

# 添加金刚石颗粒的 Ni60 涂层组织和性能研究

徐峰, 王丹, 周小平

(湖北工业大学 机械工程学院, 武汉 430068)

**摘要:** 目的 研究金刚石颗粒对 Ni60 涂层的组织硬度和耐磨性的影响, 对比无金刚石颗粒的 Ni60 涂层与含 20% 金刚石颗粒的 Ni60 涂层的组织及性能差异。方法 将预热后的 Ni60 和 Ni60+20% 金刚石粉末在 Ar 气保护下球磨 10 h, 对球磨后的粉末进行造粒, 过筛后, 选出粒度低于 200 目的粉末作为喷涂材料, 并在钢基体表面进行火焰喷涂, 制备 Ni60 涂层和含 20% 金刚石颗粒的 Ni60 涂层, 对获得的涂层进行 X 射线衍射分析、扫描电镜观察、显微硬度和耐磨性测试。结果 通过火焰喷涂获得了组织致密性较好的 Ni60 涂层和含 20% 金刚石颗粒的 Ni60 涂层。抛光后, Ni60 涂层的断面整洁, 无粗糙区域, 而含 20% 金刚石颗粒的 Ni60 涂层断面出现大面积粗糙区域。Ni60 涂层的显微硬度约为 694.2HV, 含 20% 金刚石颗粒的 Ni60 涂层的显微硬度约为 891.8HV。在载荷 6 N、转速为 1000 r/min 的条件下, Ni60 涂层每 10 min 的磨损量为  $10.7 \times 10^{-5} \text{ g/mm}^2$ , 20% 金刚石颗粒的 Ni60 涂层每 10 min 的磨损量为  $9.6 \times 10^{-5} \text{ g/mm}^2$ 。结论 由于金刚石颗粒的硬度非常高, 经过砂纸打磨和抛光后, 含 20% 金刚石颗粒的 Ni60 涂层断面不会像纯金属涂层那样出现光洁、整齐的形貌, 而是在涂层局部区域出现较粗糙的形貌。通过对比 Ni60 涂层和 20% 金刚石颗粒的 Ni60 涂层的力学性能, 20% 金刚石颗粒的 Ni60 涂层的显微硬度高于 Ni60 涂层, 耐磨性比 Ni60 涂层好。在低载荷、高滑动摩擦速率的条件下, 涂层以微量去除的磨损方式进行。

**关键词:** 球磨; 火焰喷涂; Ni60 涂层; Ni60+20% 金刚石涂层; 显微硬度; 耐磨性

**中图分类号:** TH117 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2016)09-0100-06

**DOI:** 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2016.09.016

## Study on Microstructure and Properties of Ni60 Coating by Adding Diamond Particles

XU Feng, WANG Dan, ZHOU Xiao-ping

(School of Mechanical Engineering, Hubei University of Technology, Wuhan 430068, China)

**ABSTRACT:** **Objective** To study the effect of diamond particles on the structure hardness and wear resistance of Ni60 coating, and compare the differences of structure and properties between Ni60 coating and Ni60 coating with 20% diamond particles. **Methods** The preheated Ni60 and Ni60+20% diamond powders were ball milled for 10 h under the protection of Ar gas. The milled powder was granulated and sieved. The particles sized below 200 mesh were selected as spray materials. Ni60 coating and Ni60 coating with 20% diamond particles were prepared on the surface of the steel by flame spraying. X-ray diffraction

