

高效能超音速等离子喷涂射流与涂层特点

刘明¹, 王海军^{1*}, 张伟¹, 王海斗¹, 刘天寅²

(1. 陆军装甲兵学院再制造技术重点实验室, 北京 100072;
2. 宝鸡市新福泉机械科技有限公司, 陕西宝鸡 721008)

摘要: 超音速等离子喷涂技术是热喷涂技术发展的重要方向之一。通过简化模型计算, 比较了常见热喷涂技术的粒子飞行时间、等离子喷嘴喉口的能量密度, 探讨了高效能超音速等离子喷涂典型陶瓷、易氧化纯金属、金属陶瓷复合材料、非晶材料等粒子飞行特征和涂层主要性能。结果表明: 高效能超音速等离子喷涂技术 (HEPJet) 所具有的高温、高速双高特点, 使其能够对各种熔点、易氧化、易失碳材料实现低成本、高效率、高质量的涂层制备, 是一种非常具有应用潜力的热喷涂技术。

关键词: 超音速等离子喷涂; 热喷涂; 喷涂粒子特性; 涂层特点

中图分类号: TG174.4 文献标识码: A 文章编号: 1674-7127 (2018) 12-0005-11

DOI 10.3969/j.issn.1674-7127.2018.04.005

Characteristics of High Efficiency Supersonic Plasma Spraying Jet and Coating

LIU Ming¹, WANG Haijun¹, ZHANG Wei¹, WANG Haidou¹, LIU Tianyin²

(1. National Key Lab for Remanufacturing, Army Academy of Armored Forces, Beijing 100072;
2. Baoji Xin Fu Quan Machinery and Technology Co., Ltd., Shaanxi Baoji 721008)

Abstract: Supersonic plasma spraying technology is one of the most important directions in the development of thermal spraying technology. The particle flight time and the energy density of plasma nozzle throat are calculated and compared by simplified model. The characteristics of the particle flight and the main properties of the coating of typical ceramics, oxidizable pure metals, cermet composites and amorphous materials by high efficiency supersonic plasma sprayed are discussed. The results show that the high efficiency supersonic plasma spraying technology (HEPJet) has the characteristics of high temperature and high speed, so the coatings could be prepared with low cost, high efficiency and high quality for various melting points and materials which are easy to be oxidized and easy to lose carbon

Key words: Supersonic plasma spraying; Thermal spraying; Particles characteristics; Coating characteristics

0 引言

等离子喷涂技术产生于上世纪四十年代, 随

着现代航空、航天技术的发展而迅速发展起来。已广泛应用于军事、航空、航天、纺织、机械、电力、生物工程等各个领域, 是一项应用相当广

作者简介: 第一作者: 刘明 (1979-), 男, 陕西宝鸡人, 博士生, 助理研究员, hzaam@163.com;

通讯作者: 王海军, junwang_hj@sina.com。

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51535011); 973 计划 (61328304)

泛的热喷涂技术^[1,2]。随着高科技的发展,现代工业要求涂层更为致密、强度更高、可靠性更好。而涂层的致密性、结合强度和可靠性在很大程度上依赖于喷射熔滴的熔化程度和速度,于是高能高速喷涂成为了国内外热喷涂技术的发展方向。

超音速等离子喷涂是利用非转移型等离子弧与高速气流混合时出现的“扩展弧”,得到稳定聚集的超音速等离子焰流进行喷涂的方法^[3]。与普通等离子喷涂、爆炸喷涂、高速火焰喷涂等其他喷涂技术相比,超音速等离子喷涂兼有焰流温度高和粒子飞行速度快的优点,等离子弧中心温度可达 32000K,粒子速度能达到 240~800m/s^[4]。超音速等离子喷涂能够喷涂各种高熔点陶瓷、难熔金属和金属陶瓷等喷涂材料,获得的涂层,致密性、强韧性、结合强度都有显著的提高。因此超音速等离子喷涂不仅能制备比普通等离子喷涂有明显提高的一般涂层,更是一种制备高质量陶瓷涂层不可替代的工艺方法。

普通等离子射流温度很高,但速度相对偏低,美国从 20 世纪 80 年代中期率先投入研究,到 80 年代后期,国际上对高速等离子喷涂技术的研究仍处于起步阶段。美国 Browning 公司在 1986 年推出了试验研究型高速等离子喷涂装置(PlazJet),90 年代中期美国 TAFA 公司将 Browning 公司的高速等离子喷涂装置(PlazJet)商业化,并进一步加大了喷涂功率,代表了当时世界的先进水平^[5]。它是通过大气体流量(21m³/h)的气动力提高射流速度,以大功率(270kW)保证射流的足够热焓值。这种设计思路造成了能量消耗大、能量转换率低,喷涂成本较高,因此限制了其推广运用。

陆军装甲兵学院装备再制造技术国防科技重点实验室从上世纪八十年代末就开始了高速等离子喷涂技术的研究工作,在多年研究的基础上,于 2000 年研制成功了低功率、小气体流量的高效能超音速等离子喷涂系统(HEPJet)^[6,7]。突破了传统的依靠提高功率和气体流量来获得超音速射流的方法;提出了在低功率、小气体流量条件下实现超音速等离子射流的设计思路;发明了高效能超音速等离子喷涂枪;在国内外率先研制出高能量(120kW)、高电压(220V)逆变式等离子

