

热喷涂 NiCoCrAlYTa+7YSZ 热障涂层颗粒沉积行为

杨焜^{1,2,3}, 邓畅光^{1,2,3}, 刘敏^{1,2,3}, 邝子奇^{1,2,3}, 曾威^{1,2,3}

(1. 广东省新材料研究所, 广东 广州 510651)

(2. 现代材料表面工程技术国家工程实验室, 广东 广州 510651)

(3. 广东省现代表面工程技术重点实验室, 广东 广州 510651)

摘要: 分别采用低压等离子喷涂和大气等离子喷涂在 K4169 基体上收集了 NiCoCrAlYTa 颗粒沉积物及涂层, 并对颗粒沉积物的形貌及涂层性能进行了观察分析。结果表明: 低压等离子喷涂收集到的单个 NiCoCrAlYTa 扁平颗粒主要呈圆盘状, 涂层致密且氧含量低。而大气等离子喷涂收集到的扁平颗粒主要呈溅射状, 涂层孔隙率和氧含量均较高。又在经镜面抛光的 NiCoCrAlYTa 涂层和 K4169 基体上分别收集了 7YSZ 颗粒沉积物, 并对其沉积形貌进行了观察分析, 结果表明: 在 K4169 基体上收集到的 7YSZ 颗粒沉积物主要呈圆盘状, 表面存在大量的网状微裂纹及宏观环状贯通裂纹。在镜面抛光的 NiCoCrAlYTa 涂层表面收集的 7YSZ 颗粒沉积物, 周围有少量的指状溅射物, 中心部存在一定数量的网状微裂纹, 但宏观环状裂纹消失。

关键词: 热喷涂; 颗粒沉积物; 涂层; NiCoCrAlYTa; 7YSZ

中图分类号: TG174.442

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2017)04-1148-08

目前, 热障涂层在航空发动机、燃气涡轮机等诸多领域起着越来越重要的作用^[1]。典型的热障涂层 (thermal barrier coatings, TBCs) 由高温合金基体、MCrAlY 粘结层 (M 为 Ni, Co 或它们的合金)、生长氧化物 TGO 和顶部以氧化钇部分稳定氧化锆 (YSZ) 为主的隔热陶瓷涂层组成^[2]。热喷涂方法因其低成本、高效率等诸多优点被广泛应用于热障涂层的制备。其中, 低压等离子喷涂 (LPPS) 是制备 MCrAlY 粘结层的常用方法^[3], 而大气等离子喷涂 (APS) 是迄今为止面向工业应用 TBCs 的主要加工工艺^[4]。

与此同时, 热喷涂过程极其复杂, 影响等离子喷涂的因素就多达 50 多个^[5]。加强喷涂过程中基础现象的研究, 对于控制和优化热喷涂过程有着重要的意义。热喷涂过程中, 单个熔融颗粒作为热喷涂涂层的基本组成单位, 其撞击基体并在其表面铺展凝固行为对涂层性能有着重要影响^[6,7]。因此, 通过对热喷涂过程中单个熔融颗粒在基体表面沉积行为的研究, 可为热喷涂涂层性能预测和喷涂过程优化提供理论依据。然而, 目前关于热障涂层中熔滴沉积行为的研究主要集中在 YSZ 材料上^[8,9], 且基本都是在金属基体上直接收集颗

粒沉积物及观察分析, 这与热障涂层实际应用中陶瓷面层沉积在金属粘结层之上不符。特别地, 关于粘结层 MCrAlY 熔滴沉积行为的研究并不多。

本研究首先以热障涂层粘结层材料 NiCoCrAlYTa 粉末为研究对象, 对大气等离子喷涂和低压等离子喷涂制备的熔滴沉积物形貌及涂层性能进行观察分析。然后, 采用大气等离子喷涂在经镜面研磨的 NiCoCrAlYTa 涂层及 K4169 基体上分别收集 7% 氧化钇稳定氧化锆 ($7\% \text{Y}_2\text{O}_3\text{-ZrO}_2$, 7YSZ) 颗粒, 并对其沉积形貌进行了观察比较, 以期涂层的实际应用提供实验依据。

1 实验

基体材料为铸造高温合金 K4169。喷涂前将基体超声波清洗除油, 部分试样经砂纸打磨后再用人工金刚石研磨膏对其进行抛光处理备用, 另有部分试样用 CS-600D 型喷砂机对喷涂表面进行喷砂处理, 并用压缩空气清除试样表面可能残留的刚玉砂粒。

金属粘结层粉末材料为 NiCoCrAlYTa 六元合金粉

收稿日期: 2016-04-12

基金项目: 国家自然科学基金 (51301046); 国家重点基础研究发展计划 (2012CB625100)

作者简介: 杨焜, 男, 1984 年生, 博士, 高级工程师, 广东省新材料研究所, 广东 广州 510651, 电话: 020-61086656, E-mail: yangkun20021357@hotmail.com

