

送粉位置对等离子喷涂 YSZ 粒子熔化状态的影响

王秋童, 冉 健, 乔新义, 汪瑞军

(中国农业机械化科学研究院 表面工程技术研究所, 北京 100083)

摘 要: 研究了等离子喷枪采用 3 个送粉位置时距离喷嘴 90 mm 处 YSZ 粒子的熔化状态(包括粒子温度及速度、粒子粒度分布、粒子撞击基体后的扁平形貌), 其中送粉位置 1 和 2 为枪外送粉, 送粉孔轴线距离喷嘴端面分别为 9 mm 和 3.5 mm, 送粉位置 3 为枪内送粉, 送粉孔轴线距离喷嘴端面 5 mm。结果表明, 送粉位置沿等离子射流逆流方向移动时(分别对应送粉位置 1、2 和 3), 粒子熔化效果明显增强, 粒子扁平化程度提高; 涂层中未熔颗粒和孔隙百分比由 33.25% 减小至 10.13%, 涂层结合强度由 16.25 MPa 增加至 37.25 MPa, 涂层表面剥落 20% 时经历的热震次数由 35 次增加至 130 次; 采用送粉位置 3 时, 喷涂功率 33.60 kW, 低于其他送粉位置的电弧功率(46.75 kW), 实现了低功率制备高性能 YSZ 涂层。

关键词: 等离子喷涂; 送粉位置; 氧化钇稳定氧化锆(YSZ); 熔化状态

中图分类号: TG174.442

文献标志码: A

文章编号: 1007-9289(2014)02-0006-07

Effect of Powder Injection Positions on the Melting State of Plasma Sprayed YSZ Particles

WANG Qiu-tong, RAN Jian, QIAO Xin-yi, WANG Rui-jun

(Institute of Surface Engineering Technology, Chinese Academy of Agricultural Mechanization Science, Beijing 100083)

Abstract: This paper analyzed different melting states of yttria-stabilized(YSZ) zirconia particles sprayed at 3 different powder injection positions. Powder injecting position 1 and 2 were located outside the nozzle. However, position 3 was located inside the nozzle. Particles states including particles average temperature, fly velocity, size distribution and splats patterns were measured at the distance of 90 mm from the nozzle exit. The results show that when the powder injection position removed along the downstream of a plasma jet (from position 1 to position 3), the particle heating effect was enhanced. The particle flattening degree increased and deposited coating became denser with fewer amounts of un-melted particles and pores. The average adhesion strength of YSZ coatings increased from 16.25 MPa to 37.25 MPa. Bend performance and thermal shock resistance of the coatings also increased. At powder injection position 3, high performance coatings were obtained with less power consumption of 33.60 kW in comparison with other positions of 46.75 kW.

Key words: plasma spraying; powder injection position; yttria-stabilized zirconia(YSZ); melting condition

0 引 言

等离子喷涂是将粉末材料送入等离子射流中, 熔融或半熔融状态的粒子快速喷射至经过处理的基体表面形成涂层的一种热喷涂技术。目前, 其制备的耐磨、耐腐蚀、热障及各种功能涂层

已广泛用于航空航天、机械、冶金、纺织、能源、石油化工等工业领域。研究表明, 粒子熔化状态和基体表面状况是影响涂层微观结构和性能的重要因素^[1-3]。

等离子射流作为粒子加热、加速的媒介, 其

收稿日期: 2013-12-04; 修回日期: 2014-03-03

作者简介: 王秋童(1983—), 男(汉), 北京人, 助理工程师, 本科; 研究方向: 机械设计及理论

网络出版日期: 2014-03-18 16:40; 网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.3905.TG.20140318.1640.005.html>

引文格式: 王秋童, 冉健, 乔新义, 等. 送粉位置对等离子喷涂 YSZ 粒子熔化状态的影响 [J]. 中国表面工程, 2014, 27(2): 6-12.

