

# 热喷涂新技术在发动机减摩性能方面的应用和研究

王刚, 焦孟旺, 李贺, 贡泽飞, 魏元生, 杨红新

(长城汽车股份有限公司技术中心, 河北省汽车工程技术研究中心, 河北 保定 071000)

**摘要:** **目的** 研究热喷涂和喷丸新型复合技术涂层的组织结构和摩擦学性能。**方法** 在发动机主要摩擦副零件表面制备涂层, 对其表面和横截面组织进行金相和 SEM 观察分析, 对处理前后零件进行尺寸、硬度、摩擦系数及发动机台架试验测试分析。**结果** 零件表面形貌得到明显改善, 但涂层膜状组织不明显, 新技术对零件尺寸和硬度影响不大, 涂层使零件表面动摩擦系数略有增加, 由 0.142 增加至 0.152, 但其波动性变小, 沉积涂层导致发动机的动力性和经济性变差。**结论** 通过对复合工艺参数的调整, 将制得兼具热喷涂与喷丸两种工艺优势的涂层, 则热喷涂新技术将不失为一种优良的表面处理工艺。

**关键词:** 热喷涂和喷丸; 复合工艺; 表面形貌; 动摩擦系数

**中图分类号:** TH117.1; TG174.442

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1001-3660(2014)01-0103-06

## Application and Research of New Thermal Spraying Technology in Engine Friction-reduction Performance

WANG Gang, JIAO Meng-wang, LI He, GONG Ze-fei, WEI Yuan-sheng, YANG Hong-xin

(Technology Center of Great Wall Motor Company Limited, Automobile Engineering and  
Technology Research Center of Hebei Province, Baoding 071000, China)

**ABSTRACT:** **Objective** To study the structure and tribological behavior of the new coating which was a complex of thermal spraying and shot peening. **Methods** The new coating was prepared on the surface of friction pair. To observe the structure of surface and cross section, the metallographic analysis and SEM were conducted. A series of tests were carried out on the size, hardness, friction coefficient and engine bench for the original and new parts. **Results** The surface morphology was significantly improved, but as for the membrane microstructure, the improvement was not obvious. The results were as follows: the coating had weak effect on the size and hardness of the parts, the kinetic friction coefficient increased slightly from 0.142 to 0.152 and had better stability, the engine performance and fuel efficiency declined. **Conclusion** Combining the property of thermal spraying and shot peening, competitive coating could be obtained through parameter adjustments on the compound process and the new coating will be a promising technology for surface treatment.

**KEY WORDS:** thermal spraying and shot peening; composite technology; surface topography; kinetic friction coefficient

热喷涂技术是利用热源将喷涂材料加热到熔融和半熔融状态,用高速气流将其吹成微小颗粒,以一定速度喷射到被涂敷的基体表面,形成性能优于原基体材料的覆盖层<sup>[1-3]</sup>,使工件具有更加优异的表面性

收稿日期: 2013-09-13; 修订日期: 2013-09-28

Received: 2013-09-13; Revised: 2013-09-28

作者简介: 王刚(1983—),男,硕士,工程师,主要研究方向为发动机减摩技术的开发应用。

**Biography:** WANG Gang(1983—), Male, Master, Engineer, Research focus: development and application of friction reduction techniques for engines.

能。热喷涂技术受喷涂温度、熔滴对基体表面的冲击速度及形成涂层的材料性能等3个要素的影响,使热喷涂技术具有多功能叠加效果,其可赋予零件耐磨、减摩、抗高温、抗氧化、隔热、绝缘、防腐等性能。随着工业和科技的发展,热喷涂技术以其设备轻便、工艺灵活、操作程序简便、可快速修复、较强的适应性、涂层厚度可控制等优点<sup>[4-6]</sup>,被广泛应用于国防、宇航、机械、冶金、能源、交通、石油化工和电力等行业<sup>[3,7-9]</sup>。

目前,对于热喷涂技术的研究中,冯旭东等<sup>[3]</sup>针对热喷涂 Ni60 和 Ni25 涂层进行了材料性能检测,分析得出热喷涂涂层在改善零件性能方面的优良特性。周克崧<sup>[10]</sup>论述了热喷涂技术的发展,并着重介绍高速火焰喷涂涂层的性能优势。陈汝广等<sup>[11]</sup>研究了一种免喷砂热喷涂用涂料,并对相关性能进行检测分析。张剑等<sup>[12]</sup>研究了轴套热喷涂强化层的耐磨性能。郭双全等<sup>[13]</sup>研究了未来航空发动机热障涂层材料及制备技术。上述工作主要针对常规热喷涂技术中喷涂温度、冲击速度及涂层材料性能等3个主导要素进行研究,针对涂层对零件的表面摩擦系数、形貌影响研究较少,也不涉及热喷涂工艺对发动机的节能减排性能的检测论证。