(AMDRY®R997, Sulzer Metco), 其粒度分布范围为 $5\sim 35\ \mu\text{m}$ 。面层陶瓷粉末为团聚烧结的 $7\% \text{Y}_2\text{O}_3\text{-ZrO}_2$ (7YSZ, AMPERITM 827, H.C. Starck), 粉末粒径分布为 $15\sim 45\ \mu\text{m}$ 。

NiCoCrAlYTa颗粒收集及涂层制备实验采用广州有色金属研究院自行研制的低压等离子喷涂设备(LPPS, F4等离子喷枪, advanced materials technology GmbH, Switzerland)及大气等离子喷涂系统(APS, MF-P1000, GTV, Germany)进行。其中, 低压等离子喷涂实验均在Ar保护气氛中进行, 先将工作室抽真空到 $4.1\ \text{kPa}$ 以下, 然后向工作室充入Ar至 $8\ \text{kPa}$ 再进行喷涂; 而大气压条件下制备涂层时无保护气体。7YSZ颗粒收集实验采用大气等离子喷涂系统进行。

在保证收集到足够数量颗粒沉积物的同时, 为避免等离子射流对基体温度及表面形态的影响, 在距离基体 $3\ \text{cm}$ 处放置一带有小孔的挡板。当等离子射流稳定后启动喷涂程序, 当等离子射流中心、挡板上小孔及基体中心处于同一水平线上, 一定数量的熔融颗粒即可通过挡板上小孔沉积到基体表面。

在基体表面捕获的NiCoCrAlYTa及YSZ颗粒沉积物正面形貌利用扫描电子显微镜(SEM, JEOL JSM-5910)进行观察。然后, 用导电胶布覆盖于收集了一定数量颗粒沉积物的基体上, 并用力平稳地挤压后缓慢地揭开导电胶布, 然后用SEM对导电胶布上收集到的沉积物的底面形态进行观察。

NiCoCrAlYTa涂层形貌通过SEM进行观察。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张相同放大倍率的SEM图片进行分析, 计算其平均值。原始粉末及涂层的氧含量采用TC600氧氮测定仪进行测量。采用Everone MH-5型显微硬度计测量涂层的截面硬度, 测试载荷为 $3\ \text{N}$, 加载时间为 $15\ \text{s}$, 取10次测量平均值。

2 结果与讨论

2.1 NiCoCrAlYTa 颗粒沉积形貌

图1为采用低压等离子喷涂和大气等离子喷涂在镜面抛光K4169基体上收集到的NiCoCrAlYTa颗粒沉积物正面形貌。低压下, 沉积物主要呈盘状铺展, 但有部分短而粗的指状物与中心部位相连。除此之外, 基体上可见少量的未熔或半熔颗粒。这主要是因为低压条件下等离子焰流被拉长, 这必然导致能量密度的降低。相较于相同功率条件下的大气等离子喷涂, 粉末颗粒送入焰流加温加速后其飞行速度更快但温度更低^[10,11], 被送至焰流边缘的粉末可能未被充分熔化所致。大气等离子喷涂收集到的沉积物主要呈溅射

状, 周围可见明显与中心残留物相分离的溅射环, 中心残留部边缘可见较明显的卷曲现象(如图1b中箭头所示), 这主要包含以下几个原因: 首先, 常压下熔融颗粒与基体间的润湿相对较差, 导致熔融颗粒与基体间初始接触角更大, 形成间隙^[12]; 其次, 熔融颗粒撞击基体后, 撞击区域局部温度快速上升促进了该区域的吸附质发生脱附, 并从沉积物边缘逸出, 阻碍了沉积物边缘与基体的结合; 再次, 热胀冷缩作用下熔融颗粒在凝固过程中会向粒子中心方向收缩, 最终导致边沿出现卷曲。

另一方面, 即便考虑周围溅射环的质量损失, 大气等离子制备颗粒沉积物中心残留物尺寸也明显小于低压下沉积物。当基体经抛光处理后露置于空气中时, 其表面会附着一层以化学键为主的化学吸附质, 并在该层之上以范德华力附着多层物理吸附质^[13]。采用低压等离子喷涂之前, 喷涂腔内被抽至低真空环境, 基体本身表面的化学成分及粗糙度等并不会发生明显变化, 但附着的物理吸附质会迅速发生脱附, 因此, 熔融颗粒与基体间的物理接触更好, 润湿更充分^[12], 导致铺展半径更大。

低压等离子喷涂中, 相对较低的颗粒温度对应的是颗粒粘性的增加, 而相对较高的飞行速度必然导致熔融颗粒撞击基体的初始动能增加, 熔融颗粒与基体间良好的润湿又能促进其在基体表面的平稳铺展及向基体内部的热传递, 诸多因素的综合作用抑制了低压下熔融颗粒溅射的发生。相反, 常压下飞行颗粒较低的粘性、基体表面吸附质的存在以及较差的润湿性能导致了熔滴在基体表面发生溅射。