温度和速度场呈现较大的梯度分布,如图 1、2 所示^[4-5]。喷枪送粉位置决定了粉末颗粒在等离子射流中运动的起始点,较大程度决定了粉末在等离子射流中的运动轨迹。送粉位置变化后,粒子加热、加速历程发生变化,影响其到达基体前的温度和速度,从而使涂层结构和性能发生变化。

1 试验过程

1.1 材料及方法

采用 NiCrAlY 粉末(粒度范围 15~45 μm)作为粘结层材料,使用 HVOF 工艺制备粘结层,厚度约为 100 μm 。采用纳米团聚 YSZ 粉末作为面层材料,粉末粒度范围 38~61 μm ,粉末表面 SEM 形貌如图 3 所示,原始粉末截面金相形貌如图 4 所示。由图 4 可知,原始粉末是由纳米颗粒团聚并等离子球化造粒而成,粉体内部较致密。采用等离子喷涂工艺制备的 YSZ 面层厚度为 200~250 μm 。

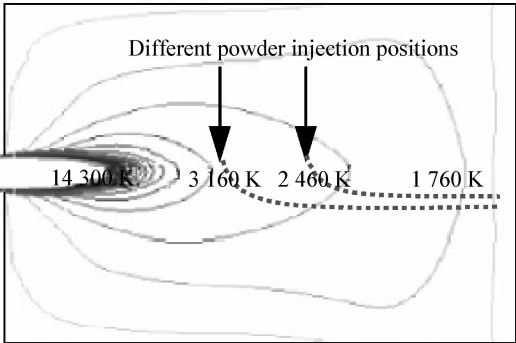


图 1 等离子射流温度分布

Fig. 1 Spatial distribution of plasma gas temperature

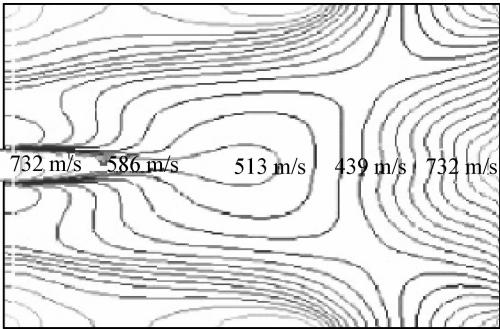


图 2 等离子射流速度分布

Fig. 2 Spatial distribution of plasma gas velocity

氧化钇稳定氧化锆(YSZ)粉末广泛应用于制备热障涂层隔热面层,由于其熔点高(2 700 $^{\circ}\text{C}$)、热导率低的特点,增大喷枪功率是增强其熔化效果的途径。然而,大连海事大学 An L T 等人关于送粉位置对等离子喷涂陶瓷涂层性能的影响研究^[6]表明,改变喷枪送粉位置后,使用相同喷涂功率即可制备出高性能陶瓷涂层。目前,关于送粉位置对等离子喷涂制备 YSZ 涂层影响的研究鲜有报道^[7-10]。因此,文中采用多种手段表征了采用不同送粉位置时 YSZ 粒子熔化状态,包括飞行粒子温度及速度、喷涂后粒子粒度分布、飞行粒子撞击基体后的扁平粒子形貌,同时比较了所制备涂层的截面金相组织和性能,以期送粉方式对涂层组织和性能影响的研究提供数据支撑。

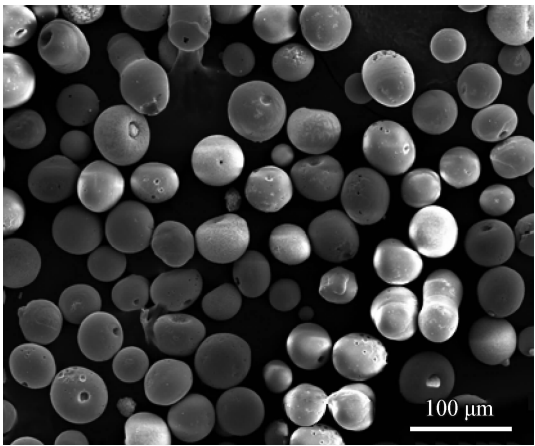


图 3 粉末表面形貌

Fig. 3 Surface morphology of YSZ powders

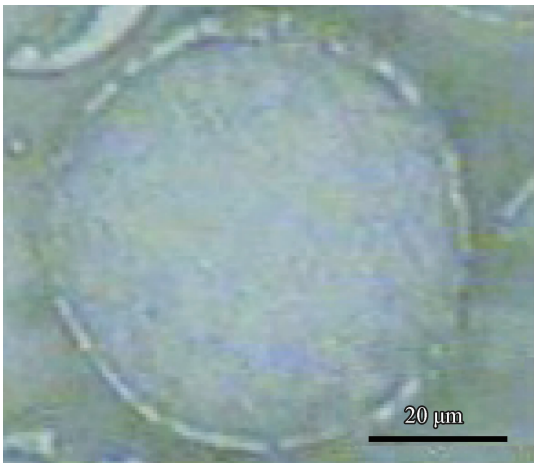


图 4 粉末截面形貌

Fig. 4 Cross section morphology of YSZ particle

结合强度试样采用 2Cr13 不锈钢,尺寸为 Φ 25.4 mm $\times$ 8 mm,热震、金相、背弯试样均采用 GH3030 镍基高温合金,尺寸分别为 40 mm $\times$

