

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2024.06.005

# 有限元探究表面曲率和基体厚度对 等离子喷涂层残余应力影响

章凯羽, 张能奇, 邓永胜, 梁亚楠, 于校通

(合肥工业大学 机械工程学院, 安徽 合肥 230009)

**摘要:**为探究基体表面曲率和基体厚度对等离子喷涂涂层残余应力的影响,文章建立不同表面曲率和基体厚度的模型,应用有限元方法,在控制喷涂工艺参数不变的情况下,对不同模型进行 TC4 钛合金表面喷涂 NiCrAl 涂层的仿真。结果表明,基体表面曲率及基体厚度均不会影响残余应力的整体分布规律,而对其大小有影响。涂层与基体结合面上残余应力分布呈边缘位置应力大,而中心位置上较小的规律。当基体表面曲率  $\kappa$  从  $0 \text{ mm}^{-1}$  增加到  $1/9 \text{ mm}^{-1}$  时,结合面边缘位置的残余应力值降低明显。在基体表面曲率相同的情况下,基体厚度增大可使结合面上残余应力极值明显降低。在文章的参数选择范围内,增大基体表面曲率、增加基体厚度均可减小结合面上的等效残余应力的极值,有助于提高涂层与基体的结合质量。

**关键词:**等离子喷涂;残余应力;基体表面曲率;基体厚度;钛合金;NiCrAl 涂层

中图分类号: TG174.442

文献标志码: A

文章编号: 1003-5060(2024)06-0753-09

## Study of the effect of substrate surface curvature and thickness on residual stress of plasma sprayed coatings by finite element method

ZHANG Kaiyu, ZHANG Nengqi, DENG Yongsheng, LIANG Yanan, YU Xiaotong

(School of Mechanical Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

**Abstract:** In order to investigate the effect of substrate surface curvature and thickness on the residual stress of plasma sprayed coatings, this paper established models with different substrate surface curvatures and thicknesses, and applied the finite element method to carry out the simulation on the different models for spraying NiCrAl coatings on TC4 titanium alloy surfaces under the control of constant spraying process parameters. The results show that the curvature of the substrate surface and the thickness of the substrate do not affect the overall distribution pattern of the residual stress, but have an effect on its magnitude. The distribution of residual stress on the bonding surface of the coating and the substrate shows a pattern of high stress at the edges and low stress at the center. When the substrate surface curvature  $\kappa$  increases from  $0 \text{ mm}^{-1}$  to  $1/9 \text{ mm}^{-1}$ , the larger residual stress values on the bonding surface decrease significantly. In the case of the same curvature of the substrate surface, an increase in the substrate thickness can result in a significant decrease in the extreme value of the residual stress on the bonding surface. In the range of parameters selected in this paper, increasing the substrate surface curvature and the substrate thickness can reduce the equivalent residual stress extremes on the bonding surface and help improve the bonding quality of the coating and the substrate.

**Key words:** plasma spraying; residual stress; substrate surface curvature; substrate thickness; titanium alloy; NiCrAl coating

收稿日期: 2022-10-31; 修回日期: 2023-02-27

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金资助项目(51704090)

作者简介: 章凯羽(1984—), 女, 江西南昌人, 博士, 合肥工业大学讲师, 硕士生导师。

## 0 引 言

TC4 钛合金具有密度小、熔点高、强度高和耐腐蚀性等优点,被广泛应用于航空航天、冶金化工等领域<sup>[1-2]</sup>。但由于 TC4 钛合金硬度低、不耐磨损,在高温下易被氧化,使其应用范围受到极大的限制。通过在基体表面制备保护涂层可有效改善其表面性能,扩大材料应用范围<sup>[3-4]</sup>。等离子喷涂是制备涂层的一种重要方法,其射流温度高、速度快,粉末粒子与基体的结合方式以机械结合为主,沉积效率高,在制备高质量涂层的同时能最大限度地保留基体材料的固有特性,已成为材料表面改性不可或缺的手段之一<sup>[5-6]</sup>。

涂层材料决定了涂层对基体保护效果的好坏。NiCrAl 涂层是一种等离子喷涂涂层,黏接性能良好,在高温条件下能形成致密氧化膜,具有耐高温性和耐腐蚀性,常用作阻燃涂层防钛火(如由于剧烈冲击、摩擦等原因导致钛或钛合金机件起火燃烧,造成损伤或烧毁的现象),同时能提高基体的热稳定性、抗冲蚀性等<sup>[7-9]</sup>。因而可在 TC4 基体表面制备 NiCrAl 涂层来改善其耐高温性能,延长使用寿命。

采用等离子喷涂制备涂层时,由于该过程加热和凝固速度较快,熔化或半熔化的涂层材料在沉积过程中与基体发生密集的热交换,易在涂层内部产生残余应力<sup>[10-11]</sup>。残余应力的大小和分布影响涂层的结合强度、寿命等性能,是影响涂层质量的关键因素之一。当涂层内残余应力过大时,涂层便会剥离和开裂<sup>[12-14]</sup>。因此,改善涂层内的残余应力是提高涂层质量的重要研究方向之一。

当前众多学者对影响涂层残余应力的因素展开了研究,常用的研究方法有实验研究法和有限元模拟研究法等。在对涂层系统进行研究时,后者因具有减少设计成本、缩短设计分析的循环周期等优点而为多数学者所采用。文献[15]通过对比实验与有限元仿真在钛合金表面等离子喷涂制备 NiCrAl 涂层的残余应力,证明仿真方式对涂层系统进行分析的有效性,并发现从涂层中心位置到靠近边缘附近,残余应力逐渐增大,边缘处出现明显的应力集中;文献[16]对等离子喷涂  $\text{Al}_2\text{O}_3$  涂层的温度场和应力场进行了模拟分析,发现在一定范围内随喷涂功率增加,涂层温度显著增加,与基体间的温差增大,涂层内的残余应力也显著增加;文献[17]通过建立等离子喷涂 Mo/8YSZ 梯度热障涂层的有限元模型,模拟分析喷

