

文章编号:1673-9981(2020)04-0288-06

粉末粒径对 Ni60 涂层结构及性能影响的研究

张玉桢, 谢迎春, 况 敏, 陈换涛, 张忠诚, 王 昊

广东省科学院新材料研究所, 广东 广州 510650



摘 要:等离子喷涂 Ni60 涂层因为其优异的耐磨性能和力学性能, 广泛应用于机械装备等领域, 而粉末粒径是影响等离子喷涂涂层结构和性能的主要因素之一. 采用不同粒径分布的 Ni60 粉末, 通过真空等离子体喷涂工艺, 在 A30 不锈钢基体上制备粗化、硬化的镍涂层, 研究粉末粒径与涂层表面粗糙度、显微硬度、结合强度和耐磨性能间的关系. 结果表明: 通过调控粉末粒径从 78 μm 增加到 319 μm , Ni60 涂层表面的粗糙度从 18 μm 增加到 30 μm ; 采用平均粒径为 164 μm 的 Ni60 粉末制备的涂层, 其表面粗糙度达到 $\sim 28 \mu\text{m}$, 经过三周砂纸往复摩擦后粗糙度仍可保持在 20 μm , 显微硬度达到 678 $\text{Hv}_{(300\text{g})}$, 涂层结合强度高达 53 MPa, 综合性能优异.

关键词: Ni60; 粉末粒径; 等离子喷涂; 粗糙度; 耐磨性能; 微观结构

中图分类号: TG156.99

文献标识码: A

复卷辊作为造纸装备的关键机械部件, 对表面粗糙度和耐磨性能要求较高, 长期使用后其表面粗糙度降低, 造成摩擦力下降等问题, 严重影响造纸相关装备的使用寿命, 导致造纸成本升高^[1]. Ni60 作为一种自溶性合金材料, 其粉末润湿性和热喷涂性能良好, 还具有硬度高、耐磨性能好等优点, 在发动机关键零部件及精密武器装备、石油运输容器等领域中有广泛应用^[2-3]. 影响热喷涂涂层质量的因素主要包括喷涂粒子温度和速度以及粒径分布等^[4-6]. 刘雪峰等人^[7]建立多功能超音速火焰喷涂火焰流场的数值模型, 对超音速火焰喷涂粒子的速度特性和温度特性进行数值模拟, 其结果揭示了多功能超音速火焰喷涂粒子的速度和温度的变化规律. 杨晖等人^[8]利用 Spraywatch 热喷涂监控仪对等离子射流的形貌进行观察, 对飞行粒子的速度进行测量, 发现射流脉动是电弧大尺寸分流和卷吸作用造成的, 改善射流脉动可以减小射流中粒子的速度, 提高等离子喷涂的质量. 然而, 对于粉末粒径对热喷涂涂层微

观结构及性能的影响尚缺乏系统研究.

选取市面上三组不同粒径的 Ni60 粉末作为原材料, 通过真空等离子喷涂工艺制备了 Ni60 金属涂层, 对涂层的微观结构、表面粗糙度、显微硬度、耐磨性能及结合强度进行研究, 探究粉末粒径大小对 Ni60 涂层微观结构和性能的影响.

1 试 验

1.1 基体及粉末

试验基体材料选用传输装置常用的 45 号钢, 其尺寸为 80 mm $\times$ 50 mm $\times$ 5 mm. 喷涂粉末选用 1 号、2 号和 3 号 Ni60 粉末 (厂家为四川省成都大光有限公司生产), 牌号分别为 DG. Ni50-100, DG. Ni60-200 和 DG. Ni140-325. 三种 Ni60 粉末的元素成分相同, 主要包括 Ni, Cr, B, Si 等元素, 纯度均大于 99.9%.

三种 Ni60 粉末的微观形貌如图 1 所示. 从图 1

收稿日期: 2020-08-24

作者简介: 张玉桢 (1993-), 女, 黑龙江哈尔滨人, 硕士, 助理工程师, 主要从事利用场发射扫描电镜的功能, 为纳米材料 (喷涂涂层、镀膜膜层) 的研究提供可靠的实验手段. 对不同热喷涂层、真空镀膜进行微区观察, 结合 EDS、EBSD 对高性能涂镀层的微观成分及晶体结构进行标定的研究.

