

基于 CBN 砂轮的超音速火焰喷涂涂层磨削性能研究

Research on the Grinding Performance of HVOF Coating Based on CBN Grinding Wheel

中航工业西安飞行自动控制研究所 徐瑞 杨强强 王文汉 王伟 宋永伟
中航工业北京航空制造工程研究所 杨伟华

[摘要] 研究了超音速火焰喷涂 WC-Co 镀层基于 CBN 砂轮的低成本、高效率磨削技术,通过全因子正交试验,分析磨削过程中砂轮转速(s)、进给量(a_p)、走刀速度(v)对磨削后表面粗糙度的独立影响以及交互影响规律,建立各加工要素与表面质量之间的数学模型,得出了适合 WC-Co 涂层的最佳磨削工艺参数。

关键词: 超音速火焰喷涂 精密磨削 数学模型 工艺参数

[ABSTRACT] Research on the low cost and high efficiency Grinding technology of WC-Co Coating Based on CBN Grinding Wheel. Analysis on the independent effects and interactions of grinding parameters such as speed of grinding wheel (s), feed rate (a_p) and the cutting speed (v) on the surface roughness after grinding. The mathematic model of the Processing parameters with surface quality is structured. The optimum parameters of grinding process for WC-coating are obtained.

Keywords: High-Velocity Oxy-Fuel Precision grinding Mathematic model Process parameters

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2015.19.022

超音速火焰喷涂技术(也称高速火焰喷涂, HVOF 或 HVOF)是近年来出现的一种表面强化技术,主要用于在零件表面制造耐磨涂层以提高零部件的使用寿命。该技术的出现很好地替代镀铬强化,避免对环境的污染,实现零件绿色制造。随着航空技术的飞速发展,超音速火焰喷涂技术受到研究机构的持续关注^[1-2]。

WC10Co4Cr 是一种常用的涂层材料,其涂层表面粗糙度小,涂层致密(孔隙率小于 1%),结合强度高(60~70MPa),由于涂层的优越性能使得其光整加工阶段一般采用金刚石砂轮磨削。但因金刚石砂轮成本高、不易修磨和找正,使得涂层零件精加工非常困难。鉴于此问题,本文采用 CBN 砂轮实现超音速火焰喷涂涂层低成本、高效率精密光整加工,通过理论分析与试验验证,详细论述了磨削过程中砂轮转速(s)、进给量(a_p)、走刀速度(v)对磨削后表面粗糙度的独立影响以及交互影响

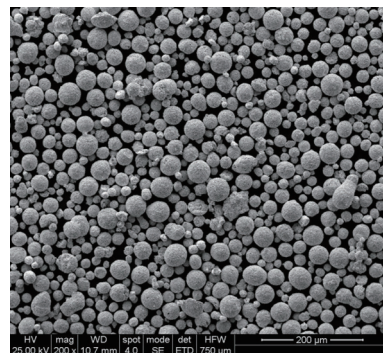
规律,拟合砂轮转速(s)、进给量(a_p)、走刀速度(v)与涂层磨削后表面质量数学模型,得出了适合 WC10Co4Cr 涂层的最佳磨削工艺参数^[3-4]。

1 WC-Co 超音速火焰喷涂样件制备

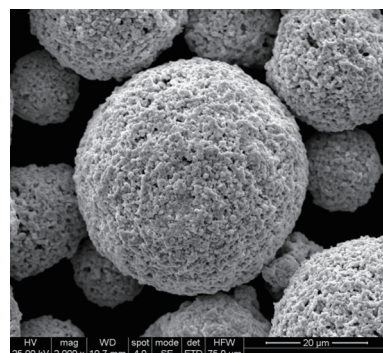
15-5PH 不锈钢以其高强度、高弹性模量、刚性模量等优异性能在航空领域广泛应用,多用于精密偶件零件的制造,本试验采用 15-5PH 不锈钢,在其表面通过超音速火焰喷涂技术喷涂 WC-Co 涂层,研究该类不锈钢材料喷涂后精密光整加工性能。

1.1 WC10Co4Cr 粉末

选用 Sulzer Metco (瑞士)公司的 WoKa3652 (86%WC+10%Co+4%Cr, 15~45 μ m, 团聚烧结粉末),粉末形貌如图 1 所示。