图2为采用低压等离子喷涂和大气等离子喷涂在镜面抛光 K4169 基体上收集到的 NiCoCrAlYTa 颗粒沉积物底面形貌。低压下收集到沉积物底面如图 2a 所示, 中心部组织致密, 边缘可见部分显微气孔的存在。常压下收集到沉积物底面如图 2b 所示, 残留物中心部可见一直径达数微米的孔洞, 边缘围绕一定数量的纳米及微米级气孔。孔洞数量及尺寸分布区别主要取决于熔滴与基体碰撞前基体表面的吸附质数量, 其生成过程已在大量的文献中报道^[7,13-15]。

为了便于颗粒沉积物的收集及观察, 目前关于热喷涂颗粒沉积行为的研究主要针对抛光基体上收集的沉积物。而在实际涂层制备过程中, 为获得干净、具有活性、易附着的表面状态及加强涂层与基体的机械咬合作用, 喷涂前基体一般都会经过喷砂粗化处理。因此, 为了解单个熔融颗粒在实际喷涂过程中的沉积行为, 采用低压等离子喷涂和大气等离子喷涂在经喷砂处理的 K4169 基体上也收集了一定数量的

NiCoCrAlYTa 颗粒沉积物。相较于镜面抛光基体上数量众多的颗粒沉积物，在喷砂基体上仅有数量有限的

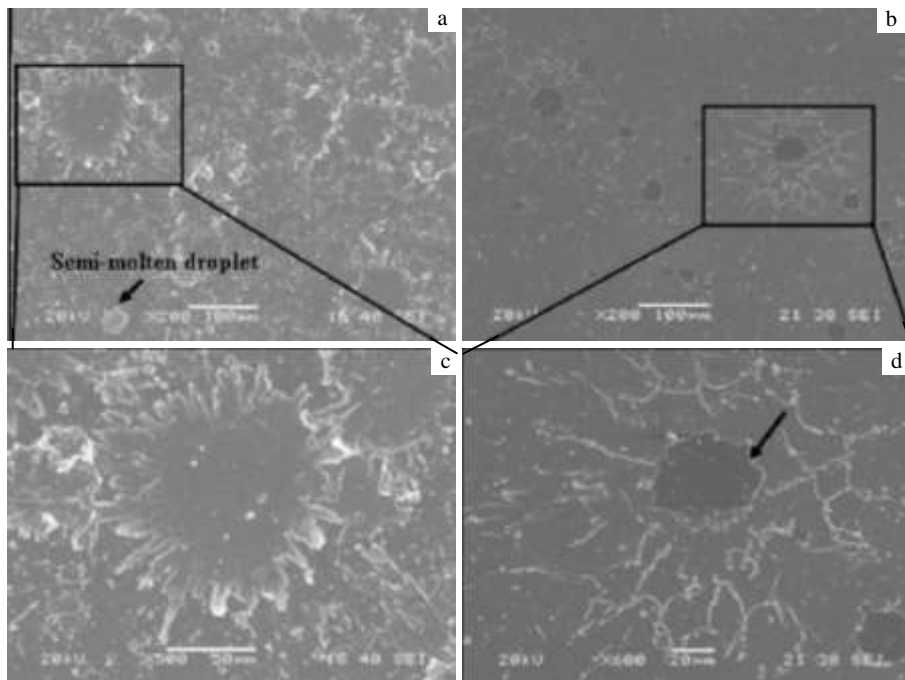


图 1 采用不同方法在抛光 K4169 基体上收集 NiCoCrAlYTa 颗粒沉积物正面形貌

Fig.1 Top surface morphologies of NiCoCrAlYTa splats deposited on mirror-polished K4169 substrate by different routes: (a, c) LPPS and (b, d) APS

