及 XRD 物相分析

结果。图中显示，涂层 XRD 衍射图谱在  $2\theta$  为 35° 和 55° 之间均为典型的非晶宽化漫散射峰，说明两种涂层仍然为非晶态组织。但不同的是，原始粉末制备的涂层表面和内部存在较多未铺展颗粒，如图 2a，涂层孔隙率较大 (1.0%)；而低温热循环处理粉末制备的涂层中未铺展颗粒较少，孔隙率较低 (0.4%)，组织更加均匀致密，如图 2b。两种涂层组织结构的差异与粉末在喷涂前期的低温热循环处理密切相关。非晶合金被普遍认为是均匀和长程无序的固体，但其由液态到玻璃态的转变过程中，会在内部产生异质性，使得非晶合金中存在局域短程不均匀性。在低温热循环所引入的应力作用下，会诱导产生更多的不均匀区域 (软点)，使得非晶合金达到较高能量状态，在压应力作用下，剪切带密度增加，压缩塑性增强<sup>[9]</sup>。因此对粉末的低温热循环处理优化了粉末塑性，促进了粉末在沉积过程中更好地铺展。

### 2.2 涂层显微硬度

图 3 为涂层截面维氏显微硬度分布情况和对应压痕的 SEM 形貌。图中显示，两种涂层均具有较高的显微硬度 (均高于 800HV)。图 3a 显示，原始粉末制备的涂层显微硬度测试结果有较大的波动性 (845.8±81.2)HV)，该现象的产生除了与涂层自身存在较多孔

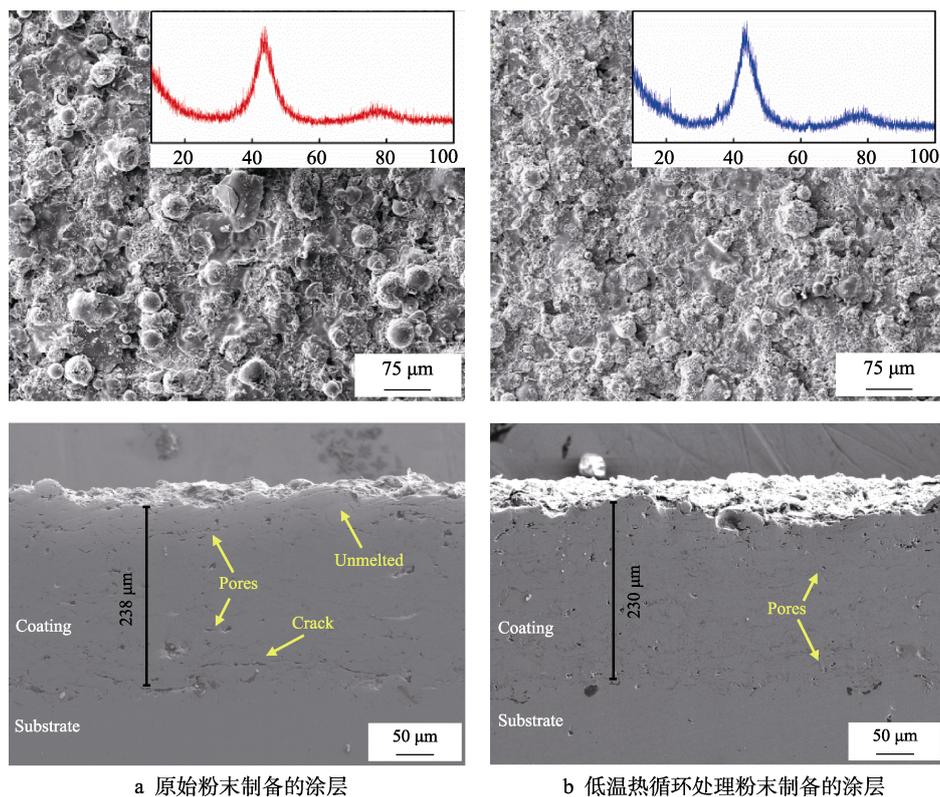


图2 涂层 SEM 形貌和 XRD 衍射图谱

Fig.2 SEM morphology and X-ray diffraction patterns of coating: a) powder-original coating; b) powder-treated coating