可见,粉末总体呈近球形,球化程度较高,存在少量的不规则粉末,粉末之间没有粘结,流动性较好,有

利于喷涂时粉末均匀送出. 1,2,3 号粉末颗粒的直径依次增大,粉末粒径差距明显.

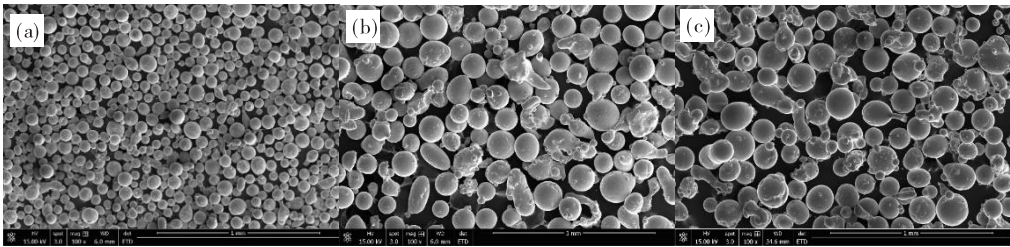


图 1 Ni60 粉末微观形貌
(a) 1 号;(b)2 号;(c)3 号
Fig. 1 The microstructure of Ni60 powder
(a)1#;(b)2#;(c)3#

图 2 为 Ni60 粉末粒径分布. 从图 2 可见,三款粉末的粒径分布总体相对集中. 1 号粉末的 D10, D50 及 D90 的粒径分别为 54,78 和 111 μm ,2 号粉末分别为 116,164 和 250 μm ,3 号粉末分别为 116, 319 和 463 μm . 1,2 号粉末的粒径分布峰宽较窄,粉末尺寸范围小,颗粒大小较均匀,有利于均匀粗化涂层的制备^[9];3 号粉末粒径分布范围较大,10%的粉末颗粒尺寸最大可达 463 μm ,这有利于大粗糙度涂层的制备^[10]. 1,2 及 3 号粉末颗粒的平均粒径分别为 78,164 和 319 μm .

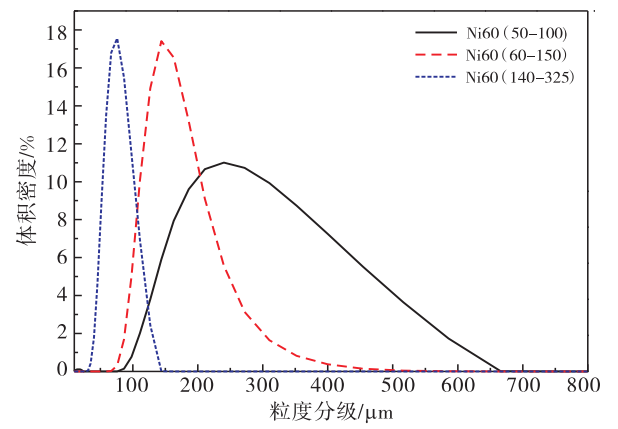


图 2 Ni60 粉末粒径分布图

Fig. 2 The particle size distribution of Ni60 powder

1.2 涂层的制备

利用丙酮对 45 号钢板基体表面进行清洗,去除基体表面污渍. 以刚玉为喷砂材料,使用 AMS908P 喷砂机对 45 号钢板表面进行粗化处理,直至 45 号钢板表面无反光后再用酒精清洗基板表面.

实验采用 MF-P-1500 型高能等离子喷枪系统完成过渡层与粗化层的制备. 为了增强 Ni60 粗化涂层与 45 号钢表面的结合力,首先在 45 号钢表面制备一层 Ni20Cr 过渡层(粉末牌号为 DG. Ni20Cr, 粒径为 25~45 μm),进而以平均粒径 78,164 和 319 μm 的 Ni60 粉末为原材料,在基体表面制备不同粗化尺寸的 Ni60 耐磨涂层. 过渡层和粗化层具体工艺参数如表 1 所示.