20 mm×3 mm,30 mm×20 mm×2 mm,125 mm×25 mm×1.5 mm。

采用内、外送粉喷嘴及专用送粉架实现在不同位置送粉,3 个送粉位置如图 5 所示,喷涂参数如表 1 所示(送粉位置 3 的喷涂功率采用内送粉喷涂优化后的工艺参数。工艺研究表明,等离子喷枪采用内送粉后若继续使用外送粉时的高功率,会造成粒子过熔并发生细化,导致部分小颗粒在达到基体前发生固化,降低了扁平粒子间粘结,从而降低了涂层结合强度和性能)。采用 Spray Watch 2i 粒子在线检测仪测量飞行粒子的温度和速度,测量距离为 90 mm;在距喷嘴出口 90 mm 处迅速放入不锈钢薄板,收集扁平粒子;

调整机械手姿态使等离子喷枪竖直向下,下面放置装满蒸馏水的容器,水面距喷嘴出口 300 mm,喷涂 5 min 后,将液料烘干收集喷涂粒子。

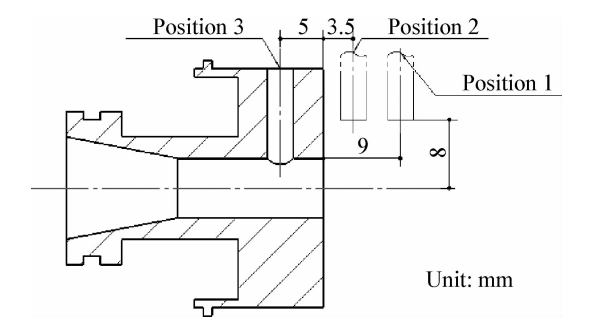


图 5 不同送粉位置示意图
Fig. 5 Schematic diagram of powder injection positions

表 1 不同送粉位置时的喷涂工艺参数

Table 1 Spray parameters for different powder injection positions

Position	Current/ A	Voltage/ V	Ar flow/ (L · min ⁻¹)	H ₂ flow/ (L · min ⁻¹)	N ₂ flow/ (L · min ⁻¹)	Feeding speed/ (r · min ⁻¹)	Pressure/ MPa	Gas flow/ (L · min ⁻¹)
1	550	85	30	0.83	10	1.9	0.15	6
2	550	85	30	0.83	10	1.9	0.15	6
3	480	70	40	1	Microscale	1.9	0.13	5

1.2 表征方法

采用 Spray Watch 2i 科研型在线监测系统测量了飞行粒子温度及速度,采用金相显微镜观察扁平粒子形貌和涂层截面微观形貌,采用 Image Pro-Plus 软件大致测量了涂层截面孔隙和未熔粒子百分比,采用 SEISHIN LMS-30 型激光粒度分布仪测量原始粉末及水中收集颗粒的粒度分布。

依照 GB/T 8642-2002《热喷涂·抗拉结合强度测定》规定测试方法测量涂层结合强度,为了避免 E-7 胶渗透涂层,导致基体与拉伸试棒直接粘结,试验选用进口 FM-1000 固体薄膜胶粘接涂层试样与拉伸试棒,使用 DZ-150KN 拉伸试验机对试样进行加载测试(每组工艺下制备 3 组结合强度试样,取其平均值作为最终的结合强度值)。将涂层随试片弯曲 180°测试涂层弯折性能,记录涂层弯曲后的表面形貌。采用箱式电阻炉测试涂层抗热震性能,YSZ 涂层热震温度为 1 100 ℃,保温 10 min,取出后迅速投入(20±5) ℃水中淬冷,并照相记录涂层淬水后的表面形貌。

