

低压等离子喷涂耐高温涂层残余应力检测及分析

王斌利¹, 胡江波¹, 王建锋¹, 黄宝庆¹, 江鹏², 刘建明³

- (1. 中国航发西安航空发动机有限公司, 陕西西安 710021
2. 西安交通大学航空航天学院, 陕西西安 710000
3. 北矿新材料科技有限公司, 北京 102206)

摘要: 采用低压等离子工艺制备耐高温可磨损涂层, 通过光学显微镜观察了耐高温涂层的显微结构, 采用逐层法与曲率法相结合的检测技术, 对不同厚度涂层残余应力进行检测, 形成了涂层厚度与残余应力分布及趋势图, 运用热处理技术控制和消除涂层内部残余的涂层应力。结果表明, 低压等离子喷涂的耐高温涂层表面残余应力随着涂层厚度的增加而增大, 当涂层厚度达到 0.6mm 左右极限时, 涂层会发生自然开裂, 采用热处理的工艺方法可以减少涂层内的热应力导致的涂层残余应力。

关键词: 高温合金涂层; 逐层法和曲率法; 高温可磨损; 残余应力; 热处理

中图分类号: TG174.4 文献标识码: A 文章编号: 1674-7127(2019)12-0008-05

DOI 10.3969/j.issn.1674-7127.2019.04.008

Residual Stress Measurement and Analyze of High Temperature Abradable Coatings Prepared by Low Pressure Plasma Spray

Binli Wang¹, Jiangbo Hu¹, Jianfeng Wang¹, Baoqing Hang¹, Peng Jiang², Jianming Liu³

(1. AECC Xi'An Aero-engine Ltd, Shanxi Xi'An 710021

2. Aeronautical and Space Institute, Xi'An Jiaotong University, Shanxi Xi'An 710000

3. BGRIMM Advanced Materials Science & Technology Co., Ltd., Beijing 102206)

Abstract: In the study, high temperature abradable coatings were prepared by low pressure plasma spray process, the microstructure of coatings was observed by optical microscope, the coating residual stress with different thickness were measured by the combination of layer by layer and curvature method, and the distribution and trend chart of coating thickness and residual stress were formed. The heat treatment techniques to control and eliminate residual stresses inside the coating were adopted. The results show that the surface residual stress of the low temperature plasma sprayed high temperature resistant coating increases with the thickness of the coating. The coating will crack naturally when the coating thickness reaches the limit value of about 0.6 mm. The heat treatment process can reduce the residual stress of the coating caused by thermal stress.

Keywords: Superalloy coatings; Layer-by-layer and curvature method; High temperature abradable; Residual Stress; Heat treatment

0 引言

热喷涂是国内外航空发动机和燃气轮发动机

使用最广泛的一种涂层制备技术,主要用于耐磨、可磨损封严、热障、抗氧化、抗腐蚀、防粘接、抗微振磨损、阻燃以及零部件尺寸修复涂层的制

备。在采用低压等离子喷涂耐高温涂层时，高温合金粉末粒子在喷枪内瞬间熔化，熔融粒子在冲击基体时产生碰撞，产生涂层的热应力。涂层与基体之间热膨胀系数差异，熔融粒子结晶时产生收缩，颗粒撞击基体时要生变形和硬化等，产生了淬冷应力，这一系列复杂应力的集合便在涂层-基体系统中产生了涂层残余应力。残余应力是热喷涂涂层固有的特性之一，其主要原因是涂层与基体有着较大的温度梯度和物理特性差异^[1]。喷涂时涂层产生残余应力，控制残余应力是非常重要的，其影响因素也很复杂^[2]。马维等人根据涂层形成的流体力学和热力学等主要影响参数，形成了残余应力的理论模型^[3]，黄贞益等人运用有限元方法对等离子喷涂高温涂层沉积过程中涂层内部残余应力进行了数值模拟计算^[4]，但这些仅仅停留在理论计算上，缺乏可靠的试验验证。