1.3 组织及性能表征

采用 FEI Nano 450 型扫描电子显微镜 (SEM)、Leica DMIRM 金相显微镜,对 Ni60 粉末及涂层形貌进行观察;采用 Mastersizer3000 型激光粒径仪,对粉末粒径分布进行表征. 采用 MH-5D 显微维氏硬度计测定涂层的显微硬度,测试施加载荷 300g、持续时间 15 s,取 5 个均匀分布的点进行测试后取平均值. 采用 GP-TS2000M 万能试验机对涂层结合强度进行测试,预先喷涂 0.2~0.25 mm 厚的

表 1 主要喷涂工艺参数

Table 1 The main spraying process parameters

涂层	材料	氢气流量/(L·min ⁻¹)	氩气流量/(L·min ⁻¹)	电流/A	喷涂距离/mm	送粉量/g
过渡层	Ni20	7±1	55±3	550±5A	120±3	40±5g
粗化层	Ni60	9±2	40±3	650±10	110±5	40±4

涂层,用 FM1000 胶和对偶件粘在一起,在 200 ℃ 下的保温箱内保温 3 h,再以 1 mm/min 的速度进行结合强度检测,试验结果选取 3 组平行试样的平均值.采用 NUS-IS03 轮式磨损试验机测试涂层耐磨性能,砂纸选择 1200 型号,试验片每往复一次,推动试验片下方的磨损轮带动砂纸旋转 0.9°,400 次往复后砂纸旋转一周,测试三周期内涂层耐磨性能,最后结合 DEKTAK XT 三维表面轮廓仪对三周期磨损过程中涂层表面粗糙度进行表征,选区面积 10000 μm×10000 μm,面扫精度为 200 μm/道,取区域粗糙度平均值,表征摩擦过程中涂层表面粗糙度的变化.

2 结果及分析

2.1 涂层微观形貌分析

2.1.1 表面形貌

图 3 为不同尺寸 Ni60 粉末制备的耐磨粗化涂

层表面形貌.从图 3 可见:涂层组织相对致密,粉末融化程度较高,但不同粒径粉末制备的粗化涂层均存在未完全融化颗粒的沉积;在相同的喷涂工艺条件下,不同尺寸粉末制备的 Ni60 粗化涂层,其表面未熔化颗粒的尺寸大小也随着粉末尺寸的增大而增大.这是由于热喷涂过程中半融化颗粒在粗化涂层表面形成大量凸起,直接增加了 Ni60 涂层的表面粗糙程度^[11].

进一步对涂层表面进行粗糙度测试,结果如图 4 所示.从图 4 可见,随着粉末粒径的增加,表面粗糙度从 18.7 μm 增加到 30.1 μm,其中 2 号粉末(粒径为 164 μm)所制备的涂层表面粗糙度介于上述范围内,为 28.3 μm.测试结果与上述表面形貌分析的规律一致.分析其原因,在相同的工艺条件下,随着粉末粒径的增大,涂层表面沉积的半融化颗粒尺寸也相应增大,直接增加了涂层表面高峰和低谷的尺寸,导致 Ni60 粗化涂层表面的粗糙度随着粉末尺寸的增大而升高^[12-13].

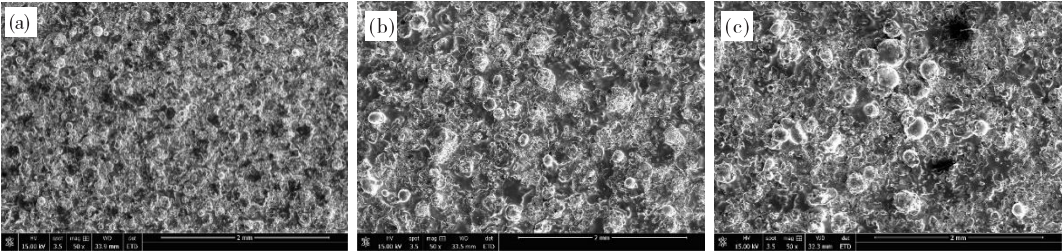


图 3 涂层表面显微形貌
(a) 1 号粉末;(b) 2 号粉末;(c) 3 号粉末
Fig. 3 The microstructure of coating surface
(a) powder 1#;(b) powder 2#;(c) powder 3#