2 结果与讨论

2.1 粒子温度及飞行速度

采用不同送粉位置时测得的粒子平均温度和飞行速度如图 6 所示。

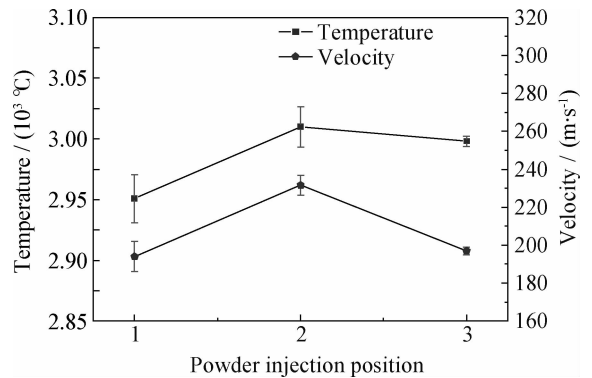
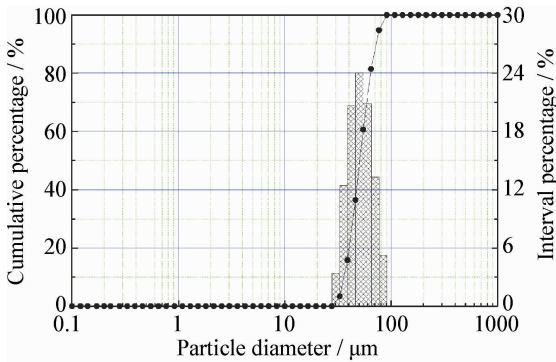


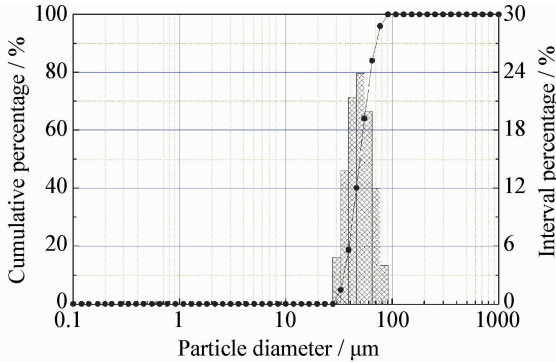
图 6 不同送粉位置时粒子的平均温度和飞行速度
Fig. 6 Particles average temperature and velocity obtained in different powder injection position

由图 6 可知,喷涂工艺参数相同时,位置 2 处粒子温度和飞行速度均高于位置 1。假设粒子分

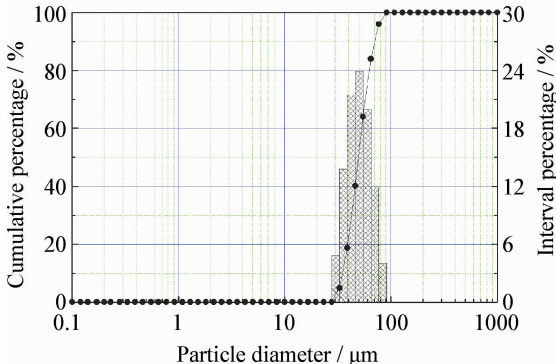
别以平均速度做匀速直线运动,送粉位置 1 时粒子飞行距离为 81 mm,加热时间约为 0.418 ms,送粉位置 2 时粒子飞行距离为 86.5 mm,加热时间约为 0.373 ms。由于采用位置 2 粉末粒子经历较高温场加热,虽然在等离子射流中停留时间缩短,但依然可以被加热至较高的温度。采用送粉位置 3 时,粉末被送进喷嘴内部,虽然喷涂功率降低 13.15 kW,但粒子温度比位置 2 时仅低 11.78 ℃,但速度下降明显。这是由于降低电弧功率后,气体电离度下降,速度场整体减弱,传递给粒子的动能减小,同时粒子飞行距离延长(95 mm),导致粒子飞行速度降低。粒子速度降低后,加热时间变长,更重要的是粉末粒子经过喷嘴内部更高温区的加热,因此低功率下粒子温度仅略微降低。



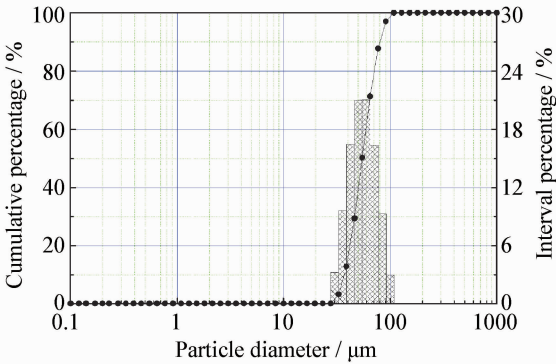
(a) Original spray powders



(b) Position 1



(c) Position 2



(d) Position 3

图 7 粉末粒度分布图

Fig. 7 Distributions of particles size

2.3 扁平粒子形貌

使用放大倍数 500 倍的金相显微镜观察到的不锈钢薄板上扁平粒子的形貌如图 8 所示。可以看出,采用送粉位置 1 时,粒子铺展面积较小,说明此时粉末粒子加热效果较差;采用送粉