喷涂电源;配备了先进的喷涂过程自动控制、故障自动监测控制柜,具有明显的独创性、新颖性和实用性^[8]。其价格和运行成本仅为 PlazJet 高能高速等离子喷涂系统的三分之一。高效能超音速等离子喷涂系统(HEPJet)的研制成功,使我国成为继美国之后第二个能够生产成套高速等离子喷涂系统的国家,填补了我国自主制造超音速等离子喷涂设备的空白,并率先在国内外将该系统推向工程应用的前沿,提高了我国热喷涂技术的发展水平,为我军现代武器装备提供了高科技的表面工程和绿色再制造手段,具有重大的军事效益和经济效益,应用前景广阔^[8]。

1 HEPJet 的性能特点

(1) HEPJet 系统的焰流(热源)温度和喷涂材料的粒子飞行速度与其它热喷涂工艺方法比较(如图 1 所示),可调节范围最宽。

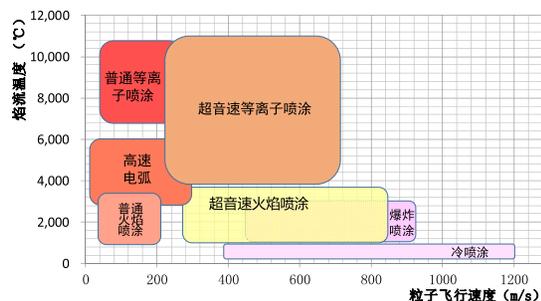


图 1 常见热喷涂方法的粒子速度和焰流温度比较
Fig.1 Comparison of Particle Velocity and Flame Temperature of Common Thermal Spraying Methods

HEPJet 的焰流温度最低达 4000 ,最高达 11000 以上,超过了普通等离子喷涂;粒子飞行速度最低为 240m/s 与普通等离子喷涂和电弧喷涂相当,最高达 800m/s 接近 HVOF 的最大值^[4]。HEPJet 的焰流温度与粒子速度可大范围稳定调节的特点为制备各种熔点、易氧化、易失碳材料的高性能涂层奠定了基础。

(2) HEPJet 与其它热喷涂工艺方法相比较喷涂粒子的飞行时间最短,即喷涂材料在射流中滞留的时间最短。

对于不同的喷涂工艺方法,喷涂材料被送到

热源中,直至喷射到基体上,其被加热的时间(即粒子在射流中的飞行时间, t)、被加热的距离(即粒子在射流中的飞行距离, D),以及粒子撞击基体时的速度值(V_t)是有较大差别的。当喷涂金属材料时,HEPJet的 D 常为 100mm 左右, V_t 可达到 450m/s 左右;超音速火焰喷涂(HVOF)的 D 常为 400mm 左右; V_t 可达到 600m/s 左右;普通等离子喷涂(APS)的 D 常为 100mm 左右;

V_t 可达到 250m/s 左右;普通火焰喷涂(FS)的 D 常为 300mm 左右; V_t 可达到 150m/s 左右。为简化计算,假设喷涂粒子在到达基体前做匀加速运动,将以上参量代入式 1 可近似得到粒子在射流中的飞行时间(t),如表 1 所示。

$$t = \frac{2D}{v_t} \quad (1)$$

表 1 不同喷涂方法的热源温度及粒子飞行距离、速度和时间

Table1 Heat source temperature and particle flying distance, velocity and time of different spraying methods

喷涂方法	热源温度 ()	V_t (m/s)	D (mm)	t (s)
超音速等离子喷涂 HEPJet	4000~11000	450	100	4.4×10^{-4}
超音速火焰喷涂 HVOF	1000~3000	600	400	13.3×10^{-4}
普通等离子喷涂 APS	6500~11000	250	100	8×10^{-4}
普通火焰喷涂 FS	1000~3000	150	300	40×10^{-4}

从表 1 知,HEPJet 的粒子飞行时间最短,是 HVOF 的 1/3,APS 的 1/2,FS 的 1/10;HEPJet 的热源温度可调节范围最大,其最大热源温度是 HVOF 的 3~4 倍。因此从喷涂工艺方法上分析,HEPJet 最容易实现对喷涂粒子的快速加热和快速冷却,非常适于制备非晶结构涂层;加之 HEPJet 为惰性热源的特点,使得其能够制备高性能易氧化材料涂层,如 Ti、Al、Zn 等。

(3) HEPJet 相对普通等离子而言,电流不仅仅是电参数可调节的唯一,电压成为可选择、可调节的电参数,电压可根据材料性能、涂层性

能和工艺要求在 60~220V 之间选择性设定与调节,这对射流的可控性提供了方便。

(4) HEPJet 与普通等离子喷涂相比较,等离子射流的能量密集度是后者的 2.4~8.8 倍,如表 2 所示,其中能量密集度为单位面积内瞬时流经的能量(),按式(2)计算。

$$\psi = \frac{P}{\pi \cdot (D/2)^2} \quad (2)$$

式中, P 为喷涂功率, D 为喷嘴喉口的内径。

表 2 HEPJet 与普通等离子喷涂的能量密集度比较

Table 2 Comparison of energy intensity between HEPJet and conventional plasma spraying

喷涂方法	喷涂功率 P (kW)	喷嘴喉口的内径 D (mm)	能量密集度 kW/mm^2
超音速等离子喷涂 HEPJet	80	3.9~5.5	6.7~3.37
普通等离子喷涂 APS	40	6~8	1.42~0.76