枪扫描速度对温度场的影响,发现随扫描速度升高,涂层间温度梯度的减小可以降低因自身变形不协调而产生的热残余应力;文献[18]通过有限元模拟的方法研究等离子喷涂 NiCrAl 涂层,结果表明,随涂层厚度的增加,残余应力也随之增加,厚度变化只改变残余应力大小,而不改变残余应力的状态和趋势。

综上所述,对等离子喷涂残余应力影响因素的研究主要以喷涂工艺参数(喷涂功率、喷涂速度等)和涂层结构参数(涂层厚度)为主。现阶段针对基体形状因素对残余应力变化影响的仿真研究比较少,并且目前仿真研究模型相对简单,主要是在规则的矩形基体上模拟生成平滑整齐的薄涂层,而实际应用中基体表面往往具有一定的曲率。因此,本文利用有限元方法,通过构建 TC4 钛合金表面等离子喷涂 NiCrAl 涂层的数值模型,揭示基体表面曲率和基体厚度对涂层残余应力的影响规律,对等离子喷涂过程中基体形状的限定范围和调整具有重要的指导意义。

## 1 等离子喷涂模型的建立

### 1.1 等离子喷涂物理模型

在 TC4 表面等离子喷涂 NiCrAl 涂层的物理模型如图 1 所示,模型中基体尺寸均为  $25\text{ mm} \times 25\text{ mm} \times 6\text{ mm}$ (长 $\times$ 宽 $\times$ 高),涂层长  $25.0\text{ mm}$ 、宽度为  $8.0\text{ mm}$ 、厚  $0.2\text{ mm}$ 。为探究基体表面曲率的变化对残余应力的影响,在模型上建立包括平面在内的 4 种不同曲率的结合面。等离子喷涂物理模型如图 1 所示。

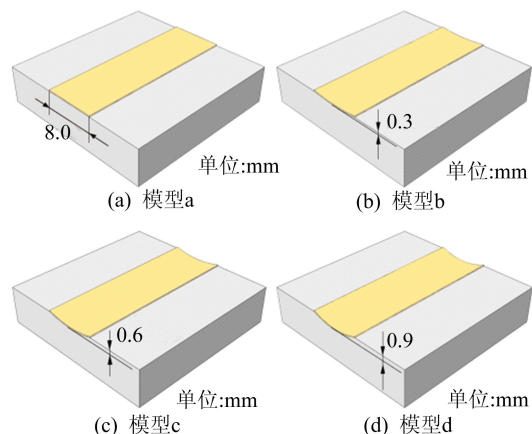


图 1 等离子喷涂物理模型

其中,图 1a 为平面喷涂模型,图 1b~图 1d 为圆弧面喷涂模型,结合面中点位置是最低点,使其分别距离基体表面为  $0.3$ 、 $0.6$ 、 $0.9\text{ mm}$ ,可得

模型 b 结合面上曲率  $\kappa=1/28 \text{ mm}^{-1}$ ; 模型 c 结合面上曲率  $\kappa=1/14 \text{ mm}^{-1}$ ; 模型 d 结合面上曲率  $\kappa=1/9 \text{ mm}^{-1}$ 。

### 1.2 等离子喷涂有限元模型

在热喷涂工艺中,目前常用的热源模型主要有高斯面热源、高斯圆柱体热源、双椭球热源等。双椭球热源模型因为考虑了热源能量的扩散,计算结果的准确性优于高斯热源模型,所以本文采用双椭球热源模型<sup>[19]</sup>。双椭球热源模型是用 2 个具有相同短轴但不同长轴的半椭球体来近似实际热源的体热源模型<sup>[20-21]</sup>。其表达式为:

$$q_f(x,y,z) = \frac{6\sqrt{3}f_f Q}{a_f b_h c_h \pi \sqrt{\pi}} \exp\left(-\frac{3x^2}{a_f^2} - \frac{3y^2}{b_h^2} - \frac{3z^2}{c_h^2}\right),$$

$$q_r(x,y,z) = \frac{6\sqrt{3}f_r Q}{a_r b_h c_h \pi \sqrt{\pi}} \exp\left(-\frac{3x^2}{a_r^2} - \frac{3y^2}{b_h^2} - \frac{3z^2}{c_h^2}\right),$$

$$f_f + f_r = 2,$$

$$f_f = \frac{2a_f}{a_r + a_f}, f_r = \frac{2a_r}{a_r + a_f}.$$

其中:  $Q$  为输入热源;  $a_r$  为前半球椭圆半长轴;  $a_f$  为后半球椭圆半长轴;  $b_h$  为椭球宽度;  $c_h$  为椭球高度。

为了在仿真过程中提高计算效率,忽略次要因素的影响,在保证模型计算正确的情况下对模型条件进行一定的简化和假设:① 假设涂层均匀分布在基体表面且结合紧密;② 忽略高温可能造成的氧化与涂层内部产生空隙的情况;③ 不考虑涂层发生的塑性变形。