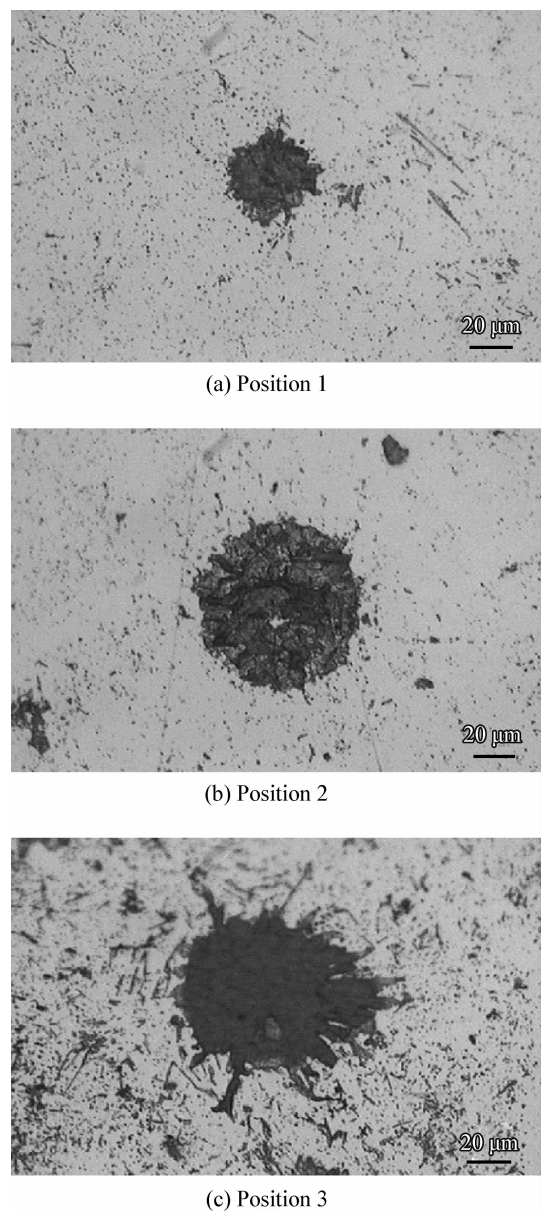
2.2 飞行粒子粒度分布

原始粉末及水中收集颗粒的粒度分布如图 7 所示,测得的原始粉末、送粉位置 1、2 和 3 的中位径分别为 50.68、49.42、50.25 和 54.50 μm。由图 7 可知,送粉位置 1 和 2 时收集的粒子粒度分布未发生明显变化,仅出现轻微的细化现象,而送粉位置 3 时出现大粒径颗粒,即粒子间发生粘结现象。这是由于粉末送入喷嘴内部后,等离子射流瞬间可将致密的纳米粉末团聚颗粒加热至完全或大部分熔化状态,熔融的粒子间粘附力变强,多个粒子相互粘结后形成粒度较大的颗粒喷入水中。结合粒子温度的检测结果,可知采用送粉位置 3 时,虽然粒子表面温度有所降低,但粒子内部熔化效果增强。