收稿日期: 2016-01-15; 修订日期: 2016-03-03

Received: 2016-01-15; Revised: 2016-03-03

作者简介: 徐峰 (1988—), 男, 硕士生, 研究方向为金属表面工程。

**Biography:** XU Feng (1988—), Male, Master, Research focus: metal surface engineering.

通讯作者: 周小平 (1963—), 男, 博士, 教授, 研究方向为金属表面工程。

**Corresponding author:** ZHOU Xiao-ping (1963—), Male, Doctor, Professor, Research focus: metal surface engineering.

analysis, scanning electron microscopy, micro-hardness and wear resistance tests were carried out for the prepared coating. **Results** Ni60 coating and Ni60 coating with 20% diamond particles were obtained with good compactness by flame spraying. After polishing, the section of Ni60 coating was clean and tidy and had no rough area while there was a large area of rough area in the section of Ni60 coating with 20% diamond particles. The microhardness of the Ni60 coating was about 694.2HV, and that of the Ni60 coating with 20% diamond particles was about 891.8HV. Under the load of 6 N and the speed of 1000 r/min, the wear loss of Ni60 coating for every 10 min was  $10.7\times10^{-5}$  g/mm<sup>2</sup>, and that of Ni60 coating with 20% diamond particles was  $9.6\times10^{-5}$  g/mm<sup>2</sup>. **Conclusion** Because of the high hardness of diamond particles, after sanding and polishing, the Ni60 coating with 20% diamond particles has no pure metallic coatings as clean and tidy as simple metal but appears relatively rough in the local region of the coating. Through comparing the mechanical properties of the two coatings, the Ni60 coating with 20% diamond particles has higher microhardness and better wear resistance. Under the condition of low load and high sliding friction speed, the wear mode of the coating is micro removal.

**KEY WORDS:** ball milling; flame spraying; Ni60 coating; Ni60 coating with 20% diamond particles; microhardness; wear resistance

Ni60 是高硬度的镍铬硼硅合金粉末，其自熔性、润湿性和喷焊性优良，而且熔点比较低，喷焊层具有硬度高、耐蚀、耐磨、耐热等特点<sup>[1-2]</sup>，适用于氧-乙炔火焰或等离子喷焊工艺，常用于耐蚀、耐磨，特别是耐滑动磨损零件的预防性保护和修复，如拉丝滚筒、凸轮、柱塞、轧钢机的输送辊等。将硬质颗粒加入喷涂粉末中，利用硬质颗粒形成弥散强化来提高涂层的耐磨性是一种常见的强化手段。王丽娟等<sup>[3-5]</sup>先后采用不同的方法制备出了 Ni60+WC 涂层，其对提高涂层耐磨性的研究取得了很好的效果。金刚石是硬度最高的固体物质（HV=100 GPa），具有许多优异的力学、电学、热学、声学 and 光学等性质，在高技术领域具有十分广阔的应用前景，其性质稳定，耐磨，但却难以加工成各种所需的零件和制品。金刚石工具普遍用于石材、机械、汽车、地质勘探和国防工业等各个领域，主要用于地质钻头和石材切割工具<sup>[6-7]</sup>。

热喷涂技术是利用热源将喷涂材料加热至溶化或半溶化状态，并以一定的速度喷射沉积到经过预处理的基体表面形成涂层的方法。热喷涂技术的主要目的是在钢铁结构的表面进行涂层处理，控制产品或工件的腐蚀与磨损，从而提高工件的使用寿命<sup>[8-10]</sup>。其主要特点是涂覆设备轻便，工艺灵活，操作程序少，适应性强，环保，经济适用，因而得到广泛应用<sup>[11-15]</sup>。本文采用火焰喷涂的方法在钢基体表面制备 Ni60 涂层和含 20%金刚石颗粒的 Ni60 涂层，对比研究添加 20%金刚石颗粒后对 Ni60 涂层组织及力学性能的影响，为后续开展金刚石颗粒强化涂层的研究提供指导意义。

1 实验

实验选用的材料为 Ni60 粉末（150 目）和金刚石粉末（180~200 目）。机械合金化过程所使用的磨球直径分别为  $\phi 10$  mm 和  $\phi 4$  mm 的 GCr15 钢球（硬度 HRC 为 60~62），大钢球与小钢球的质量比为 2：1，球料比为 10：1。实验分两组进行，一组为 Ni60 粉末，另一组为 Ni60 粉末与金刚石粉末按质量比为 4：1 混合所得的混合粉末。将两组粉末充分混合后分别置于不锈钢罐中，并在干燥箱中 120 ℃恒温下保温 2 h，然后在真空箱中抽真空，并在高纯 Ar 气环境下加入无水乙醇并进行封口。实验球磨以高纯度的 Ar 气作为保护气，在转速为 500 r/min 的 QM-3SP4 行星球磨机中进行湿磨，将球磨 10 h 后的粉末置于干燥箱中，在 90 ℃下进行低温干燥，用质量分数为 7%的聚乙烯水溶液与球磨后的粉末进行混合，通过搅拌团聚后进行烘干、破碎、过筛，获得粒度低于 200 目的粉末。基体材料为 20 mm×20 mm×4 mm 的普通钢板。以两组处理过的粉末为喷涂材料，在经过喷砂处理后的钢基体表面进行火焰喷涂。Ni60+20%金刚石涂层中，金刚石为强化相颗粒，Ni60 合金粉末作为强化相颗粒的粘结剂。喷涂工艺参数如表 1。使用 XD-2