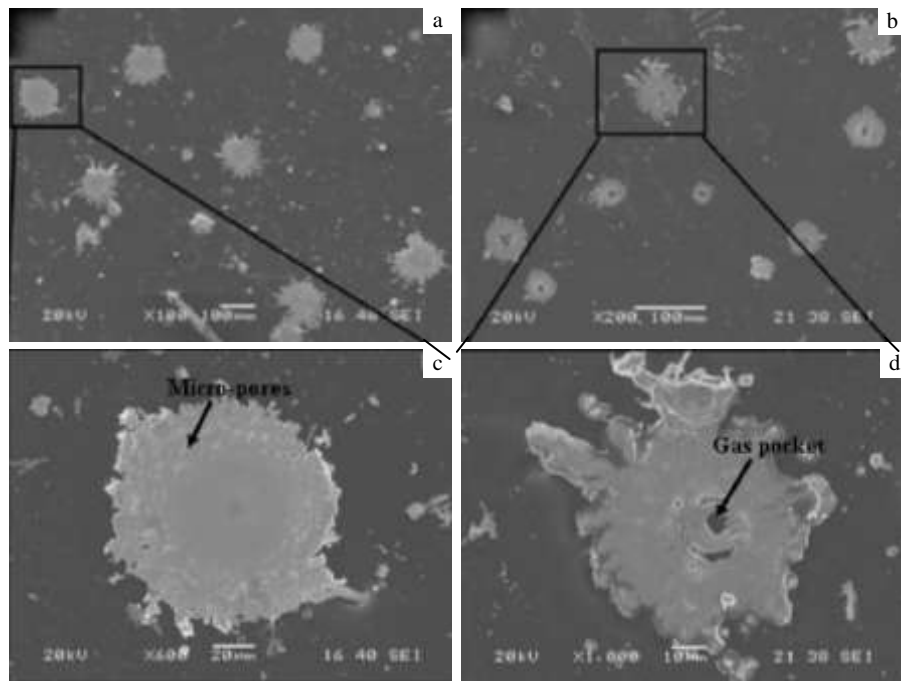


图 2 采用不同方法在抛光 K4169 基体上收集 NiCoCrAlYTa 颗粒沉积物底面形貌

Fig.2 Bottom surface morphologies of NiCoCrAlYTa splats deposited on mirror-polished K4169 substrate by different routes:

(a, c) LPPS and (b, d) APS

颗粒沉积物被观察到, 正面形貌如图 3 所示。无论是低压还是常压条件下收集的沉积物, 由于在铺展过程中受到基体表面凸起物的限制, 沉积物的形状都显得不够规则。单个沉积物的尺寸相较于在抛光基体上收集到的沉积物更小, 这主要是因为熔滴在喷砂基体上铺展的时间更短^[16]; 同时, 基体表面粗糙度显著上升, 导致了熔融颗粒在铺展过程中与基体间的摩擦力增加, 阻碍了熔融颗粒的铺展速度^[16,17]。

尽管在低压和常压下在喷砂基体上收集到的沉积物都不够规则, 但两相比较还是可以发现, 采用低压等离子喷涂收集到的沉积物铺展相对平稳, 而采用大气等离子喷涂收集到的沉积物表面中心部有大量的气孔, 这主要是由于熔融颗粒撞击基体后, 碰撞区域基体温度快速上升, 隐藏在基体凸凹不平处的气体及表面吸附质的迅速逸出所致。中心部周围存在部分与之分离的溅射物, 但由于基体表面形态的限制未形成连续的环状结构。

热喷涂过程中, 喷涂材料经焰流加热后形成熔融或半熔融状态高速撞击基体表面, 然后迅速在基体表面或已沉积涂层上铺展并快速凝固形成扁平粒子。大量扁平粒子的逐层堆垛最终形成热喷涂涂层。因此, 了解熔融颗粒在已沉积涂层上的沉积行为也至关重要。此时, 前期沉积的涂层又成为后续涂层的基体, 如此累积最终达到所需的涂层厚度。基于此, 分别将低压等离子喷涂及大气等离子喷涂制备的 NiCoCrAlYTa 涂层进行研磨抛光处理, 然后选择与底层涂层制备工艺相同的方法收集一定数量的颗粒沉积物。

图 4 所示即为采用不同方法在已沉积涂层上收集到的 NiCoCrAlYTa 颗粒沉积物正面形貌。由图 4a 可见, 采用低压等离子喷涂在经抛光的低压等离子喷涂 NiCoCrAlYTa 涂层上收集到的 NiCoCrAlYTa 颗粒呈规则的盘状沉积, 与在抛光 K4169 基体上收集到的颗粒沉积物形貌并无明显的区别, 说明 NiCoCrAlYTa 熔融颗粒在已沉积涂层及在高温合金基体上的沉积行为较为相似。由图 4b 可见, 相较于在抛光 K4169 基体上收集到的颗粒沉积物, 采用大气等离子喷涂在经抛光处理的大气等离子喷涂 NiCoCrAlYTa 涂层上收集 NiCoCrAlYTa 颗粒铺展半径更大, 边缘大量细而长的溅射物与中心残留物相连, 而中心残留物尺寸更大且在中心部可见直径达数微米的孔洞。由于喷涂颗粒及此时采用的基体材料均为 NiCoCrAlYTa 六元合金, 相同的材料导致熔滴与基体更容易润湿, 熔融颗粒在基体表面非常快速地铺展且在铺展方向上缺乏有效的约束^[18]。同时, 与基体甚至低压等离子喷涂制备的涂层