(a) 低倍



(b) 高倍

图1 WC10Co4Cr粉末形貌

Fig.1 Powder morphology of WC10Co4Cr

从图中可以看出 WC 粉末颗粒粒度均匀,团聚烧结球化效果好,从而保证了良好的工艺性。

1.2 超音速火焰喷涂原理

本试验采用设备为 Sulzer Metco 公司的 EvoCoat 燃油型超音速火焰喷涂系统。其工艺原理如图 2 所示。

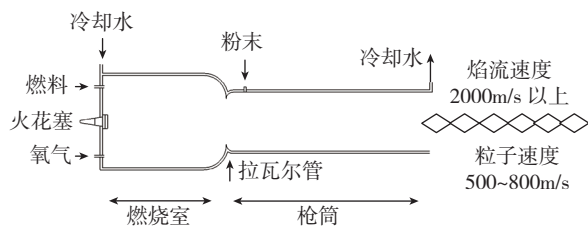


图2 超音速火焰喷涂工作原理
Fig.2 Working principle of HVOF

超音速火焰喷涂技术是为了降低材料的氧化与烧损,提高喷涂粒子速度而出现的一种热喷涂技术。通常采用可燃气体或雾化煤油与氧气在燃烧室内燃烧,通过拉瓦尔管压缩、扩张加速,形成温度 2600℃ 以上、速度高达 2000m/s 以上的高速焰流;粉末粒子被送入焰流中,加热、加速到 500~800m/s 以上,撞击基体形成涂层。喷涂后的涂层表面粗糙度小,涂层致密(孔隙率 >1%)、结合强度高(60~70MPa),适合喷涂金属、金属陶瓷和合金等,尤其是喷涂碳化物具有明显优势。

通过该技术以某型号活塞零件为试验对象,制备样件如图 3 所示。



图3 喷涂后样件表面
Fig.3 The sample surface After spraying

2 磨削试验平台搭建及方案设计

WC-Co 火焰喷涂涂层致密在其精加工阶段多采用金刚石砂轮进行磨削,但金刚石砂轮自身成本以昂贵、修磨工艺复杂、修磨时间长,这些不足给火焰喷涂涂层的光整加工带来很大难度。为此,本文提出 WC-Co 涂层的 CBN 砂轮磨削工艺,实现涂层的高效、低成本加工。

2.1 试验设备与砂轮的选择

本文选用斯图特 S21 万能外圆磨床进行磨削试验研究,该机床床身由人造大理石铸造而成,具有良好的

吸振性及热稳定性,磨削过程中线速度最高可达 50m/s,采用恒定线速度磨削,乳化液冷却。

试验选用陶瓷结合剂 CBN 砂轮,粒度号为 200,砂轮直径 400mm,宽度 30mm。采用金刚石滚轮修整器对砂轮进行修整,修整时,砂轮线速度为 4.5m/s,滚轮线速度为 0.5m/s,工作台轴向速度为 70mm/min。整形初期,滚轮每径向进给 2μm,工作台左右循环运动 10 次,运行 20 周期左右;整形后期,滚轮每径向进给 1μm,工作台运动 3 次,运行 10 周期左右,直至砂轮外圆跳动不大于 10μm;最后用 200# 氧化铝砂条对砂轮进行修锐。在每组磨削试验前,采用用砂条对砂轮进行修锐,以保证磨削砂轮状态一致。

2.2 试验方案设计与表面质量评价体系

图 4 中黄色表面为被磨削表面。利用 Minitab 软件对磨削过程中砂轮转速、进给量、走刀速度三要素设计全因子 DOE 试验方案,如表 1 所示,按照试验顺序依次进行试验。