文中研究的热喷涂新技术是热喷涂与喷丸复合工艺。在高温高压的条件下,以表面粘附润滑物质的钢丸作为载体对零件进行撞击,同时在零件表面沉积涂层的新工艺。该新技术同时兼具热喷涂技术和喷丸强化工艺的性能特点,在增加零件表面残余压应力的同时,改善摩擦副接触面的储油效果,增强零件表面的油膜涂布能力,进而提高零件的减摩润滑性能。

## 1 试验内容与方法

针对热喷涂新技术的工艺特点和性能趋势,文中以新技术的性能验证与分析为目的,评价其在汽车发动机减摩耐磨方面的应用价值与前景。以发动机的主要摩擦副零件为载体,涉及活塞、气门挺柱、曲轴、活塞销等4种零件,通过对比分析处理前后零件在零件尺寸、表面粗糙度、表面摩擦系数方面的变化,分析该工艺对零件表面状态的影响。通过对处理前后材料的硬度和金相组织对比分析,评价该技术对材料性能的影响。通过对发动机摩擦功的台架检测,分析新工艺对发动机动力性及经济性的影响,并对摩擦副零件的摩擦机理进行分析讨论。

## 2 热喷涂新技术的减摩性能分析

### 2.1 材料性能分析

#### 2.1.1 新工艺对零件表面状态的影响

选取气门挺柱作为研究对象,对零件在处理前后的表面形貌、涂层成分、涂层厚度进行检测,分析讨论该种减摩涂层技术的基本性能。气门挺柱顶面处理前后形貌的照片如图1所示。

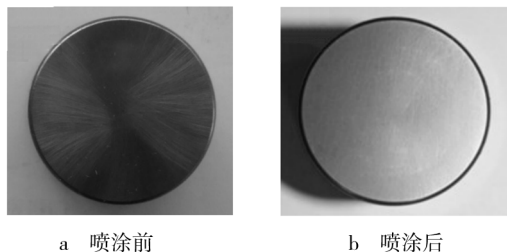
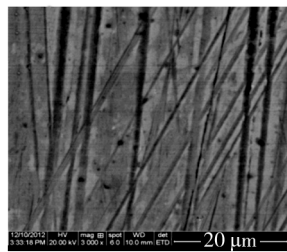


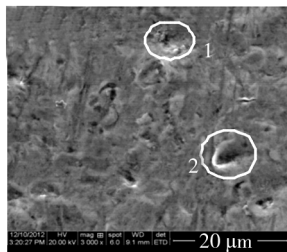
图1 喷涂前后气门挺柱顶面表面形貌

Fig. 1 Top surface morphology of tappets before and after spraying

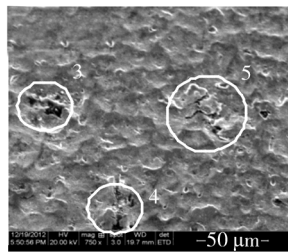
对比处理前后零件表面状态可知,新技术可改善零件表面状态,增强零件的精致感。通过表面形貌的SEM检测,得到零件的微观形貌照片如图2所示。分析可知,经处理后,零件表面的微观状态由沟槽状变为滩涂状,机加工磨痕消失,表面由均匀的凹坑覆盖。表面凹坑增加了零件表面的残余压应力,提高零件表



a 未进行处理的顶面(3000×)



b 处理后的顶面形貌(3000×)



c 处理后的顶面形貌(750×)

