

大气等离子喷涂 TiO_2 涂层性能及厚涂层制备工艺^{*}

杨 焜, 邓畅光, 邝子奇, 曾 威

(广州有色金属研究院 新材料研究所, 广州 510650)

摘 要: 为改善 TiO_2 溅射靶材主要依赖进口的局面, 采用大气等离子喷涂技术在不锈钢 SUS304 平板基体及管状基体上制备了 TiO_2 涂层。利用扫描电子显微镜对涂层形貌进行了观察, 并对涂层与基体的结合强度、涂层孔隙率及抗热震性能分别进行了表征。结果表明: 粉末熔化及铺展良好, 截面可见典型层状结构。涂层与基体以机械结合为主, 断裂基本发生在基体与粘结层界面处; 涂层的孔隙率较低, 同时具有良好的抗热震性能。厚涂层制备过程中, 采用循环水冷却方法对不锈钢 SUS304 管状基体进行冷却, 涂层沉积速度快且无开裂和脱落, 涂层厚度可达 8 mm。通过对冷却装置的改进及喷涂工艺的进一步优化, 有望在大尺度管状基体上制备厚涂层以满足溅射蒸镀的需要。

关键词: 大气等离子喷涂; TiO_2 ; 厚涂层

中图分类号: TG 174.442 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-9289(2014)04-0012-07

Properties of TiO_2 Coating Deposited by Atmospheric Plasma Spraying and Thick Coating Fabrication Process

YANG Kun, DENG Chang-guang, KUANG Zi-qi, ZENG Wei

(Department of New Materials, Guangzhou Research Institute of Non-ferrous Metals, Guangzhou 510650)

Abstract: To improve the situation that most of the TiO_2 sputter targets are depend on imports, TiO_2 coating was deposited on the flat SUS304 substrate and hollow pipe substrate by atmospheric plasma spraying in this study. The coating morphologies in detail were observed by scanning electron microscope. The adhesion strength, porosity and thermal shock resistance of the coating were evaluated, respectively. The results show that most of the feedstock powders are fully melted and flattened sufficiently on the substrate, and the coating has a typical multi-layer and dense structure from the cross section view. The coating adheres well to the substrate mainly by mechanical adhesion, and the fracture is found at the interface between the substrate and the bond coating. Meanwhile, the thermal shock resistance of the coating is quite well. TiO_2 thick coating is successfully fabricated on the hollow SUS304 pipe substrate by circulating water cooling during the spraying process. The coating deposition rate is favorable and with no cracking and falling, the thickness of the coating can reach up to 8 mm. By further optimization of the cooling system and spraying parameters, thick coating can be fabricated on the large scale tubular substrate, and this technology can be expected to be used in sputtering rolls.

Key words: atmospheric plasma spraying; TiO_2 ; thick coating

0 引 言

中国多年来一直是玻璃生产量和消费量最大的国家。为了满足玻璃的不同功能要求, 如色

彩、导电、隔热、防紫外线、光伏转换等, 必须在玻璃上面制备出各种薄膜涂层。各种大面积玻璃, 特别是幕墙玻璃和未来太阳能电池玻璃的快速

收稿日期: 2014-05-10; **修回日期:** 2014-06-23; **基金项目:** * 广东省国际合作项目(2009B050700050)

作者简介: 杨焜(1984—), 男(土家), 湖北利川人, 工程师, 博士; **研究方向:** 热喷涂熔滴扁平化及涂层应用

网络出版日期: 2014-07-02 16:49; **网络出版地址:** <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.3905.TG.20140702.1649.010.html>

引文格式: 杨焜, 邓畅光, 邝子奇, 等. 大气等离子喷涂 TiO_2 涂层性能及厚涂层制备工艺 [J]. 中国表面工程, 2014, 27(4): 12-18.