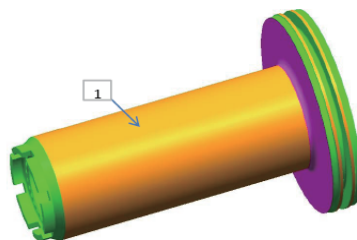


图4 磨削部位示意图
Fig.4 Sketch of grinding position

表1 全因子正交试验方案

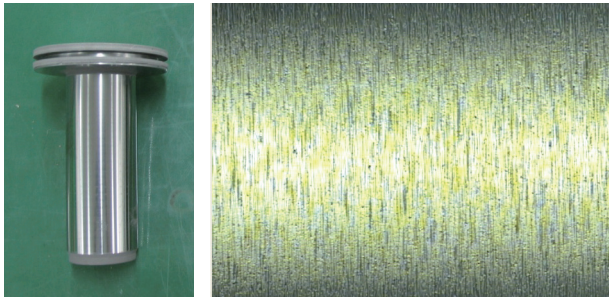
试验顺序	参数		
	砂轮转速 $s/(r \cdot \min^{-1})$	进给量 a_v/mm	走刀速度 $v/(\text{mm} \cdot \min^{-1})$
1	1678	0.002	200
2	1919	0.002	200
3	1678	0.003	200
4	1919	0.003	200
5	1678	0.002	400
6	1919	0.002	400
7	1678	0.003	400
8	1919	0.003	400

磨削后零件表面质量是评价光整加工质量的重要指标。本试验采用德国泰勒粗糙度仪,在工件外圆面测量垂直于磨削方向的表面粗糙度 R_a ,取样长度为 10mm,对外圆表面粗糙度测量 3 次,取其平均值以评价

磨削后表面质量的优劣。

3 试验结果及分析

磨削后零件如图 5 所示, 5 (a) 为 CBN 砂轮磨削后的宏观照片, 可以看出磨削后的表面质量明显提升,



(a) 宏观照片 (b) 显微照片

图5 CBN砂轮磨削后的零件

Fig.5 Part of CBN grinding wheel

图 5 (b) 为磨削部位局部放大 200 倍后的显微照片。

借助 Minitab 分析软件, 以磨削后表面粗糙度的平均值作为光整加工表面质量的评价指标, 分析磨削过程中各工艺因素对磨削质量的影响规律, 拟合砂轮转速 (s)、进给量 (a_p)、走刀速度 (v) 3 个主效应、3 个双因子交互作用以及 1 个三因子交互作用的数学模型, 精确分析工艺参数对磨削质量的影响。

3.1 工艺参数对磨削质量的影响规律

3.1.1 磨削质量的关键影响因素

从图 6 反映加工参数对磨削表面质量影响的显著性效应可以看出走刀速度、砂轮转速与走刀速度的交互影响对磨削后表面质量的影响显著。在 WC-Co 涂层的磨削过程中, 当转速处于 1678~1919r/min 区间时, 走刀速度对最终表面质量影响最大, 这是由于走刀速度降低可使单位时间磨削区域内的磨粒数增加, 单颗磨粒的切削量减小, 从而使零件表面粗糙度明显改善; 砂轮转速与走刀速度之间的交互影响次之, 在磨削过程中砂轮转速与走刀速度存在一定的匹配关系, 只有这 2 个工艺参数相适应才能使零件的表面质量达到最高。

3.1.2 关键工艺参数对磨削质量的独立影响

通过各工艺参数显著性效应分析, 可以确定砂轮转速与走刀速度 2 个工艺参数对磨削后表面质量的影响最大。图 7 为表面质量的主效应图, 分析显著因素对磨削表面质量的独立影响规律, 从图中可看出, 走刀速度对表面粗糙影响更为显著。当走刀速度由 400mm/min 变化为 200mm/min, 零件表面粗糙度可以提升 21%, 而砂轮转速对表面质量的独立影响较小。