图2 气门挺柱热喷涂前后微观形貌

Fig. 2 Microscopic morphology of tappets before and after spraying

层材料力学性能的同时增加了表面储油能力,增强了零件表面润滑油膜的涂布和自修复能力,从该角度分析可得,该工艺具有改善零部件的润滑状态优势。喷涂层表面也存在随机分布的气孔、夹杂物等缺陷。由工艺原理可知,涂层是由无数变形粒子相互交错呈波浪式堆叠而成的层状结构组织,颗粒的陆续堆叠和部分颗粒的反弹失效,导致涂层粒子结合不佳,且涂层组织内不可避免的存在孔隙或孔洞缺陷。同时在高温下,熔融的颗粒与周围介质发生化学反应产生氧化物。据研究资料表明,在喷涂过程中,大约 20% ~ 60% 的喷涂材料以飞溅或烧损的形式被消耗掉<sup>[14]</sup>,因此喷涂层中存在大量的由变形颗粒、气孔和氧化夹杂物组成的缺陷<sup>[2]</sup>。这些缺陷必然导致涂层连续性下降,降低涂层的耐蚀性能。如图 2b,c 所示,1—4 区域所示为气孔与夹杂物。同时由于新工艺中钢丸的表面撞击,对涂层中颗粒间的附着与内聚造成不利影响,使涂层与基材的结合力和涂层的密度变小,降低涂层的使用性能。如图 2c 所示,5 区域为撞击造成的片层状剥落缺陷区。因此热喷涂新技术对零件减摩性能的影响是表面状态改善与引入缺陷综合作用的结果。

2.1.2 零件表面喷涂层能谱分析

对气门挺柱顶面进行能谱分析,如图 3 所示。通过对比能谱分析结果可知,经过处理后的零部件表面引入了 S, Mo, Pd 等元素。结合工艺过程可知,此为复合材料中的润滑材料 MoS<sub>2</sub> 带来的。

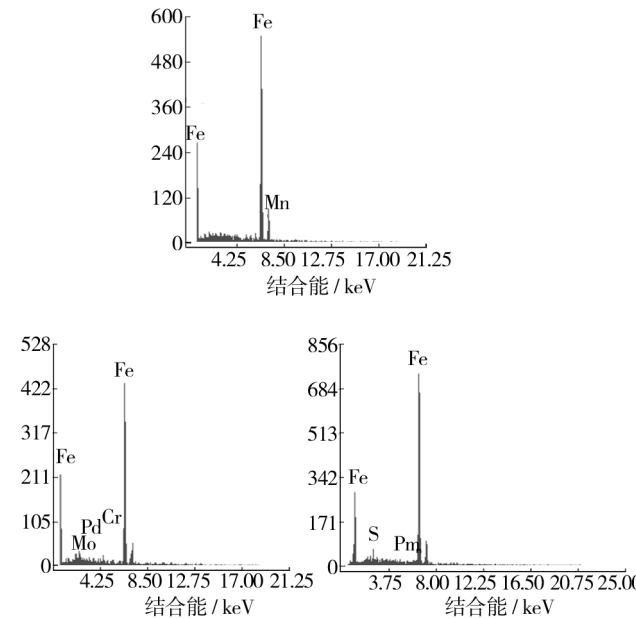


图 3 气门挺柱顶面能谱分析结果图谱  
Fig. 3 Energy spectra analysis results of the top surface of tappets

选取气门挺柱截面进行微观分析,如图 4 所示。分析可知,零件表层无明显的涂层膜状组织。经能谱检测,在临近表层区域也不存在到 S, Mo 元素,涂层与零件界面处无明显的微冶金结合过渡层。结合新工艺的技术原理分析可知,工艺参数的精度、喷涂层的质量以及钢丸撞击对涂层表面质量的综合影响使零件表面涂层膜状组织不明显,界面结合处无明显的过渡层。

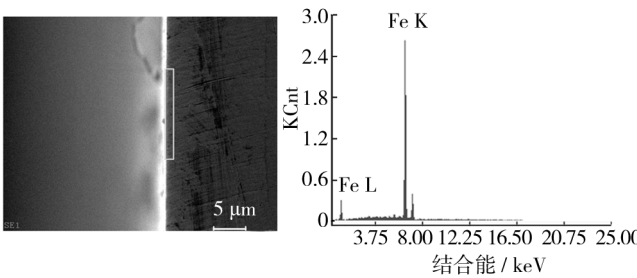


图 4 气门挺柱横截面表面形貌和能谱分析  
Fig. 4 Surface morphology and energy spectra analysis results of the cross section of tappets

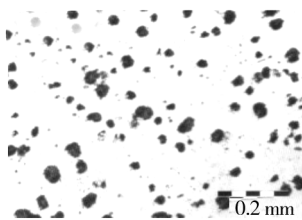
结合 SEM 试验结果分析可知,经热喷涂新技术工艺处理后,引入 MoS<sub>2</sub> 等润滑物质,改善了零件表面状态,表面形貌由原先的机加工沟痕变为平铺的凹坑,有利于表面油膜的形成与存储。由于喷涂层自身结合力差,涂层内部颗粒附着力和内聚力较小,因此经过新工艺中喷丸的撞击,使零件表面的膜状组织不明显,且经过新工艺处理后涂层表面中的气孔、氧化夹杂物等缺陷,将影响零件耐磨、耐蚀性能。