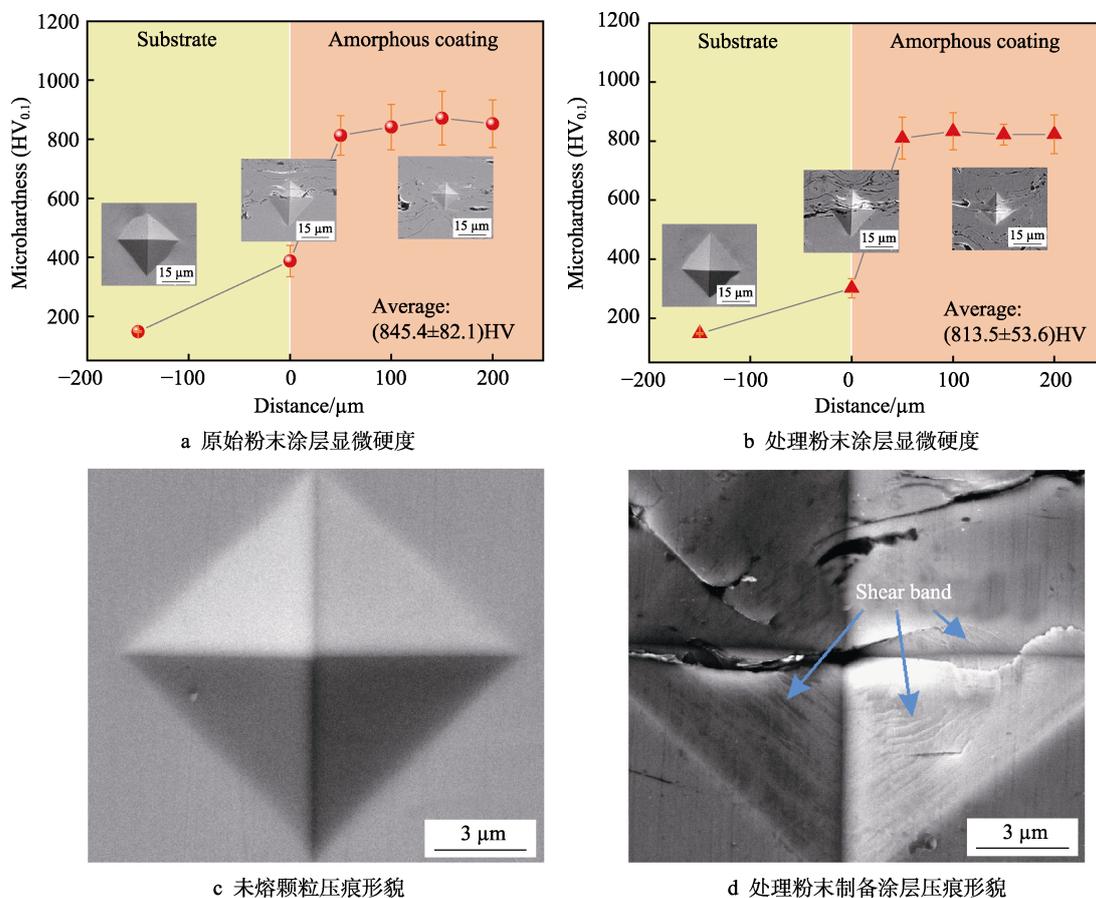


图3 涂层截面显微硬度及压痕形貌

Fig.3 Microhardness and indentation morphology of coating section: a) microhardness of powder-original coating; b) powder-treated coating; c) morphology of powder-original coating; d) morphology of powder-treated coating

