

干冰微粒喷射工艺对等离子喷涂金属涂层结构和性能的影响

董淑娟¹, 宋 波¹, Bernard Hansz², 廖汉林¹, Christian Coddet¹

(1. 贝尔福-蒙贝利亚技术大学, IRTES-LERMPS 实验室, 法国 贝尔福 90010; 2. 法国 HMRexpert 公司, 法国 伊图普斯 25490)

摘 要: 干冰微粒喷射法被应用到大气等离子喷涂中以改善涂层的性能。文中采用等离子喷涂和干冰微粒喷射工艺在不锈钢基体表面制备了钢涂层, 并研究了涂层的微观结构、孔隙率、温度、氧化、表面粗糙度和结合强度等性能。结果表明, 由于干冰微粒喷射具有较高的冷却效率, 加之干冰微粒撞击所产生的机械作用, 等离子喷涂制备的钢涂层呈现出更致密的结构特征。相比于空气冷却制备的涂层, 干冰微粒冷却制备的涂层含有更少的氧化物。另外, 干冰微粒喷射工艺对基体的预处理使得涂层的结合强度提高了将近 14%, 这是由于干冰微粒喷射工艺对基体上吸附的有机物质具有清洁作用, 主要基于干冰颗粒的热、机械和膨胀的综合效应。

关键词: 大气等离子喷涂; 干冰微粒喷射; 金属涂层

中图分类号: TG174.442

文献标识码: A

文章编号: 1007-9289(2012)06-0010-05

Effect of Dry-ice Blasting on the Microstructure and Properties of Plasma-sprayed Metallic Coatings

DONG Shu-juan¹, SONG Bo¹, HANSZ Bernard², LIAO Han-lin¹, CODDET Christian¹

(1. IRTES-LERMPS Laboratory, University of Technology of Belfort-Montbeliard, Belfort Cedex 90010, France; 2. HMRexpert Company, Etupes 25460, France)

Abstract: Dry-ice blasting was applied to the atmospheric plasma spraying process for improving coating's properties. In this paper, the steel coating was plasma-sprayed combined with dry-ice blasting on the stainless substrate, and the properties of the coating including microstructure, porosity, temperature, oxidation, surface roughness, and adhesion strength were studied in detail. Results show that plasma-sprayed steel coating displays a denser structure because dry-ice blasting has better cooling efficiency and mechanical effect arising from the impact of dry ice pellets. Compared with the coating deposited by air cooling, the coating prepared by dry-ice blasting has less oxide. Additionally, the adhesion strength increases up to 14% after the pretreatment of dry-ice blasting. This result from the cleaning effect of dry-ice blasting on organic substances adsorbed on the substrate surface is a combination of thermal, mechanical and sublimating effect.

Key words: atmospheric plasma spraying; dry-ice blasting; metallic coating

0 引 言

大气等离子喷涂 (APS) 由于其相对较高的沉积效率、低成本和高灵活性, 被广泛地用于工

业界, 尽管大气等离子喷涂制备金属涂层过程中存在部分氧化^[1]。这主要是由周围空气卷入高温粒子导致^[2]。涂层中的氧化物对涂层的结构

收稿日期: 2012-09-14; 修回日期: 2012-10-31

作者简介: 董淑娟(1987—), 女(汉), 山东临沂人, 博士; 研究方向: 热喷涂技术的基础理论与创新研究

网络出版日期: 2012-11-28 16:08; 网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.3905.TG.20121128.1608.004.html>

引文格式: 董淑娟, 宋波, Bernard Hansz, 等. 干冰微粒喷射工艺对等离子喷涂金属涂层结构和性能的影响 [J]. 中国表面工程, 2012, 25(6): 10-14.