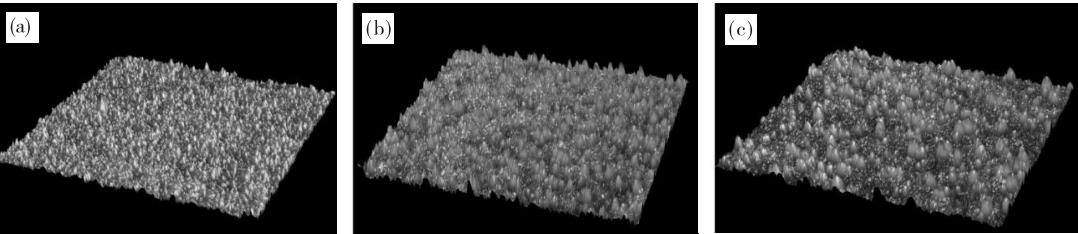


图 4 涂层表面 3D 轮廓
(a)1 号粉末(粒径为 78 μm);(b) 2 号粉末(粒径为 164 μm);(c) 3 号粉末(粒径为 319 μm)
Fig. 4 3D profile of coating surface
(a) powder 1# ($D_{50}=78\text{ }\mu\text{m}$); (b) powder 2# ($D_{50}=164\text{ }\mu\text{m}$); (a) powder 3# ($D_{50}=319\text{ }\mu\text{m}$)

2.1.2 截面形貌

粗化涂层截面形貌如图 5 所示.从图 5 可见:涂层与基体界面结合处存在不同程度的分离,Ni60 粗

化层与过渡层间结合良好,大颗粒 Ni60 呈半融化沉积状态,形成了明显的山峰状形貌,且随着 Ni60 粉末原始尺寸的增大,粗化层表面山峰状的凸起也愈

发明显,这有效地增大了耐磨涂层的表面粗糙度;涂层内部均存在孔隙,这是因为喷涂过程中粒子的相互搭接堆积,融化粒子体积收缩,以及喷涂时熔融颗

粒中的气体在涂层冷却至室温后析出,从而导致涂层中出现孔隙^[14].

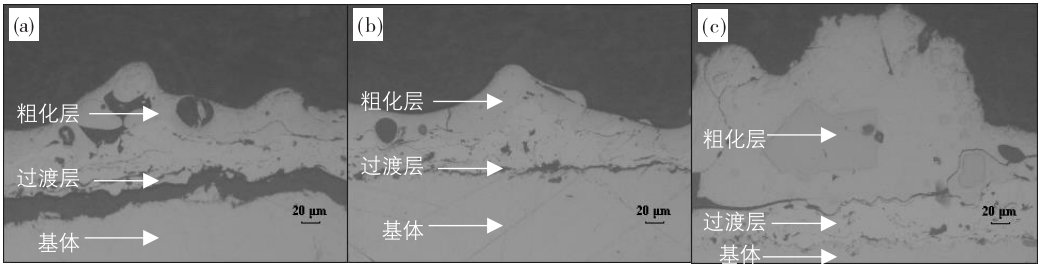


图 5 Ni60 粗化涂层截面形貌
(a)1 号粉末;(b) 2 号粉末;(c) 3 号粉末
Fig. 5 The cross section morphology of Ni60 coarsening coating
(a)powder 1#;(b)powder 2#;(c)powder 3#

2.2 涂层显微硬度

不同粉末粒径制备的涂层显微硬度值如图 6 所示.从图 6 可见,涂层显微硬度随粉末尺寸的增大而下降,其中 1 号粉末所制备的涂层硬度平均值为 695 $Hv_{(300\text{ g})}$,2 号粉末所制备的涂层平均显微硬度为 678 $Hv_{(300\text{ g})}$,3 号粉末所制备的涂层平均显微硬度为 591 $Hv_{(300\text{ g})}$.这主要是因为粉末粒径增大,Ni60 颗粒熔化堆积成涂层时孔隙增多,孔隙率增大,进而造成了涂层的硬度下降.而 3 号粉末所制备的涂层局部存在较大孔隙,其显微硬度相对于 1 号和 2 号粉末所制备的涂层明显下降.

