

热喷涂基体表面前处理技术的研究进展^{*}

杨震晓^{1,2}, 刘 敏², 邓春明², 邓畅光², 车晓舟¹

(1. 华南理工大学 材料科学与工程学院, 广州 510640; 2. 广州有色金属研究院, 广州 510651)

摘 要: 热喷涂涂层与基体机械咬合的结合机理决定了基体表面前处理是热喷涂涂层中非常重要的处理工艺。文中概述了当前广泛应用的喷砂处理的工艺特点, 指出砂粒易在基体表面镶嵌和对基体造成损伤是喷砂工艺的主要缺点, 讨论了喷砂对高温合金单晶材料和超高强度钢疲劳性能的影响, 研究了软质基体表面超音速火焰喷涂 WC 涂层的免喷砂工艺。同时介绍了近年来其他热喷涂基体表面前处理方面的研究热点, 包括高压水射流处理技术、机械粗化技术以及激光表面前处理, 并重点阐述了其基本原理、特点及应用情况。

关键词: 热喷涂; 表面前处理; 喷砂; 高压水射流处理; 机械粗化; 激光表面前处理; 研究现状

中图分类号: TG174.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-9289(2012)02-0008-07

Review on the Pretreatment of Substrate for Thermal Spray Process

YANG Zhen-xiao^{1,2}, LIU Min², DENG Chun-ming², DENG Chang-guang², CHE Xiao-zhou¹

(1. School of Materials Science and Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640; 2. Guangzhou Research Institute of Non-ferrous Metals, Guangzhou 510651)

Abstract: Pretreatment on substrate was extremely important as a result of the bond strength of mechanical occlusion between coating and substrate. The technical characteristics of currently and widely used grit blasting were reviewed, and the two main drawbacks including grit embedment and damage to substrate for the grit blasting process were pointed out. The effects of grit blasting on high temperature single crystal substrate and ultra high strength steel were discussed. Free grit blasting treatment was recommended for the deposition of HVOF WC coating on relatively soft substrate. Meanwhile, the current research focus on other pretreatment processes on substrate, including high pressure water jet, mechanical roughening and laser treatment was introduced. The principle of the process, process characteristics and their applications in the pretreatment of thermal spray process were emphasized in the introductions to these processes.

Key words: thermal spray; pretreatment on substrate; grit blasting; high pressure water jet; mechanical roughing; laser treatment; research status

0 引 言

热喷涂技术可快速地在大面积基体表面沉积性能优良的涂层, 已成为材料表面防护与强化的重要手段, 也是再制造的重要技术之一。其具体应用包括材料表面性能的改善(耐磨、耐蚀和隔热等)、失效零件的功能恢复及几何尺寸的修

复, 可节省能源和避免材料的浪费, 从而广泛应用于航空航天、机械制造、石油化工以及核电站等军工、民用工业领域^[1-4]。随着热喷涂涂层应用领域的拓展, 尤其在恶劣工况下的应用需求, 对涂层的质量提出了更高的要求, 包括涂层的致密度、与基体的结合强度等。热喷涂的工艺特点决定了涂层与基体的结合机理主要为机械咬合,

收稿日期: 2011-12-06; 修回日期: 2012-03-09; 基金项目: * 国际热核聚变实验堆(ITER)计划(2010GB109002)

作者简介: 杨震晓(1988—), 男(汉), 浙江乐清人, 硕士生; 研究方向: 材料表面改性

网络出版日期: 2012-03-13 10:14; 网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.3905.TG.20120313.1014.001.html>

引文格式: 杨震晓, 刘敏, 邓春明, 等. 热喷涂基体表面前处理技术的研究进展 [J]. 中国表面工程, 2012, 25(2): 8-14.