和性能具有一些不利影响,尤其是对于金属涂层^[3-4]。因此,大量文献报道真空等离子喷涂(VPS),低压等离子喷涂(LPPS)或冷气体动力喷涂(CGDS)制备金属或者合金涂层,如MCrAlY合金和FeAl合金等^[5-7]。但是它们毕竟不是沉积这些涂层最有效并且节约成本的方法。

文中介绍了在等离子喷涂过程中引入干冰微粒喷射工艺,目的是提高涂层的性能,特别是减少金属涂层中的氧化物含量。干冰微粒喷射工艺是利用高品质可调节的压缩空气作为动力源,把较低温度的干冰颗粒(常压下干冰的升华温度为 $-78.50\text{ }^{\circ}\text{C}$)通过专用设备加速到被作用表面的过程。干冰微粒喷射工艺目前被广泛地应用在清洗行业。干冰微粒喷射工艺,作为一种环境友好型方法,应用在APS的过程中是非常有意义的,对基体的净化作用有利于扁平粒子的铺展。实际上,在热喷涂过程中,将基体预热到一定温度,例如 $400\text{ }^{\circ}\text{C}$,也能清洁吸附在基体上的有机物等,最终导致近圆饼形扁平颗粒的产生^[8]。但在实际工业生产中,预热的高温基体无疑会产生表面氧化,这将会促进涂层的失效。基于干冰的低温效应,以及干冰与作用物体表面之间的能量和动量的转移作用,干冰微粒喷射在热喷涂过程中或许可以起到更好的散热效果和净化效果。干冰微粒喷射工艺的优点还在于作为工作介质的固体二氧化碳在被作用表面上会全部挥发,无残留物质,不仅能提高表面清洁度,而且符合USDA、FDA、EPA的安全环保要求。目前,尚没有发现其他研究机构报道干冰微粒喷射法应用在热喷涂领域。一旦干冰微粒喷射法被证实等在等离子喷涂金属涂层过程中具有良好的效果,这将会推进大气等离子喷涂制备金属或者合金涂层的应用。

1 试验材料及方法

试验材料选用钢粉(Sulzer-Metco Amdry XPT 512)制备涂层,作为金属涂层的典型代表;基体选用316L不锈钢板。沉积涂层前对表面进行了喷砂粗化处理。试验装置采用F4大气等离子枪(Sulzer-Metco),氩气作为等离子喷涂的主气和送粉气体。所采用的具体工艺参数如下:电流600 A,电压67.8 V,氩气60 L/min,氢气9.0 L/min,送粉气体(Ar)2.0 L/min。喷涂距离为115 mm。

喷涂过程中,压缩空气用于冷却试样。这将作为干冰喷射-等离子喷涂试验的对比试验。

干冰微粒喷射采用移动式喷射IC4000系统装置,其中包括喷枪、气动马达、干冰贮存箱和压缩空气供应装置。试验采用了柱状干冰颗粒($\Phi 3\text{ mm}\times(5\sim 10)\text{ mm}$),干冰颗粒的流量和干冰喷枪与基体之间的距离分别为42 kg/h和25 mm。喷涂过程示意图如图1所示。

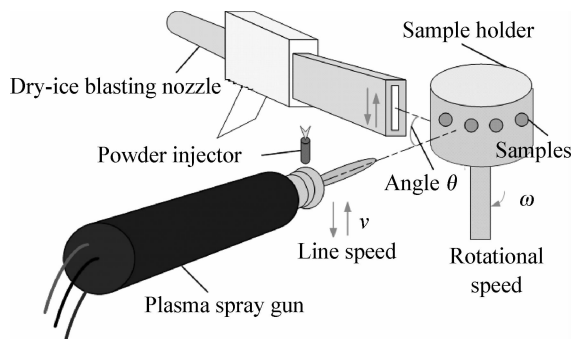


图1 等离子喷涂和干冰微粒喷射示意图

Fig.1 Schematic diagram of plasma spray and dry-ice blasting

涂层的微观形貌采用光学显微镜(OM)观察并利用ImageJ图像分析软件分析涂层中的氧化物含量和孔隙率。涂层的平均表面粗糙度采用Altmet AltiSurf500粗糙度仪测量。喷涂过程中涂层表面的温度演变曲线通过红外摄影仪进行监控。涂层界面结合强度通过拉伸法测得。