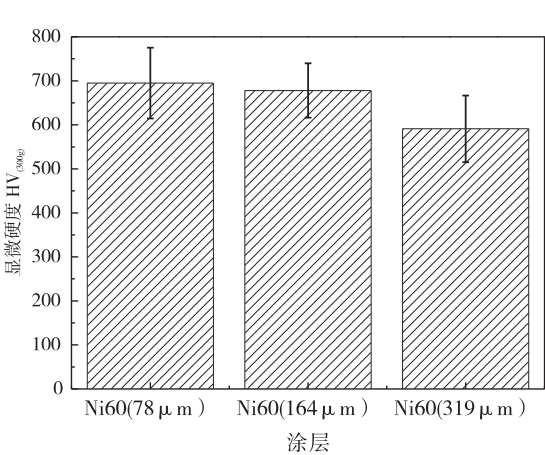


图 6 涂层显微硬度
Fig. 6 The microhardness of coating

Ni60 粉末在 45 号钢表面制备的粗化涂层与界面存在明显分离.然而 GP-TS2000M 万能试验机的测试结果显示,不同粒径尺寸的 Ni60 粉末制备的粗化涂层,其结合强度均超过 30 MPa,具体结果如图 7 所示.从图 7 可见,以 1 号粉末制备的粗化涂层结合强度为 44 MPa,2 号粉末制备的涂层结合强度高达 53 MPa,而以平均粒径达到 319 μm 的 3 号粉末制备的粗化涂层的平均结合强度也达到了 36 MPa.以上拉伸结果表明,利用等离子喷涂制备的 Ni60 粗化涂层,与基体界面结合可靠,能满足一般传输装备部件表面粗化涂层的制备需求.

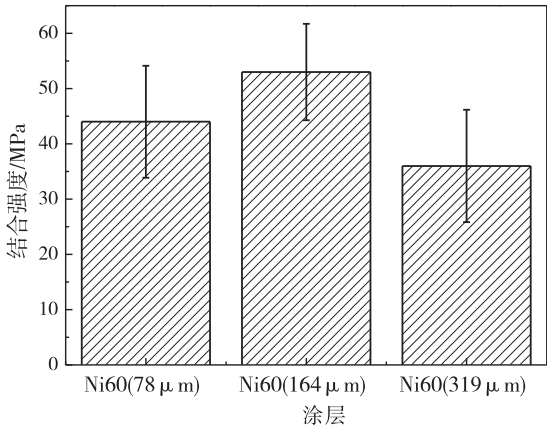


图 7 涂层结合强度
Fig. 7 The coating bonding strength

2.3 涂层结合强度

由 Ni60 粗化涂层的截面形貌可知,利用大尺寸

2.4 涂层耐磨性能

测试砂纸往复磨擦过程中表面粗糙度的变化,结果列于表 2.由表 2 可知:1 号粉末所制备的涂层

经砂纸往复三周期摩擦后,其一周期的粗糙度为 15.5 μm 、二周期的为 15.3 μm 、三周期的为 12.4 μm ,总粗糙度变化量为 6.2 μm ;粒径为 164 μm 的 2 号粉末所制备的涂层,其一周期摩擦后的粗糙度为 27.0 μm 、二周期的为 24.9 μm 、三周期的为 20.1 μm ,总粗糙度变化量为 9.5 μm ;而粒径为 319 μm 的 3 号粉末的涂层,其一周期摩擦后的粗糙度为 23.5 μm 、二周期的为 20.3 μm 、三周期的为 19.9 μm ,总粗糙度变化量为 10.0 μm . 经过三个周期的摩擦后,1 号、2 号及 3 号粉末所制备的涂层的粗糙度相对于喷涂态涂层分别为 66.4%,70.9% 和 66.1%,它们粗糙度基本相当.

表 2 磨损过程中涂层表面粗糙度
Table 2 Surface roughness of the coating during wear process

组别	粗糙度/ μm			
	喷涂态	1 周期	2 周期	3 周期
1 号	18.7	15.5	15.3	12.4
2 号	28.3	27.0	24.9	20.1
3 号	30.1	23.5	20.3	19.9

3 结 论

采用等离子喷涂技术制备了 Ni60 金属涂层,重点研究了 Ni60 粉末粒径分布对涂层显微结构和综合性能的影响. 研究发现,随着粉末平均粒径从 78 μm 增加至 319 μm ,制备的热喷涂涂层表面粗糙度从 18 μm 增加至 30 μm ,实现了等离子喷涂 Ni60 涂层表面粗糙度大范围可控,满足了我国造纸企业对复卷辊表面的粗化需求. 其中粒径为 164 μm 的 Ni60 粉末制备的涂层表面粗糙度为 28 μm 、显微硬度 670 $\text{HV}_{(300\text{g})}$ 、涂层结合强度 54 MPa,往复摩擦过程中耐磨性能优异,三周期摩擦后粗糙度仍可稳定保持在 20 μm 以上,可大幅度提高复卷辊的使用寿命,具有较高的市场应用价值.