表 1 火焰喷涂工艺参数  
Tab.1 Flame spraying process parameters

Spraying process	O <sub>2</sub> pressure/ MPa	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> pressure/ MPa	Spraying distance/ mm
Parameters	0.5~0.6	0.1~0.12	150~180

型 X 射线衍射仪对喷涂后所得的涂层进行 X 射线衍射分析 (XRD), 使用 QUANTA FEG 450 型扫描电镜对涂层进行形貌分析, 并对涂层进行硬度及摩擦磨损测试。

## 2 结果及分析

### 2.1 涂层的 XRD 分析

图 1a 和图 1b 分别为 Ni60 涂层和 Ni60+20% 金刚石涂层的 X 射线衍射图谱。对材料进行 X 射线衍射图谱分析是获得材料成分、材料内部原子结构和材料物相组成的重要研究手段。由图 1a 可知, 在 Ni60 涂层组织中检测到物相  $\text{FeNi}_3$ 、 $\text{Cr}_7\text{C}_3$  和  $\text{BCr}$  的存在, 说明 Ni60 涂层组织由化合物  $\text{FeNi}_3$ 、 $\text{Cr}_7\text{C}_3$  和  $\text{BCr}$  组成。由图 1b 可知, 在 Ni60+20% 金刚石涂层中, 除了检测到物相  $\text{FeNi}_3$ 、 $\text{Cr}_7\text{C}_3$  和  $\text{BCr}$  的存在, 还检测到了金刚石物相, 说明 Ni60+20% 金刚石涂层组织由化合物  $\text{FeNi}_3$ 、 $\text{Cr}_7\text{C}_3$ 、 $\text{BCr}$  和单质金刚石颗粒组成。采用火焰喷涂的方法制备的金刚石强化的 Ni60+20% 金刚石涂层确实含有金刚石成分。

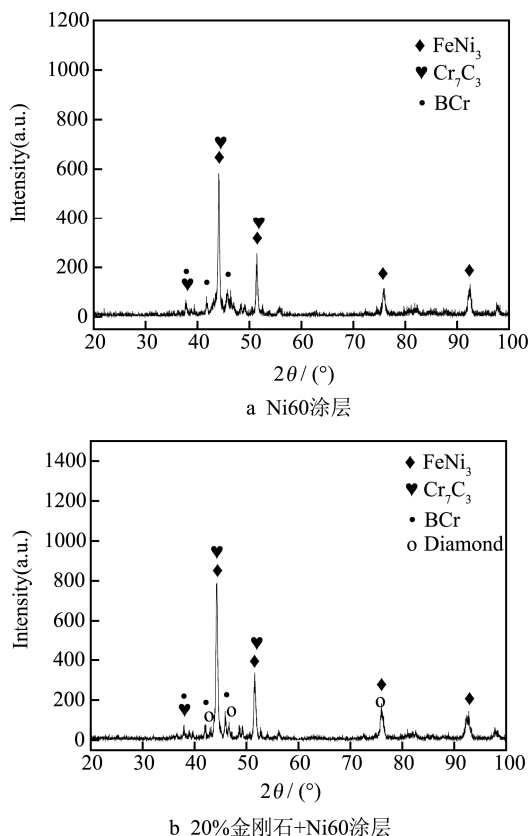


图 1 (a)Ni60 涂层和(b)含 20% 金刚石颗粒的 Ni60 涂层 XRD 图谱

Fig.1 XRD patterns of Ni60 coating and 20% diamond +Ni60 coating: a) Ni60 coating; b) 20% diamond +Ni60 coating