2.2 对基体材料性能的影响与讨论

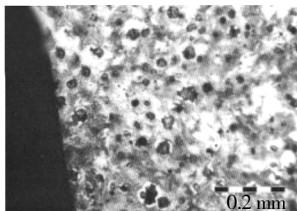
选取曲轴的喷涂部位轴颈进行材料性能的分析,试验在长城汽车股份有限公司金相分析室进行,主要进行金相组织和硬度的检测,依据的试验标准为《GB/T 4340.1—2009 金属材料维氏硬度试验第一部分:试验方法》,检测试样为曲轴轴颈。曲轴轴颈经热喷涂处理之后的零件表层金相组织照片如图 5 所示。

由实验结果分析可知,试样的基体组织为片状珠光体+少量铁素体,珠光体含量大于 95%,石墨球化率为 2 级到 3 级,石墨大小为 5 到 6 级。外表面无明显的硬化层,界面处也不存在微冶金结合过渡层(与气门挺柱分析结果一致),试样的表面硬度 HBW10/3000 为 260,零件基体材料组织和硬度与处理前无明显差异。材料硬度是由材料各相的本征硬度决定的<sup>[15]</sup>,热喷涂新技术涂层成分和微观结构的不均匀

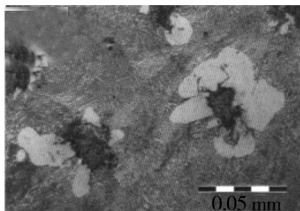




a 抛光态的石墨形态



b 外表面显微组织照片



c 基体组织照片

图5 热喷涂处理之后曲轴轴颈金相组织照片

Fig.5 Microstructure of the shaft neck of crankshaft after spraying (Microstructure of the polishing state of graphite)

性,导致涂层的成分偏析。同时因工艺原因使涂层膜状组织不明显,在热喷涂处理前后,涂层中的润滑物质及其氧化物对材料零件硬度、金相组织无显著影响。

## 2.3 对零件尺寸及表面粗糙度的影响

对热喷涂处理后零件进行外观尺寸和表面粗糙度的检测,外观尺寸经三坐标测量仪和入厂检验后,零部件符合装机要求。表面粗糙度在处理前后基本不变,因此该工艺对零件外观尺寸和表面粗糙度影响不大。

## 2.4 对零件表面摩擦系数的影响

降低摩擦系数对发动机节能减排、提高零件使用寿命具有重要应用价值。试验通过在相同工况条件下零件表面摩擦系数的检测分析,对比评价新技术对动摩擦系数的影响。选取气门挺柱顶面作为检测表面,接触形式为线接触,运动形式为滑动。试样数量为4,其中1,2号为经过处理试样,3,4号为未经处理试样。摩擦系数试验检测条件为室温,湿度为30%~40%,测试设备为日本HEIDON公司Type 14FW表面性能测试仪,摩擦副为挺柱顶面与 $\phi 10$  mm的不锈钢标准压头,运动方式为往复运动,往复20次,移动距离为20 mm,试验速度为150 mm/min。