本文先采用 X 射线衍射法对涂层的残余应力进行了定性的规律性探索，再利用逐层法与曲率法相结合的方式测试不同厚度涂层残余应力，将逐层法与曲率法测量方法进行了有机结合，利用各自检测方法的优点，对低压等离子喷涂的高应力涂层残余应力进行了测试与分析，以期获得重复性好并能获得较为真实的涂层残余应力水平数据。同时将传统的热处理工艺引入涂层的残余应力消除中，实践检验证明，对热喷涂涂层进行热处理，可以释放涂层内部的残余应力，降低孔隙率，并能一定程度上改善涂层的性能^[5,6]。

1 试验材料和检测方法

1.1 试样的准备

试样基材为高温合金材料，喷涂前试样的制备采用同一块大规格试板线切割剪裁，平板试样

尺寸：75mm×20mm×3mm，对试样的边缘尖角采用手工方式倒角 1mm×45°，并在同状态下抛光、装夹、吹砂、喷涂。根据事先预设不同涂层厚度方案，采用多个试样同时喷涂，每次取出 2 个试样，1 件用于原始态的涂层残余应力检测，1 件涂层经高温热处理，用于消除涂层应力后残余应力检测。

本实验涂层为单层结构形式，粉末材料采用传统的 MCrAlY，粉末的化学成分为 Co-30Ni-25Cr-7Al-0.4Y，粉末粒度 -62μm~+11μm，粉末的外观形貌见图 1。

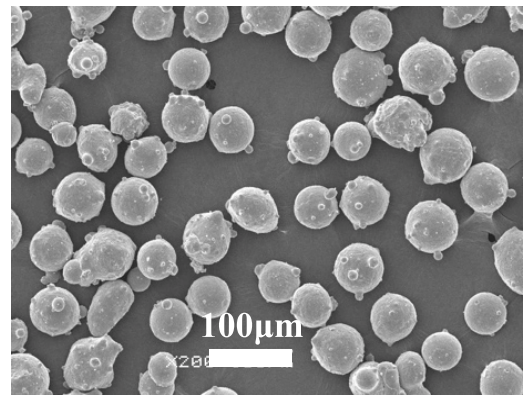


图 1 MCrAlY 粉末 SEM 形貌 :200X 放大
Fig. 1 SEM of MCrAlY powder: 200X magnification

1.2 涂层的制备

采用欧瑞康美科公司生产的 MultiCoat VPS 低压等离子喷涂设备制备高温涂层，表 1 为低压等离子喷涂工艺参数，涂层厚度从 0mm 开始，每隔 0.05mm 为基准，直到涂层厚度达 1mm 为止。但是在实际制备中，当涂层厚度达 0.7mm 时，所制备的涂层已经出现目视可见的基体与涂层明显的宏观分层，因此预设方案涂层厚度上限调整到 0.65mm。

表 1 低压等离子喷涂制备涂层工艺参数

Table 1 Process parameters of low pressure plasma spray coating

氩气流量 (L/min)	氢气流量 (L/min)	载气流量 (L/min)	送粉率 (g/min)	电流 (A)	电压 (V)
45	15	5	50	600	85

1.3 涂层残余应力的检测方法

1.3.1 X 射线衍射检测法

采用 X 射线衍射法对试验件原始样、喷砂后

以及喷涂后的残余应力进行了定性检测，试样总数共 3 片，在检测试验前，3 片试片按照与零件同状态的要求，在试片表面进行了喷丸处理，并

分别在其反面处用点阵标刻机标刻,用于残余应力检测试样其测点尺寸基准边的选择,保证每片试片检测的点位一致,确保检测的数据有可比性。每片试片反面分别选取3个测点进行检测,获得3个测点测定的残余应力值。分别获得了原始、喷砂后以及喷涂后的试样残余应力。

1.3.2 逐层剥离曲率检测法

曲率法测试的结果是平均应力,只能粗略测量厚度方向的平均残余应力。而逐层剥离检测需要的设备、逐层磨除涂层的程序,对于涂层逐层磨除去除的方法和精度难以控制。本次试验测试是将同一块试板线切割剪裁,在同状态抛光、装夹、喷砂、喷涂,同时喷涂多个试样,每次取出2个试样,通过人为设定涂层厚度的方法,间接的实现对接体表面涂层进行逐层剥离测量。逐层剥离和曲率检测有机的结合,可以测定整个涂层厚度变化范围内的残余应力详细数据,虽然对于多层或者较厚的涂层非常困难,但本次试验的单层涂层,涂层厚度不超过0.65mm。