相比, 大气等离子喷涂制备的涂层中存在大量的空隙,

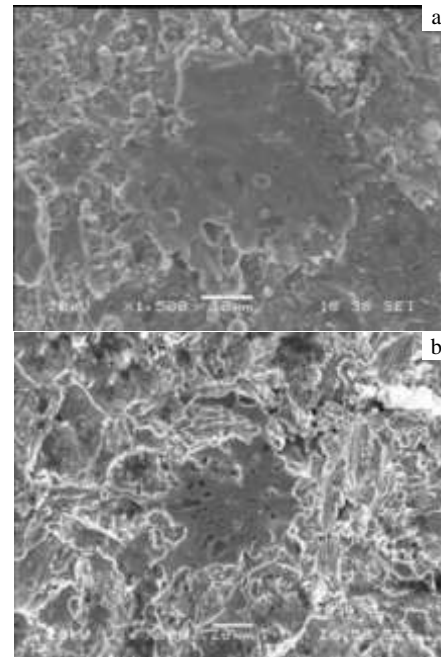


图 3 采用不同方法在喷砂 K4169 基体上收集 NiCoCrAlYTa 颗粒沉积物正面形貌

Fig.3 Top surface morphologies of NiCoCrAlYTa splats deposited on grit blasted K4169 substrate by different routes: (a) LPPS and (b) APS

内部储存有大量的环境气体。当熔融颗粒高速撞击到已沉积涂层后, 撞击区域的温度迅速上升, 导致该区域表面吸附质及其下涂层内部气体发生脱附进入到颗粒内部并发生体积膨胀, 随着该累积气体压强的增加, 最终冲破熔滴形成大的孔洞。

2.2 NiCoCrAlYTa 涂层形貌及性能

为探讨熔融颗粒沉积行为对涂层性能的影响, 本研究亦在喷砂 K4169 基体上制备了 NiCoCrAlYTa 涂层, 并对其微观结构及性能进行了观察分析。图 5 为不同方法制备的涂层表面形貌。由图 5a 可见, 低压等离子喷涂涂层表面可见部分未熔或半熔颗粒, 表面较为粗糙; 而由图 5b 可见, 大气等离子喷涂制备涂层中未熔或半熔颗粒数量明显减少, 且涂层表面更为平整。这主要是由于低压下, 等离子焰流长度的增加及能量密度降低, 送入的粉末颗粒经等离子焰流加温加速后, 沉积前熔融颗粒的温度更低^[10,11], 导致了未熔或半熔颗粒的存在。此类颗粒在基体或已沉积涂层表面的铺展不够充分, 涂层表面因而更为

粗糙。

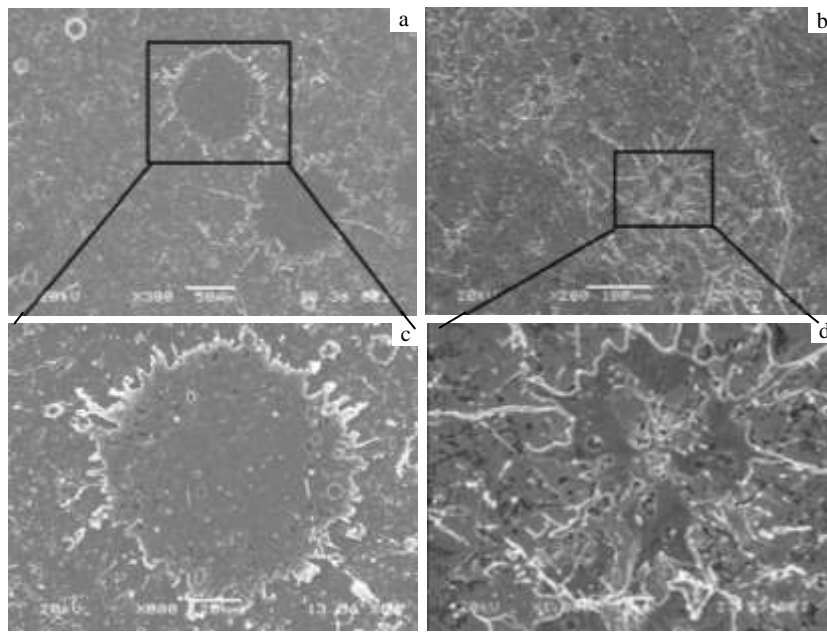


图 4 采用不同方法在镜面抛光 NiCoCrAlYTa 涂层上收集 NiCoCrAlYTa 颗粒沉积物正面形貌

Fig.4 Top surface morphologies of NiCoCrAlYTa splats deposited on mirror-polished NiCoCrAlYTa coating by different routes: (a, c) LPPS and (b, d) APS

(a) LPPS and (b) APS

图 6 为不同方法制备的 NiCoCrAlYTa 涂层截面形貌。由图 6a 可见，低压等离子喷涂制备的涂层组织致密，层状结构不明显。由于喷涂在保护性气氛下进行，单个颗粒飞行过程及在基体及之前制备的涂层表面铺展过程中无明显氧化，故单个沉积物之间无明显氧化物界面。同时，涂层内部（如图中箭头所示位置）可见截面呈圆形的未熔或半熔颗粒物的存在，与单个颗粒沉积物及涂层表面观察到的未熔或半熔物相对应。如图 6b 所示，大气等离子喷涂制备的涂层组织则较为疏松，呈典型的层状结构，层间界面明显。这是由于喷涂在大气环境下进行，单个颗粒在飞行过程以及在基体或已沉积涂层表面铺展过程中均发生氧化，熔滴表面氧化层即形成各层间界面。