### 2.2 涂层形貌分析

图 2a 为 Ni60 涂层横截面经抛光和腐蚀后在电镜下放大 300 倍的形貌图, 从图中可以明显地看到三部分: 最上层灰白色的物质为镶嵌粉凝固后的组织; 中间呈灰色的部分即为 Ni60 涂层组织; 下部为钢基体, 涂层部分与钢基体部分有一条很明显的分界线。由涂层部分可以明显看出层状结构, 这是由于在火焰喷涂过程中, 原料颗粒在高温下熔化或软化后沉积在工件表面, 先后依次叠加形成多层的层状结构组织, 即为涂层。由图 2a 可知, 涂层与钢基体结合较好, 涂层区域光洁、整齐, 个别区域存在少量的孔隙与缺陷, 总体看来, 涂层的组织与结构较为均匀。

图 2b 为 Ni60+20% 金刚石涂层横截面经抛光和腐蚀后在电镜下放大 300 倍的形貌图。图 2b 中最上层灰白色的物质为镶嵌粉凝固后的组织, 中间呈灰色的部分为 Ni60+20% 金刚石涂层组织, 下部为钢基体。从图 2b 中可以看出, 在涂层部分由较多的粗糙区域和光滑区域相互交融组成。光滑区域为 Ni60 合金组织, 粗糙区域为含金刚石颗粒的 Ni60 合金组织, 在抛光和腐蚀剂的腐蚀过程中,

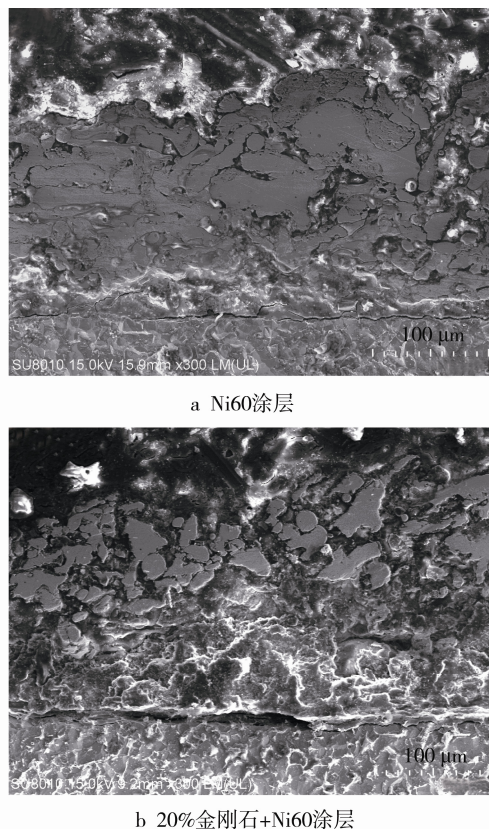


图 2 涂层横截面形貌

Fig.2 Cross-section morphology of coatings: a) Ni60 coating; b) 20% diamond +Ni60 coating

部分组织被腐蚀掉，而镶嵌在其中的金刚石颗粒由于少了这部分组织的附着作用而掉落，从而形成大面积的粗糙区域。尽管经腐蚀后的金相组织中有大面积的粗糙结构存在，但涂层中并无明显的孔隙和裂纹存在，说明涂层的致密性较高，组织与结构较为均匀。