此外,为了阐明干冰微粒喷射工艺对基体表面状态的改变,干冰微粒喷射工艺还被用于处理预先涂覆有机污染物(丙三醇)的抛光基体。不同处理条件下的基体的润湿角通过DIGIDROP影像分析法润湿角测定仪测得,去离子水作为标准滴定液体。

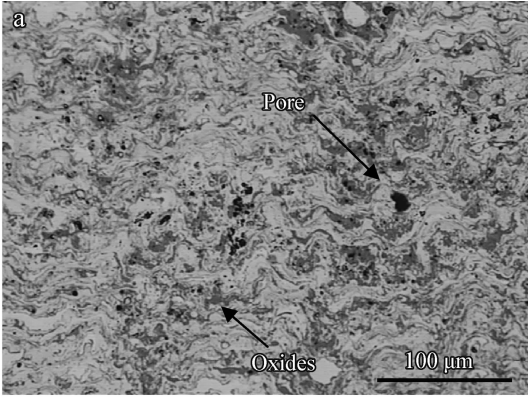
2 结果与讨论

2.1 干冰微粒喷射工艺对金属涂层结构的影响

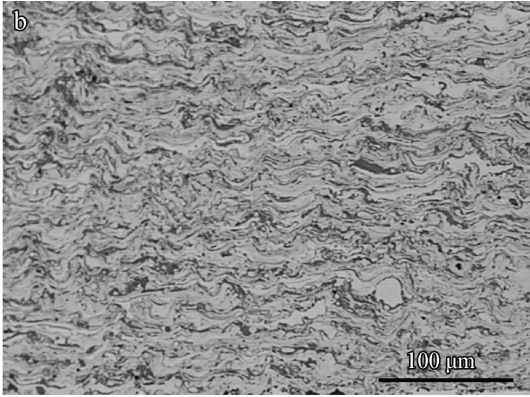
图2为干冰微粒喷射和压缩空气冷却条件下等离子喷涂制备钢涂层的显微结构,可以清楚地看出,干冰微粒喷射工艺后等离子喷涂在不锈钢基体表面制备的钢涂层显示出非常致密的结构,如图2(b)。基于图像分析的估算结果,涂层的孔隙率仅为0.23%,相比于压缩空气冷却的

0.55%而言,一方面,这是由于干冰微粒的撞击所产生的机械作用具有一定的夯实效应;另一方

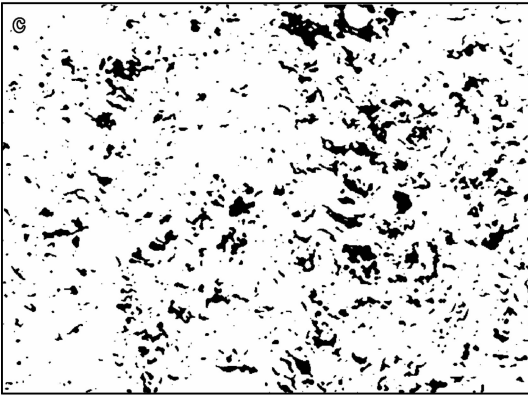
面,涂层中凸起的氧化群的减少也有助于减少涂层的孔隙率。



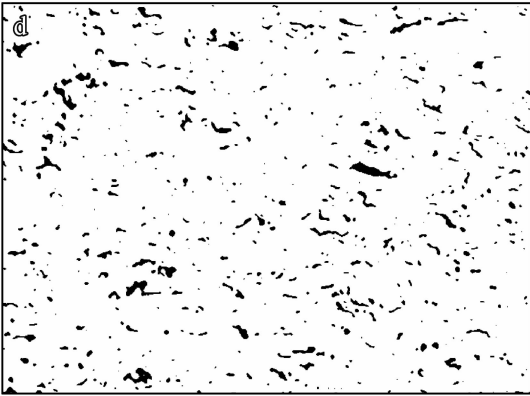
(a) Air cooling



(b) Dry-ice blasting



(c) Oxides and pores in (a)