镀膜,一般采用离线阴极溅射法。由于溅射技术的广泛应用,靶材已成为一种具有高附加价值的特种光电子材料^[1-3]。溅射镀膜原来采用平面靶,为了连续、高效、平稳、高质量地大面积镀膜,目前国外已向采用柱状靶(溅射辊)的方向发展,国内引进的大型的现代玻璃镀膜设备,也都采用了柱状溅射辊。

TiO_2 薄膜在 $0.4\sim 3\ \mu\text{m}$ 波长范围内具有良好的透光性、高折射率、优良的机械性能和较强抗腐蚀能力,可用于复合光学镀膜以生产低辐射玻璃和减反射玻璃^[3-6]。作为镀膜材料的 TiO_2 溅射靶制备在空心的蒸镀辊上,辊中心通水冷却。由于溅镀辊直径近 $160\ \text{cm}$,长 $4\ \text{m}$ 多,溅射材料厚度 $6\ \text{mm}$ 以上,没法采用烧结等常规方法制备,目前只能采用热喷涂技术。事实上,采用热喷涂方法制备的 TiO_2 涂层在光催化、生物涂层,耐腐蚀领域应用的研究早已开展^[7-10]。另一方面,随着技术的进步,尤其是自动化热喷涂工艺和先进材料的出现,使得制备出毫米甚至厘米量级的厚涂层成为现实^[11-14]。在国外,已采用等离子喷涂技术制备出大厚度涂层并作为靶材成功应用于制备玻璃镀膜用的蒸镀辊上。中国玻璃生产企业最新引进了大型玻璃镀膜生产线,但溅射靶材却只能以高昂的价格由国外购买,这无疑提高了企业的生产成本,限制了企业的自主创新能力。因此,开展等离子喷涂制备溅射辊的研

究十分必要。

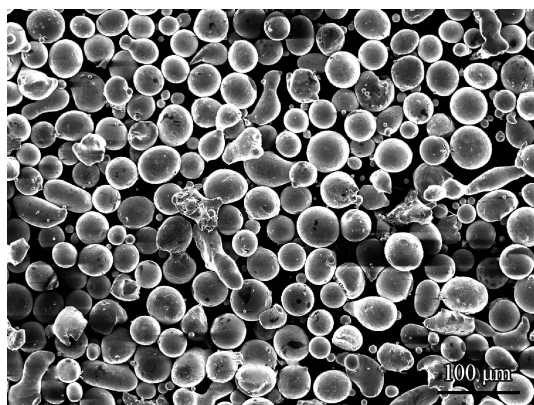
文中采用等离子喷涂设备制备了 TiO_2 涂层,对涂层的显微组织、结合强度、致密度及抗热震性等分别进行了研究;并在采用循环水冷却的空心钢管上就 TiO_2 厚涂层制备进行了试验,以期自主开发 TiO_2 溅射辊奠定基础。

1 材料与方法

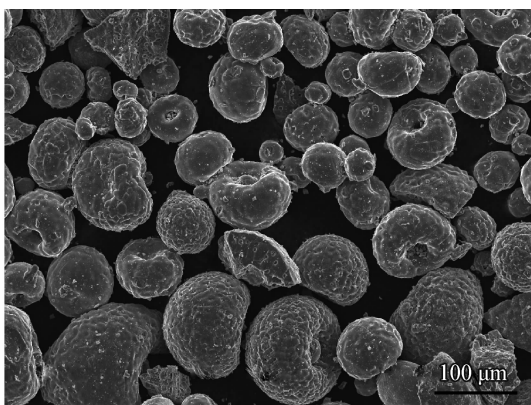
1.1 基体及粉末材料

基体材料选用 SUS304 不锈钢。为去掉基体表面氧化层以增加表面活性并提高涂层与基体间的机械咬合效率,待喷涂表面在进行汽油除油和超声波清洗后,用 CS-600D 型喷砂机对样品表面进行喷砂处理。喷砂材料为 46 号锆刚玉砂,喷砂压力为 $0.2\sim 0.3\ \text{MPa}$,喷砂机的喷嘴轴向方向与样品表面保持 $60^\circ\sim 80^\circ$ 的夹角,随后用压缩空气和超声清除试样表面吸附的刚玉砂粒,获得干净、具有活性、易附着的表面状态。

粘结层材料选用北矿新材料科技有限公司生产的 316L 不锈钢粉(粒径 $15\sim 45\ \mu\text{m}$),面层材料选用德国 GTV 公司生产的 TiO_2 粉末(粒径 $45\sim 106\ \mu\text{m}$)。粉末的表面形貌如图 1 所示,可见两种粉末的球形度均较高且粒度较为均匀。喷涂前,先将粉末置于 $80\ ^\circ\text{C}$ 干燥箱中烘烤 $1\sim 2\ \text{h}$ 以去除粉末中吸附的水汽等,防止在喷涂过程中堵塞送粉管。