由于 HEPJet 的粒子飞行速度高,在射流中滞留时间最短暂,必须要有足够的能量才能使粒子获得好的熔化状态,获得高性能涂层。HEPJet 通

过实现高的能量密集度,满足了高速飞行粒子的加热需求,使不同喷涂材料匹配不同能量大小的热源在短暂的加热时间内恰好能够达到适宜的温

度，为喷涂易失碳的碳化物材料提供了保证。

2 典型涂层特点

超音速等离子喷涂技术与其它热喷涂技术相比，具有惰性气氛热源、温度高、热效率高、射流和喷射粒子速度高、射流能量密集度高、粒子

在射流中滞留时间最短、热源温度和粒子速度可调节范围最宽、喷涂材料广泛的特点，不但特别适合制备高性能、高质量、高可靠性的陶瓷涂层，而且对制备高性能易氧化的纯金属、易失碳氧化的金属陶瓷涂层也具有明显的优势。常见的涂层性能特点如表 3 所示。

表 3 HEPJet 制备的几种典型涂层性能
Table 3 Several Typical Coatings Prepared by HEPJet

涂层材料	涂层性能		
	结合强度 (MPa)	孔隙率 (%)	显微硬度 (HV _{0.3})
Al ₂ O ₃ ^[9,10]	25~33	<2.5%	900~1100
WC-12Co ^[11,12]	50~65	<2%	950~1150
Cr ₂ O ₃ ^[13,14]	28~35	<1.5%	1000~1300
NiCr-Cr ₂ C ₃ ^[15,16]	60~70	<1%	950~1000
Ti ^[17]	45~55	<2%	200~350
Fe 基非晶 ^[18]	50~60	<1%	800~950
Al ₂ O ₃ +40%TiO ₂ ^[19]	30~40	<2%	850~950

2.1 Al₂O₃ 涂层

Al₂O₃ 陶瓷涂层由于其良好的耐磨性、耐热性、耐腐蚀性、抗氧化性以及电绝缘性，被广泛用作隔热涂层、绝缘涂层以及耐滑动摩擦磨损的涂层。目前一般采用等离子喷涂工艺制备 Al₂O₃ 陶瓷涂层。由于 Al₂O₃ 粉末熔点高，比重轻，制备出性能优异的 Al₂O₃ 涂层一直是个难点问题。高效能超音速等离子喷涂系统焰流更加集中，射流速度更快，是制备性能优异的 Al₂O₃ 涂层优选的技术工艺方法。

使用芬兰引进的 SprayWatch-2i CCD 在线监测系统对超音速等离子射流中的粒子速度、温度进行监控。喷涂中 Al₂O₃ 粒子平均速度达到 650m/s，平均温度达 3150 左右，如图 2 所示。从图 3 所示的 Al₂O₃ 涂层截面形貌可以看出，利用高效能超音速等离子喷涂系统制备的 Al₂O₃ 涂层具有粒子熔化状态好，变形充分，涂层非常致密，无分层、裂纹和明显的孔隙等优异特点。

2.2 WC-Co 涂层

WC-Co 是典型硬质合金材料，由于 WC-Co 涂层有很高的硬度和和良好的强韧性，常用超音速火焰喷涂和爆炸喷涂制备超硬（1200~1400 HV_{0.2}）耐磨涂层。这两种喷涂方法由于焰流速度高、温度较低，可以有效地减轻 WC 在喷涂过程中的分解现象，是制备 WC-Co 涂层较常用的工艺方法。采用常规等离子喷涂工艺进行喷涂时，由于等离子射流温度高，粒子飞行速度低，WC 粉末易发生氧化、脱碳和烧损，致使涂层性能降低；而使用高效能超音速等离子喷涂系统 (HEPJet) 时，情况则与之明显不同。

图 4 是 WC-Co 粒子在 HEPJet 焰流中的速度、温度状态图。显示粒子的平均速度达 420m/s，平均温度达 2600 。如图 5 所示，利用 HEPJet 制备的 WC-Co 涂层，粒子变形充分、涂层均匀、致密、无分层、裂纹和明显的孔隙。图 6 是 WC-Co 涂层的 XRD 衍射图谱，可以看出，从整体衍射曲

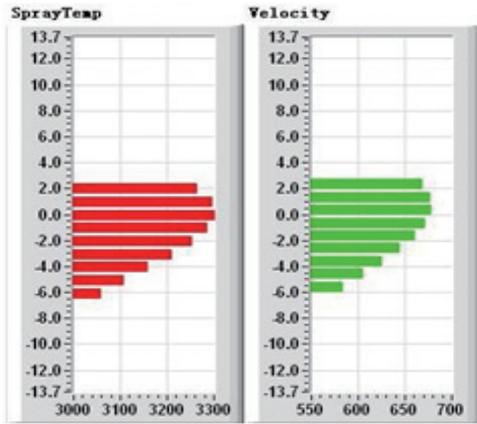


图 2 Al₂O₃ 粒子速度、温度状态^[9]