4组试样的动摩擦系数检测平均值如图6所示,分析可知,经过处理之后,零件表面的平均动摩擦系数略有增加,最大差值达0.02。

选取2号和4号试样动摩擦系数的20次检测数

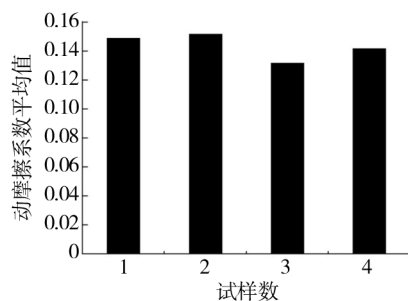


图6 试样平均动摩擦系数对比

Fig.6 Average friction coefficient of tappets

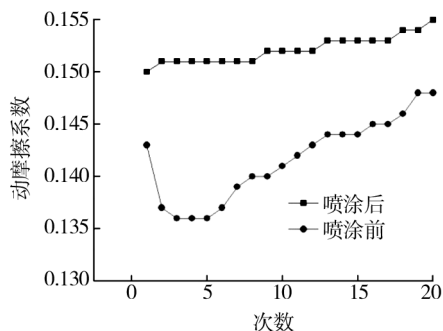


图7 试样热喷涂前后动摩擦系数对比曲线

Fig.7 Friction coefficient contrast curve of un-sprayed and sprayed tappets

值进行分析,如图7所示。未进行喷涂处理的试样,初始动摩擦系数较大,前5个运动周期内,摩擦系数随次数增加先减小后趋于相等,从第6次往复运动开始,动摩擦系数随往复运动次数的增加而增大。沉积涂层后的各次运动的摩擦系数差值较小,波动性小。与未喷涂相比,摩擦系数较大,最大差值达0.015。随着摩擦次数的增加,两种表面状态下零件摩擦系数的差值逐渐变小。

由图7中数据结果对比分析可知,经过热喷涂之后,零件表面平均动摩擦系数由0.142增加至0.152。结合上文分析可知,热喷涂新技术工艺使零件的表面微观形貌变为均匀分布凹坑,使摩擦副表面动摩擦系数数值稳定,波动性减小。由于喷涂层颗粒堆叠疏松,存在较多的孔洞和氧化夹杂物等缺陷,且涂层与基体结合力较差,导致涂层的连续性下降,降低零件的表面耐磨性能,因此导致处理后零件的滑动摩擦系数变大。

## 2.5 对发动机动力性与经济性的影响与分析

### 2.5.1 发动机台架试验结果

选配沉积涂层的零件活塞、曲轴、气门挺柱、活塞

销进行台架试验,对实验中油耗率、功率、扭矩指标进行对比分析,评价该种新工艺对发动机经济型与动力性的影响。台架试验结果如图 8 所示。

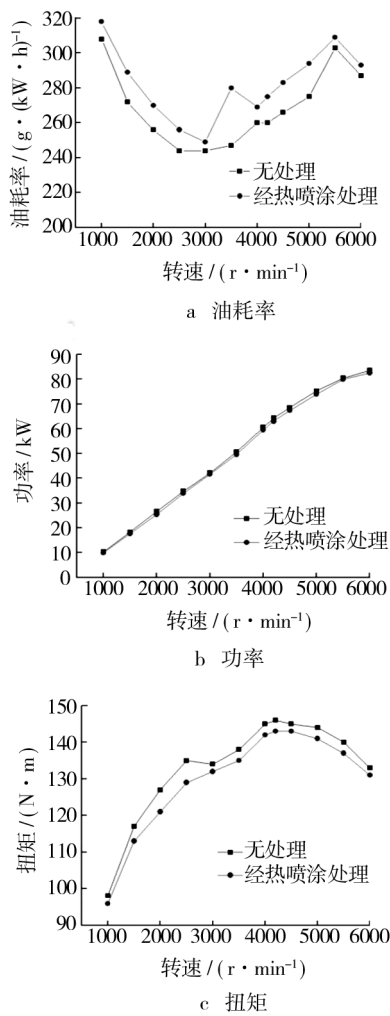


图 8 零件处理前后发动机台架试验性能指标的对比曲线  
Fig. 8 The performance data contrast curve of engine bench test for un-sprayed and sprayed parts

由图 8 中结果分析可知,经过处理后油耗率明显增加,在不同转速条件下,油耗率平均增加 13.6 g/kW · h,同时发动机的功率略有下降,扭矩也明显下降,说明该工艺导致发动机的经济型(油耗率)变差,动力性下降。

2.5.2 台架试验结果分析与讨论

在发动机台架试验初期磨合过程中发现,润滑油中存在黑色颗粒状脱落物,如图 9 所示。通过对零件进行清洗发现黑色颗粒为喷涂层表面脱落物。因涂层颗粒与基材之间以机械结合为主,且撞击工艺在涂层中积累残余应力,使涂层中颗粒之间的内聚力和吸附力减小,且导致涂层与基体的结合力降低<sup>[2]</sup>,影响

零件表面涂层质量,使零件在初期磨合中产生脱落颗粒。完成台架试验后拆机分析发现,发动机主要摩擦副零件表面磨损加剧,且存在异常磨损的现象,台架试验后轴瓦和曲轴轴颈的磨损形貌如图 10 所示。