位置 2 时,扁平粒子呈圆饼状,但粒子表面粗糙,铺展不充分;采用送粉位置 3 时,粒子熔化充分,扁平粒子表面光滑,铺展均匀,有轻微飞溅现象。

2.4 涂层微观结构及性能

采用 3 个送粉位置制备的涂层截面金相组



(a) Position 1

(b) Position 2

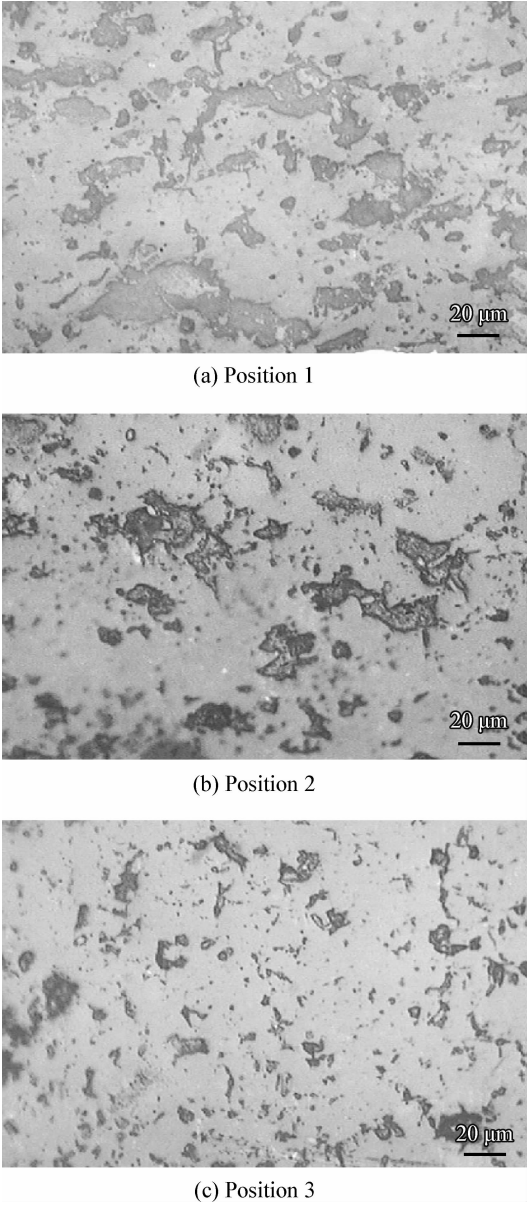
(c) Position 3

图 8 扁平粒子表面形貌

Fig. 8 Optical morphologies of the splats

织如图 9 所示,涂层孔隙率和结合强度随送粉位置的变化趋势分别如图 10 和 11 所示。由图 9 和 10 可知,采用送粉位置 1 时,涂层中未熔颗粒和孔隙较多,说明该送粉位置时粒子熔化效果差;采用送粉位置 2 时,涂层中未熔颗粒和孔隙数量减少;采用送粉位置 3 时,涂层更加致密,层间结合良好,无横向裂纹与纵向裂纹存在。由图 11 可知,送粉位置沿着等离子射流逆流方向移动时,涂层结合强度平均值逐渐升高。送粉位置 2 和 3 时的结合强度和孔隙率测试结果表明,粒子熔化效果进一步增强,但涂层结合强度值仅出现

小幅增大。这是由于涂层结合强度受综合因素影响,如涂层孔隙、未熔粒子、片层间结合力及微裂纹等,对于送粉位置 2 制备的涂层,由于粒子飞行速度大,片层间结合力较大,但孔隙及未熔粒子较多,加载拉伸力后,首先在孔隙及未熔粒子处出现微裂纹,裂纹扩展最终导致涂层失效;对于送粉位置 3,涂层较致密,孔隙及未熔粒子数量较少,但由于粒子飞行速度小,造成片层间结合相对薄弱,加载拉伸力后,片层之间结合较弱的位置产生微裂纹并最终导致涂层失效。上述两种不同的失效机理导致送粉位置 3 制备的涂层结合强度值仅出现了小幅增大。