3.1.3 关键工艺参数对磨削质量的交互影响

图 8 为关键工艺参数之间的交互影响情况。从图

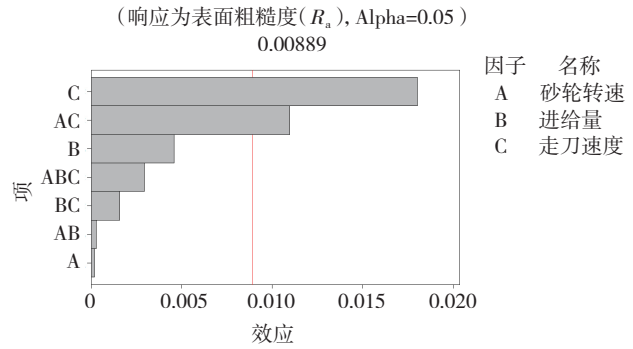


图6 磨削质量影响因素效应的博拉图

Fig.6 Pareto diagram of the factors affecting the quality of grinding

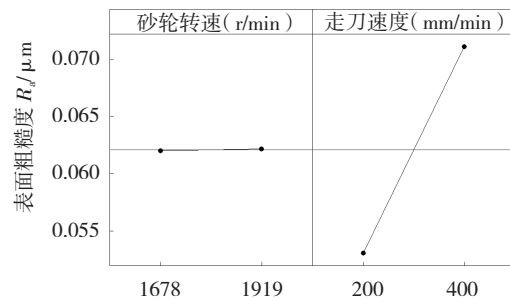


图7 磨削质量主效应图

Fig.7 Master effect diagram of grinding quality

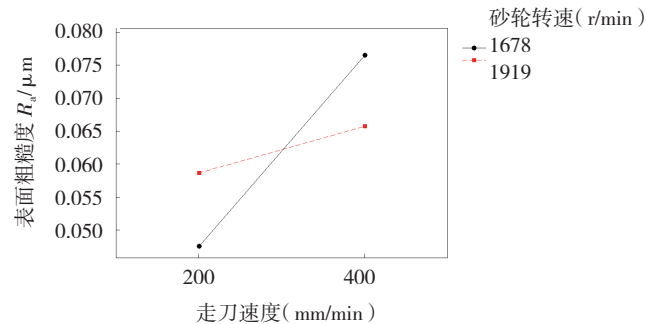


图8 磨削质量影响因素交互作用图

Fig.8 Interaction diagram of grinding quality influence factors

8 可看出在所选的参数范围内砂轮的转速与走刀速度之间存在交互影响, 走刀速度为 200mm/min 时, 零件表面质量随着砂轮转速地提高而增加; 当走刀速度为 400mm/min 时零件表面质量随着砂轮转速的提高而降低, 这是因为走刀速度与砂轮转速之间存在匹配关系, 如果砂轮转速与走刀速度之间不匹配, 就会造成零件表面质量降低。

3.2 磨削后涂层表面质量模型

通过拟合各影响因素与表面粗糙度的关系, 得出表面粗糙度与显著影响因素之间的数学模型为 $Y = -0.211964 + 0.000137344 * s + 0.000909151 * v - 4.55394E - 07 * s * v$, 其中 s 为砂轮转速, v 为走刀速度。

图9是表面粗糙度与走刀速度、砂轮转速曲面图,当走刀速度为200mm/min、砂轮转速为1700r/min时,涂层磨削后的表面质量最高。

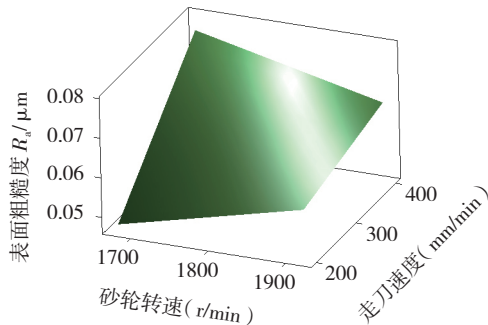


图9 表面粗糙度与影响因素曲面图
Fig.9 Surfaces diagram of Surface roughness and influence factors

4 结论

(1)在WC-Co镀层磨削过程中,走刀速度、砂轮转速与走刀速度的交互影响对磨削后表面质量的影响最为显著;

(2)在显著影响因素中,当转速处于1678~1919r/min区间时,走刀速度对表面粗糙影响较砂轮转速更为明显,当走刀速度由400mm/min变为200mm/min,零件表面粗糙度可提升21%,而砂轮转速对表面质量的独立影响较小。

(3)走刀速度与砂轮转速之间存在匹配关系,如果砂轮转速与走刀速度之间不匹配,就会造成零件表面质量的降低。

(4)通过拟合各影响因素与表面粗糙度的关系,得出表面粗糙度与显著影响因素之间的数学模型 $Y=0.211964+0.000137344*s+0.000909151*v-4.55394E-07*s*v$ 。可以看出,当走刀速度为200mm/min,砂轮转速为1700r/min时,涂层磨削后的表面质量最高。

参考文献

- [1] Wielage B, Wank A, Pokhmurska H, et al. Development and trends in HVOF spraying technology. *Surface&Coating Technology*, 2006(201): 2032-2037.
- [2] Murthy J K N, Rao D S, Venkataraman B. Effect of grinding on the erosion behavior of a WC-Co-Cr coating deposited by HVOF and detonation gun spray processes. *Wear*, 2001(249): 592-600.
- [3] 易军,盛晓敏,郭力. 超音速火焰喷涂WC涂层超高速磨削试验研究. *制造技术与机床*, 2012(6):49-52.
- [4] 高峰,刘富荣,任先京. 超音速火焰喷涂CrC-25%NiCr涂层的滑动摩擦磨损性能研究. *有色金属*, 2008(12):98-101.