因此基体表面预处理对热喷涂涂层的结合强度有着重要的影响。

表面预处理有很多方法,在选择表面预处理方法时主要考虑基体的形状和厚度、表面原始状态以及涂层与基体结合强度的要求等因素。表面预处理主要分为净化和粗化处理两种^[5]。净化处理是指去除待喷涂工件表面的氧化物、油渍和其他污染物,主要包括试剂腐蚀(酸洗)、除油(化学除油和蒸汽除油)、磷化或钝化以及超声波清洗等。粗化处理是指通过处理使净化处理后的基体表面粗糙化,为热喷涂涂层在基体表面提供更多的“抛锚”咬合点,从而改善涂层与基体的结合强度。传统的表面粗化处理工艺主要有喷砂处理、化学粗化等,近年来高压水射流处理技术、机械粗化技术、激光表面预处理成为热喷涂表面预处理的研究热点。喷砂因工艺简单,适宜大面积工件表面的粗化,仍是热喷涂最常用的表面预处理方法。

文中概述了热喷涂基体喷砂表面预处理技术的工艺特点,同时结合课题组的工作分析了喷砂对高温合金单晶材料和超高强度钢疲劳性能的影响,探讨了喷砂工艺质量控制及热喷涂中的免喷砂工艺。同时介绍了近年来在热喷涂基体表面预处理方面的研究热点,并阐述了这些方法的基本原理、特点及应用情况。

1 喷砂表面预处理技术

1.1 喷砂处理工艺

喷砂处理是指一定粒径的氧化铝、氧化硅等硬质砂粒在压缩空气的作用下由喷嘴高速喷射到工件表面,通过砂粒的撞击和冲刷作用来粗化工件表面。喷砂处理过的表面显微状态受砂粒特性(包括砂粒的形状、硬度、质量、成分和种类等)、基体材料特性以及喷砂工艺参数(喷砂压力、角度、距离)的影响。喷砂处理过程中,喷射到基体表面的砂粒的能量主要消耗在切削基体表面材料和使表面材料发生塑性变形等方面^[6]。喷砂处理的优点是工艺简单、效率高、成本低,特别适用于大面积工件的表面粗化处理。它的缺点是砂粒易残留在基体表面(尤其较软的基体),而且喷砂会改变基体表面的应力,进而影响基体材料的力学性能。

国内外学者^[7-10]对热喷涂的前处理工艺做了

大量的相关研究,研究发现喷砂距离、喷砂角度、喷砂压力以及砂粒的大小是影响热喷涂涂层与基体之间结合强度的最主要的几个因素。通过提高喷砂压力及砂粒粒径可提高涂层的结合强度,但会导致砂粒镶嵌在基体表面,因此喷砂压力和砂粒粒径要设定在合适范围。在喷砂压力和角度一定的情况下,随着喷砂距离的增大,涂层与基体的结合强度逐渐升高,但当喷砂距离达到一定值后,进一步增大距离,则出现涂层结合强度降低的现象。这是因为喷砂距离过大时,砂粒撞击到基体的动能减小,对基体冲击作用减少从而导致表面粗糙度降低所致^[8]。

Mellali 等^[9]探讨了等离子喷涂前的喷砂工艺对不同基体材料(铝合金、铸铁、高强度钢)表面粗糙度、残余应力、砂粒残留及砂粒破碎的影响。研究表明,砂粒大小是决定表面粗糙度的最主要因素;随着喷砂压力的增大,表面粗糙度也随之增大,但更大的压力会导致砂粒的残留;喷砂时间在 3~6 s 能获得最高粗糙度并不会引起砂粒破碎;残余应力的产生是一个复杂的过程,取决于砂粒的粒径、喷砂压力以及基体的杨氏模量大小等因素,最大的残余应力产生在距离基体表面几百微米的塑性区域。Bahbou 等^[10]研究了喷砂角度和喷涂角度对钛合金基体与涂层的结合强度的影响,并观察了不同喷砂角度下基体表面的形貌以及砂粒的残留情况。随着喷砂角度和喷涂角度同步增大,结合强度也随之增大,当喷砂和喷涂角度都接近 90°时,涂层与基体表现出最大的结合强度,而当喷砂角度为 75°时砂粒残留最严重。

1.2 喷砂处理对基体疲劳性能的影响

课题组研究了喷砂处理对镍基单晶高温合金表面低压等离子喷涂 NiCoCrAlYTa 涂层疲劳性能的影响^[11-12]。经研究发现,喷砂处理会使单晶基体的疲劳极限降低 30 MPa 以上。在相同的应变幅下,喷砂试样的疲劳寿命低于未喷砂试样;应变幅越高,喷砂处理对试样基体的疲劳性能影响越大。这是因为喷砂使基体表面产生了从外部至内部的压应力梯度,导致单晶基体发生再结晶,如图 1 和图 2 所示。并且随着喷砂压力的提高,单晶表面的再结晶深度越大,从而对高温合金单晶基体的高温疲劳性能影响越大。