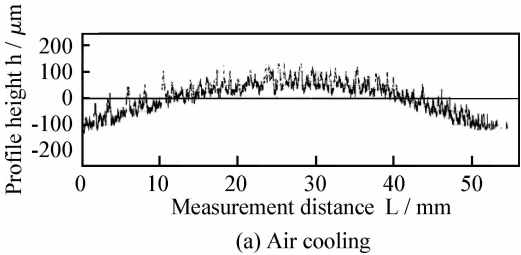


(d) Oxides and pores in (b)

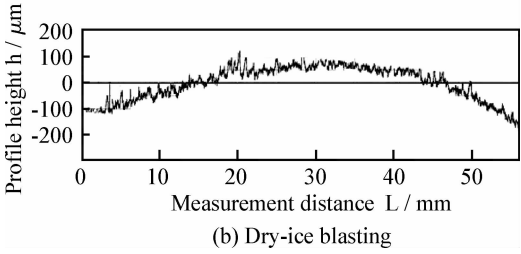
图 2 等离子喷涂制备钢涂层的显微形貌
Fig. 2 Morphologies of plasma-sprayed steel coatings

从压缩空气冷却条件下涂层的微观结构可以看出(图 2(a)),氧化群与孔隙共存于涂层中,这将会导致更加粗糙的表面形貌,如图 3 所示。传统的空气冷却条件下,涂层的粗糙度 R_a 值可以达到 $16.54\text{ }\mu\text{m}$,而干冰微粒喷射条件下涂层的 R_a 值为 $7.21\text{ }\mu\text{m}$ 。

此外,相比于空气冷却制备的涂层,干冰微粒冷却制备的涂层含有更少的氧化物(4.23%),只有空气冷却条件下涂层含氧量(9.46%)的一半。一方面,这是由于干冰微粒的机械夯实效应,这种效应导致涂层具有较低的孔隙率,从而减少了氧的通道和氧化面积;另一方面,氧化物含量的减少也可以归结为干冰微粒的冷却效果。实际喷涂过程中的红外测量结果显示如图 4,干冰微粒喷射预处理条件下工件表面的温度为 $85\text{ }^\circ\text{C}$,而传统的空气冷却条件下的温度为 $170\text{ }^\circ\text{C}$ 。通常认为温度足够高的条件下,金属材料



(a) Air cooling



(b) Dry-ice blasting

图 3 等离子喷涂钢涂层的表面粗糙度
Fig. 3 Surface roughness of plasma-sprayed steel coating

在基板上会继续被氧化。这说明干冰微粒可以
更有效地冷却工件并且更稳定地保持在较低
的温度下。

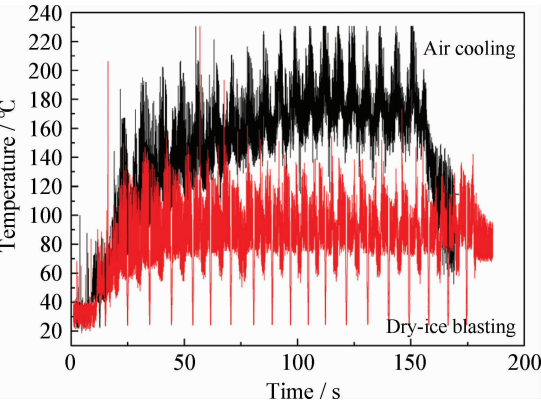


图 4 喷涂过程中涂层表面的温度变化曲线
Fig. 4 Temperature evolutions of steel coatings during
plasma spraying process