在 ABAQUS 中建立等离子喷涂的有限元模型,因等离子喷涂过程主要涉及材料的温度变化,同时需要计算由于温度变化引起的变形和热胀冷缩导致的残余应力,故本模拟仿真采用 C3D8T 八结点热耦合六面体单元。在等离子喷涂过程中涂层和基体表面的温度变化快、温度梯度大,因此,在涂层及结合面附近位置的网格划分精度高,为 0.25 mm 左右,远离这些区域的网格则逐渐过渡为精度 1.3 mm 的网格。曲率  $\kappa=1/9 \text{ mm}^{-1}$  的

模型网格划分结果如图 2 所示,图 2 中定义了 X、Y、Z 方向。等离子喷涂的过程运用 ABAQUS 中“生死单元”的方法进行仿真,随着喷枪沿路径(Z 方向)喷涂,在等离子喷涂开始之前全部“杀死”的作为涂层的单元逐步被激活,进行温度和应力场的计算。

本模拟仿真采用单道直线喷涂,喷涂路径如图 2 中 Path1 带红色箭头路线所示。设喷枪移动速度为 50 mm/s,喷枪喷涂功率为 17 kW。等离子喷涂一般在室温条件下进行喷涂,因此设环境温度与基体起始温度均为 20 °C。在喷涂过程中存在与空气的对流换热和本身的热辐射,设定对流换热系数为 20 W/(m<sup>2</sup>·°C),辐射换热系数为 0.85。由于该基体水平放置在工作台上,与工作台固定以限制其水平位移,将边界条件设置为将底面完全固定。

为了监测等离子喷涂后不同位置残余应力的分布情况,监测路径 Path1、Path2 的设置如图 2 所示。

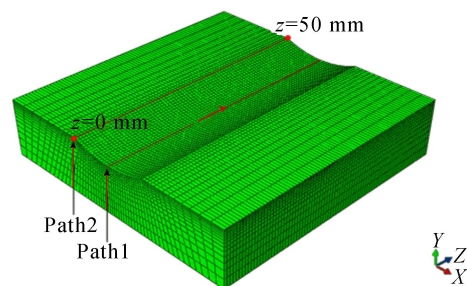


图 2 等离子喷涂网格模型

### 1.3 材料参数

由于在等离子喷涂过程中,材料的各项参数均随温度的变化而变化,为对该有限元模型进行温度场和应力场的仿真,需要确定基体、涂层在各温度下的材料参数,包括密度、比热容、热导率、泊松比、热膨胀系数、弹性模量。基体 TC4 钛合金材料参数见表 1 所列,涂层 NiCrAl 的材料参数见表 2 所列<sup>[22]</sup>。

表 1 TC4 钛合金材料参数

温度/°C	密度/(kg/m <sup>3</sup> )	热导率/[W/(m·K)]	杨氏模量/GPa	泊松比	比热/[J/(kg·K)]	热膨胀系数/(10 <sup>-6</sup> /K)
25	4 440	15.3	115	0.32	561.88	6.5
200	4 440	14.6	106	0.33	649.37	6.4
400	4 440	15.0	95	0.33	743.84	3.9
600	4 440	15.9	87	0.34	738.61	4.8
800	4 440	19.4	77	0.35	885.73	6.5
1 000	4 440	23.9	69	0.37	862.72	6.5
1 200	4 440	27.3	61	0.39	696.31	7.6

表 2 NiCrAl 材料参数

温度/°C	密度/(kg/m <sup>3</sup> )	热导率/[W/(m·K)]	杨氏模量/GPa	泊松比	比热/[J/(kg·K)]	热膨胀系数/(10 <sup>-6</sup> /K)
25	7 320	4.3	204	0.30	501	13.6
200	7 320	4.3	190	0.30	501	14.2
400	7 320	6.4	175	0.30	592	14.6
600	7 320	6.4	160	0.30	592	15.2
800	7 320	10.2	145	0.30	781	16.1
1 000	7 320	10.2	120	0.30	781	17.2
1 200	7 320	16.1	90	0.30	764	20.8

## 2 模型应力场模拟结果分析

### 2.1 不同曲率模型残余应力分布

为观察涂层与基体结合处的残余应力分布,将模型上涂层隐藏仅显示基体与结合面,在基体厚度为 6 mm 且基体表面曲率不同的模型结合面等效残余应力云图如图 3 所示。

设等离子喷涂路径上任意位置与喷涂起始位置距离为  $z$ 。从单个模型的残余应力分布上看,

在  $z$  相同时,结合面边缘位置的残余应力往往比中心处残余应力大,这导致边缘位置涂层的失效风险相对更大。而结合面沿喷涂路径方向的中心线部分应力虽相对较小,但应力变化复杂,并且中心线位置周围的残余应力沿喷涂方向的变化趋势也与中心线保持一致,因此需要进一步研究中心线位置的残余应力。此外,从图 3 可以看出,基体表面曲率不同的模型上的残余应力分布规律相似但数值上有差异。