(a) 316L



(b) TiO_2

图1 316L 不锈钢粉和 TiO_2 粉末形貌

Fig. 1 Morphologies of the 316L and TiO_2 powders

1.2 涂层制备

粘结层和面层均采用大气等离子喷涂系统 (APS, MF-P1000, GTV, Germany) 进行制备,

工艺参数如表 1 所示。喷涂时,先用等离子焰流对基体预热两遍后再送粉喷涂。其中,工艺优化及性能检测样品采用 SUS304 不锈钢平板基体,

利用压缩空气进行冷却。

厚涂层制备选用中空 SUS304 不锈钢管材作为基体,孔径 50 mm,壁厚 2.5 mm,中间通循环水冷却并在喷涂过程中对循环水温度进行监测和调控。整个喷涂操作由日本生产的 MOTO-MAN-MH-50 型机器人完成。

表 1 316L 粘结层和 TiO₂ 面层的喷涂工艺参数

Table 1 Spraying parameters of the 316L bond coating and TiO₂ top coating

Parameters	316L bond coating		TiO ₂ top coating	
	Flat substrate	Pipe substrate	Flat substrate	Pipe substrate
Current/ A	600	600	580	580
Voltage/V	75	75	76	76
Spray distance/mm	110	110	110	110
Ar/(L·min ⁻¹)	45	45	41	41
H ₂ /(L·min ⁻¹)	9	9	12	12
Traverse speed/(mm·s ⁻¹)	1 000	10	1 000	10
Rotational speed/(r·min ⁻¹)		200		200
Powder feed rate/(g·min ⁻¹)	1×20	1×20	2×31.5	2×31.5

1.3 性能检测

采用扫描电镜 (SEM, JEOL JSM-5910) 对涂层的正面形貌进行观察。然后采用线切割机切制样品,经镶样、预磨和抛光后制成金相样品,借助于扫描电镜观察涂层的截面形貌。采用图像分析软件 UTHSCSA Image Tool 定量测定涂层的孔隙率,取不同视场内 5 张放大 1 000 倍的 SEM 图片进行分析,计算其平均值。

采用美国 ASTM-C633 标准测量涂层结合强度。在直径 25.4 mm 的试样上喷涂粘结层和面层后,把经搅拌均匀的 E7 胶均匀涂抹在涂层试样和对偶件上并粘接,经 100 ℃ 固化 3 h 后,采用拉伸法在 JDL-50KN 型万能电子式拉力机测量断裂时的载荷,载荷与涂层试样截面积的比值即为涂层的结合强度。重复测量 5 次,取其平均值。

涂层的抗热震性能试验在吉林大学材料学院研制的热疲劳试验机上进行。在圆片试样上喷涂粘结层和面层后,200 ℃ 热震温度下保温 10 min 后水淬 2 min,如此重复 20 次后取出试样,观察试样表面状况和涂层截面形貌。

2 结果与讨论

2.1 涂层形貌

图 2 为 TiO₂ 涂层表面形貌,可见涂层表面较为粗糙,熔融粉末撞击基体后,在基体表面铺

展良好,并凝固成典型的薄片状结构,但局部仍存在一定数量的部分熔融 TiO₂ 颗粒。部分区域可见少量微裂纹存在,这主要是由于熔融粉末撞击基体后,在飞行熔滴的动能作用下在表面迅速铺展,而熔滴的热量快速向基体或已沉积涂层以及环境中传递导致铺展中的熔滴快速冷却,单个熔滴内部在垂直于涂层方向上存在温度梯度,熔滴凝固时导致的体积收缩受到周围条件的约束,从而诱发了微裂纹的产生。