逐层剥离曲率检测如图2。将试样放置在检测试验机上,仪器通过光学定位方式自动找到测试样品四条边界;自动定位样品边界后,样品台会自动移动到光斑位于样品在X轴方向的中线位置;手动输入Y轴方向的测试长度(\leq 样品Y轴方向表征长度);样品台会自动沿X轴中线向Y

轴正向移动完成测量(测试长度中点为样品中心点);利用-1000mm标准凹面镜校准设备;利用SP-FST对样品喷涂反面进行表征计算;对测试结果的曲率半径做负数换算,带入Stoney公式中换算喷涂涂层面应力值。



图2 逐层剥离曲率检测

Fig. 2 Layer-by-layer peeling curvature detection

2 结果与讨论

2.1 低压等离子涂覆的高温合金粉末涂层形貌分析

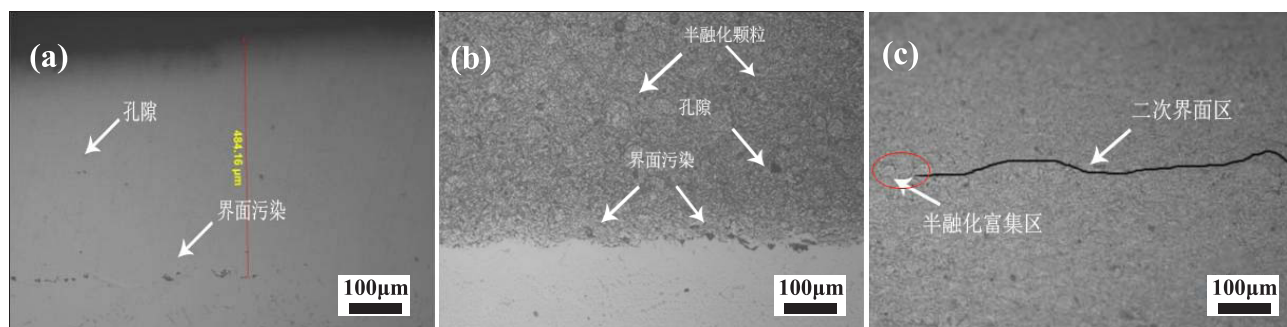


图3 高温合金粉末涂层形貌图:(a)原始试样200X;(b)腐蚀后试样200X;(c)腐蚀后的试样涂层间200X

Fig. 3 Morphology of superalloy powder coating:

(a) original sample 200X, (b) sample 200X after corrosion, (c) sample coating 200X after corrosion

高温合金涂层表面形貌如图3所示。(a)采用低压等离子喷涂工艺制备高温涂层,涂层与基体的界面污染低于20%,涂层与基体、涂层与涂层之间未见横向和纵向裂纹,未见明显的条状氧化

物和团状氧化物,显微组织中可见孔隙少且分散,未融化的粉末颗粒不明显,说明粉末熔化比较完全,熔化后的粉末颗粒在碰到基体后产生形变,弥散性较好,表现为光滑的层状结构涂层形貌。(b)

经过腐蚀后的涂层形貌显示，涂层与基体、涂层与涂层之间未见横向和纵向裂纹，涂层组织致密，涂层中存在半融化状态的粉末颗粒，且半融化状态粉末均布在融化粉末涂层中，孔隙少且分散，在涂层与靠近基体位置，有明显的扩散层存在。(c) 经过腐蚀后涂层间的形貌，两次涂层涂覆结合面处界面存在二次界面污染区，有半融化颗粒富集区。说明在二次以上喷涂存在时间上的间隔、界面污染等二次污染现象。

2.2 不同工序残余应力分析

采用 X 射线衍射法对试验件进行了原始样、喷砂后以及喷涂后的残余应力进行了检测。试验件经不同工序后的残余应力测量曲线如图 4。

从图 4 检测中可以看出，试样的原始样和喷涂后的残余应力曲线更为接近，残余应力变化不大。而原始样和喷砂后的残余应力变化较大。说明在较薄的涂层厚度情况下，喷砂工序对涂层的