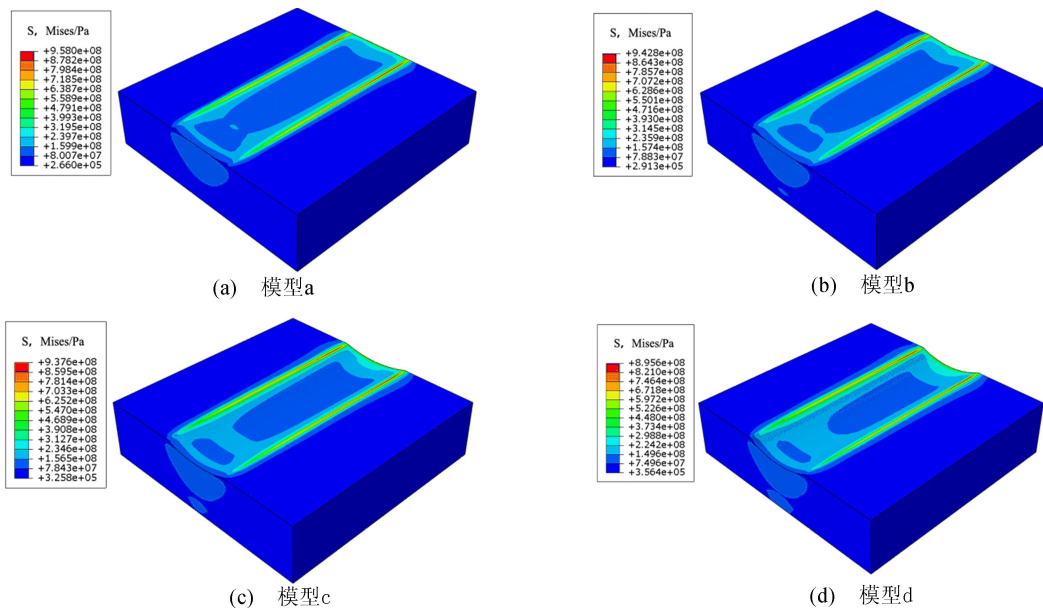


图 3 结合面等效残余应力分布图

为反映结合面上残余应力的分布规律及基体参数改变导致的应力变化,在结合面上取中心线路径 Path1 和边缘路径 Path2 的残余应力进行研究,结合面上不同路径上等效残余应力分布图如图 4 所示。

由图 4a 可知:在喷涂路径的前 20 mm 时,Path1 上的残余应力值在 100~200 MPa 之间;喷涂到最后 5 mm 时,残余应力值随着  $z$  的增大逐渐增大;在喷涂路径的最后 1 mm 残余应力增大了近 300 MPa,最终达到 550 MPa 左右的最大应

力。因此对于 Path1 而言,等离子喷涂结束位置为涂层最易失效的位置。此外,随着结合面处曲率的增大,Path1 上残余应力有不同幅度的增大,如曲率  $\kappa=1/9 \text{ mm}^{-1}$  模型上残余应力与平面模型相比在不同位置上增大了 13~30 MPa,其中等离子喷涂路径的中段上的应力增幅最大。

由于涂层边缘位置由等离子喷涂过程造成的模型温度变化和材料急冷急热的程度相对较小,导致起始位置复杂的传热条件对残余应力的影响相对较小,在喷涂路径的前几毫米不会如 Path1

的应力一样产生波动。从喷涂起始位置开始残余应力逐渐增大并在距喷涂终点还有 2 mm 时达到最大值。在等离子喷涂过程中,由于喷枪产生的热源对喷枪经过后的部分仍存在加热的作用,因此工件上最大温度出现的位置往往滞后于喷枪的位置。仿真结果显示,最高温度滞后于喷枪移动位置 2 mm 左右。当喷枪移动到距离较远后,喷枪热源给该处加热的能量小于散发的热量,此处才开始降温。反映到喷涂过程中即在  $z=23$  mm 前的喷涂位置均会出现最高 1 300 °C 的温度极值,而喷涂路径的最后 2 mm 在仿真过程中最高温度仅达到 800~1 000 °C。 $z$  在 23~25 mm 的部分残余应力出现了下降,即是由于该位置升温与冷却幅度较小,造成的塑性变形及残余应力也有所降低。

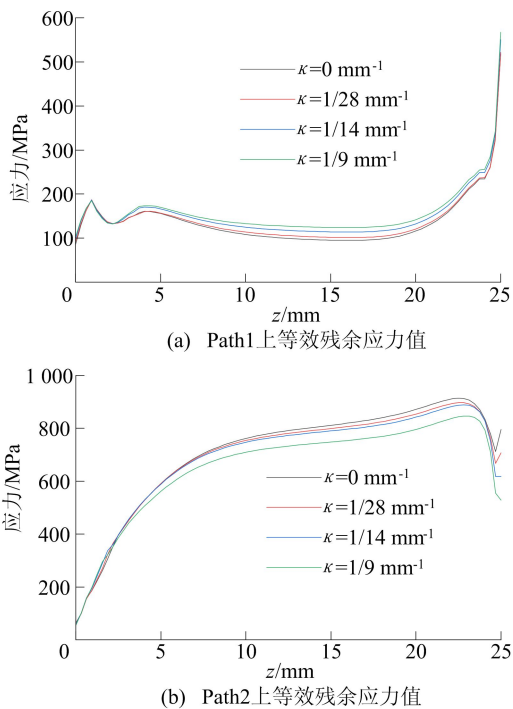


图4 结合面上不同路径上等效残余应力分布图

对比图 4a 和图 4b 可知,结合面中心位置残余应力与边缘处残余应力分布规律有很大的区别:① 残余应力沿喷涂路径的分布规律不同,Path1 上除喷涂结束位置产生应力极值,其余部分应力变化相对较小,而 Path2 上的残余应力在喷涂结束位置之前一直随着  $z$  增大而增大,直至喷涂最后 2 mm 处开始降低;② 除喷涂的起始和结束位置外,在  $z$  相等的情况下 Path2 上残余应力均远大于 Path1 上残余应力,由于喷涂路径结束位置也属于结合面边缘,因此对于涂层而言,