然而,未喷砂处理所制备的涂层附着力差,

在使用过程中易发生剥落。因此可采用低喷砂压力、较细砂粒对其进行表面微粗化,以使得喷砂后基体仍具有较高的疲劳极限,且所制备的涂层具备良好的附着力。

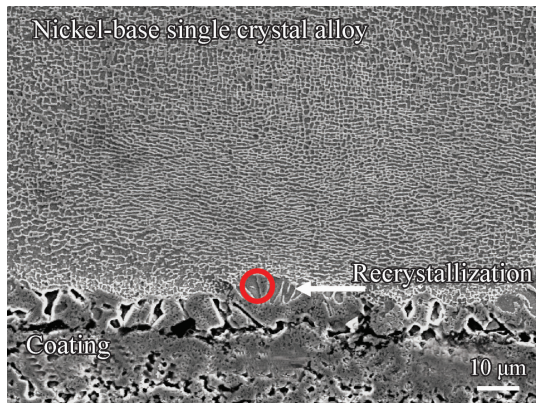


图 1 在喷砂压力为 0.3 MPa 下 AM3 单晶与涂层界面处的显微结构

Fig. 1 Cross-sectional morphology of the AM3 substrate/coating interface at 0.3 MPa grit blasting

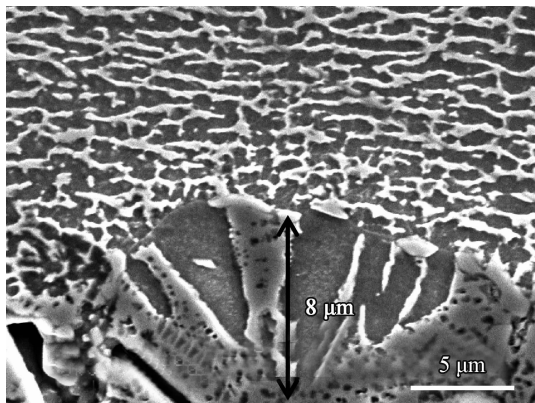


图 2 图 1 中圆圈内的界面处放大图

Fig. 2 Magnified image for coating/AM3 substrate interface at the circle in figure 1

课题组前期还研究了喷砂处理对超高强钢上超音速喷涂 WC 涂层的疲劳性能的影响。结果表明,喷砂后砂粒易残留镶嵌在超高强钢基体表面,对基体表面造成损伤,可使 WC 涂层的疲劳寿命降低 30%~65%。这是由于涂层、基体和砂粒之间的物理性能差异所造成的,它们之间的物理性能差异将导致在疲劳载荷过程中镶嵌砂粒附近产生应力集中,镶嵌砂粒因承受巨大载荷而发生破碎(见图 3)。基体表面由于上述复合作用而形成疲劳裂纹源,并在基体内部形成主疲劳裂纹扩展而导致基体发生疲劳断裂。

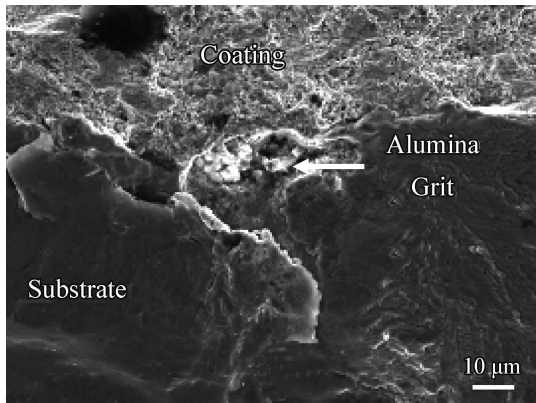


图 3 WC 涂层的疲劳裂纹源附近的形貌

Fig. 3 Magnified image for crack sources of WC coating

1.3 喷砂质量控制及免喷砂工艺

1.3.1 喷砂质量控制

喷砂质量控制包括以下几个方面:①对砂粒材料进行质量控制。一般采用氧化铝、氧化硅类砂粒,对于可靠性要求高的工件采用韧性良好的粉末,如锆刚玉、氧化锆等,并控制砂粒中细小粉末量,建立量化指标;②控制喷砂压力、喷砂角度,在满足表面粗糙度的要求前提下尽可能采用低压力,喷砂角度控制在 $50^{\circ} \sim 80^{\circ}$;③喷砂后工件采用压缩空气吹清理、超声波清洗或用硬度较高的塑料刷等方法进行表面清理。