(责编 古京)

(上接第21页)

合加工工艺,通过对比复合工艺与传统工艺加工试件的亚表面损伤情况,结果表明复合加工工艺对亚表面损伤抑制效果非常明显,实验表明了提出的复合加工工艺可以实现超低亚表面损伤超光滑表面加工。

参考文献

- [1] Camp D W, Kozlowski M R, Sheehan L M, et al. Subsurface damage and polishing compound affect the 355-nm laser damage threshold of fused silica surfaces. *Proceedings of SPIE*, 1998, 3244: 356-364.
- [2] Tian Ailing, Wang Chunhui, Jiang Zhuangde, et al. Study on key algorithm in scanning white-light interferometry. *Proc. of SPIE*, 2008, 7155:71552N1-71552N8.
- [3] BUIJSM, HOUTENK K V. Three-body abrasion of brittle materials as studied by lapping. *Wear*, 1993(166):237-245.
- [4] 刘德福,段吉安,钟掘. 光纤连接器端面研磨装置运动分析. *光学精密工程*, 2006, 14(2):159-166.
- [5] FINE K R, GARBE R, GIP T, et al. Non-destructive, real time direct measurement of subsurface damage. *SPIE*, 2005, 5799: 105-110.
- [6] Feit M D, Rubenchik A M. Influence of subsurface cracks on laser induced surface damage. *Proceedings of SPIE*, 2004, 5273: 264-272.
- [7] Kamimura T, Akamatsu S, Yamamoto M, et al. Enhancement of surface damage resistance by removing a subsurface damage in fused silica. *Proceedings of SPIE*, 2004, 5273:244-249.
- [8] Stolz C J, Menapace J A, Schaffers K I, et al. Laser damage initiation and growth of antireflection coated S-FAP crystal surfaces prepared by pitch lap and magnetorheological finishing. *Proceedings of SPIE*, 2005, 5991: 449-455.
- [9] Mansurov G M, Mamedov R K, Sudarushkin A S, et al. Study of the nature of a polished quartz-glass surface by ellipsometric and Spectroscopic Methods. *Optical Spectroscopy*, 1982, 52(5): 509-513.
- [10] 王卓,吴宇列,戴一帆,等. 光学材料研磨亚表面损伤的快速检测及其影响规律. *光学精密工程*, 2008, 16(1):16-21.
- [11] 石峰,戴一帆,彭小强,等. 磁流变抛光消除磨削亚表面损伤层新工艺. *光学精密工程*, 2010, 18(1):162-167.
- [12] 李圣怡,王卓,吴宇列,等. 基于研磨加工参数的亚表面损伤预测理论和试验研究. *机械工程学报*, 2009, 45(2):192-198.
- [13] SHEN J, LIU SH H, YI K, et al. Subsurface damage in optical substrates. *Optik*, 2005, 116(6):288-294.
- [14] PAPEMORY S, SCHMID A W. Laser-introduced surface damage of optical materials: Absorption sources, initiation, growth, and mitigation. *Laser-Induced Damage in Optical Materials*. Bellingham, USA:SPIE, 2008, 7132:7132J1-7132J28.
- [15] 张峰,余景池,张学军,等. 磁流变抛光技术. *光学精密工程*, 1999, 7(5):1-8.
- [16] RANDI J A, LAMBROPOULOS J C, JACOBS S D. Subsurface damage in some single crystalline optical materials. *Applied Optics*, 2005, 44(12): 2241-2249.
- [17] 高宏刚. 亚纳米级超光滑表面制造的关键技术研究[D]. 长春:中国科学院长春光学精密机械研究所, 1999.

(责编 宁军)