Fig.2 Velocity and Temperature State of Al₂O₃Particles

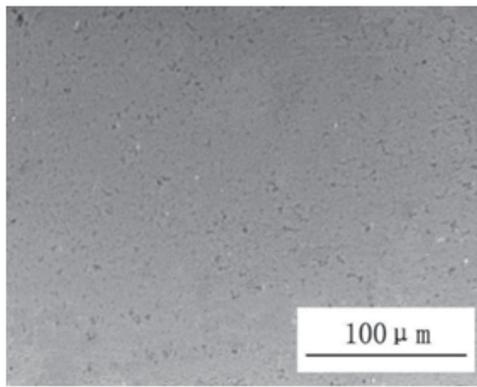


图 3 Al₂O₃ 涂层截面 SEM 形貌^[9]

Fig.3 SEM Morphology of Al₂O₃ Coating Section

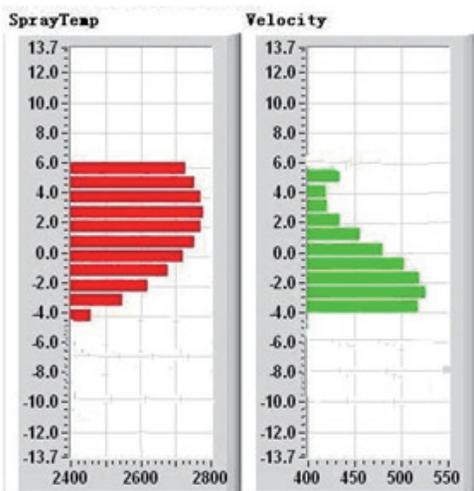


图 4 WC-Co 粒子速度、温度状态^[11]

Fig.4 Velocity and Temperature State of WC-Co Particles

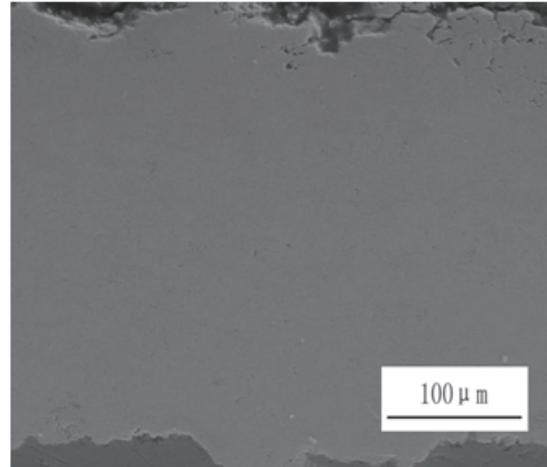


图 5 WC-Co 涂层截面 SEM 形貌^[11]

Fig.5 SEM Morphology of WC-Co Coating Section
 线来看,涂层的 WC 相保持完好,证明射流速度的提高对抑制 WC 的分解和氧化的效果明显。采用 HEPJet 可以获得较好 WC-Co 涂层的原因可能为: HEPJet 的焰流温度可调节范围大,且速度高,可以使得 WC-Co 粒子以接近 HVOF 喷涂的粒子温度、速度飞行;如表 1 所示,HEPJet 的喷涂距离短,粒子在高温焰流中滞留时间最短,仅为 HVOF 的 1/3,普通 APS 的 1/2,且热源中不含氧气,粒子氧化脱碳的几率显著降低。经测量涂层显微硬度(1350HV_{0.3})^[12]和结合强度(65MPa)^[12]均较高,孔隙率达到 0.6%^[12],且与超音速火焰喷涂和爆炸喷涂方法相比沉积效率和喷涂速率大幅提高,综合成本显著降低,涂层受氧化的程度也有所降低^[20]。

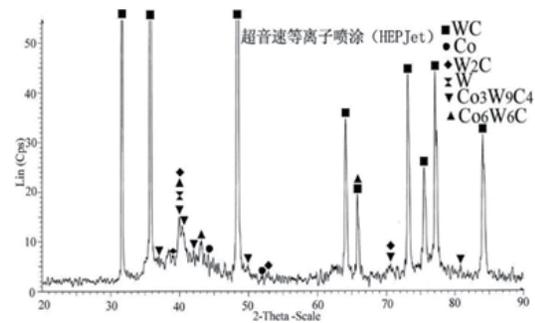


图 6 WC-Co 涂层 XRD 衍射图谱^[11]

Fig.6 XRD Diffraction Patterns of WC-Co Coatings

目前瓦楞辊在造纸业的使用比例相当大,由于生产过程中,重压下参与啮合的只是齿的顶部

和沟部一段很小的范围，相对滑动率很大，齿顶齿根磨损相当严重。目前在制造材料的选择上已发挥到极限，但通过高效能超音速等离子喷涂 WC-Co 涂层对磨损报废的瓦楞辊进行尺寸修复、硬化和耐磨性处理，工艺简单，成本低，修复成本仅为新品的 1/2~1/3，经过再制造处理的瓦楞辊性能超过新品。

2.3 NiCr-Cr₃C₂ 涂层

热喷涂 NiCr-Cr₃C₂ 涂层因其优异的耐高温、耐磨损及高温耐蚀性能，广泛应用于零部件的表面强化和尺寸修复，如柴油机缸套、油田钻杆的表面耐磨器件、锅炉四管的抗高温氧化腐蚀器件等。HVOF 喷涂 NiCr-Cr₃C₂ 涂层具有结合强度高、显微硬度高、结构致密的特点，在现代工业中已得到广泛认可。但采用 HVOF 制备 NiCr-Cr₃C₂ 涂层沉积效率较低(约 30%)，造成了喷涂成本较高。