1.3.2 免喷砂的涂层工艺研究

超音速火焰喷涂 WC 涂层由于具有较高的硬度和与基体的结合强度,广泛应用于工业领域。课题组研究了超音速火焰喷涂 WC 涂层在抛光和喷砂处理下与不同基体的结合强度^[10],结果如表 1 所示。由表 1 可以看出,超音速火焰喷涂 WC 涂层与抛光态和喷砂态 AZ31 镁合金、7075 铝和黄铜基体的结合强度相当。这是因为这些基体较软,超音速焰流中的高速 WC 粒子容易进入基体表面,具有自粗化作用。而对于硬质基体(Q235 和 300M 超高强钢),超音速火焰喷涂 WC 涂层与抛光态基体的结合强度明显低于其余喷砂态基体的结合强度。高速 WC 粒子会在硬质基体表面铺展开,基体越硬,颗粒越充分扁平化。因此,必须对硬质基体进行喷砂粗化,以提高涂层与基体的机械咬合能力。

2 高压水射流处理技术

高压水射流处理技术是指一定流量的水在

大于 200 MPa 的高压作用下冲刷在工件表面上,使工件表层产生塑性变形,得到理想的组织结构和残余压应力的分布,从而达到粗化的效果。高压水速度可达到 600 m/s 以上,特别适合于较硬的陶瓷、硬金属表面粗化;并且高压水

射流粗化能造型出合适粗糙度的表面形貌,同时能适当提高机械结合力而不降低基体的力学性能。

典型的高压水射流粗化后 718 镍铬合金基体的表面形貌如图 4 所示。

表 1 抛光和喷砂处理下 WC 涂层与不同基体的结合强度 (MPa)^[13]

Table 1 Bond strength between WC coating and different substrates in polished and blasted treatment (MPa)^[13]

	AZ31		7075 aluminum		Brass		Q235		300M ultra-high strength steel	
	Polished	Blasted	Polished	Blasted	Polished	Blasted	Polished	Blasted	Polished	Blasted
Bonding strength	35.0	36.0	46.0	57.0	61.0	64.0	52.0	72.0	42.0	78.0
	32.0	31.0	57.0	48.0	65.0	66.0	40.0	80.0	39.0	75.0
	33.0	32.0	59.0	56.0	60.0	61.0	46.0	74.0	46.0	77.0
Average value	33.3	33.0	54.0	52.0	62.0	64.0	46.3	75.3	42.3	76.6

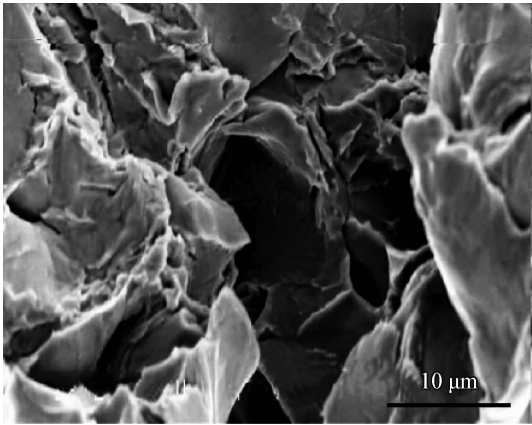


图 4 典型高压水射流粗化后 718 镍铬合金基体表面形貌^[14]

Fig. 4 Typical micrograph of inconel 718 after high pressure water jet^[14]

但高压水射流粗化对低密度金属表面进行粗化时,容易造成其基体损伤和腐蚀问题。高压水射流粗化所用的介质可以是纯水,也可以在水中加入耐磨陶瓷砂粒,因此不会带来环境污染问题。高压水射流粗化与很多因素有关,如喷嘴到工件表面的距离、射流的压力大小、射流的速度、材料本身的硬度等。