图 3 为对含 20%金刚石颗粒的 Ni60 涂层形貌进行的能谱分析（EDS）。图 3a 为将含 20%金刚石

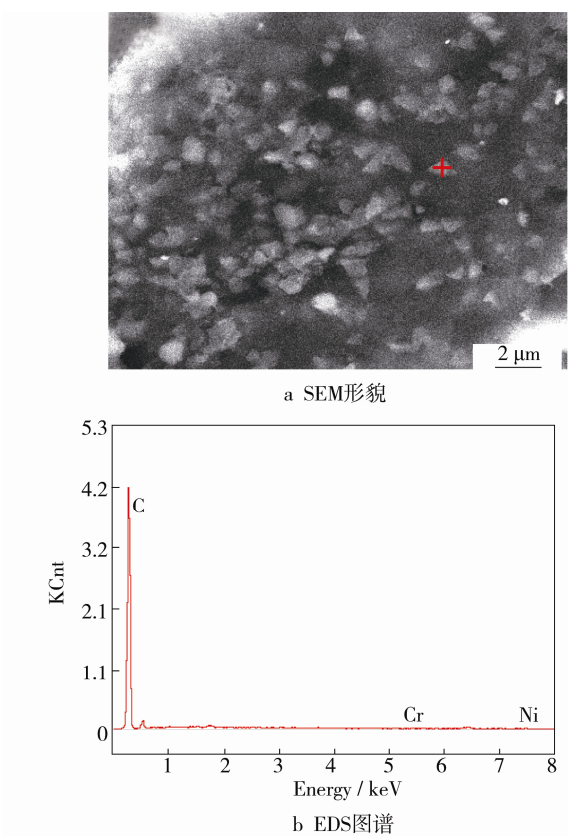


图 3 含 20%金刚石颗粒的 Ni60 涂层的 SEM 形貌和 EDS 分析图谱

Fig.3 SEM images (a) and EDS analysis diagram (b) of Ni60 coating with 20% diamond particles

颗粒的 Ni60 涂层在电镜下放大到 6000 倍时的表面形貌图，从图中可以看出，在涂层内部均匀分布着大量的细小颗粒，对这些细小颗粒进行点能谱分析（如图 3b 所示），结果显示，在打点位置检测出 C、Cr、Ni 元素，且 C 的含量较高。说明这些细小颗粒以 C 元素为主，由此可知，这些细小的颗粒即为金刚石颗粒。这些细小金刚石颗粒呈现弥散分布状态，均匀地分布在以 Ni60 合金为基体的涂层中。从金刚石颗粒的尺寸来看，已经达到了微米级，说明在球磨过程中，金刚石颗粒在钢球与钢球、钢球与颗粒的反复碰撞和碾压下，不断破碎，在长时间的

的作用下形成了尺寸近乎 1 μm 的颗粒。

### 2.3 涂层的显微硬度测试

涂层的硬度值是体现涂层质量的重要指标之一，为了测试喷涂后涂层的性能，本文使用 HVS-1000 型显微硬度仪对两组涂层进行显微硬度分析，分别在 Ni60 涂层和 Ni60+20%金刚石涂层断面区域随机选取 10 个点，对其进行显微硬度测试，测试载荷为 0.98 N，加载时间为 20 s，测试结果如表 2。

由表 2 可得，Ni60 涂层的平均硬度值为 694.2HV，而 Ni60+20%金刚石涂层的平均硬度值为 891.8HV。当喷涂原料中加入 20%金刚石颗粒后，涂层中分布着高硬度的金刚石颗粒，从而使涂层的显微硬度有了一定程度的提高，但硬度值提高的幅度不大，未能反应出金刚石颗粒的真实硬度值，原因可能是由于涂层中的金刚石颗粒太细，致使在硬度测试的过程中，压头不能完全压在金刚石颗粒上，还是只能打在以 Ni60 合金为主的涂层基体上。

表 2 涂层的显微硬度  
Tab.2 Microhardness of coating

Coating	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Average(HV)
Ni60-coating	695	663	612	707	711	689	769	670	699	727	694.2
20%diamond Ni60-coating	895	863	947	882	865	988	874	850	891	863	891.8

### 2.4 涂层的摩擦磨损实验测试

磨损是工件失效的主要形式之一。耐磨性的高低也是衡量一个涂层性能好坏的重要指标。本次耐磨性试验在 P-2 金相试样抛光机上进行，摩擦副为

粒度为 800 目的砂纸，载荷为 6 N，转速为 1440 r/min，样品置于抛光盘边缘无润滑干摩擦。实验前，将试样用金相切割机切成尺寸为 10 mm×10 mm×4 mm 的块状，用无水乙醇洗净，烘干后采用 TG328B 型分析天平（测试精度 0.0001 g）测量试



样的质量。试验过程中,每隔 10 min 将试样取下,用无水乙醇清洗干净,并用吹风机吹干后再用天平称量。采用磨损前后的单位面积的质量差 $\Delta W_c$ 评价涂层的耐磨性能。磨损失重量 $\Delta W_c$ 越小,涂层耐磨性能越好。磨损失重量由公式(1)计算可获得:

$$\Delta W_c = (M_i - m_i) / S \quad (1)$$

式中: $\Delta W_c$ 为涂层的磨损失重量; $M_i$ 为试样第*i*次磨损前的质量; $m_i$ 为试样第*i*次磨损后的质量; $S$ 为摩擦面积。