超音速等离子喷涂 (HEPJet) 在喷涂过程中，喷涂距离短，粒子飞行速度高，粒子被加热时间短，飞行粒子在惰性气体中加热、加速，粒子失碳、被氧化的可能性远低于 HVOF，可获得综合性能较好的涂层。图 7 为 NiCr-Cr₃C₂ 粒子在焰流中的速度、温度状态图。显示粒子的平均速度达 450m/s，平均温度达 2170。从图 8 所示的涂层截面可以看出，HEPJet 制备的 NiCr-Cr₃C₂ 涂层致密、均匀，由硬质相的 Cr₃C₂ 相和粘结相 NiCr 两种相结构交替组成，涂层既具有较高的硬度又具有较高的韧性，从而保证了涂层具有较高耐磨性，同时也具

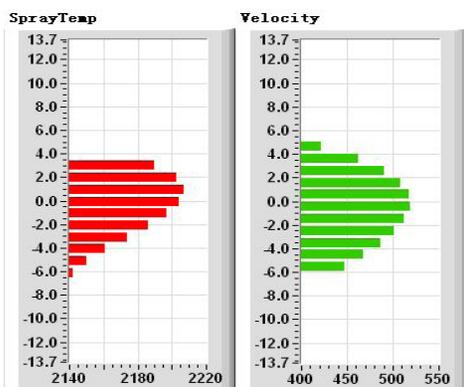


图 7 NiCr-Cr₃C₂ 粒子速度、温度状态 [15]

Fig.7 Velocity and temperature state of NiCr-Cr₃C₂ particles

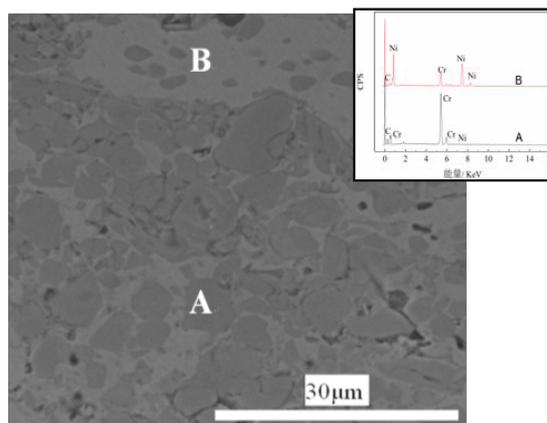


图 8 SEM 截面图及对应的 EDS 能谱图 [15]

Fig.8 SEM Cross Section and EDS Spectrum

有良好的内聚强度和结合强度，因此能在众多领域中得到推广应用。能谱中没有氧元素出现，说明喷涂过程中形成氧化物很少或几乎没有元素被氧化。分析图 9 中 NiCr-Cr₃C₂ 涂层的 XRD 图谱可知，涂层主要由 NiCr 相和 Cr₃C₂ 相组成。涂层中存在少量 Cr₇C₃，但没有氧化物存在。

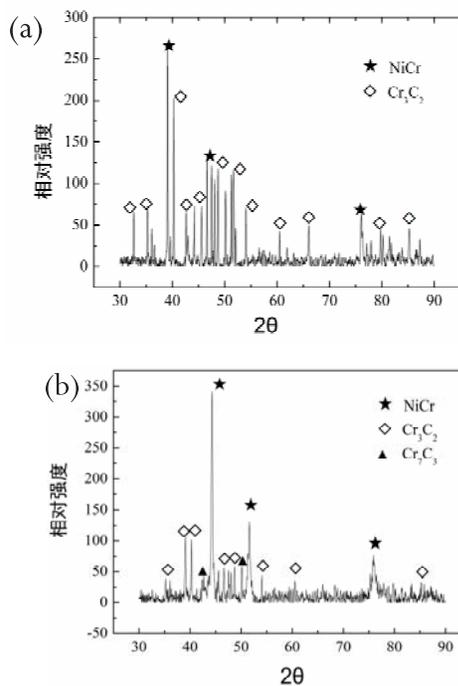


图 9 NiCr-Cr₃C₂ 喷涂粉末及涂层 XRD 图谱 [15] : (a)NiCr-Cr₃C₂ 粉末 XRD 图谱; (b) NiCr-Cr₃C₂ 涂层 XRD 图谱

Fig.9 XRD spectrum of NiCr-Cr₃C₂ sprayed powder and coating: (a) XRD spectrum of NiCr-Cr₃C₂ powder;(b) XRD spectrum of NiCr-Cr₃C₂ coating

HEPJet 制备 NiCr-Cr₃C₂ 涂层的性能与消耗相较于 HVOF (如表 7、表 8 所示), 氧化现象不明显; 涂层结合强度、孔隙率、显微硬度等指标与 HVOF 接近, 沉积效率大于 60%, 是 HVOF 的

2 倍。制备相同厚度与面积的 NiCr-Cr₃C₂ 涂层, HEPJet 比 HVOF 成本低。所以, 从经济性和节能减排的角度看, HEPJet 制备 NiCr-Cr₃C₂ 涂层更具有优势。

表 7 不同工艺制备 NiCr-Cr₃C₂ 涂层性能对比

Table 7 Performance comparison of NiCr-Cr₃C₂ coatings prepared by different processes