参考文献:

[1] 余章书. 造纸复卷机结构的技术改进[J]. 湖南造纸, 2015(4):33-37.

[2] 刘大娇. Ni60A-Cr₂O₃ 超音速等离子喷涂涂层组织与性能的研究[D]. 兰州:兰州理工大学,2017.

[3] 吴向清,胡慧玲. 等离子喷涂镍基合金涂层的组织与耐腐蚀性[J]. 中国表面工程,2011, 2(5):13-17.

[4] 陆在平,田玉亮,朱成才,等. 高频感应重熔 Ni60AA 合金粉末涂层的研究[J]. 热喷涂技术, 2012, 4(1): 44-46.

[5] 齐蕴思. 等离子喷涂对铜基表面 Ni60 涂层性能的影响[J]. 内燃机与配件,2018(10):123-124.

[6] 杨秀从,董天顺,李国禄,等. 超声速等离子喷涂 Ni60A 涂层的滚动接触疲劳寿命[J]. 机械工程学报,2016,52 (20):38-43.

[7] 刘雪峰,刘春和,张仕念,等. 多功能超音速火焰喷涂粒子特性的数值模拟[J]. 表面技术, 2007(3):25-27.

[8] 杨晖,李根. 等离子喷涂射流对飞行粒子的影响[J]. 焊接技术,2008,37(5):1-4.

[9] 王明胜,孙东平. 浸锌-热浸锌沉没辊专用喷涂粉末的制备及涂层性能[J]. 粉末冶金材料科学与工程,2010,15 (6):630-634.

[10] 陈国安,颜永根,杨王玥,等. 粉末的物理性能对热喷涂涂层的影响[J]. 北京:北京科技大学学报,2005(1): 55-60.

[11] 王灿明,孙宏飞. 粉末粒径对等离子喷涂 Al₂O₃-13% TiO₂ 陶瓷涂层组织结构及性能的影响[J]. 材料保护, 2011, 44(2):56-58.

[12] 迟长云. 表面粗糙度对传动轴静电粉末喷涂涂层性能的影响[J]. 腐蚀与防护,2019,40(5):379-382.

[13] KIM H J, KIM J J, LEE J K. Enhancement of the surface roughness by powder spray coating on zirconia substrate[J]. Journal of Nanoence and Nanotechnology, 2019 (17):11-17.

[14] 马光,樊自拴,孙冬柏,等. AC-HVAF 喷涂 Ni60/WC 复合涂层微观组织及冲刷磨损性能研究[J]. 有色金属:冶炼部分,2006(S1):19-22.

Effect of powder size on structure and properties of Ni60 coating

ZHANG Yuhui, XIE Yingchun, KUANG Min, ZHANG Zhongcheng, WANG Hao

Institute of New Materials, Guangdong Academy of Sciences, Guangzhou 510650, China

Abstract: Plasma sprayed Ni60 coating is widely used in the field of mechanical equipment because of its excellent wear resistance and mechanical properties. Powder particle size is one of the main factors affecting the structure and performance of the coating. In this study, Ni60 powder with different particle size distribution was used to prepare coarsened and hardened nickel coating on A30 stainless steel substrate by vacuum plasma spraying. The relationship between the particle size and the surface roughness, microhardness, bonding strength, wear resistance of the coating was studied. The results show that the surface roughness of the coating increases from $\sim 18\ \mu\text{m}$ to $\sim 30\ \mu\text{m}$ by adjusting the particle size from $78\ \mu\text{m}$ to $319\ \mu\text{m}$. The surface roughness of the coating prepared by Ni60($164\ \mu\text{m}$) powder reaches $28\ \mu\text{m}$. The roughness can still be maintained at $20\ \mu\text{m}$ after three weeks of reciprocating friction. The microhardness reaches $678\ \text{HV}_{(300)}$. The bonding strength is as high as $53\ \text{MPa}$. The comprehensive performance is excellent.

Key words: Ni60; powder size; APS; roughness; wear resistance; microstructure