其边缘位置的残余应力往往比中心处大。这是由涂层和基体材料热物性差异形成的热失配应力以及喷涂后边缘和内部冷凝条件不同,形成的淬火残余应力的差异相结合而形成的。

为分析 2 条路径残余应力差别及其产生的原因,在喷涂路径的中间位置设置节点进行进一步研究,在相应节点提取温度随时间变化如图 5 所示。

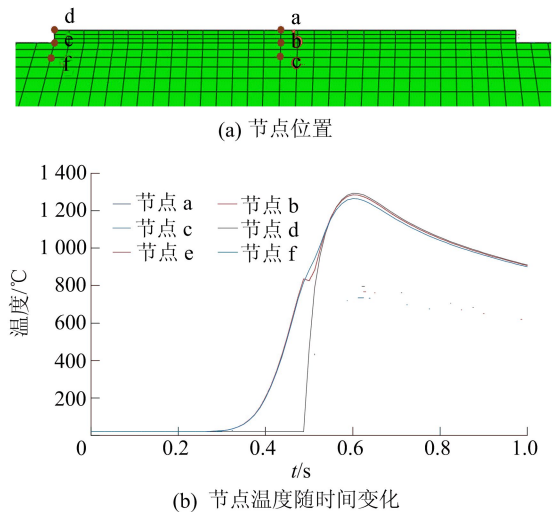


图5 节点位置及其温度随时间变化

喷涂路径中点的横截面上节点 a、b、c 在涂层中间位置处,节点 d、e、f 在边缘位置处,如图 5a 所示。节点 a、d 在涂层顶部,节点 b、e 在涂层与基体的结合面上,c、f 点在结合面垂直向下 3 mm 的位置。各节点温度随时间变化趋势如图 5b 所示,设喷涂时间为  $t$ ,在等离子喷涂进行到 0.5 s 时,喷枪刚好移动到路径的中间截面,0.6 s 时这个截面上各节点温度达到最大值,这说明局部热量的传递和累积与喷枪移动速度之间存在一定的滞后。在 0.6 s 时,处于涂层中心位置的节点 a、b、c 的温度几乎相同,在材料温度相近的情况下,结合面中心位置的残余应力主要是由涂层与基体的热膨胀系数不同导致的。相反,此时节点 d、e、f 间温差较大且节点 d 的温度最高,这表明在涂层边缘位置上,涂层温度高于基体温度。在相同温度下,涂层材料的热膨胀系数大于基体材料,温度差异又会进一步使冷却过程中由涂层与基体收缩不一致导致的残余应力更大;另一方面,涂层和基体材料热物性差异形成的热应力与喷涂后冷凝形成的淬火残余应力相结合,这种综合作用造成了边缘处应力集中,易造成涂层裂纹以及与基体界面的结合失效等问题。

为进一步分析基体表面曲率对涂层不同位置残余应力造成的影响,需要对 Path1 与 Path2 上

各方向应力及最大剪切残余应力进行分析。Path1 上各向的残余应力分布如图 6 所示。

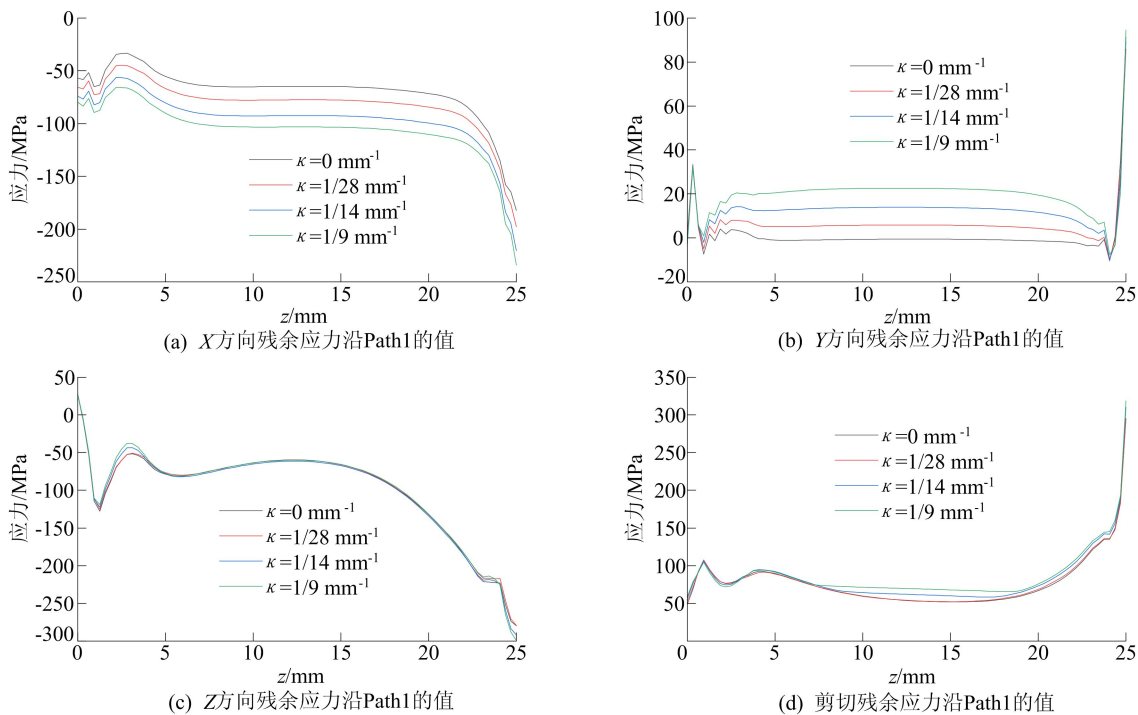


图 6 Path1 各方向残余应力分布图

由图 6a 可知, X 方向残余应力表现为压应力,这由于涂层材料的热膨胀系数大于基体材料,在冷却过程中涂层材料持续向中心部分收缩挤压。在等离子喷涂起始的一段位置上,该方向残余应力略有波动,之后趋于稳定,在喷涂路径的最后 4 mm 迅速增大,并在路径末端达到最大值。随着基体表面曲率逐渐增大,残余压应力也逐渐增大。在等离子喷涂路径中段,随着结合面上曲率的增大其 X 方向残余压应力分别增大 13、27、38 MPa。这是由于结合面处曲率的增大会导致重力沿结合面切向的分量也逐渐增大,中心部分涂层受到两边材料的挤压产生的压应力也就越大。在等离子喷涂结束位置, X 方向残余应力受曲率影响极大,其中曲率  $\kappa=1/9$   $\text{mm}^{-1}$  的模型上的残余压应力比  $\kappa=0$   $\text{mm}^{-1}$  的模型大了 51 MPa。