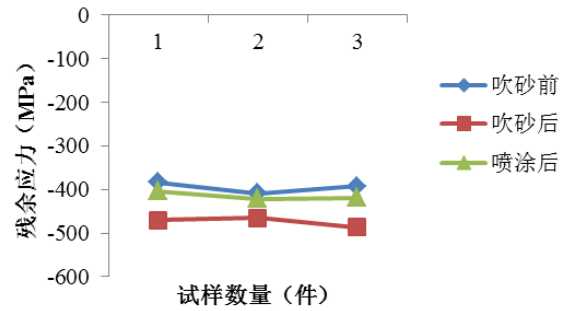


图 4 试验件经不同工序后的残余应力测量曲线
Fig. 4 Residual stress measurement curve of test piece after different processes

残余应力有一定的影响，但原始试样的残余应力对喷涂后残余应力几乎没有影响。

2.3 低压等离子喷涂高温涂层残余应力影响及分析

逐层剥离曲率检测法测得的低压等离子喷涂高温涂层不同涂层厚度残余应力如表 2。

表 2 不同涂层厚度残余应力统计表

Table 2 Statistical table of residual stress of different coating thickness

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	101	12	13
涂层厚度	0	0.05	0.1	0.15	0.2	0.25	0.3	0.35	0.4	0.45	0.5	0.55	0.6	0.65
残余应力	0	0.1	0.1	0.12	0.12	0.32	0.34	0.33	0.33	0.42	0.44	0.46	0.52	N/A

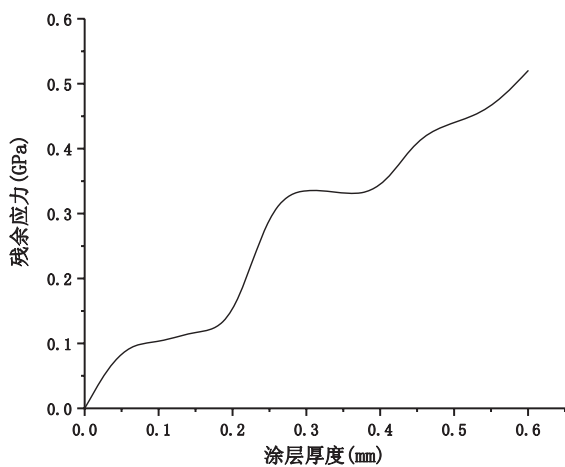


图 5 不同涂层厚度残余应力分布趋势图
Fig. 5 Distribution trend of residual stress of different coating thickness

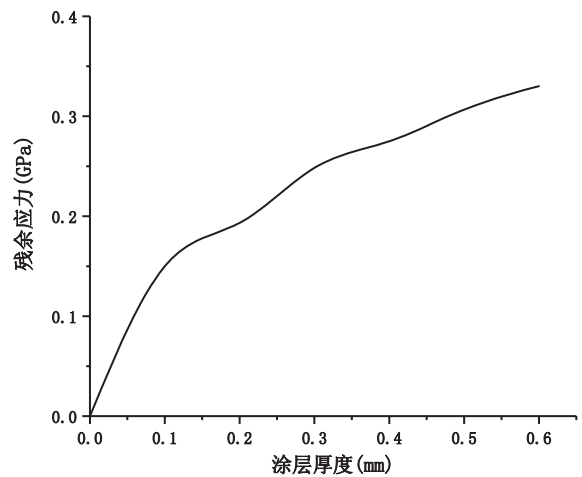


图 6 不同涂层厚度热处理后涂层残余应力分布趋势图
Fig. 6 Distribution trend of coating residual stress after heat treatment with different coating thickness