隙和裂纹等缺陷有关外，还与涂层内部存在较多未铺展颗粒有极大的关系。由于硬度计压头施加载荷时，未铺展颗粒压痕周围缺陷极少，接近于块体材料，所以显微硬度较高，可达 1000HV 以上（压痕形貌如图 3c 所示）；而铺展较好的片层压痕周围存在较多缺陷，压痕周围材料不能起到很好的支撑作用，使得硬度值相对较低。相比于前者，低温热循环处理粉末制备的涂层由于组织更加致密均匀（如图 2b 所示），压痕尺寸变化较小，且低温热循环引入微观上的非均匀性软点<sup>[9]</sup>，导致涂层在压头压入时产生的剪切带密度增加（图 3d），使得显微硬度测试误差（ $813.5 \pm 53.6$ ）HV 明显较小，分布更加均匀，如图 3b 所示。

据文献[12-13]报道，涂层显微硬度服从威布尔分布，拟合直线斜率越大，涂层显微硬度分布越均匀。图 4 为两种涂层表面显微硬度的威布尔分布。图中  $R$  为拟合回归系数，纵坐标中  $F$  可表示为<sup>[12]</sup>：

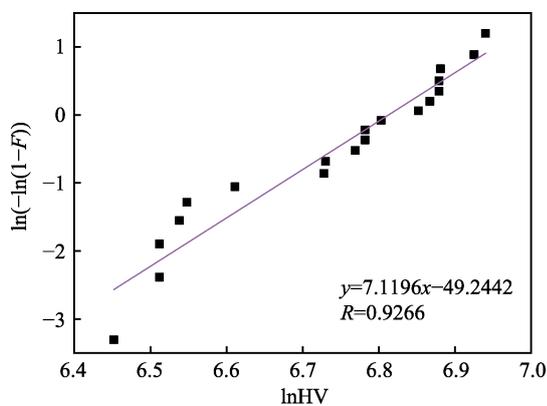
$$F \approx \frac{i-0.3}{r+0.4} \quad (2)$$

式中， $i$  为测定显微硬度值从小到大排列的序号； $r$  为显微硬度值的计数总数。拟合结果显示，低温热循环处理粉末制备的涂层拟合斜率（9.6414）明显大于原始粉末制备的涂层（7.1196），说明前者的显微

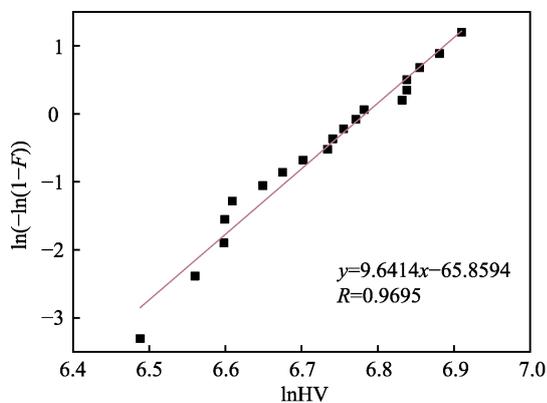
硬度波动明显减小，分布更加均匀。这一分析结果与截面显微硬度统计结果（图 3）相一致。

### 2.3 涂层摩擦磨损性能

图 5 为原始粉末及低温热循环处理粉末制备的涂层的摩擦系数曲线和耐磨性能对比柱状图。普遍认为，摩擦系数曲线分为跑合阶段和稳定磨损阶段<sup>[14]</sup>。由图 5a 中可以看出，两条摩擦系数曲线在开始摩擦后都很快结束了跑合阶段，且在随后将近 60 min 的时间里一直表现为稳定磨损阶段，表明爆炸喷涂制备的 Fe 基非晶涂层具有稳定的摩擦磨损行为。但比较发现，低温热循环处理粉末制备的涂层摩擦系数曲线更加平稳，平均摩擦系数更低。图 5b 中显示，两种 Fe 基非晶涂层均具有极好的耐磨性，且两者的平均磨损率相近，均在  $10^{-6}$  数量级。而数据统计误差显示，低温热循环处理粉末涂层磨痕深度和磨损率的统计误差均小于原始粉末涂层，结合两者的摩擦系数曲线平稳性差异，说明低温热循环处理粉末制备的涂层摩擦学性能更为稳定。由于低温热循环处理提高了 Fe 基非晶粉末塑性，促进了粉末在沉积过程中的铺展，涂层组织更加均匀致密，且爆炸喷涂保留了部分粉末的原始组织，使得低温热循环处理所引入的非均匀性