(a) Position 1

(b) Position 2

(c) Position 3

图 9 涂层截面金相组织

Fig. 9 Cross section microstrucutre of the coatings

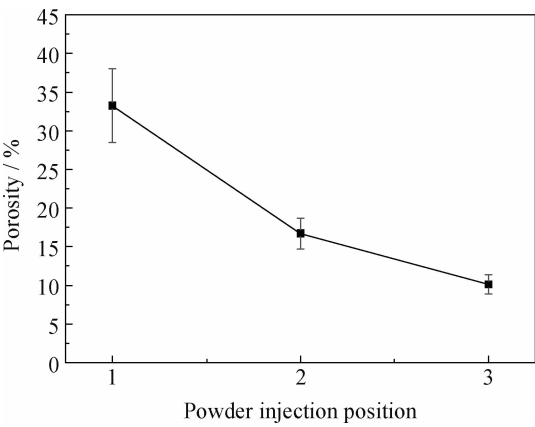


图 10 涂层孔隙率随送粉位置的关系

Fig. 10 Coatings porosity varies with the powder injection position

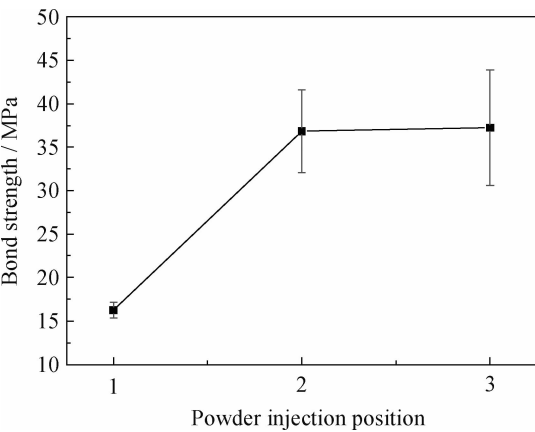


图 11 涂层结合强度随送粉位置的关系

Fig. 11 Coatings bond strength varies with the powder injection position

将涂层随试片弯曲 180°后测试涂层抗弯折性能,根据 HB 20035-2011《热喷涂工艺质量控制》

相关要求,由于边缘效应造成的应力集中,涂层边缘 2 mm 的剥落不计。对比 3 组涂层的边缘剥落情况可见:送粉位置 1 制备涂层边缘产生大面积剥落现象,送粉位置 2 涂层边缘轻微剥落,送粉位置 3 时涂层(厚度约为 220 μm)边缘仅出现一处剥落现象。这是由于送粉位置 3 时 YSZ 粒子熔化良好,扁平粒子间粘结效果好,抗应变容限大,能够吸收大部分变形引起的应力。

涂层经历不同淬水次数后的表面剥落面积百分比如图 12 所示(每组工艺制备两组热震试样,统计剥落面积较少的试样)。由图 12 可知,涂层剥落 20%左右时,送粉位置 1 涂层经历了 35 次水淬(表面照片如图 13(a)所示),送粉位置 2 涂层经历了 100 次水淬(表面形貌如图 13(b)所示),送粉位置 3 经历了 130 次水淬(表面照片如图 13(c)所示)。可见,YSZ 粒子熔化效果越好,涂层抗热震性能越好。