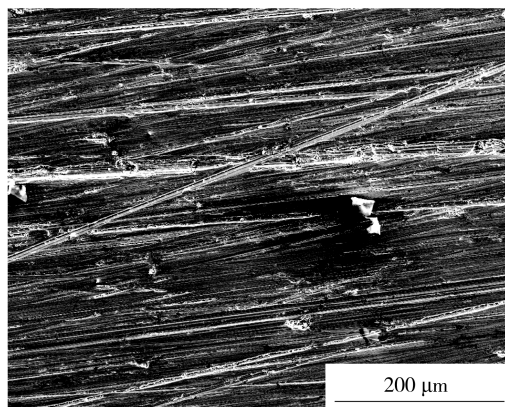
由表 3 可知, Ni60 涂层每 10 min 的磨损失重量为  $10.7 \times 10^{-5} \text{ g/mm}^2$ , Ni60+20%金刚石涂层每 10 min 的磨损失重量为  $9.6 \times 10^{-5} \text{ g/mm}^2$ , 涂层在相同时间内的磨损失重量较均匀。在相同时间内, Ni60+20%金刚石涂层的磨损失重 $\Delta W_c$ 比 Ni60 涂层的小, 说明 Ni60+20%金刚石涂层的耐磨性要比 Ni60 涂层的好。一方面, Ni60 自溶性合金中的镍基固溶体本身具有优良的强韧性, 不易产生裂纹, 耐磨损能力强<sup>[16]</sup>; 另一方面, 涂层中的金刚石颗粒本身具有很高的强度, 并弥散地分布在涂层中, 起到了弥散强化作用, 从而使涂层表现出很好的耐磨性。从图 3 可以看出, 涂层内有较多的金刚石颗粒, 掺金刚石的涂层理应耐磨。但磨损试验数据显示, 掺金刚石涂层的耐磨性提高幅度不大, 估计是金刚石与基体之间的结合强度不高, 在摩擦过程中金刚石颗粒都脱落了。

表 3 涂层的摩擦磨损结果  
Tab.3 Friction and wear of coating

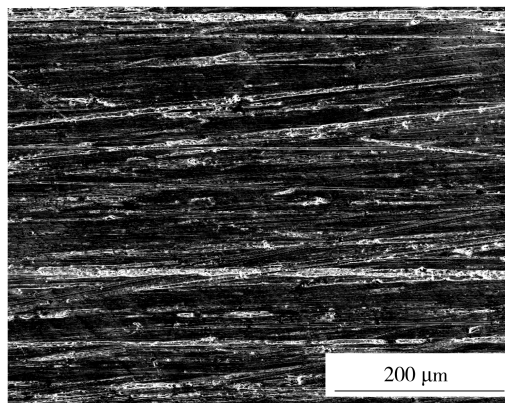
Samples	$\Delta W_c / (\times 10^{-5} \text{ g} \cdot \text{mm}^{-2})$			
	10 min	20 min	30 min	40 min
Ni60-coating	10.778	10.771	10.766	10.762
20%diamond Ni60-coating	9.695	9.691	9.688	9.683

图 4 为 Ni60 涂层和 Ni60+20%金刚石涂层经过摩擦磨损实验后磨痕的微观形貌图。涂层摩擦磨损实验的一般规律为: 在不同载荷、不同滑动摩擦速率下, 涂层在干磨条件下的磨损机制会有很大的不同, 具体表现为磨粒磨损、疲劳磨损、剥层磨损和微量去除的方式<sup>[17-18]</sup>。由图 4a 可知, Ni60 涂层经过磨损实验后, 涂层表面保持着较平滑且完整的组织, 仅显示一些犁沟较浅的划痕, 磨痕边缘也相当整齐, 这是由于在 Ni60 涂层中, 存在软相镍基 $\gamma$ -固溶体。载荷较低时, 该相被挤压、碾平, 起到对孔隙的填充作用, 使磨面光滑, 因此它是以微量