2 种方法制备的涂层基本性能如表 1 所示。采用低压等离子喷涂时，喷涂腔内充入了保护性气体导致氧分压的降低，有效抑制了粉末颗粒在飞行过程及涂层形成过程中氧化，其氧含量（质量分数）低至 0.4%，虽高于原始 NiCoCrAlYTa 粉末（0.057%），但远低于大气等离子喷涂涂层制备的涂层（4.2%）。

为比较涂层的孔隙率，选取不同方法制备涂层的截面形貌中视场区域进行分析。根据对多张随机选取拍摄区域的照片进行统计显示，低压等离子喷涂制备的 NiCoCrAlYTa 涂层孔隙率为 1.4%，远低于大气等

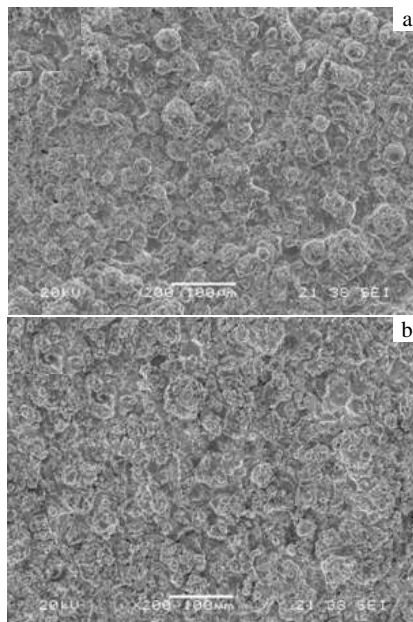


图 5 采用不同方法在 K4169 基体上制备 NiCoCrAlYTa 涂层正面形貌

Fig.5 Top surface morphologies of NiCoCrAlYTa coatings deposited on K4169 substrate by different routes:

离子喷涂涂层的孔隙率 7.6%。低压等离子喷涂时, 单个粉末颗粒首先在基体表面沉积为规则的盘状沉积物, 在良好的润湿作用下, 后续熔滴在已沉积涂层表面充分铺展并有效填补之前沉积物之间的空隙; 同时, 后续飞行颗粒较高的飞行速度产生的喷丸效应亦会夯实已沉积涂层, 从而降低其孔隙率。而大气等离子喷涂时, 单个沉积物底部存在大量的微米和纳米级的气孔^[14,15], 沉积物边缘的卷曲及溅射物的存在均导致了大量的孔洞在涂层内部生成。

同时, 低压等离子喷涂制备涂层的硬度显著高于大气等离子喷涂制备涂层, 这与涂层的孔隙率吻合良好。

基于对低压等离子喷涂和大气等离子喷涂制备的 NiCoCrAlYTa 粉末颗粒沉积行为及涂层性能的对比研究, 采用低压等离子喷涂制备的 NiCoCrAlYTa 涂层更适合作为热障涂层的粘结层。后文中关于粘结层对陶瓷层熔融颗粒沉积行为的影响研究也将选择低压等离子喷涂 NiCoCrAlYTa 涂层作为收集 7YSZ 颗粒沉积物的基体。

2.3 7YSZ 颗粒沉积形貌

在 TBCs 体系中, YSZ 涂层微组织结构对 TBCs 的隔热性能和使用寿命起关键作用。本研究采用大气等离子喷涂技术在经镜面研磨的低压等离子喷涂制备的 NiCoCrAlYTa 涂层上收集了一定数量的 7YSZ 颗粒沉积物, 并对其形貌进行观察分析。作为对比, 在未

deposited on K4169 substrate by with different routes: (a) LPPS and (b) APS

制备粘结层的 K4169 抛光基体上亦直接进行了 7YSZ 颗粒沉积物收集和观察。

图 7 为大气等离子喷涂在 NiCoCrAlYTa 涂层及 K4169 基体上收集到的 7YSZ 颗粒沉积物正面形貌。由图 7a 可见, 在经镜面抛光的低压等离子喷涂制备的 NiCoCrAlYTa 涂层表面收集的 7YSZ 颗粒沉积物周围有少量的指状溅射物, 中心部存在一定数量的相互贯通的网状微裂纹, 这主要是由于颗粒沉积物在铺展方向上, 径向应力由压应力向拉应力转换, 并在界面边缘附近达到最大值^[19], 而陶瓷材料相较于金属材料脆性更大而延展性极低, 当陶瓷颗粒沉积物凝固冷却收缩时, 在拉应力作用下, 微裂纹在界面边缘萌生并向界面中心域扩展最终形成网状裂纹。图 7b 为在未喷涂粘结层的镜面抛光 K4169 基体上直接收集的 7YSZ 颗