2.2 干冰微粒喷射工艺对金属涂层性能的影响

2.2.1 结合强度

图 5 为干冰微粒喷射对基体预处理条件下
和传统空气冷却条件下等离子喷涂制备的钢涂
层的结合强度的对比。由图可见,干冰微粒喷射
对基体预处理后,钢涂层的结合强度提高了大约
14%。这说明干冰微粒喷射的预处理过程一定
程度上改变了基体表面状态。这可能与干冰微
粒喷射对基体上吸附的有机物质的清洁效果有
关,这种清洗作用将有助于在喷涂沉积过程中获
得理想的扁平圆盘颗粒,即有利于熔融粒子的铺
展。这一结果与等离子喷涂涂层过程中基体预
热的效果相类似^[8]。

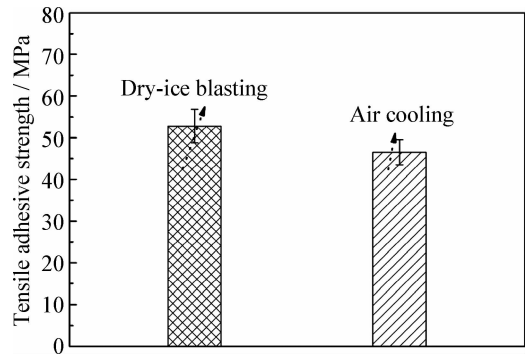


图 5 钢涂层的拉伸试验结果比较
Fig. 5 Comparison of tensile test results of steel coatings

2.2.2 润湿角

表 1 给出了不同条件下基体的润湿角。在
原始抛光的不锈钢基体表面上测量得到的润湿
角为 72.6°,而涂覆有机物质丙三醇的不锈钢基
体表面的润湿角对应 10.8°。这意味着预先涂覆
的有机物质大大改变了基体表面的润湿性。然
而,经过干冰微粒喷射处理后,基体表面的润湿
角又升高到 69.9°,非常接近初始抛光基板的润
湿角 72.6°。

基于以上这些结果可以确定干冰微粒喷射
工艺确实对基体表面吸附的有机污染物,如丙三
醇,具有一定的清洁作用。这种清洁作用是干冰
颗粒的低温、机械和升华的综合效应。干冰颗粒
以压缩空气为载体,以一定的速度作用于污物表
面,利用其超低温使处理物表面的污垢在极短
的时间内冻到脆化甚至爆裂,干冰颗粒碰撞后立
即气化,其体积在瞬间内膨胀近 600~800 倍,从
而将污物带离物体表面。研究表明,基材表面的
状态在热喷涂过程中对粒子溅射的发生起着重
要作用。不利的表面状态将不利于熔融粒子与
基体的接触甚至引起飞溅。此外,熔融液滴与基
板之间的热接触阻抗也与基体的表面润湿性有
很大的关系,这也是影响涂层结构的一个重要参
数。

因此,干冰微粒喷射工艺对基体上吸附的有
机污染物质的清洁作用,将有助于基体上形成
近圆形的扁平粒子。涂层最终可以表现出更好
的结合强度。

表 1 不同处理条件下基体的润湿角
Table 1 Contact angles of substrates under different
conditions

No.	Details	Contact angle/(°)
S-P	Initial polished stainless steel surface	72.6
S-PG	Stainless steel surface polluted by glycerol	10.8
S-PGD	Stainless steel surface polluted by glycerol and then treated by CO ₂ pellets	69.9