去除的磨损方式进行。图 4b 为 Ni60+20%金刚石涂层经过 40 min 的摩擦磨损后的磨面形貌, 可以看出它的磨损方式和 Ni60 涂层相同, 也是以微量去除的方式进行。



a Ni60涂层



b 20%金刚石+Ni60涂层

图 4 摩擦磨损实验后涂层组织的微观形貌

Fig.4 Microstructure of coating after friction and wear experiment: a) Ni60 coating, b) 20% diamond +Ni60 coating

### 3 结论

1) 将球磨后的 Ni60 粉末和 Ni60+20%金刚石粉末进行火焰喷涂, 可以获得致密高、组织和结构较均匀的涂层, Ni60 涂层断面光滑, 无粗糙断面结构。Ni60+20%金刚石涂层中含有高硬质相金刚石, 这些金刚石颗粒弥散分布在 Ni60 合金组织中, 金刚石颗粒与基体结合强度不高, 当基体组织被腐蚀剂腐蚀后, 金刚石颗粒开始从基体中脱落, 涂层部分出现较多的粗糙区域。

2) 显微硬度和摩擦磨损测试结果显示, Ni60+20%金刚石涂层的显微硬度和耐磨性均优于 Ni60 涂层。

3) 在低载荷、滑动摩擦速率较高的条件下,

Ni60 涂层和 Ni60+20% 金刚石涂层均以微量去除的方式发生磨损。

## 参考文献

- [1] 朱润生. Ni60 自熔合金粉末的研究[J]. 粉末冶金工业, 2002, 12(6): 7—16.  
ZHU Run-sheng. Study on Ni60 Self-melting Alloy Powder[J]. Powder Metallurgy Industry, 2002, 12(6): 7—16.
- [2] 陈茂军, 石凯. 火焰喷熔 Ni60 合金涂层耐磨粒磨损性能的研究[J]. 热加工工艺, 2007, 36(23): 51—53.  
CHEN Mao-jun, SHI Kai. Study on Abrasion Resistance of Flame Melting Ni60 Alloy Coating[J]. Hot Working Technology, 2007, 36(23): 51—53.
- [3] 王丽娟. WC 添加量对 Ni60 基合金粉末喷焊层耐磨耐蚀性的影响[J]. 热加工工艺, 2010, 39(20): 139—141.  
WANG Li-juan. Effects of WC Content on Wearability and Corrosion Resistance of Spray Coating on Ni60 Based Alloy[J]. Hot Working Technology, 2010, 39(20): 139—141.
- [4] 贺定勇, 许静, 马然, 等. 高频感应熔覆 WC 增强 Ni60 合金涂层性能研究[J]. 材料热处理学报, 2008, 29(3): 138—141.  
HE Ding-yong, XU Jing, MA Ran, et al. Properties of WC Reinforced Ni60 Coating Prepared by High Frequency Induction Cladding[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2008, 29(3): 138—141.
- [5] 王欣, 于荣海. 火焰喷涂 Ni60 和 Ni60-WC 涂层的组织结构分析[J]. 热加工工艺, 2009, 38(22): 108—110.  
WANG Xin, YU Rong-hai. Analysis on Microstructure of Ni60 and Ni60-WC Coatings Prepared by Flame Spraying Process[J]. Hot Working Technology, 2009, 38(22): 108—110.
- [6] 李大佛, 李天明, 陈洪俊. 中国电镀金刚石钻头的研究与应用[J]. 探矿工程, 1996(4): 41—43.  
LI Da-fo, LI Tian-ming, CHEN Hong-jun. The Study of Electroplated Diamond Bits and Their Application in China[J]. Exploration Engineering, 1996(4): 41—43.
- [7] 王秦生. 超声波强化电镀过程及改善镀层质量的机理[J]. 工业金刚石, 2003, 136(4): 29—32.  
WANG Qin-sheng. The Mechanism of Supersonic Wave Strengthening Electroplating and Improving Layer Quality[J]. Diamond and Abrasives Engineering, 2003, 136(4): 29—32.
- [8] REACYM M J, E BBESSEN T W, GIBSON J M, et al. Exceptionally High Young's Modulus Observed for Individual Carbon Nanotubes[J]. Appl Phys Lett, 1996, 381(6548): 678—680.
- [9] CHEN W X, TU J P, WANG L Y, et al. Tribological Application of Carbon Nanotubes in a Metal-based Composite Coating and Composites[J]. Carbon, 2003, 45(2): 215—222.