由于高压水射流粗化时,喷嘴和工件表面是垂直的,不存在角度的选择,操作较简单。研究发现,低压等离子喷涂 MCrAlY 涂层与经高压水粗化基体的结合强度为其与喷砂粗化基体的 1.5

倍^[14]。针对低密度金属表面的高压水粗化,Kunaporn 等^[15]研究了三种不同喷嘴所造型出的高压水射流(圆型、扇型、模糊型)对 6061-T6 铝合金表面特征及粗糙度的影响。结果表明,在相同的操作条件下,扇型射流相比圆型射流能喷射出具有更均匀粗糙度的表面;模糊型射流(fuzzy jet)可在低速移动下喷射铝合金,有望提高涂层与铝合金基体的结合强度。

Taylor 等^[16]对比研究了射流压力和射流移动速度对 718 镍铬合金腐蚀失重和表面粗糙度的影响,并用线性方程描绘了它们之间的关系。在射流移动速度一定的情况下,随着射流压力(207~345 MPa)的增大,718 镍铬合金表面粗糙度逐渐增加,同时腐蚀失重也相应变大,对合金基体损伤较大;而在射流压力一定时,腐蚀失重和表面粗糙度随着射流移动速度的增加而减小。

因此要选择合适的射流压力值和射流移动速度大小以达到最佳的粗化效果。

3 机械粗化技术

机械粗化技术是采用机械的方法在基体材料表面加工出所需的表面结构,从而实现对待喷涂工件表面的直接粗化。较适宜的热喷涂机械粗化主要有机械微刻,它是使用一个或多个特定形状工具头,使其沿着造型平面或曲面相对移动,同时在工具头上施加低频振动,依靠振动冲

击在待加工表面上形成微结构。机械粗化技术的优点是对基体表面无污染，结合强度较高。但其缺点是工艺较复杂，效率低；并且机械加工存在加大难度，对机械设备精度要求高。另外，机械粗化技术主要针对较软的轻金属，如铝合金等，基体材料和形状受一定限制。

Schlaefler 等^[17]通过图 5(a)所示的多晶金刚石 (polycrystalline diamond) 刀具，在 AlSi 基体表面加工出如图 5(b)所示“燕尾”织构。然后采用等离子转移弧线材喷涂沉积高碳低合金钢涂层，该涂层与基体的结合强度比其与喷砂处理基体的结合强度提高了 45%。这种机械粗化的优点就是加工所需时间短，而且在加工的过程中不

需要辅助的冷却清洗装置，但刀具容易在加工的过程中发生断裂。为了防止断裂的发生，将该刀具进行改进，如图 5(c)所示，这种特殊结构的刀具所加工出的“燕尾”槽可以使汽车气缸内壁的碳钢涂层与 AlSi 基体的结合强度提高到 60 MPa 甚至更高^[18]。目前该技术已经成功应用于汽车气缸内表面喷涂铝合金基体的表面粗化中。

上述这些刀具的一次性切割所带来的阻力较大，且易断头，研究者已经将其改进为如图 5(d)所示的机械粗化。该刀具分为前、中、后三个不同形状的切头。由前切头先切出圆型槽，再由中切头在这基础上切出较深的方型槽，最后由后切头造型最终的表面图案^[19]。