3 结 论

(1) 应用干冰微粒喷射工艺后,等离子喷涂
制备的钢涂层具有致密的结构,涂层的氧化程度

和粗糙度都得到了很大的改善。

(2) 干冰微粒的机械夯实效应促成了致密的微观结构和氧化物的减少;而且干冰微粒具有更高的冷却效率。

(3) 干冰微粒喷射工艺对基体的预处理使得涂层的结合强度提高了将近 14%。

(4) 除了冷却和机械作用外,干冰微粒喷射工艺对基体上吸附的有机物质具有清洁作用,主要基于热、机械和膨胀的综合效应。

参考文献

- [1] Toma D, Brandl W, Köster U. Studies on the transient stage of oxidation of VPS and HVOF sprayed MCrAlY coatings [J]. Surface and Coatings Technology, 1999, (120/121): 8-15.
- [2] Pfender E, Fincke J, Spoore R. Entrainment of cold gas into thermal plasma jets [J]. Plasma Chemistry and Plasma processing, 1991, 11(4): 529-543.
- [3] Sobolev V V, Guilemany J M. Effect of oxidation on droplet flattening and splat-substrate interaction in thermal spraying [J]. Journal of Thermal Spray Technology, 1999, 8(4): 523-530.
- [4] Sahoo P, Goward G W. On the suitability and application

of MCrAlY coatings under various operation conditions [C]. Thermal Spray Science and Technology. ASM International, 1995, 539-544.

- [5] Zhang Q, Li C J, Li C X, et al. Study of oxidation behavior of nanostructured NiCrAlY bond coatings deposited by cold spraying [J]. Surface and Coatings Technology, 2008, 202(14): 3378-84.
- [6] Zhang Y J, Sun X F, Zhang Y C, et al. A comparative study of DS NiCrAlY coating and LPPS NiCrAlY coating [J]. Materials Science and Engineering: A, 2003, 360(1/2): 65-69.
- [7] Wang H T, Li C J, Yang G J, e. Effect of heat treatment on the microstructure and property of cold-sprayed nanostructured FeAl/Al₂O₃ intermetallic composite coating [J]. Vacuum, 2008, 83(1): 146-152.
- [8] Li C J, Li J L. Evaporated-gas-induced splashing model for splat formation during plasma spraying [J]. Surface and Coats Technology, 2004, 184(1): 13-23.

作者地址: IRTES-LERMPS, UTBM, Rue de leupe, SEVENANS 90400, France

Tel: (+33) 03 84 58 31 64

E-mail: shujuan.dong@utbm.fr

• 学术动态 •

2013 年全国青年摩擦学学术会议将在青岛举行

由中国机械工程学会摩擦学分会青年工作委员会主办的 2013 年全国青年摩擦学学术会议将于 2013 年 5 月在山东青岛举行,会议旨在提供一个自由和气氛友好的学术交流平台,就摩擦学领域中备受关注的生态、环境、能源等热点问题展开讨论,包含大会报告、分会场报告及展览交流 3 种形式。

会议主题内容包括:①摩擦与磨损的基础研究;②润滑的基础研究;③表面工程;④摩擦化学与界面;⑤环境与生态;⑥生物与仿生;⑦工业摩擦学(轴承、齿轮、密封、液压、风电等新技术及工程应用);⑧微纳摩擦学与应用;⑨摩擦学创新研究——新理论、新现象、新方法及应用。

欢迎全国各高等院校、研究机构、企事业单位从事摩擦学研究和工业应用的人员参加大会,展示研究成果或提交论文。会议组委会会前将印制非正式出版的论文或详细摘要文集,供交流使用,不收取版面费。摘要征文截止日期为 2012 年 12 月 31 日,论文全文截止日期为 2013 年 3 月 31 日。请将论文摘要/论文全文的电子版通过 E-mail 提交至大会秘书处,请注明会议论文。

会务费正式代表 1200 元/人,学生代表 800 元/人,统一安排食宿,住宿费用自理。会议期间提供一定的场地和条件进行商业展示活动,展位费为 5000 元/展位。

会议联系人:王静 18669723895;马咏娣 13646482627;杨萍 13573888173;李霞 13361209997

联系地址:山东省青岛市抚顺路 11 号青岛理工大学机械工程学院(266033)

联系方式:(0532)8507 1980;(0532)8507 1283;QQ:346366512

电子邮件:tribo2013qd@163.com;tribo2013qd@126.com