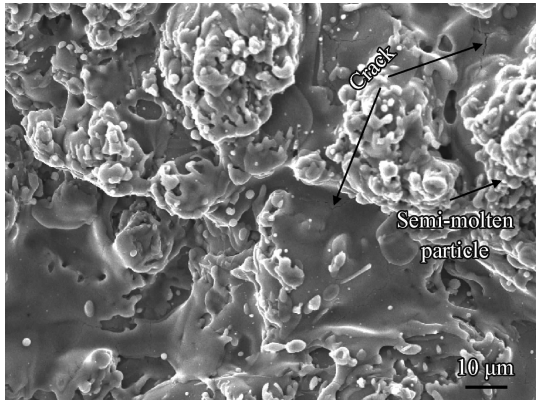


图 2 TiO₂ 涂层表面形貌

Fig. 2 Surface morphology of the TiO₂ coating

图 3 为 316L+TiO₂ 涂层截面形貌,可见 316L 不锈钢粘结层厚度约为 90 μm,其与基体的凹凸结构互相嵌合,面层与粘结层之间亦可见比较清晰的

分界面,机械结合良好。粘结层和面层均呈现典型的平行于基体方向的层状重叠结构。涂层内部主要以扁平沉积物间的相互搭接形式结合在一起,且单个沉积物间并未发生明显的融合。截面无明显宏观裂纹存在且组织较为致密,局部可见不规则孔洞以缺陷的形式填充与涂层之中。

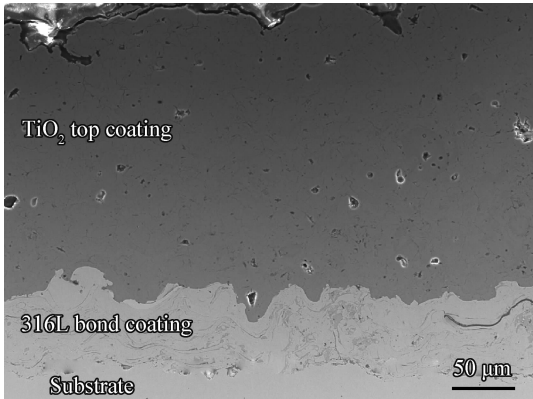


图 3 316L+TiO₂ 涂层截面形貌

Fig. 3 Cross section morphology of the 316L+TiO₂ coating

2.2 结合强度、孔隙率及抗热震性能

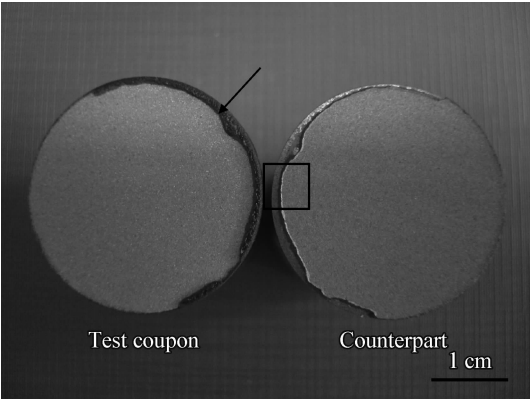
2.2.1 结合强度

涂层与基体的结合强度是涂层最基本的性能之一,是保证涂层满足力学、物理和化学等使用性能的基本前提,结合强度差时涂层极易剥落,则无法保护基体或实现其功能要求。表 2 为 316L+TiO₂ 涂层与基体的结合强度测量值,可见涂层与基体间的结合强度接近 50 MPa,远高于中间不加粘结层时等离子喷涂 TiO₂ 涂层与 Q235 钢的结合强度((30.90±4.74) MPa)^[7],说明增加粘结层后可显著改善涂层与基体间的结

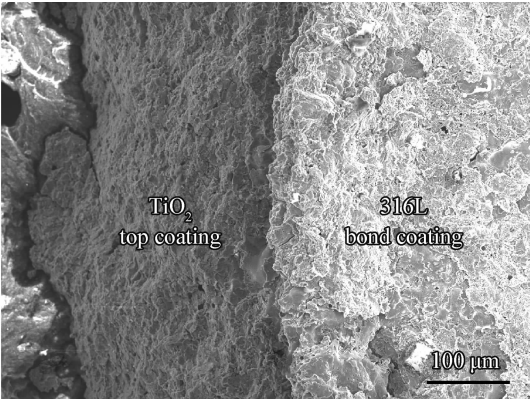
合。这是因为金属材料与陶瓷材料之间的物理性能(热膨胀系数、晶格常数等)相差较大,在金属基体与陶瓷材料之间制备合适的过渡层,可显著改善陶瓷层与基体间的结合。当然,在厚涂层制备过程中,随着喷涂时间的增加,制备过程中产生的残余应力会逐渐累积,厚涂层与基体间的结合强度会有一定程度的降低^[11]。