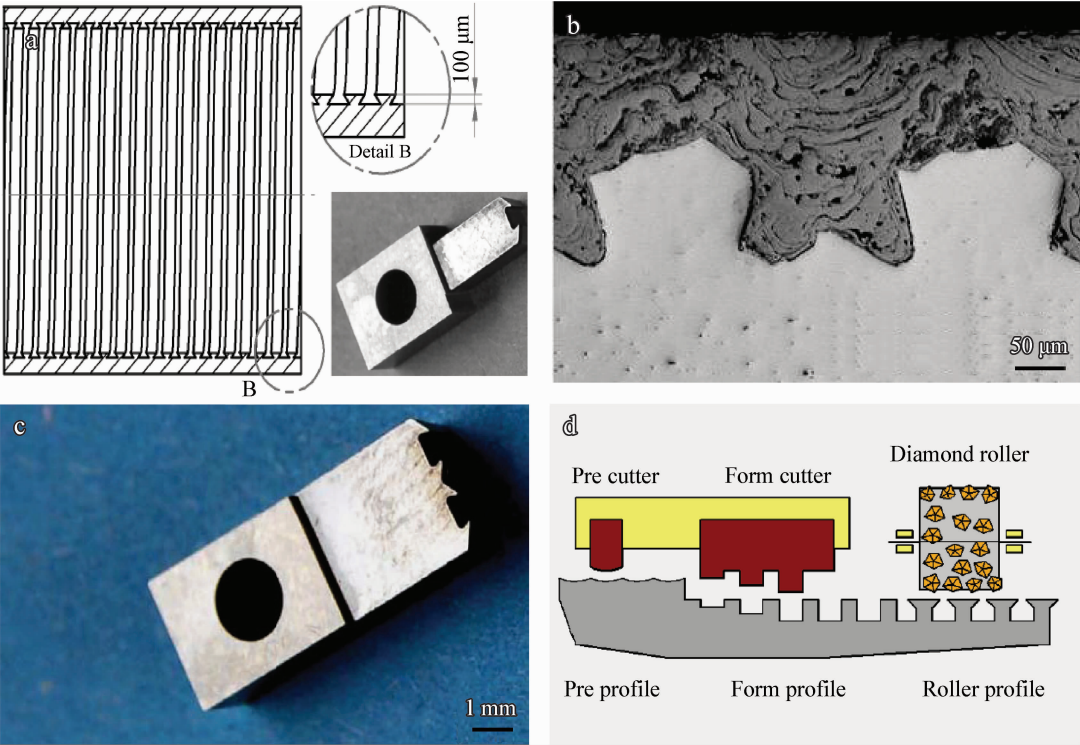


图 5 机械粗化原理示意图^[17-19] (a) “燕尾”槽的平面形状 (b) 涂层与基体界面处的截面形貌 (c) 多晶金刚石刀具 (d) 刀具加工原理示意图

Fig. 5 Schematic diagram of the mechanical roughening process^[17-19] (a) planar figure for “dovetail” grooves (b) cross-sectional morphology of coating/substrate interface (c) polycrystalline diamond tool (d) schematic diagram of the cutting process

4 激光表面前处理

激光表面前处理是指利用高能激光束去除基体表面的氧化物及其他污染物，提高涂层与新鲜基体表面的附着力。激光表面前处理的生产效率优于传统的清洁+喷砂工艺，但其设备成本

较高。通过激光处理不仅可以清除表面氧化物或污染物，而且粉末能充分铺展在处理后的洁净表面，使喷涂颗粒与基体良好的润湿和附着^[20]。基于激光表面前处理的优点，人们开发了激光表面前处理与热喷涂的同步技术，被称为 PRO-TAL®(包含一个 Nd:YAG 激光器)技术。与传

统表面预处理方法相比,PROTAL®的优势在于^[21]:① 噪音小,对环境不造成污染;② 易于监控和自动操作,同时灵活性极高;③ 它产生的激光束能消除基体表面的污染物、氧化层;④ 可以防止涂层在沉积过程中的再污染以及提高涂层结合强度^[22-25]。但该复合工艺的设备成本非常高,目前还没在工业中发现应用案例。

基体激光表面织构化是近来热喷涂领域中表面预处理的研究热点。它是利用激光在物体表面造型出各种微米/亚微米级的微细形貌或图案。通过调整激光束的脉冲,可以加工出直径小于0.3 mm,深度大于2 mm的圆凹坑,并且可以实现不同形状的表面织构图案:圆凹坑形、方凹坑形、条状凹痕形和网格状凹痕形等。

Lamaraoui等^[26]对比了新型的激光表面织构化与几种传统的热喷涂2017铝合金表面预处理工艺(除油清洗+喷砂、激光烧蚀)对NiAl涂层与基体的结合强度的影响。织构化后2017铝合金表面形貌以及喷涂后基体与涂层的剖面形貌如图6和图7所示。基体经过激光表面织构化后,NiAl涂层与基体的结合强度可达55 MPa,高于其与传统前处理(除油清洗+喷砂)基体的结合强度(45 MPa)。