性能指标	HVOF	HEPJet	二者比较
孔隙率	0.98% ^[21]	1.07%	相当
结合强度	68-75MPa	65-70MPa	相当
物相组成	Cr ₃ C ₂ , Cr ₂ O ₃ , NiCr, NiO, Cr ₇ C ₃ , C ₆ CrO ₆ 等	Cr ₃ C ₂ , NiCr, Cr ₇ C ₃ 等	HEPJet 氧化不明显
显微硬度	950-1100HV ^[22]	950-1000HV	相当
物相分布	粘结相, 硬质相均匀分布	粘结相, 硬质相均匀分布	相当

表 8 不同工艺制备 NiCr-Cr₃C₂ 涂层消耗对比

Table 8 Consumption comparison of NiCr-Cr₃C₂ coatings prepared by different processes

指标	HVOF (德国 GTV)	HEPJet	二者比较
燃料 / 电功率	煤油: 26L/h	电功率: 62KW	后者价格是前者的一半
耗气量	氧气: 800L/min 氩气: 20L/min	氩气: 140L/min 氮气: 24L/min 送粉气: 12.6L/min	后者远小于前者
送粉量	50g/min	40g/min	后者小于前者
涂层沉积速率	15g/min	25g/min	后者远大于前者

2.4 连续梯度热障涂层

热障涂层 (thermal barrier coatings, TBCs) 是当今热喷涂技术领域研究最多、应用水平最高、最有发展潜力的几种最重要的涂层之一。选用 Y₂O₃-CeO₂ 复合稳定的多晶 ZrO₂ 陶瓷粉末和 NiCoCrAlY 合金粉末, 根据高效能超音速等离子喷涂的内送粉特点, 开发出两路内送粉、分别输送熔点高的陶瓷和熔点低的金属至等离子射流的不同温区的“双通道、双温区”专用喷嘴, 较好地解决了普通等离子喷涂梯度 TBCs 时, 高熔点陶瓷“夹生”和低熔点合金“过熔”的难题^[23]。获得了陶瓷组分和金属组分各自都获得良好熔

化, 沿途层厚度方向呈均匀梯度分布的连续梯度热障涂层系统 CG-TBCs。如图 10 所示, 用“双通道、双温区”高效能超音速等离子喷涂 (HEPJ) 制备的 CG-TBCs 涂层显得十分致密、均匀, 陶瓷相 (白区) 与合金相 (灰区) 相互层叠交错, 实现了沿途层厚度方向呈均匀的连续梯度分布, 整个 CG-TBCs 系统看不出明显的宏观界面。对 CG-TBCs 试样进行的 1200 加热 - 淬水热冲击试验。经 200 次热震循环后, 约 1mm 厚的 CG-TBCs 涂层仅在最表层的纯陶瓷层 (0.2~0.3mm) 形成了一些网状微裂纹 (如图 11 所示), 表现出优异的抗热震性能。

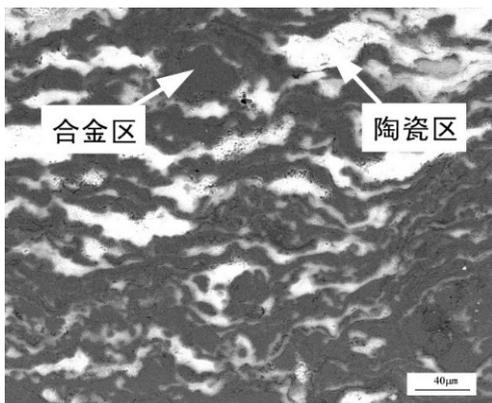


图 10 超音速等离子喷涂制备 CG-TBCs 的截面形貌^[23]

Fig.10 Cross section morphology of CG-TBCs prepared by supersonic plasma spraying



图 11 CG-TBCs 试样经 200 次热震试验后表面形貌^[23]

Fig.11 Surface morphology of CG-TBCs specimens after 200 thermal shock tests

目前由金属结合层与氧化锆陶瓷层构成的热障涂层体系 (TBCs) 已经应用于航空发动机与燃气轮机。然而,热障涂层在使用过程中易发生氧化锆涂层的脱落失效,导致涂层寿命有限。采用“双通道、双温区”超音速等离子喷涂新工艺,制备出的连续梯度热障涂层 (CG-TBCs),涂层内部合金与陶瓷成分连续变化,无明显内界面,涂层的抗热震性能大幅度提升。HEPJet 已成功应用于某型航空发动机叶片表面强化,使其热障涂层的主要性能指标得到了进一步提升。

2.5 Ti 涂层

目前常采用低压等离子喷涂 (LPSS) 和冷喷

涂 (CGDS) 制备钛涂层。但这两种喷涂方法均需采用热喷涂专用 Ti 粉制备涂层,材料价格昂贵 (大于 3000 元/kg),设备价格也高,从而喷涂成本高,且喷涂工件的尺寸和形状受限,喷涂作业的场地受限,不能在户外对大型装备实施现场喷涂。

超音速等离子喷涂技术 (HEPJet) 的热源温度高,且为惰性气氛,喷涂距离小,喷涂粒子在等离子射流中的飞行速度高 (可达到 500-800m/s 以上)、被加热时间短,在射流中被氧化的可能性较小,对于喷涂易氧化的钛粉具有一定的优势。HEPJet 的喷枪小巧、仅消耗电能和 Ar 气,对喷涂环境无苛刻要求,能够随车配备于方舱内的精便型超音速等离子喷涂系统还可用于户外现场喷涂。