表 2 316L+TiO ₂ 涂层与基体的结合强度						
Table 2 Adhesion strength between the 316L+TiO ₂ coating and substrate (MPa)						
No.	1	2	3	4	5	Average
Adhesion strength	46.6	49.9	47.2	50.0	45.9	47.9

图 4(a)为 TiO₂ 涂层拉伸后断面形貌,可见拉伸样上的涂层基本沿基体与粘结层的界面剥离,只有边缘残留少部分涂层。由于拉伸方向可视为与基体和涂层的结合界面以及与涂层内部扁平颗粒间的结合界面垂直,而熔融颗粒与经喷砂粗化处理后的基体碰撞后主要以机械咬合的方式紧密结合在一起^[15],说明同种涂层内部的内聚结合强度以及粘结层与陶瓷面层之间的结合强度均超过了基体与粘结层的结合强度。为了进一步表征涂层的断裂行为,观察了拉伸对偶件上边缘部位的形貌(图 4(b)),可见失效基本发生在基体与粘结层界面处,涂层内单个扁平沉积物铺展较充分,且沉积物间界面比较完整。这说明涂层拉断过程中主要沿扁平颗粒与基体的结合界面分离。另在边缘部存在少数单个扁平沉积物



(a) Fracture surface



(b) SEM of the matching surface

图 4 涂层拉伸后断面形貌及对偶件电子扫描形貌

Fig. 4 Morphologies of the fracture surface after tensile test and the matching surface

内部断裂的痕迹,说明此处涂层内部层间结合良好,断裂发生在单个扁平沉积物内部。

2.2.2 孔隙率

制备 TiO₂ 厚涂层的目标是作为靶材应用于溅镀辊上,故对涂层的致密度必须严格控制。致密度太大会导致涂层内应力增大;致密度太小则会延长在玻璃溅射镀膜工序中抽真空的时间,且不利于溅射靶材表面的热量快速传递给旋转靶材内表面的冷却水,影响生产效率。

文中选取截面形貌中 TiO₂ 面层视场区域进行分析,图 5 为涂层孔隙率的测量过程。其中,图 5(a)为原始形貌,图 5(b)为根据对比度判断孔隙位置和孔径后的图片,图 5(c)为孔隙数量及面积的统计。根据对多张随机选取拍摄区域的照片进行统计显示,该 TiO₂ 涂层的平均孔隙率约为 3.5%,虽高于一般采用超音速火焰喷涂和低压等离子喷涂等设备制备的致密涂层的孔隙率,

但显著低于已有报道中等离子喷涂 TiO₂ 涂层的孔隙率^[16]。

喷涂过程中,喷涂粉未经等离子焰流加热加速后与基体碰撞,并在数十微秒时间内完成铺展及凝固为扁平状沉积物。单个沉积物会由于在铺展过程中基体表面的吸附质经焰流加热后脱离而从熔滴与基体界面处逃逸或在熔滴底部形成大量的微米和纳米级的气孔^[17-18]。同时,前期沉积物又可被视为后续熔融粉末沉积时的基体,如此累积就形成了由小薄片叠加而成层状结构的涂层^[19]。单个熔滴在基体或已沉积涂层部位铺展但尚未填补之前沉积物之间的孔隙就完全凝固,随即又成为后续铺展熔滴的基体。如此反复,大量的孔洞就残留在了涂层的内部。因此,通过对喷涂参数的调整达到对颗粒温度和速度等参数的控制,实现对熔融颗粒铺展过程的掌控,从而根据需求对孔隙率进行优化。