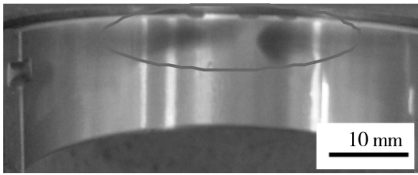


图 9 颗粒状的涂层脱落物照片  
Fig. 9 The granular cast of the coating

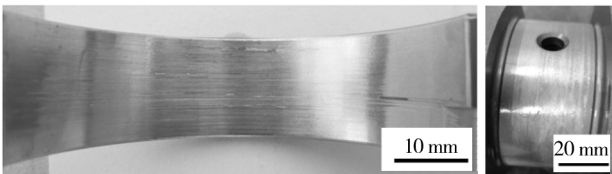


图 10 台架试验后轴瓦和曲轴轴颈的磨损形貌  
Fig. 10 Wear surface of the bearing and crankshaft neck after engine bench test

台架试验前后曲轴轴颈表面微观形貌如图 11 所示,分析可知,试验后曲轴表面存在明显的犁沟形貌,零件表面异常磨损严重。结合初期磨合阶段涂层颗粒脱离的现象分析可知,外加涂层的引入,虽然使零件表面状态得到改善,但同时也引入了缺陷或磨粒。实际润滑工况中油膜厚度基本不变<sup>[16]</sup>,而涂层脱落的颗粒物进入润滑系统,恶化发动机润滑条件,导致摩擦副接触面磨损加剧,产生异常磨损,影响零件的稳定性和可靠性,且缩短零件的使用寿命。外在表现为发动机油耗率上升,功率、扭矩等指标下降。由实验结果分析可得,零件表面涂层的磨损类型主要为磨粒磨损和粘着磨损。

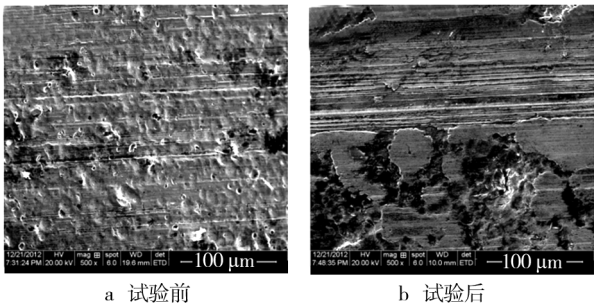


图 11 台架试验前后曲轴轴颈热喷涂表面的 SEM 形貌  
Fig. 11 SEM morphology of the spray surface of crankshaft neck before and after the engine bench test

### 3 结论

采用热喷涂与喷丸的复合工艺,在发动机主要摩擦副零件表面制备涂层,运用 SEM 及金相组织观察、能谱分析、硬度测试、滑动摩擦系数测试及发动机台架试验验证等测试实验,对涂层的形貌、结构、成分、性能进行研究,得出以下结论。

1) 热喷涂新技术可改变零部件表面形貌,零部件表面微观划痕变为坑状,增强了零件表面的储油效果。喷涂层中含有  $\text{MoS}_2$  等润滑物质,但该涂层在零部件表面无法形成连续的膜状组织,且涂层物质附着能力较差,脱落颗粒易进入润滑系统,引起发动机零件的异常磨损,缩短零件使用寿命。

2) 经热喷涂新技术处理后,零件尺寸和表面粗糙度变化不大,满足发动机装机要求。

3) 热喷涂新技术处理后,零件表面的滑动摩擦系数略有增大,由 0.142 增加至 0.152,但摩擦系数数的差值变小,摩擦系数稳定性提高。

4) 经发动机台架试验验证,热喷涂新技术处理后,发动机的经济型(油耗率)变差,动力性(功率、扭矩)降低。

5) 热喷涂新工艺对零件的基体硬度和微观组织影响不大。

6) 根据热喷涂新技术的工艺原理,及其对零件表面状态的改善作用,可推测通过对新技术工艺参数调整和优化,使该复合工艺同时发挥热喷涂与喷丸性能优势,达到“1+1>2”的效果,则文中热喷涂新技术将不失为一种优良的表面处理工艺。

### 参考文献

- [1] 吴涛,朱流,酆剑,等.热喷涂技术现状与发展[J].国外金属热处理,2005,26(4):2—6.  
WU Tao,ZHU Liu,LI Jian,et al. The Status and Development of Thermal Spray Techniques[J]. Heat Treatment of Metals Abroad,2005,26(4):2—6.
- [2] 贾文.表面热喷涂技术的发展与应用[J].昆明冶金高等专科学校学报,2003,19(2):32—35.  
JIA Wen. The Development of Thermal Spray Techniques and its Application[J]. Journal of Kun Ming Metallurgy College,2003,19(2):32—35.
- [3] 冯旭东,杨刚,崔琳珠.热喷涂 Ni60 和 Ni25 涂层组织及性能研究[J].大型铸锻件,2009(2):17—19.