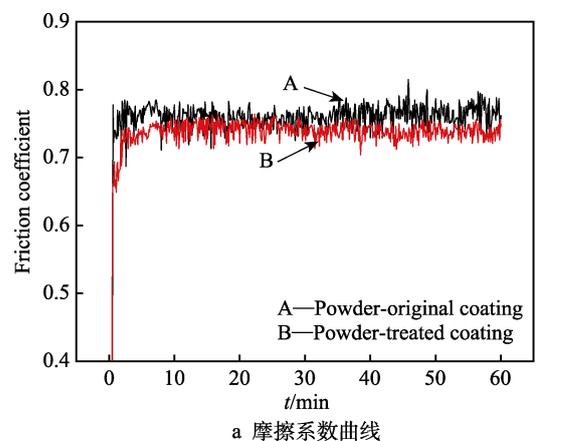


a 原始粉末涂层

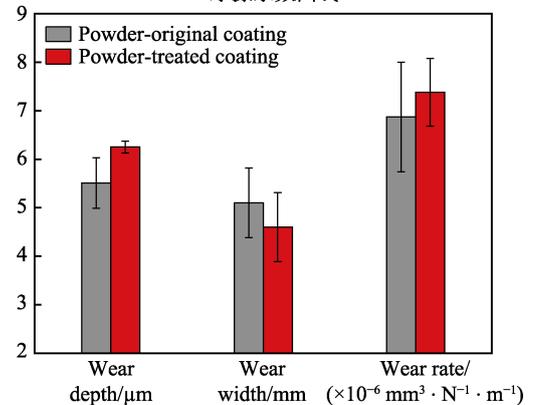


b 低温热循环粉末涂层

图 4 涂层表面显微硬度的威布尔分布  
Fig.4 Weibull distribution of microhardness values of coatings: a) powder-original coating; b) powder-treated coating



a 摩擦系数曲线



b 耐磨性对比图

图 5 涂层摩擦系数曲线和耐磨性能对比图  
Fig.5 Coating friction coefficient curve and wear resistance comparison histogram: a) friction coefficient curves; b) wear resistance comparison histogram

软点仍存在于涂层中,极大地改善了涂层硬度分布均匀性(图3、图4),进而提高了涂层摩擦的平稳性。而原始粉末制备的涂层由于存在较多孔隙及未铺展的颗粒(大于1000HV),硬度分布均匀性较差,因此在摩擦过程中产生较大的摩擦系数。

为进一步分析两种Fe基非晶涂层的摩擦磨损机理,对两种涂层的磨痕和磨屑进行了SEM形貌及特征区域EDS能谱表征,如图6所示。图6a显示,原始粉末涂层磨痕表面存在大片的剥落坑,其边缘表现为脆性断裂特性,且剥落坑中填充了较多的白色细小颗粒。其对应磨屑的SEM形貌显示,磨屑主要由较大的薄片和较为细小的颗粒组成。其中,大片层磨屑

尺寸可达45 μm,该尺寸与磨痕形貌上的剥落坑相近。图6a中EDS检测结果显示,磨屑中的细小颗粒(点1)具有很高的O元素含量(54.2%),而大片层磨屑的O元素含量相对较少(27.8%)。对磨痕特征区域的EDS检测结果表明,区1和区2的O元素含量较高,与点1相近,区3的O元素含量较低,与点2相近。图6b为粉末低温热循环处理后的涂层磨痕形貌。图中显示,该磨痕形貌上的剥落坑较少,但磨痕上存在大量的塑性变形和粘附层。同时,该涂层的磨屑形貌和元素含量也与磨痕相互对应,即磨屑中含有少量的较大片层和较多的细小颗粒,磨痕表面和两种形貌的磨屑均含有含量较高的O元素。