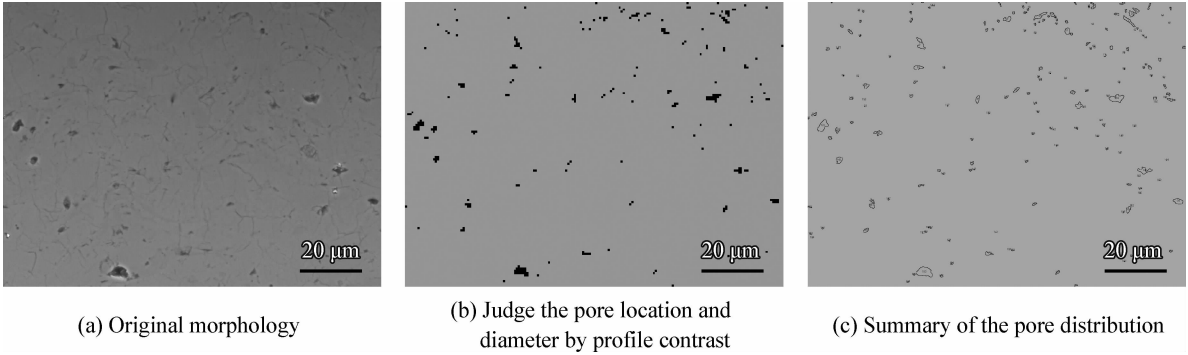


图 5 TiO₂ 涂层孔隙率测量过程
Fig. 5 Porosity measurement of the TiO₂ coating

2.2.3 抗热震性能

涂层的抗热震性能直接影响溅射辊在工作中的使用状况。即便是在溅射辊中间通水冷却的情况下,等离子放电溅射区内和背等离子放电溅射区的温度差将使涂层产生很大的内应力,故该涂层需要具备优良的抗热震性能。图 6 为 TiO₂ 涂层试样经 200 ℃、20 次热震后表面形貌,可见热震后涂层完好,无鼓泡和剥落,但表面微裂纹数量显著增加(如图中箭头所示),部分微裂纹相互连接形成网状裂纹。

图 7 为 316L+TiO₂ 涂层试样经 200 ℃、20 次热震后截面形貌,可发现存在一垂直于基体方向萌生的宏观裂纹,但在尚未到达粘结层处即停止,且周围无其它宏观裂纹。由放大图可见,围绕

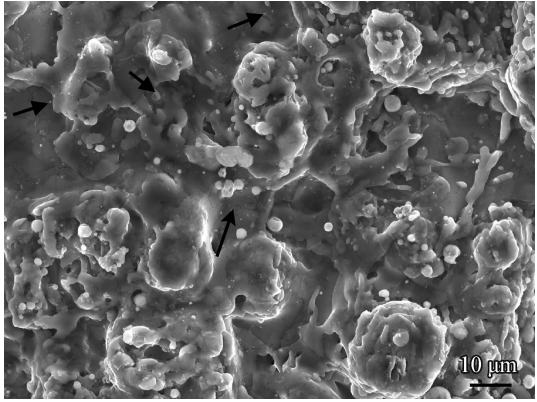
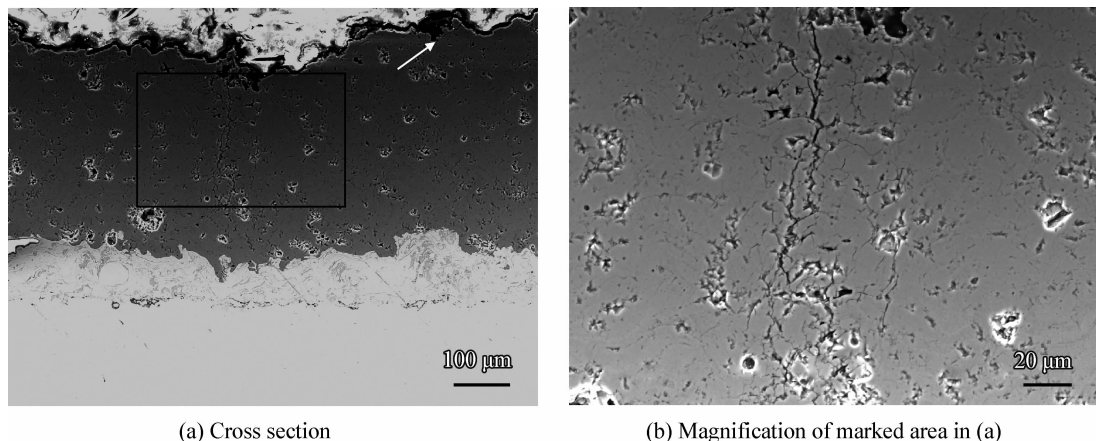


图 6 热震后 TiO₂ 涂层表面形貌
Fig. 6 Surface morphology of the TiO₂ coating after thermal shock test

图7 热震后 316L+ TiO_2 涂层截面形貌Fig. 7 Cross section morphologies of the 316L+ TiO_2 coating after thermal shock test