HEPJet 可采用廉价的 Ti 破碎粉末 (一般 200 元/kg 以内,粉末杂质含量偏多,Ti 含量 98% 左右,主要用于粉末冶金,属非热喷涂专用粉末) 制备钛涂层,为钛涂层低成本推广应用开辟了一种途径。

图 12 是 HEPJet 喷涂距离为 65mm 时 Ti 粒子在焰流中的速度、温度状态图。显示粒子的平均速度为 523m/s,平均温度为 2595。如图 13 所示,HEPJet 制备的 Ti 涂层均匀、致密,对 A 区进行 EDS 能谱分析 (如图 14 所示),涂层中主要为 Ti 元素,O 含量小于 3%、N 含量小于 5%。对 Ti 粉末和涂层进行 X 射线相成分分析 (XRD),由图 14 可知,涂层与粉末的衍射峰基本相同,在涂层中含有少量 Ti_4O_7 和 Ti_4N_2 。对涂层进行显微硬度测试,其硬度为 221HV_{0.2},略高于纯钛 TA1,进一步说明涂层中的氧化物和氮化物较少。

据统计,在我国每年利用钛合金耐腐蚀特性的钛材用量达到总用量的 60% 以上,包括化工、海洋、舰船、盐业等方面^[24]。钛的价格较高,采用 HEPJet 在零部件表面制备钛涂层以达到防腐目的是节约成本的一种较好选择。采用 HEPJet 在铁基或铝基零部件表面制备钛涂层,不仅可以赋予零部件钛合金的耐腐蚀性能,而且可以通过添加其它元素,进一步提高零部件耐腐蚀性或满足其它特殊功能的需要。HEPJet 制备钛涂层厚度一

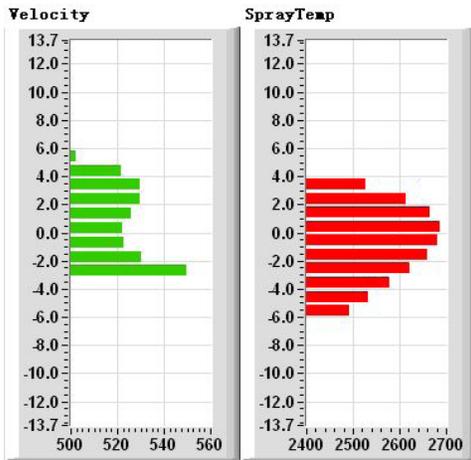


图 12 Ti 粒子速度和温度 [17]

Fig.12 Velocity and temperature of Tiparticles

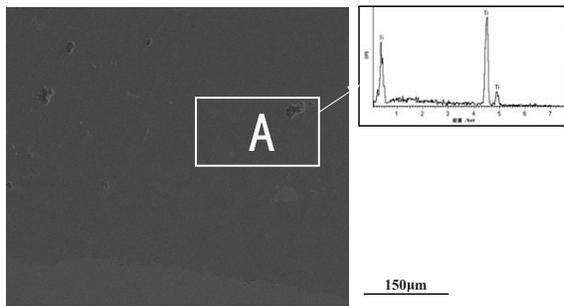


图 13 Ti 涂层截面抛光后 SEM 照片及 A 区 EDS 图谱 [17]

Fig.13 SEM photos and EDS atlas of area A of polished Ti coatings

般小于 0.5mm，可大量减少钛的消耗，且对待喷零件形状要求不高，喷涂工艺相对简单。因此采用 HEPJet 制备钛涂层在航空、航天飞行器、海洋舰艇、化工、能源、石油、盐业、生物医学等多领域具有明显的应用潜力。

2.6 Fe 基非晶涂层

利用热喷涂技术在重要零部件表面制备非晶涂层的方法比较便捷，而且能够显著的提高其寿命和耐腐蚀性。由于对超差报废的废旧零部件，通过制备非晶涂层，可恢复尺寸，所以这种获得非晶，并在工艺中应用非晶的方法，能够减少资源浪费，充分利用零部件的附加值、经济效益突出。

HEPJet 具有热源温度高，且可调节范围大

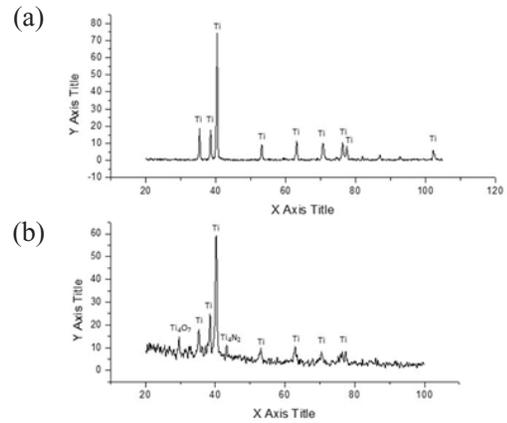


图 14 Ti 喷涂粉末及涂层 XRD 图谱：(a)Ti 粉末 XRD 图谱；(b)Ti 涂层 XRD 图谱 [17]

Fig.14 XRD atlas of Tisprayed powder and coating: (a)XRD spectrum of Ti powder; (b) XRD pattern of Ti coating