由图 6b 可知:在等离子喷涂起始位置没有 Y 方向残余应力;在等离子喷涂路径的中段, Y 方向残余应力如 X 方向残余应力一样较为平稳。随着结合面上曲率的增大,此方向残余应力值也逐渐增大,当结合面为平面时路径中段收到 Y 方向 0.6 MPa 左右的压应力,而曲率  $\kappa=1/9$   $\text{mm}^{-1}$  的模型上为 22 MPa 以上的拉应力。由于结合面上 Y 方向上合理范围的残余压应力有助于提高

涂层与基体的结合强度,因此,基体表面曲率的增大会使中心位置的涂层与基体结合紧密程度降低。

由图 6c 可知, Z 方向残余应力在  $z$  为 0~1 mm 之间结合面处残余应力值由拉应力迅速降低并转化为压应力,到  $z=1$  mm 时达到 120 MPa 左右。在等离子喷涂的中段,其残余压应力保持在 50~100 MPa 之间。随着  $z$  的继续增大,该路径上残余压应力逐渐增大且增幅也随之增加,到喷涂结束位置时有 290 MPa 左右的残余压应力。该方向上残余应力产生的原因与 X 方向残余应力相同,均是由于基体与涂层的热膨胀系数不同导致结合面上产生压应力。而且由于该方向残余应力不受因基体表面曲率变化产生的涂层重力分量的影响,导致曲率的变化仅使残余应力在极值位置有较小的差别。

由图 6d 可知, Path1 上的最大剪切残余应力与 X 方向和 Y 方向的残余应力分布较为相似, Path1 上剪切残余应力最小处同样位于喷涂的起始位置,之后也会产生一定的应力波动。 $z$  在 5~20 mm 间最大剪切残余应力呈两端大、中间小的趋势,且结合面上曲率越小趋势越明显。在喷涂路径的最后 5 mm 处,由于边缘效应,残余应力迅

速增大,并在喷涂末端达到 300 MPa。总体上基体表面曲率的增大仅会使 Path1 上的最大剪切残余应力有较小的增大,如曲率  $\kappa=1/9 \text{ mm}^{-1}$  模型