- [10] 高涛, 彭伟, 姚春燕. 金刚石表面处理的应用和发展[J]. 金刚石与磨料磨具工程, 2004, 141(3): 6—9.  
GAO Tao, PENG Wei, YAO Chun-yan. Application and Progress of Diamond Surface Treatment [J]. Diamond and Abrasives Engineering, 2004, 141(3): 6—9.
- [11] 程军胜, 赵杰, 孟辉. 大型钢结构表面热喷涂防腐技术的现状与进展[J]. 公路, 2006(2): 35—39.  
CHENG Jun-sheng, CHAO Jie, MENG Hui. Status and Progress in Thermal Spraying Technique for Corrosion Protection of Large Steel Structures[J]. Highway, 2006(2): 35—39.
- [12] 叶宏, 孙智富, 吴超云. 镁合金表面热喷涂 Al-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/TiO<sub>2</sub> 梯度涂层研究[J]. 武汉理工大学学报, 2006, 28(7): 9—11.  
YE Hong, SUN Zhi-fu, WU Chao-yun. Research on Thermal Spraying Al-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/TiO<sub>2</sub> Gradient Coating on the Surface of Magnesium Alloy[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2006, 28(7): 9—11.
- [13] 王涛, 赵淑金. Mg-8.5Li 合金表面氧-乙炔火焰喷涂铝涂层的研究[J]. 轻合金加工技术, 2010, 38(6): 42—44.  
WANG Tao, ZHAO Shu-jin. Research on Oxygen-acetylene Flame Spray Aluminum Coating on the Surface of Mg-Li Alloy[J]. Light Alloy Fabrication Technology, 2010, 38(6): 42—44.
- [14] 陈志刚, 朱小蓉, 汤小丽, 等. 火焰喷涂重熔 Ni 基 WC 复合涂层的耐磨性能试验研究[J]. 物理学报, 2007, 56(12): 7320—7329.  
CHEN Zhi-gang, ZHU Xiao-rong, TANG Xiao-li, et al. Experimental Study of Wear Resistance of Nickel Based WC Composite Coating Prepared by Flame Spraying and Re-melting[J]. Acta Physica Sinica, 2007, 56(12): 7320—7329.
- [15] 徐滨士, 李长久, 刘世参, 等. 表面工程与热喷涂技术及其发展[J]. 中国表面工程, 1998(1): 3—8.  
XU Bin-shi, LI Chang-jiu, LIU Shi-zhen, et al. Surface Engineering and Thermal Spraying Technology and Their Developments[J]. China Surface Engineering, 1998(1): 3—8.
- [16] 韩付会, 昌霞, 张小彬, 等. 铝合金喷涂 Ni60 涂层的耐磨性研究[J]. 电镀与环保, 2014, 34(2): 32—34.  
HAN Fu-hui, CHANG Xia, ZHANG Xiao-bin, et al. A Research on Wear Resistance of Ni60 Coating Prepared by Flame Spraying on Aluminum Alloy[J]. Electroplating and Pollution Control, 2014, 34(2): 32—34.
- [17] 何继宁, 李香芝, 阎殿然, 等. 等离子涂层摩擦磨损性能与机制讨论[J]. 天津理工学院学报, 2002, 18(4): 66—69.  
HE Ji-ning, LI Xiang-zhi, YAN Dian-ran, et al. Study on the Wear Properties and Mechanics of Coatings by Plasma Spray[J]. Journal of Tianjin Institute of Technology, 2002, 18(4): 66—69.
- [18] 张云凤, 孙志礼, 张思奇, 等. 激光熔覆 Ni 基高温合金粉末涂层磨损机制图[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2010, 26(1): 184—187.  
ZHANG Yun-feng, SUN Zhi-li, ZHANG Si-qi, et al. Wear Mechanism of Ni-based Super-alloy by Laser Cladding[J]. Journal of Shenyang Jianzhu University (Natural Science), 2010, 26(1): 184—187.