表 1 NiCoCrAlYTa 涂层性能

Table 1 Properties of NiCoCrAlYTa coatings

Route	Oxygen content, ω/%	Porosity/%	Hardness, HV _{0.3} /MPa
LPPS	0.4	1.4	5337
APS	4.2	7.6	2828

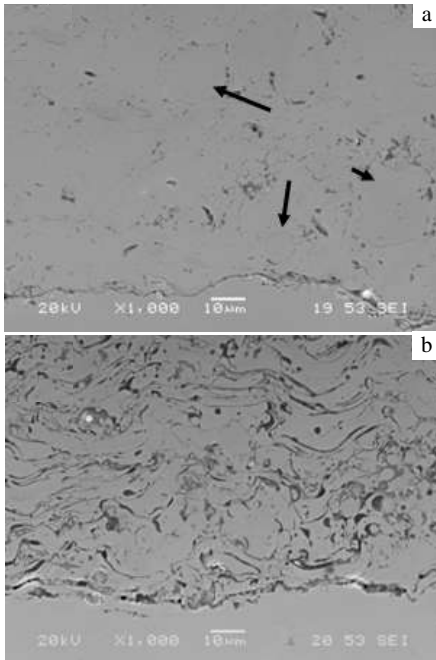


图 6 采用不同方法在 K4169 基体上收集 NiCoCrAlYTa 涂层截面形貌

Fig.6 Cross sectional morphologies of NiCoCrAlYTa coatings

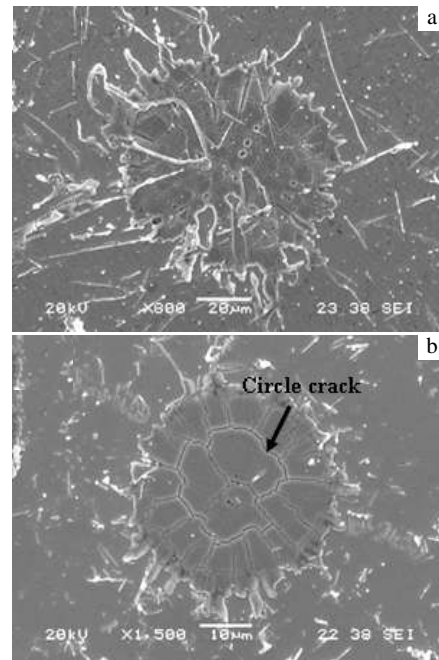


图 7 不同基体上收集 7YSZ 颗粒沉积物正面形貌

Fig.7 Top surface morphologies of 7YSZ splats deposited on different substrates: (a) NiCoCrAlYTa coating and

(b) K4169 substrate

粒沉积物形貌。沉积物呈较为规则的盘状, 周围可见部分溅射物, 上表面可见到网状微裂纹的存在。特别地, 在半径约 1/2 处可见贯通裂纹, 这主要是由于熔融的 7YSZ 陶瓷颗粒与 K4169 高温合金直接接触时, 相互间热膨胀系数、弹性模量等物理性能差异较大所致。涂层内部大量此类宏观裂纹的存在, 在服役条件下容易诱发涂层的失效。因此, 在实际应用中, 陶瓷层与高温合金基体间都会先预制一层金属粘结层, 以起到改善基体与陶瓷涂层物理相容性和抗氧化腐蚀的作用, 而顶部陶瓷层主要作用则是隔绝热量并产生温度梯度。

由沉积物正面形貌观察可见, 沉积物内部存在大量的裂纹, 故采用导电胶粘贴的方法很难从基体上分离完整的颗粒沉积物, 且无法判断底部的裂纹分布是在沉积过程产生, 还是由制样时外力所致, 故未对 2 种沉积物的底面形貌进行观察。

3 结 论

1) 大气等离子喷涂 NiCoCrAlYTa 熔融颗粒在基体上发生明显溅射; 低压等离子喷涂在 Ar 保护性气氛下进行, NiCoCrAlYTa 熔融颗粒氧化少、飞行速度快, 同时 K4169 基体表面吸附质发生脱附, 熔融颗粒与基体碰撞后与基体接触良好并在基体表面快速稳定铺展, 促进了盘状沉积物的生成。

2) 大气等离子喷涂制备 NiCoCrAlYTa 涂层疏松且氧含量高; 而低压等离子喷涂制备 NiCoCrAlYTa 涂层组织致密、氧含量低且硬度高, 可被广泛应用于高温抗氧化涂层及 TBCs 粘结层。涂层性能与单个熔融颗粒的沉积形貌有密切的关系, 通过对单个颗粒沉积行为的研究, 可为热喷涂过程优化及涂层性能预测提供依据。