上剪切残余应力比平面模型仅大 20~25 MPa。

Path2 各方向上残余应力分布图如图 7 所示。

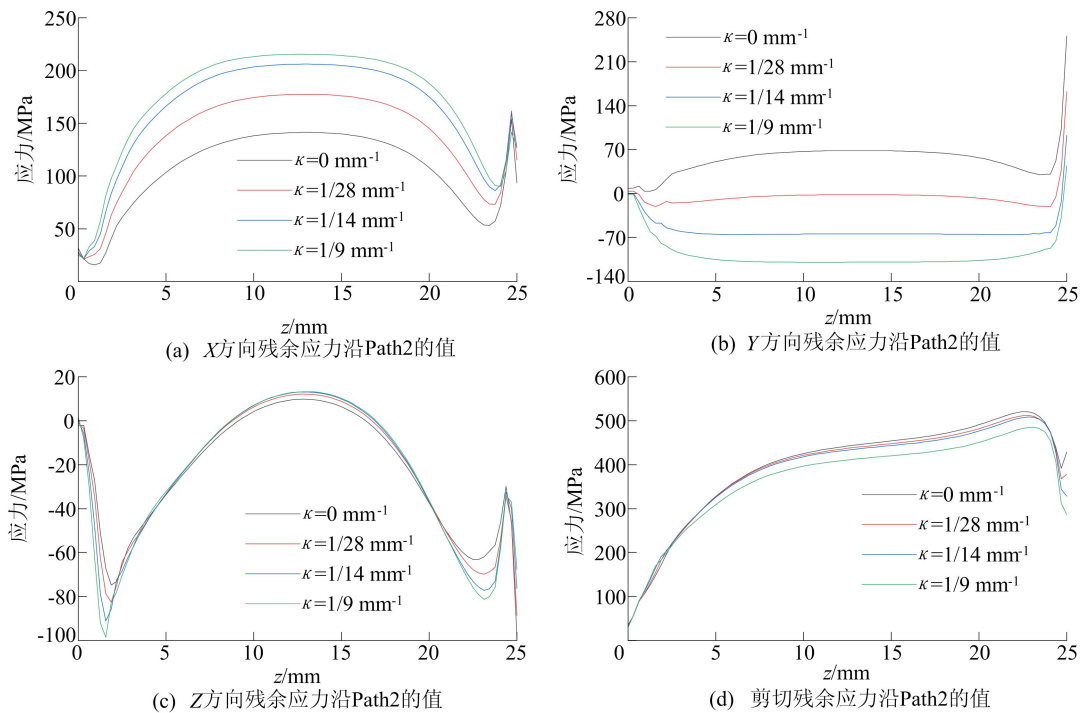


图 7 Path2 各方向残余应力分布图

由图 7a 可知,与中心位置不同,边缘位置的涂层在冷却过程中向中心收缩,导致 X 方向残余应力从  $z=1 \text{ mm}$  左右位置开始逐渐增大并趋于稳定, $z$  在 18~23 mm 之间残余应力开始降低,并在  $z=23 \text{ mm}$  达到极小值。对比图 7a 中不同基体表面曲率模型在 Path2 上的残余应力可以发现,曲率  $\kappa$  的增大会明显使 X 方向残余拉应力增大, $z$  在 10~15 mm 之间,曲率  $\kappa=1/9 \text{ mm}^{-1}$  的模型比平面模型上的残余拉应力增大了 60% 以上,差值可达到 80 MPa。这主要是由于曲率的不断增大会导致结合面边缘位置的斜率也逐渐变大,使得重力沿曲面的切向分量增大,进而对边缘位置的涂层造成额外的拉应力。

由图 7b 可知,相较于 Path1, Path2 上 Y 方向残余应力在等离子喷涂结束部分同样也会产生极值,但结合面上曲率变化对 Path2 上的影响更大,影响规律也不同。当结合面为平面时,该方向残余应力为拉应力。而随着曲率的增大, Path2 上残余拉应力越来越小并转化为压应力。在  $z=15 \text{ mm}$  时,曲率  $\kappa=0 \text{ mm}^{-1}$  模型上残余拉应力为 68 MPa,而曲率  $\kappa=1/9 \text{ mm}^{-1}$  模型在相同位置处为压应力 109 MPa,拉应力转换成压应力可使得

涂层与基体的结合更加紧密。此外,基体表面曲率的增大使得结束位置的拉应力极值显著减小,从而降低了涂层喷涂末端由 Y 方向残余拉应力造成涂层剥离的风险。因此,当结合面存在一定的曲率时,能改善涂层与基体在 Path2 位置的结合质量。

由图 7c 可知,Z 方向残余应力主要为压应力,该方向应力变化复杂,主要表现为两端有较大的残余压应力而路径中部为较小的残余拉应力。与 Path1 相似,在 Path2 上基体表面曲率变化对大部分位置的残余应力影响不大,但曲率的增大会使得应力极值( $z$  为 1、23 mm 位置处)显著增大,从而造成这些部分的涂层质量降低。

从图 7 可以看出, Path2 任意位置的剪切残余应力均大于其他方向残余应力,因此对于涂层的边缘位置,剪切残余应力为体现涂层结合质量的重要标准。由图 7d 可知, $z$  在 0~23 mm 之间 Path2 上最大剪切残余应力逐渐增大,这是由于不同材料间在冷却时的收缩率存在差异,而越靠近喷涂路径末端的部分越晚冷却,导致越靠后的部分材料间的线收缩量差异也越来越大,使得最大剪切残余应力随喷涂过程的进行逐渐增大。在

喷涂路径前端残余应力较小时,不同曲率模型的剪切残余应力大小相同。后续的喷涂位置上,曲率越大剪切残余应力越小,且  $z$  越大,此趋势越明显。因此对于 Path2 而言,结合面上存在一定的曲率可以降低涂层由于过大的剪切残余应力导致剥落的失效风险。

由以上分析可知,基体表面曲率增大,中心位置上 X 方向残余应力会明显增大,Y 方向及最大剪切残余应力也有一定幅度增大。对于靠近涂层边缘的位置,曲率增大会导致 Y 方向残余拉应力转为压应力,同时最大剪切残余应力也会明显降低,这能有效改善涂层边缘的结合质量。由于涂层边缘位置的失效风险远大于中心位置,涂层在边缘位置更易产生裂纹、起褶,因此,在本仿真模拟参数范围内,基体表面曲率越大,等离子喷涂的涂层质量反而越好。

## 2.2 不同厚度模型残余应力分布

在等离子喷涂的实际应用中,被喷涂构件的厚度往往是变化的,而基体的厚度改变对残余应力的大小同样会造成一定的影响。在不改变原模型长宽的情况下,分别对不同曲率的模型设置基体厚度为 3、6、9 mm 的模型,并采用相同的工艺参数再次进行等离子喷涂的仿真。不同基体厚度模型的残余应力分布小提琴图如图 8 所示。

由图 8a 可知:基体厚度由 3 mm 增到 6 mm 时,大小在 250~350 MPa 区间的残余应力减少很多,更多的残余应力分布在 80~180 MPa 之间;而当基体厚度进一步增加到 9 mm 时,其残余应力大小的区间分布与 6 mm 的基体几乎没有区别。因此可以推测,在基体较薄时,基体厚度是影响结合面中心位置残余应力分布的重要影响因素,增大厚度可减少数值较大的残余应力的比例,但是基体厚度增大到一定程度后,其影响将逐渐降低甚至可以忽略。对比图中的 4 组数据可以发现,对于不同曲率的基体模型,基体厚度的变化对残余应力的影响基本相同。

由图 8b 可知,相较于涂层中心位置,基体厚度的增大对涂层边缘位置的残余应力的降低作用更明显。基体厚度为 3 mm 时,其残余应力值主要集中在 700~950 MPa 之间,随着厚度增加到 9 mm,其残余应力值大小的主要分布区间降低为 600~900 MPa 之间,因此基体厚度越大,对涂层边缘位置的结合质量的改善越明显。这一方面是由于更厚的基体在冷却时有更多空间释放残余应力;另一方面基体的加厚还会导致基体内部吸收