着该裂纹有一定数量的微裂纹存在,其尺寸相对较小。在靠近涂层表面处亦有少量深度较浅的裂纹存在(如箭头所示位置)。简言之,热喷涂 TiO_2 涂层组织相对疏松,有一定的孔隙率并有数量适中的微裂纹存在,可提高断裂能,使材料在热冲击下不致被破坏。研究表明,厚涂层制备过程中,若能合理的控制基体温度,可以达到和薄涂层相似的抗热震性能^[20]。同时,溅射靶材被均匀的喷涂于中空的圆形钢管上,其形状相对简单且外形相对均匀都有助于提高构件的抗热震性能。

2.3 厚涂层制备

基于应用需求,溅射靶外表面的涂层一般较厚,必然会导致涂层内应力增加,从而诱发裂纹的出现及涂层剥离等缺陷^[20-22],这将直接影响溅射靶的质量和使用寿命。研究表明,控制基体温度是缓和或减少喷涂过程中产生热应力的有效方法,对于制备厚涂层,特别是对基体和涂层热膨胀能力相差很大的条件下,更具有特别重要的意义^[20]。

为制备大厚度 TiO_2 涂层,采用水循环冷却空心钢管替代了采用压缩空气冷却平板样品的方法。但在实际喷涂中发现,采用室温冷却水时,喷涂到一定厚度后,由于过度冷却导致涂层发生开裂。因此,后续试验中,喷涂前将冷却水预热至 $50\text{ }^{\circ}\text{C}$,通过热电偶检测水温并在喷涂过程中实时调控水温。采用大气等离子喷涂技术先在管状基体上喷涂 316L 粘结层,厚度约为 $90\text{ }\mu\text{m}$,再在粘结层上制备 TiO_2 厚涂层。在厚涂层制备过程中,每喷涂一定遍数即采用测温仪和

测厚仪测量涂层表面温度和涂层厚度。喷涂开始阶段冷却良好,后期由于 TiO_2 涂层增厚明显导致热传导受阻,表面温度略有升高,但仍明显低于空冷时的基体表面温度,说明采用循环水冷却效果良好。同时,喷涂开始阶段涂层沉积较快,每 10 遍可增厚约 1 mm;后期由于涂层厚度的增加,单位时间内喷涂面积增大,故每 10 遍只能增厚 0.9 mm,但沉积速度仍很可观。

图 8 为大气等离子喷涂在通循环水冷却的 SUS304 不锈钢空心钢管上制备的 TiO_2 厚涂层形貌,可见涂层无脱落,基体无变形。涂层表面平整且无宏观裂纹,厚度均匀,单边厚度可达 8 mm,说明采用大气等离子体喷涂技术制备大厚度 TiO_2 涂层是可行的。

图8 TiO_2 厚涂层的宏观形貌Fig. 8 Macro morphology of the TiO_2 thick coating

当然,每种基体和涂层材料的组合均存在较佳的喷涂温度范围,喷涂时基体温度过高会导致

涂层内残余应力和热应力的快速增加,涂层将自行开裂或脱落;反之,基体温度较低则会削弱涂层与基体间的结合强度,进而影响其抗热震性能。同时,送粉量过大时涂层沉积速度随之增加,但会影响到涂层的冷却效率及增加涂层内部的应力。因此,通过控制冷却水温,优化送粉量等方式,即可在大尺度管状基体上制备大厚度 TiO_2 涂层,并有望应用于溅射辊上,以改善相关产品主要依赖进口的局面。

3 结 论

(1) 采用大气等离子喷涂技术在不锈钢 SUS304 平板基体上喷涂 316L 粘结层后再喷涂 TiO_2 涂层,该涂层与基体结合强度可达 48 MPa,涂层孔隙率 3.5%,经 200 °C 时热震 20 次涂层无脱落。