3) 由于高温合金基体与陶瓷间较大的热膨胀系数差异, 直接在 K4169 基体上收集的 7YSZ 颗粒沉积物表面存在大量的网状裂纹及贯通的环状裂纹。在高温合金基体与陶瓷面层间预制 NiCoCrAlYTa 涂层, 可有效缓解二者的热不匹配, 因而在 NiCoCrAlYTa 涂层表面收集的 7YSZ 颗粒沉积物铺展更为平稳, 网状裂纹仍然可见, 但环状贯通裂纹消失。

参考文献 References

- [1] Xu Huibin(徐惠彬), Gong Shengkai(宫声凯), Liu Fushun(刘福顺). *Acta Aeronautica ET Astronautica Sinica*(航空学报)[J], 2000, 21(1): 8
- [2] Padture N P, Gell M, Jordan E H. *Science*[J], 2002, 296: 280
- [3] Huntz A M, Boumaza A, Moulin G. *Oxid Met*[J], 1988, 30(3-4): 141
- [4] Bose S, Marcin J D. *J Therm Spray Techn*[J], 1997, 6(1): 99
- [5] Sarikaya O. *Mater Des*[J], 2005, 26(1): 53
- [6] Yang K, Liu M, Deng C G. *Surf Eng*[J], 2014, 30(11): 814
- [7] Yang Kun(杨焜), Liu Min(刘敏), Deng Changguang(邓畅光) et al. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*(中国有色金属学报)[J], 2014, 24(3): 708
- [8] Sampath S, Jiang X Y, Matejicek J et al. *Mater Sci Eng A*[J], 1999, 272(1): 181
- [9] Liu H B, Bussmann M, Mostaghimi J. *J Therm Spray Techn*[J], 2008, 17(5): 646
- [10] Sodeoka S, Suzuki M, Inoue T. *Proceedings of International Thermal Spray Conference 2001*[C]. Singapore: ASM International, 2001: 737
- [11] Bronet M S, Boulos M I. *Plasma Chem Plasma P*[J], 1989, 9(3): 343
- [12] Yang K, Ebisuno Y, Tanaka K et al. *Surf Coat Technol*[J], 2011, 205(13-14): 3816
- [13] Li C J, Li J L. *Surf Coat Technol*[J], 2004, 184(1): 13
- [14] Qu M, Gouldstone A. *J Therm Spray Techn*[J], 2008, 17(4): 486
- [15] Qu M, Wu Y H, Srinivasan V et al. *Appl Phys Lett*[J], 2007, 90(25), 254 101
- [16] Moreau C, Gougeon P, Lamontagne M. *J Therm Spray Techn*[J], 1995, 4(1): 25
- [17] Fauchais P, Vardell M, Vardell A et al. *Ceram Int*[J], 1996, 22(4): 295
- [18] Dhiman R, McDonald A G, Chandra S. *Surf Coat Technol*[J], 2007, 201(18): 7789
- [19] Ma Zaimin(马再敏), Yao Jin(姚进). *Hot Working Technology*(热加工工艺)[J], 2011, 40(8): 131

Flattening Behavior of Thermally Sprayed NiCoCrAlYTa+7YSZ Particles in Thermal Barrier Coatings

Yang Kun^{1,2,3}, Deng Changguang^{1,2,3}, Liu Min^{1,2,3}, Kuang Ziqi^{1,2,3}, Zeng Wei^{1,2,3}

(1. Guangdong Institute of New Materials, Guangzhou 510651, China)

(2. National Engineering Laboratory for Modern Materials Surface Engineering Technology, Guangzhou 510651, China)

(3. The Key Laboratory of Guangdong for Modern Surface Engineering Technology, Guangzhou 510651, China)

Abstract: NiCoCrAlYTa splats and coatings were deposited on K4169 substrates by low pressure plasma spray (LPPS) and atmospheric plasma spray (APS). The microstructures of the splats and some fundamental properties of the coatings were evaluated. Results show that the splats collected by LPPS are disk-shaped, while the coating is quite dense with a low oxygen content. On the contrary, the splats caught by APS mainly deposit as splash shapes, while the coating has high porosity and oxygen content. 7YSZ splats were deposited on the mirror polished K4169 substrate and low pressure plasma sprayed NiCoCrAlYTa coating, and the microstructures of 7YSZ splats were also observed. Typical disk-shaped 7YSZ splats with network of fine cracks and macro circle crack are found on the K4169 substrate; while the 7YSZ splat deposited on the NiCoCrAlYTa coating has some splash fingers around the central solidification core, the macro circle cracks almost disappear and less network fine cracks are found, because the intermetallic bond coating can fill the thermal expansion mismatch between substrate and ceramic splat.

Key words: thermal spray; splat; coating; NiCoCrAlYTa; 7YSZ

Corresponding author: Yang Kun, Ph. D., Senior Engineer, Guangdong Institute of New Materials, Guangzhou 510651, P. R. China, Tel: 0086-20-61086656, E-mail: yangkun20021357@hotmail.com