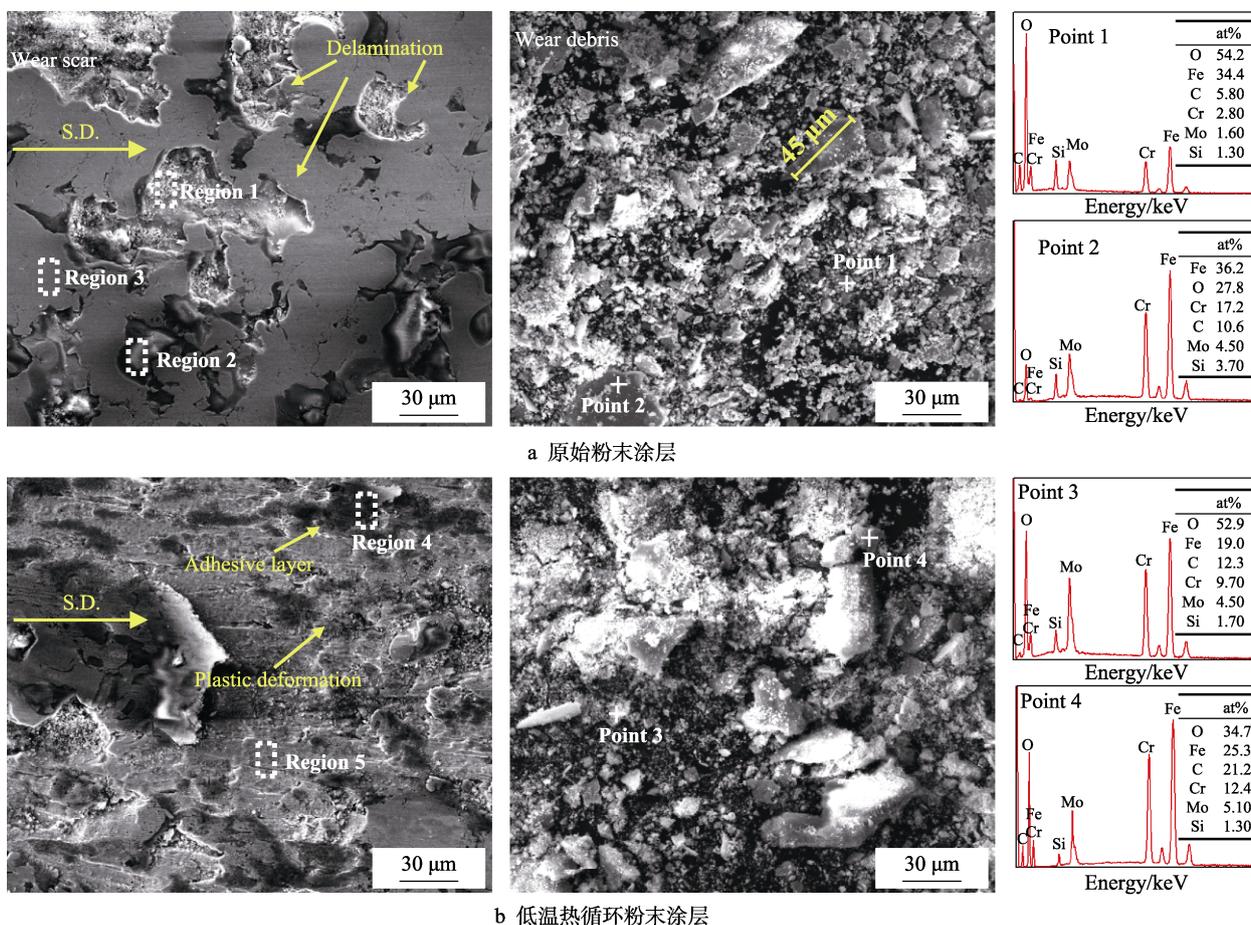


图6 涂层磨痕表面及对应磨屑的SEM形貌与EDS结果  
Fig.6 SEM morphology and EDS result of wear scar and corresponding debris of coating:  
a) powder-original coating; b) powder-treated coating