(4000~11000)；喷涂粒子速度能够被加速至 240~800m/s；工作气体主要呈惰性，对粒子氧化少；喷涂距离短，最小可达 60mm 等诸多有利于快速加热、快速冷却获得非晶结构涂层的优势，而且还可根据实际需要设计、选配合适的内送粉喷嘴，以提高能量利用率和加速热源对粒子的加热。与其它热喷涂方法相比较，HEPJet 的喷涂粒子在射流中滞留时间最短，最容易实现对喷涂粒子的快速加热和快速冷却，非常有利于获得非晶结构涂层。

图 15 为 HEPJet 制备的 Fe 基非晶涂层的表面与截面面貌，可以看到喷涂粒子熔化充分，撞击基体后铺展变形量大，涂层表面较平整，从截面照片看涂层比较致密，孔隙和杂质都较少，涂层中基本上看不到层状结构，粘接界面未见任何粗大孔隙或裂纹，涂层与基体结合牢固可靠。利用 XRD 分析涂层的非晶含量，如图 16 所示，发现涂层的非晶含量为 90.2%，高于粉末的 82.5%，说明 HEPJet 制备 Fe 基非晶涂层时，能够在保持粉体中原有非晶含量的基础上，还可促进非晶的形成。

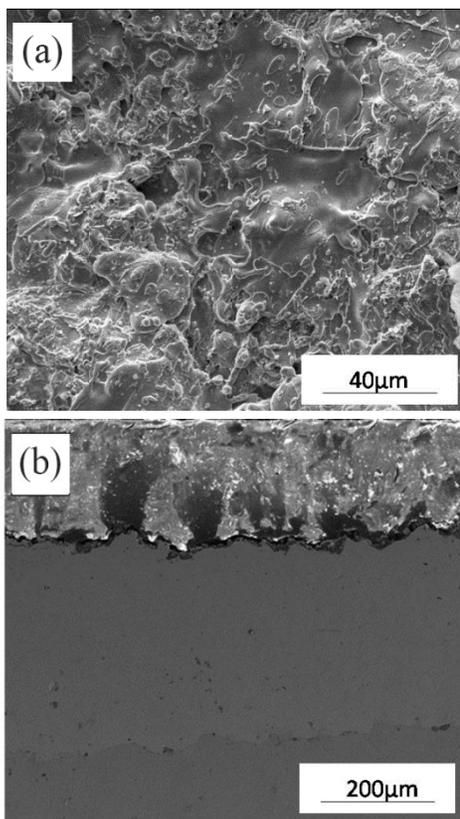


图 15 Fe 基非晶涂层表面与截面 SEM 照片 [18] : (a) Fe 非晶涂层表面形貌 ; (b) Fe 基非晶涂层截面形貌
Fig.15 SEM Photographs of Surface and Section of Fe-based Amorphous Coatings: (a)Surface Morphology of Fe Amorphous Coatings; (b)Cross Section Morphology of Fe-based Amorphous Coatings

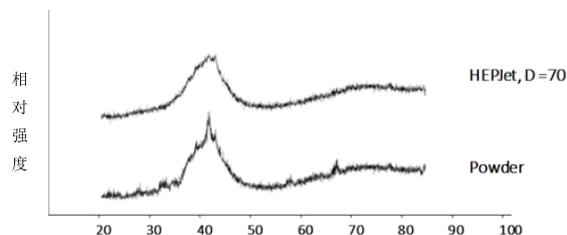


图 16 涂层与粉末 XRD 图谱 [18]
Fig.16 XRD Atlas of coatings and powders

表 9 为 HEPJet 和 HVOF 制备的 Fe 基非晶涂层性能测试结果。通过比较可知，HEPJet 热源温度和速度双高的特点，使得其制备的 Fe 基非晶涂层致密性、显微硬度、结合强度等均优于 HVOF，尤其是沉积效率明显高于 HVOF。HEPJet 相比 HVOF 更具备低成本、高效率制备高性能 Fe 基非晶涂层的优势。

3 结论

(1) 高效能超音速等离子喷涂系统 (HEPJet) 喷涂具有突出的高温、高速的“双高”特点，与普通等离子喷涂相比，喷涂高熔点的陶瓷材料，使得涂层的主要性能指标明显提高；与超音速火焰相比，使得喷涂材料的范围得到极大的拓宽，可以适宜喷涂所有可用于喷涂的粉体材料，且喷涂成本更低。

(2) HEPJet 制备的涂层组织致密、孔隙率小、

表 9 涂层性能测试结果
Table 9 Test results of coating properties

工艺方法	孔隙率 (%)	显微硬度 (HV _{0.3})	结合强度 (MPa)	沉积效率 (%)
HEPJet	0.65	905	58.1	77.7
HVOF	1.12	890	54.4	65.4

与基体结合强度高，解决了许多重要装备贵重零部件过去无法修复或使用寿命短的难题。由于其突出的特点，国内军工企业、院校、科研院所、业内主要企业等多家单位选择了该套系统。已在国防、工业、航空航天等重要领域有了广泛的应用，尤其是在科研试验研究和关重零部件上得到了应

用，发挥了重大作用。如钢厂高温段辊子的表面涂层、航空发动机叶片的热障涂层等。

(3) 高效能超音速等离子喷涂技术 (HEPJet) 是再制造技术中一项先进、高效、高质量的表面强化与修复技术。它的出现，对提升我国热喷涂技术的整体水平产生了积极作用，必将在更多领