图5为采用低压等离子喷涂高温合金粉末制备的不同涂层厚度残余应力分布趋势图,从图5可以看出,随着涂层厚度的增加,涂层的残余应力是在逐步上升的。涂层厚度为0mm~0.1mm时,由于基体是在从低温态到高温态快速变化过程,涂层中形成的残余应力斜率较大,变化量大;当涂层厚度为0.1mm~0.2mm时,涂层的平均残余应力稳定在0.12GPa左右,涂层的残余应力平缓,该区间的残余应力较小,这也从一个侧面证明,在诸多标准中,低压等离子喷涂作为粘结底层时,涂层厚度处于这个区间的重要原因;当涂层厚度达0.2mm左右时,涂层的残余应力急剧增大,斜率最大,直到涂层厚度达到0.3mm时,再次处于平缓;当涂层厚度为0.3mm~0.4mm时,涂层的平均残余应力为0.33GPa,涂层的残余应力平缓,然后随着涂层厚度的增加,涂层的残余应力逐步升高,直到涂层厚度达0.65mm。检测时发现,涂层厚度到0.65mm时,反射激光已经无法落在光敏屏上,故无数据,说明涂层到达0.65mm时已经发生与基体之间开裂现象。因此,涂层厚度0.2mm和0.4mm是残余应力趋势图中的两个明显的拐点,当涂层厚度达0.6mm左右时,涂层的残余应力达到了低压等离子制备高温涂层的极限值0.52GPa。

根据涂层厚度0.4mm是残余应力趋势图中的一个拐点,结合前期试验结果,将涂层厚度极限值圈定在0.4mm~0.5mm之间,一方面给涂层残余应力极大值留有域度,同时又考虑到制备厚的涂层后期处理结果。

2.4 热处理对低压等离子喷涂残余应力影响及分析

在喷涂过程中,由于颗粒撞击导致的塑性变形,经过热处理以后,在涂层中这种扁平化颗粒界面区域会发生组织变化。由于扁平粒子界面间的亚稳相对较低的热稳定性,后续的热处理可以改善原始层片状涂层的组织和性能。并且,对于金属涂层来说,热处理会使涂层由层片状组织向等轴晶结构转变,同时等轴晶晶粒会突破层片状结构的界面生长,并且等轴晶结构的涂层也有助于改善涂层的性能。

图6是不同涂层厚度热处理后涂层残余应力分布趋势图,涂层厚度从0mm~0.6mm,涂层的残余应力是逐步升高的,曲线近似于抛物线。0mm~0.1mm时,该曲线的斜率最大,在0.1mm~0.6mm范围内曲线较为平缓,斜率较小,涂层厚度0.6mm左右时,涂层的残余应力为0.35GPa。

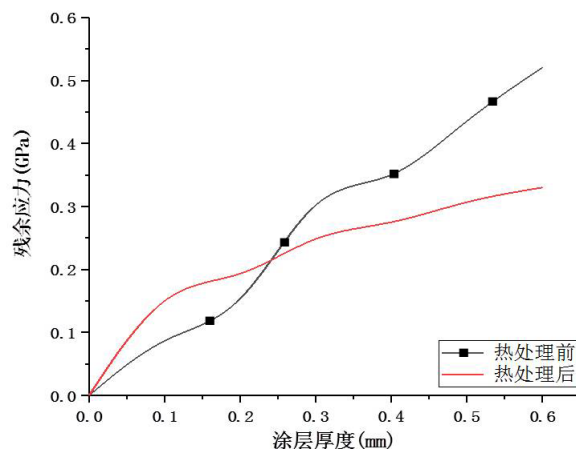


图7 不同涂层厚度热处理前和热处理后涂层残余应力分布趋势对比图

Fig. 7 Comparison of residual stress distribution before and after heat treatment for different coating thickness

图7是不同涂层厚度热处理前和热处理后涂层残余应力分布趋势对比图,对比图5、图6可以看出,0.25mm是涂层热处理前和热处理后涂层残余应力曲线的交点,涂层厚度在0.25mm范围内,热处理前的涂层残余应力小于涂层热处理后的残余应力,说明涂层在较薄厚度时,热处理会导致涂层残余应力的升高;当涂层厚度达0.25mm时,热处理前和热处理后达到了平衡点,及热处理前后涂层残余应力相当;当涂层超过0.25mm时,热处理工艺明显的可以减缓涂层厚度带来的涂层残余应力增加;当涂层厚度达0.5mm时,热处理后涂层残余应力最大值接近0.30GPa,与热处理前涂层厚度为0.3mm~0.4mm时,涂层的平均残余应力为0.33GPa曲线平缓区接近。因此,根据测试的结果,在热处理前涂层厚度在0.5mm

(下转 71 页)