通过对原始粉末和低温热循环处理粉末制备的涂层磨痕与磨屑的对比研究发现:原始粉末涂层的磨损机制主要由疲劳分层磨损主导,并伴有氧化磨损。由于该涂层中存在孔隙和微裂纹等缺陷,在与对磨副的反复摩擦过程中,裂纹会由于循环应力而在内聚强度不高的地方形核和扩展,当裂纹扩展至Fe基非晶合金基体的临界断裂尺寸时,该区域会整片地发生脆性剥落,在磨痕形貌上形成边缘呈脆性断裂特性的大片剥落坑(如图6a)。随后,被剥离的片层一部

分被推向磨痕边缘,形成大片的磨屑,另一部分被卷入涂层与对磨副之间而磨碎,形成填充于凹坑中或磨屑中的细小白色颗粒(如图6a)。此外,摩擦过程中微凸体的快速接触可产生极大的应力集中,同时产生很高的局部闪温。据报道,干摩擦条件下的局部闪温可高达4485 K<sup>[15]</sup>。由于合金体系中的Fe、Cr和Mo等对O元素具有较大的亲和力,涂层在摩擦过程中的机械作用 and 高温下会很快形成氧化层,随后涂层在氧化层的移除和重新生成交替中形成磨损<sup>[5]</sup>。

与原始粉末制备的涂层相比,低温热循环处理粉末制备的涂层组织更为致密均匀,内部孔隙和裂纹等缺陷较少,在摩擦过程中因循环应力产生疲劳裂纹的几率大大降低,所以疲劳分层磨损为涂层破坏的次要机制。在磨痕表面观察到的较少剥落坑也证实了这一观点。然而其磨痕上大量的塑性变形和 EDS 检测结果中的高 O 元素含量表明,该涂层在摩擦过程中的主要破坏机制为氧化磨损和塑性变形。其具体作用机理如下:由于低温热循环处理粉末制备的涂层组织均匀致密,裂纹形核和扩展相对困难,所以疲劳剥层较少(如图 6b)。而涂层中 Fe、Cr 和 Mo 等对 O 元素具有较大的亲和力元素的存在和摩擦闪温导致的高温,致使摩擦表面发生氧化,导致了较为严重的氧化磨损。同时,由于非晶涂层和陶瓷对磨副( $\text{Si}_4\text{N}_3$ )的导热性不好<sup>[5]</sup>,以致磨痕温度上升,致使磨痕发生塑性变形。此外,低温热循环处理粉末涂层的塑性相对于原始粉末涂层得到了一定的改善,涂层在与摩擦副的相互作用下,产生大量的剪切带,发生较为严重的塑性变形,同时剪切带的形成也会产生大量的热<sup>[15]</sup>,使磨痕温度进一步上升,最终造成塑性变形的加剧。

### 3 结论

利用爆炸喷涂技术分别制备了 Fe 基非晶原始粉末和低温热循环处理粉末的非晶涂层,对比研究了非晶粉末低温热循环处理对其制备涂层性能的影响,得出以下结论:

1) 低温热循环处理 Fe 基非晶粉末后,制备的涂层内部孔隙和裂纹等缺陷减少,组织结构更为均匀致密。涂层硬度稍有降低,但硬度分布均匀性明显提高。

2) 低温热循环处理 Fe 基非晶粉末后,制备的涂层摩擦磨损性能更为稳定,磨损机制由原始粉末涂层的疲劳剥层,转变为以氧化磨损和塑性变形主导。

#### 参考文献:

- [1] ASHBY M F, GREER A L. Metallic glasses as structural materials[J]. *Scripta materialia*, 2006, 54(3): 321-326.
- [2] SCHUH C A, HUFNAGEL T C, RAMAMURTY U. Mechanical behavior of amorphous alloys[J]. *Acta materialia*, 2007, 55(12): 4067-4109.
- [3] 张勇. 非晶和高熵合金[M]. 北京: 科学出版社, 2010. ZHANG Yong. Amorphous and high-entropy alloy[M]. Beijing: Science Press, 2010.
- [4] HENAO J, CONCUSTELL A, DOSTA S, et al. Influence of the substrate on the formation of metallic glass coatings by cold gas spraying[J]. *Journal of thermal spray technology*, 2016, 25(5): 992-1008.
- [5] 张诚. 非晶涂层的制备、结构与性能研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2012. ZHANG Cheng. Fabrication, structure and properties of amorphous metallic coatings[D]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology, 2012.
- [6] BLINK J, FARMER J, CHOI J, et al. Applications in the nuclear industry for thermal spray amorphous metal and ceramic coatings[J]. *Metallurgical and materials transactions A*, 2009, 40(6): 1344-1354.
- [7] LIAO Z, HUA N, CHEN W, et al. Correlations between the wear resistance and properties of bulk metallic glasses[J]. *Intermetallics*, 2018, 93: 290-298.
- [8] GAO J G, TANG Z H, WANG C L, et al. Microstructure, mechanical and oxidation characteristics of detonation gun and HVOF sprayed MCrAlYX coatings[J]. *Transactions of nonferrous metals society of China*, 2015, 25(3): 817-823.
- [9] KETOV S V, SUN Y H, NACHUM S, et al. Rejuvenation of metallic glasses by non-affine thermal strain[J]. *Nature*, 2015, 524(7564): 200-203.
- [10] SINGH L, CHAWLA V, GREWAL J S. A review on detonation gun sprayed coatings[J]. *Journal of minerals & materials characterization & engineering*, 2012, 11(3): 243-265.
- [11] KOGA G Y, SCHULZ R, SAVOIE S, et al. Microstructure and wear behavior of Fe-based amorphous HVOF coatings produced from commercial precursors[J]. *Surface and coatings technology*, 2017, 309: 938-944.
- [12] 刘名涛, 钟喜春, 刘仲武, 等. 等离子喷涂制备 MoSi<sub>2</sub>-CoNiCrAlY 纳米复合涂层的结构与性能[J]. *材料工程*, 2014(5): 17-22. LIU Ming-tao, ZHONG Xi-chun, LIU Zhong-wu, et al. Structure and properties of MoSi<sub>2</sub>-CoNiCrAlY nano-composite coating by plasma spraying[J]. *Journal of materials engineering*, 2014(5): 17-22.
- [13] CHU Z H, WEI F S, ZHENG X W, et al. Microstructure and properties of TiN/Fe-based amorphous composite coatings fabricated by reactive plasma spraying[J]. *Journal of alloys and compounds*, 2019, 785: 206-213.
- [14] 刘倩楠, 刘咏, 李飞, 等. 热处理对 Fe 基非晶合金涂层的相组成及摩擦磨损行为的影响[J]. *粉末冶金材料科学与工程*, 2012, 17(5): 586-591. LIU Qian-nan, LIU Yong, LI Fei, et al. Effect of heat treatment on micro-structure and wear behaviors of iron-base amorphous alloy coatings[J]. *Materials science and engineering of powder metallurgy*, 2012, 17(5): 586-591.
- [15] JANG B T, KIM S S, YI S. Wear behaviors of a Fe-based amorphous alloy in ambient atmosphere and in distilled water[J]. *Metals and materials international*, 2014, 20(1): 55-61.