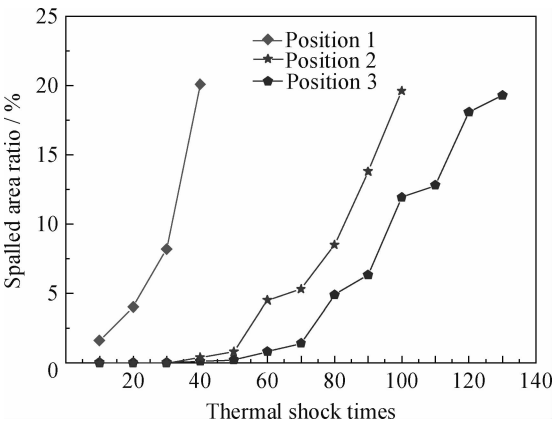


图 12 涂层经历不同淬水次数后的表面剥落面积百分比

Fig. 12 Spalled area ratio of coatings after different thermal shock times

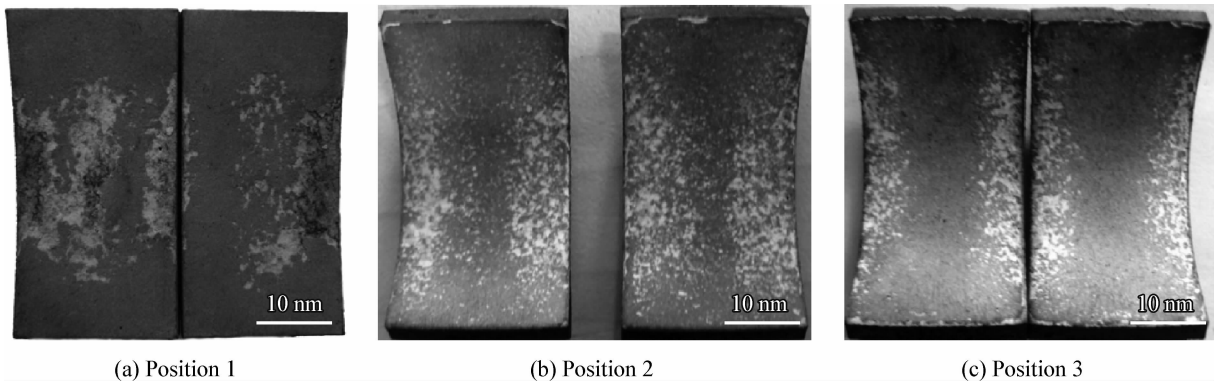


图 13 涂层经历不同淬水次数后的表面形貌

Fig. 13 Surface morphologies of coatings after different thermal shock times

3 结 论

(1) 送粉位置沿着等离子射流逆流方向移动时,等离子射流对粒子加热效果增强,送粉位置 3 在较低功率下即可将粒子充分熔化。

(2) 由送粉位置 1 向位置 3 移动过程中,粒子撞击基体时扁平化程度提高,涂层孔隙率和未熔粒子数量由 33.25%减小至 10.13%,涂层结合强度由 16.25 MPa 增加到 37.25 MPa,涂层表面剥落 20%时经历的热震次数由 35 次增加至 130 次。

(3) 喷枪采用送粉位置 3(内送粉)时,可以在较低功率下获得高性能 YSZ 涂层,具有较好的应用推广价值。

参考文献

- [1] Kristina B, Romualdas K. Correlations between processing parameters and microstructure for YSZ films produced by plasma spray technique [J]. Journal of the European Ceramic Society, 2004, 24(6): 1095-9.
- [2] Friis M, Persson C, Wigren J. Influence of particle in-flight characteristics on the microstructure of atmospheric plasma sprayed yttria stabilized ZrO₂ [J]. Surface & Coatings Technology, 2001, 141(2): 115-127.
- [3] McPherson R. The relationship between the mechanism of formation microstructure and properties of plasma sprayed

coatings [J]. Thin Solid Films, 1981, 83(3): 297-310.

- [4] Selvan B, Ramachandran K, Sreekumar K P, et al. Numerical and experimental studies on DC plasma spray torch [J]. Vacuum, 2010, 84(4): 444-452.
- [5] Kriba I, Djebaili A. Numerical study of melted particles crush metallic substrates and the interaction between particles and a plasma beam in the thermal projection process [J]. Applied Surface Science, 2009, 255(10): 5637-40.
- [6] An L T, Gao Y. Effect of powder injection location on ceramic coatings properties when using plasma spray [J]. Journal of Thermal Spray Technology, 2007, 16(5/6): 967-973.
- [7] Salhi Z, Guessasma S, Fenineche N. Yttria-stabilized zirconia in-flight particle characteristics under vacuum plasma spray conditions [J]. Vacuum, 2009, 83(11): 1382-7.
- [8] 赵伟涛, 吴九汇, 白宇, 等. 超声速等离子喷涂氧化锆粒子时的加热熔化特性分析 [J]. 西安交通大学学报, 2012, 46(1): 97-102.
- [9] 杨晖, 王良. 等离子喷涂工艺参数对粒子速度和温度的影响 [J]. 热加工工艺, 2007, 36(11): 44-48.
- [10] 韩志海, 王海军, 白宇, 等. 喷涂粒子在等离子体射流中的加热历程及熔化状态研究 [J]. 热喷涂技术, 2012, 4(2): 35-43.

作者地址: 北京市朝阳区德胜门外北沙滩一号 100083
中国农业机械化科学研究院新办公楼
Tel: (010) 6486 6873(乔新义)
E-mail: qxy0124@126.com

(责任编辑: 王文宇)

• 学术动态 •

2014 年全国博士生学术论坛将于北京举行

为进一步促进全国博士生之间的学术交流,积极落实和实施教育部研究生教育创新计划,促进学科交叉融合,拓宽博士生学术视野,激发创新思维,全面提高博士生培养质量,“2014 年全国博士生学术论坛——先进材料与可持续制造技术”论坛将于 2014 年 9 月 22-23 日在北京举行。论坛由装甲兵工程学院主办,装备维修与再制造工程系承办,主题为先进材料技术、再制造工程、表面工程和其它可持续创新技术展开,邀请全国材料、机械等相关领域的在读博士生、在站博士后积极参与论坛活动并投稿,届时论坛组委会将诚邀领域内知名院士、专家和学者蒞会指导。

此次论坛不收取任何费用,论坛组委会为参会学生免费提供食宿,西部地区等特殊情况下学生可申请交通费补助。由于论坛 80 人的规模所限,将视情况择优遴选优秀论文作者参加。摘要和全文需发送至邮箱:remanufactureforum@vip.163.com,截止日期为 2014 年 7 月 30 日。优秀论文将推荐至中文核心期刊《中国表面工程》发表。

(本刊编辑部 供稿)