- FENG Xu-dong, YANG Gang, CUI Lin-zhu. Research on Structure and Property of Hot Spraying Ni60 and Ni25 Coating[J]. Heavy Casting and Forging,2009(2):17—19.
- [4] SIRENA M, STEREN L, GUIMPEL J. Thickness Dependence of the Properties of  $\text{La}_{0.6}\text{Sr}_{0.4}\text{MnO}_3$  Thin Films [J]. Thin Solid Films,2000,373:102—106.
- [5] STEREN L B, SIRENA M, GUIMPEL J. Substrate Influence on the Magnetoresistance and Magnetic Order in  $\text{La}_{0.6}\text{Sr}_{0.4}\text{MnO}_3$  Films [J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials,2000,211:28—34.
- [6] SHIMAKAWA Y, YOSHITAKE T, KUBO Y, et al. A Variable-emittance Radiator Based on a Metal-insulator Transition of  $(\text{La}, \text{Sr})\text{MnO}_3$  Thin Films [J]. Applied Physics Letters,2002,80(25):4864—4866.
- [7] 徐滨士,张伟,梁秀兵.热喷涂材料的应用与发展[J].材料工程,2001(12):3—7.  
XU Bin-shi, ZHANG Wei, LIANG Xiu-bing. The Application and Development of Thermal Spray Materials[J]. Journal of Materials Engineering,2001(12):3—7.
- [8] FANON. Thermal Spray Technology [J]. Advanced Material Sand Processes,2000,158(2):45—48.
- [9] HERMAN, HERBERT, SAMPATH, et al. Current Status and Future Trends [J]. MRS Bulletin,2000,25(7):17—25.
- [10] 周克崧.热喷涂技术替代电镀硬铬的研究进展[J].中国有色金属学报,2004,14(1):182—191.  
ZHOU Ke-song. Progress of Thermal Spray Coating of Hard Cr Instead of Plating[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals,2004,14(1):182—191.
- [11] 陈汝广,葛圣松.热喷涂用免喷砂涂料的研究[J].山东机械,2004(5):26—27.  
CHEN Ru-guang, GE Sheng-song. Research on a Kind of Coating Instead of Sand Blasting in Hot Spraying[J]. Shandong Machinery,2004(5):26—27.
- [12] 张剑,于丽.轴套热喷涂耐磨强化层的性能研究[J].热加工工艺,2009,38(12):116.  
ZHANG Jian, YU Li. Study on Properties of Axile Bush Wear Strengthening Coating Prepared by Hot Spraying[J]. Hot Working Technology,2009,38(12):116.
- [13] 郭双全,冯云彪,何勇,等.未来航空发动机热障涂层材料及制备技术[J].表面技术,2012,41(5):119—123.  
GUO Shuang-quan, FENG Yun-biao, HE Yong, et al. Materials and Fabrication Technique of Thermal Barrier Coatings for Future Aeroengines [J]. Surface Technology,2012,41(5):119—123.
- [14] 李秉忠.热喷涂制备近净尺寸涂层技术的发展及其前沿科技问题[J].中国表面工程,2008,21(2):7—10.