为了减少光学等纯度较高的玻璃制造行业Pt坩埚的消耗,文中在陶瓷坩埚表面热喷涂Pt涂层代替纯Pt坩埚。但由于陶瓷基体与Pt热膨胀系数的巨大差异,涂层与基体的结合强度只有3~5 MPa。经过激光表面织构化,热喷涂获得的涂层再经过1773 K的热处理后,Pt涂层与基体的结合强度可以达到14~17 MPa^[27]。

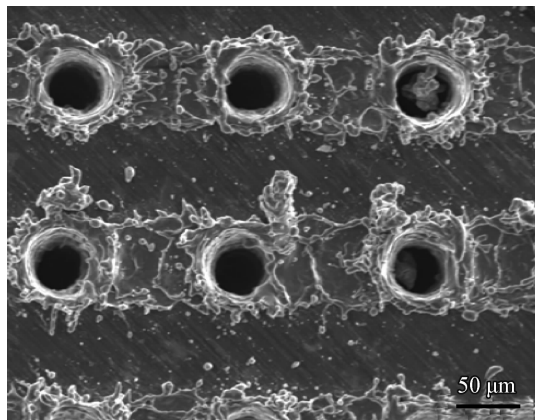


图6 激光织构化后2017铝合金基体形貌^[26]

Fig. 6 Micrograph of 2017 aluminum surface treated by laser texturation^[26]

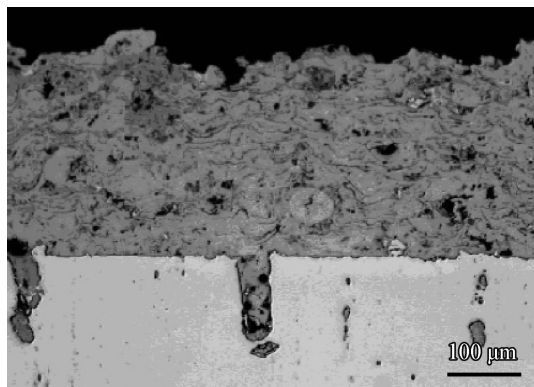


图7 激光织构化与喷涂后NiAl涂层的截面形貌^[26]

Fig. 7 Cross-sectional morphology of NiAl coating/substrate interface^[26]

5 总结

良好的附着力是热喷涂涂层应用的先决条件,而涂层与基体的结合机理决定了基体表面粗化工艺的重要性。喷砂处理工艺简单、高效,是当前热喷涂表面粗化的主要工艺,但砂粒易在基体表面镶嵌,会对基体造成损伤,进而影响材料的力学性能,说明了喷砂质量控制的重要性。而超音速火焰喷涂WC涂层对质软的基体会产生自粗化效果,因此不需要对基体进行喷砂粗化处理。近些年来高压水粗化、机械粗化和激光表面预处理等方法不断涌现,成为了热喷涂表面粗化技术的研究热点,而这些工艺的特点使其在应用方面受到一定的限制。但随着对热喷涂涂层与基体的结合强度提出越来越高的要求,机械粗化和激光表面织构化作为可获得特殊结构表面、对环境无污染等特点受到工业界越来越多的重视,因此其具有很大的应用和发展潜力。

参考文献

- [1] 戴达煌,周克崧,袁镇海. 现代材料表面技术科学[M]. 北京:冶金工业出版社,2004:140-145.
- [2] 张伟,郭永明,陈永雄. 热喷涂技术在产品再制造领域的应用及发展趋势[J]. 中国表面工程,2011,24(6):1-7.
- [3] 徐滨士,谭俊,陈建敏. 表面工程领域科学技术发展[J]. 中国表面工程,2011,24(2):1-12.
- [4] 徐滨士. 中国再制造工程及其进展[J]. 中国表面工程,2010,23(2):1-6.
- [5] 李辉,栗卓新,魏琪. 热喷涂中表面预处理的技术现状与发展[J]. 热喷涂技术,2009,1(2):16-18.
- [6] 马世宁,李长青,刘谦. Φ2mm丝材电弧喷涂工艺对结合强