(2) 采用大气等离子喷涂技术在通循环水冷却的 SUS304 不锈钢管基体上成功制备了厚度达 8 mm 的 TiO_2 涂层,涂层厚度均匀无脱落。

(3) 通过对冷却效率及喷涂参数的进一步优化,可在大尺度管状基体上制备厚涂层,该技术有望用于开发涂层蒸镀辊。

参考文献

- [1] 吴丽君. 发展中的溅射靶材 [J]. 真空科学与技术, 2001, 21(4): 342-347.
- [2] 杨邦朝, 胡永达, 蒋明. 全球溅射靶材市场及发展趋势 [J]. 电子元件与材料, 2002, 21(6): 29-31.
- [3] 赵鑫, 王小明, 黄松涛, 等. 溅射法镀二氧化钛薄膜靶材及工艺研究进展 [J]. 稀有金属, 2006, 30(2): 177-180.
- [4] Vorotilov K A, Orlova E V, Petrovsky V I. Sol-gel TiO_2 films on silicon substrates [J]. Thin Solid Films, 1992, 207(1/2): 180-184.
- [5] Perry A J, Pulker H K. Hardness, adhesion and abrasion resistance of TiO_2 films on glass [J]. Thin Solid Films, 1985, 124(3/4): 323-333.
- [6] Weinberger B R, Garber R B. Titanium dioxide photocatalysts produced by reactive magnetron sputtering [J]. Applied Physics Letters, 1995, 6(18): 2409-11.
- [7] 范艳华, 尹衍升. 二氧化钛等离子喷涂层的结构及性能 [J]. 硅酸盐通报, 2006, 25(5): 6-9.
- [8] 糜亮, 周灿旭, 丁毅, 等. 等离子喷涂 TiO_2 涂层及其光催化性能研究 [J]. 表面技术, 2009, 38(6): 29-31.
- [9] Ctibor P, Hrabovsky M. Plasma sprayed TiO_2 : the influ-

ence of power of an electric supply on particle parameters in the flight and character of sprayed coating [J]. Journal of the European Ceramic Society, 2010, 30(15): 3131-6.

- [10] Chen D, Jordan E H, Gell M, et al. Dense TiO_2 coating using the solution precursor plasma spray process [J]. Journal of the American Ceramic Society, 2008, 91(3): 865-872.
- [11] 郭双全, 葛昌纯, 冯云彪, 等. 面向等离子体材料钨厚涂层的制备及表征 [J]. 稀有金属材料与工程, 2011, 40(12): 2167-70.
- [12] 陈永雄, 梁秀兵, 商俊超, 等. 高速电弧喷涂高碳钢涂层内聚结合强度的评价 [J]. 装甲兵工程学院学报, 2013, 27(5): 86-89.
- [13] Branagan D J, Breitsameter M, Meacham B E, et al. High-performance nanoscale composite coatings for boiler applications [J]. Journal of Thermal Spray Technology, 2005, 14(2): 196-204.
- [14] Rayment T, Hoile S, Grant P S. Phase transformations and control of residual stresses in thick spray-formed steel shells [J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 2004, 35(6): 1113-22.
- [15] Dorfman M. Thermal spray basics [J]. Advanced Materials Process, 2002, 160(7): 47-50.
- [16] Berger-Keller N, Bertrand G, Filiatre C, et al. Microstructure of plasma-sprayed titania coatings deposited from spray-dried powder [J]. Surface & Coatings Technology, 2003, 168(2): 281-290.
- [17] 杨焜, 邓畅光, 刘敏, 等. 热喷涂镍粉在 SUS304 及 A6063 基体上的沉积行为 [J]. 中国表面工程, 2013, 26(6): 18-23.
- [18] Qu M, Gouldstone A. On the role of bubbles in metallic splat nanopores and adhesion [J]. Journal of Thermal Spray Technology, 2008, 17(4): 486-494.
- [19] 杨元政, 刘正义. 等离子喷涂 $\text{Al}_2\text{O}_3 + 13\% \text{TiO}_2$ 陶瓷涂层的组织结构及其耐磨性 [J]. 功能材料, 2000, 31(4): 390-392.
- [20] 郭德成, 吴朝军, 刘克勇. 陶瓷隔热厚涂层制备和抗热震损伤性能 [J]. 兵器材料科学与工程, 1993, 16(6): 12-17.
- [21] 陈威, 高一翔, 朱磊, 等. ZrO_2 涂层在坦克局部隔热隐身中的应用研究 [J]. 热加工工艺, 2013, 42(16): 140-143.
- [22] 稽罡, Grosdidier, 郝胜智, 等. HVOF 喷涂成形纳米晶 FeAl 厚涂层的结构和热稳定性 [J]. 金属学报, 2005, 41(6): 561-567.

作者地址: 广州市天河区长兴路 363 号

510650

广州有色金属研究院新材料研究所

Tel: (020) 6108 6656

E-mail: yangkun20021357@hotmail.com