- [40] SÁNCHEZ-GARCÍA M A, NARANJO F B, PAU J L, et al. Ultraviolet Electroluminescence in GaN/Algan Single-Heterojunction Light-Emitting Diodes Grown on Si(111)[J]. Journal of Applied Physics, 2000, 87(3): 1569.
- [41] TRAN C A, OSINSKI A, KARLICEK R. F, et al. Growth of InGaN/GaN Multiple-quantum-well Blue Light-emitting Diodes on Silicon by Metalorganic Vapor Phase Epitaxy[J]. Applied Physics Letters, 1999, 75(11): 1494—1496.
- [42] GUHA S, BOJAREZUK N A. Ultraviolet and Violet GaN Light Emitting Diodes on Silicon[J]. Applied Physics Letters, 1998, 74(4): 415—417.
- [43] YANG J W, LUNEV A, SHATALOV M C, et al. Selective Area Deposited Blue GaN-InGaN Multiple-quantum Well Light Emitting Diodes Over Silicon Substrates[J]. Applied Physics Letters, 2000, 76(3): 273—276.
- [44] DADGAR A, CHRISTEN J, RIEMANN T, et al. Bright Blue Electroluminescence from an InGaN/GaN Multiquantum-well Diode on Si(111): Impact of an AlGaIn/GaN Multilayer[J]. Applied Physics Letters, 2001, 78(15): 2211—2213.
- [45] 周兆忠, 袁巨龙, 文东辉, 等. 蓝宝石衬底的超光滑表面加工进展[J]. 航空精密制造技术, 2009, 45(3): 8—13.
- ZHOU Zhao-zhong, YUAN Ju-long, WEN Dong-hui, et al. Survey on the Progress of Ultra-smooth Sapphire Wafer Surface[J]. Aviation Precision Manufacturing Technology, 2009, 45(3): 8—13.
- [46] 宋晓岚, 刘宏燕, 杨海平, 等. 纳米 SiO<sub>2</sub> 浆料中半导体硅片的化学机械抛光速率及抛光机理[J]. 硅酸盐学报, 2008, 36(8): 1187—1193.
- SONG Xiao-lan, LIU Hong-yan, YANG Hai-ping, et al. Chemical Mechanical Polishing Removal Rate and Mechanism of Semiconductor Silicon with Nano-SiO<sub>2</sub> Slurries[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2008, 36(8): 1187—1193.
- [47] 陈建清, 陈杨, 陈志刚, 等. 超细 CeO<sub>2</sub> 磨料对硅片的抛光性能研究[J]. 中国机械工程, 2004, 15(8): 743—745.
- CHEN Jian-qing, CHEN Yang, CHEN Zhi-gang, et al. Study on Polishing Property of Silicon Wafer Using Ultra Fine Cerium Dioxide Abrasive[J]. China Mechanical Engineering, 2004, 15(8): 743—745.
- [48] LIU Y L, ZHANG K L, WANG F, et al. Investigation on the Final Polishing Slurry and Technique of Silicon Substrate in ULSI[J]. Microelectronic Engineering, 2003, 66: 438—444.
- [49] WANG Y G, ZHANG L C, BIDDUT A. Chemical Effect on the Material Removal Rate in the CMP of Silicon Wafers[J]. Wear, 2011, 270: 312—316.
- [50] ESTRAGNAT E, TANG G, LIANG H, et al. Experimental Investigation on Mechanisms of Silicon Chemical Mechanical Polishing[J]. Journal of Electronic Materials, 2004, 33(4): 335—338.

(上接第 80 页)

- YING Hua-gen, LUO Wei, YAN Mi. Anti-corrosion Properties of Electroless Ni-Cu-P Ternary Deposits on Sintered NdFeB Magnets[J]. Journal of University of Science and Technology, 2007, 29(2): 162—167.
- [14] 孟亚丽, 代明江, 侯慧君, 等. 15CrMnMoVA 钢磁控溅射镀铝防护层耐腐蚀性能[J]. 中国表面工程, 2012, 25(3): 28—32.
- MENG Ya-li, DAI Ming-jiang, HOU Hui-jun, et al. Corrosion Resistance of Aluminum Film on 15CrMnMoVA Steel by Magnetron Sputtering[J]. China Surface Engineering, 2012, 25(3): 28—32.
- [15] MAO S D, YANG H X, SONG Z L, et al. Corrosion Behavior of Sintered NdFeB Deposited with an Aluminum Coating[J]. Corrosion Science, 2011, 53(5): 1887—1894.

(上接第 108 页)

- LI Bing-zhong. The Development of Near Net Size Coating Which Preparation by Thermal Spray and Frontier Scientific Issues[J]. China Surface Engineering, 2008, 21(2): 7—10.
- [15] 苟国庆, 陈辉, 涂铭旌. 热喷涂 NiCr/Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>, NiCrCoAlY 涂层的微观组织结构及抗震性能[J]. 电焊机, 2005, 35(11): 36—39.
- GOU Guo-qing, CHEN Hui, TU Ming-jing. Microstructure and Thermal Shock Properties of Thermal Sprayed Coatings NiCr/Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>, NiCrCoAlY[J]. Electric Welding Machine, 2005, 35(11): 36—39.
- [16] 赵辉, 王优强. 不同供油条件下粗糙度对啮合齿轮摩擦行为的影响[J]. 表面技术, 2012, 41(5): 77—80.
- ZHAO Hui, WANG You-qiang. The Influence of Roughness on the Friction Behavior of Meshing Gear under Different Oil Condition[J]. Surface Technology, 2012, 41(5): 77—80.