- 度的影响 [J]. 装甲兵工程学院学报, 1999, 13 (1): 6-10.
- [7] James D, Xiao Huang, Richards N L, et al. Examination of a grit-blasting process for thermal spraying using statistical methods [J]. Journal of Thermal Spray Technology, 2005, 14(4): 471-479.
- [8] 郝建军, 李会平, 马跃进, 等. 喷砂预处理在铸铁零件修复中的应用研究 [J]. 农业机械学报, 2003, 24 (4): 120-122.
- [9] Mellali M, Grimaud A, Leger A C, et al. Alimina grit blasting parameters for surface preparation in the plasma spraying operation [J]. Journal of Thermal Spray Technology, 1997, 6(4): 217-226.
- [10] Bahbou M F, Nyle'n P, Wigren J. Effect of grit blasting and spraying angle on the adhesion strength of a plasma sprayed coating [J]. Journal of Thermal Spray Technology, 2004, 13(4): 508-512.
- [11] 邓春明. 300M 钢高速火焰喷涂 WC 涂层的疲劳和耐磨耐腐蚀性能的研究 [D]. 广东工业大学, 2006, 6.
- [12] 梁兴华. 镍基单晶高温合金低压等离子喷涂 NiCoCrAlYTa 涂层的高温疲劳和防护性能的研究 [D]. 广东工业大学, 2009, 7.
- [13] 刘敏, 邓春明, 邓畅光, 等. 不同基体上超音速火焰喷涂 WC 涂层的结合性能. 广州有色金属研究院内部资料, 2009, 10.
- [14] Knapp J K, Taylor T A. Water jet roughened surface analysis and bond strength [J]. Surface and coatings Technology, 1996, 86: 22-27.
- [15] Kunaporn S, Chillman A, Ramulu M, et al. Effect of water jet formation on surface preparation and profiling of aluminum alloy [J]. Wear, 2008, 265(10): 176-185.
- [16] Taylor T A. Surface roughening of metallic substrates by high pressure pure waterjet [J]. Surface and Coatings Technology 76-77, 1995: 95-100.
- [17] Schlaefer T, Bobzin K, Ernst F, et al. Plasma transferred wire arc spraying of novel wire feedstock onto cylinder bore walls of AlSi engine blocks [C]. International Thermal Spray Conference & Exposition, 2008: 18-23.
- [18] Hoffmeister H W, Schnell C. Mechanical roughing of cylinder bores in light metal crankcases [J]. Production Engineering Research Development, 2008, 35(2): 365-370.
- [19] Flores G, Ostfildern D. Thermal coating of cylinder bores needs approved processes of pre and post treatment [C]. International Thermal Spray Conference & Exposition, 2011: 501-503.
- [20] Costil S, Belfort F, Poirier D, et al. Effects of combined laser pre-treatments with cold spraying of Ti and Ti-6Al-4V [C]. International Thermal Spray Conference & Exposition, 2011: 1409-1414.
- [21] Costil S, Li Hui, Coddet C, et al. Role of laser surface activation during plasma spray coating of metallic materials [C]. 18th International Conference on Surface Modification Technologies, 2004: 29-33.
- [22] Li Hui, Costil S, Barnier V, et al. Surface modifications induced by nanosecond pulsed Nd: YAG laser irradiation of metallic substrates [J]. Surface and Coating Technology, 2006, 201(9): 1383-1392.
- [23] Coddet C, Montavon G, Costil S A, et al. Surface preparation and thermal spray in a single step: the PROTAL process example of application for an aluminum-base substrate [J]. Journal of Thermal Spray Technology, 1999, 8 (2): 235-242.
- [24] Li Hui, Costil S, Coddet C, et al. Role of the laser surface preparation on the adhesion of Ni-5%Al coatings deposited using the PROTAL process [J]. Journal of Thermal Spray Technology, 2006, 15(2): 191-197.
- [25] Lallemand G, Jacrot G, Cicala E, et al. Grooving by Nd: YAG laser treatment [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2000, 99(8): 32-37.
- [26] Lamraoui A, Langlade C, Costil S, et al. Surface pre-treatments including laser texturing for thermal spraying [C]. International Thermal Spray Conference & Exposition, 2010: 842-846.
- [27] Ishikawa Y, Hamashima K, Yokohama J, et al. Pt thermal sprayed coating on refractory bricks for glass melting [C]. International Thermal Spray Conference & Exposition, 2011: 843-844.

作者地址: 广州市天河区长兴路 363 号

510651

广州有色金属研究院新材料研究所

Tel: (020)3723 8263

E-mail: yangzhenxiao @163.com