的热量增加,在冷却阶段冷却速度降低,进而导致冷却时涂层与基体的温度梯度降低,进而使等离子喷涂后因冷却收缩产生的残余应力降低。对比 4 组不同曲率的数据可以发现,不同曲率不会改变基体厚度对残余应力的影响。

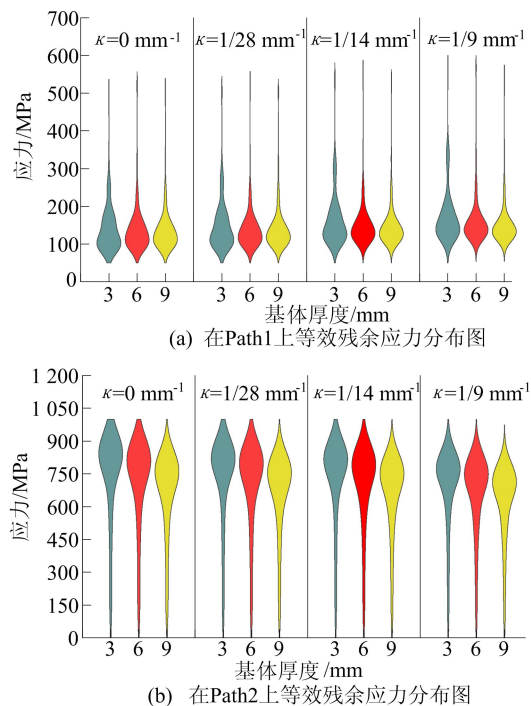


图 8 不同基体厚度模型的残余应力分布的小提琴图

基体在不同曲率及厚度时结合面上等效残余应力的最大值见表 3 所列,该数据反映了涂层最容易出现失效的情况。

表 3 基体形状不同时结合面上最大等效残余应力值

表面曲率/ $\text{mm}^{-1}$	最大等效残余应力/MPa		
	3 mm	6 mm	9 mm
0	950.3	914.2	857.0
1/28	925.4	897.2	846.6
1/14	921.6	889.3	842.8
1/9	878.5	847.0	804.0

由表 3 可知,在基体厚度相同的情况下,结合面为平面时结合面上残余应力极值最大。随着结合面曲率增大到  $1/9 \text{ mm}^{-1}$ ,结合面上的最大等效残余应力逐渐减小;在基体表面曲率相同的情况下,随着基体厚度的增加,结合面上的最大等效残余应力减小。因此在本文仿真参数范围内,基体较厚且结合面处曲率较大的情况下,结合面上的最大等效残余应力最小,涂层出现失效的风险也更低。

### 3 结 论

1) 本文分析了在 TC4 合金表面等离子喷涂 NiCrAl 的涂层后产生的残余应力,该涂层边缘位置残余应力远大于涂层的中心部分,涂层边缘位置是该涂层最容易出现失效的部分。

2) 随着基体表面曲率的增大,结合面中心处各方向残余应力及剪切残余应力略有增加。但是,涂层边缘位置最易失效,曲率的增大能明显降低边缘位置的剪切残余应力,且可使得边缘 Y 方向残余拉应力降低后转为压应力。因此,在限定范围内增大基体表面曲率( $0 \sim 1/9 \text{ mm}^{-1}$ ),有利于提高涂层质量,减少失效风险。

3) 基体厚度的增加会导致结合面上较大的残余应力的占比降低,使得结合面上的残余应力总体上处于更低的水平。涂层边缘位置受基体厚度增加导致的残余应力降低的幅度最大,因此在更厚的基体上进行等离子喷涂能得到更好的涂层结合质量。

### [参 考 文 献]

- [1] SHAO L, XIE G L, LIU X H, et al. Combustion behavior and mechanism of TC4 and TC11 alloys[J]. Corrosion Science, 2020, 168: 108564-108605.
- [2] QIN L Y, MEN J H, ZHANG L S, et al. Microstructure homogenizations of Ti-6Al-4V alloy manufactured by hybrid selective laser melting and laser deposition manufacturing[J]. Materials Science & Engineering A, 2019, 759: 404-414.
- [3] LI C G, ZENG M, LIU C M, et al. Microstructure and tribological behavior of laser cladding TiAlSi composite coatings reinforced by alumina-titania ceramics on Ti-6Al-4V alloys-ScienceDirect[J]. Materials Chemistry and Physics, 2020, 240: 1-8.
- [4] 贾倩倩,李德元,李斌,等. 钛表面 Al/NiCr 复合涂层改性反应机理及抗氧化性能[J]. 表面技术, 2020, 49(12): 311-318.
- [5] 吴艳鹏,魏剑辉,李文戈,等. 铝合金表面等离子喷涂  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -3% $\text{TiO}_2$  复合涂层工艺参数优化的研究[J]. 表面技术 2019, 48(6): 322-331.
- [6] 庞铭,张啸寒. 结构参数对等离子喷涂 Mo/8YSZ 功能梯度热障涂层残余应力的影响[J]. 航空材料学报, 2020, 40(6): 23-32.
- [7] 弭光宝,欧阳佩旋,李培杰,等. TC11 钛合金表面阻燃涂层的抗点燃性能及机理研究[J]. 航空材料学报, 2019, 39(5): 94-102.
- [8] KONG X, LIU Y, CHEN M H, et al. High temperature oxidation and tribological behaviors of NiCrAl-Graphite Self-Lubricating composites[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2021, 34(7): 900-912.
- [9] ZHANG X C, LIU C J, XUAN R Z, et al. Effect of NiCr and NiCrAl coatings on the creep resistance of a Ni alloy[J]. Materials Science and Engineering A, 2011, 528(6): 2282-2287.
- [10] 杨焜,牛少鹏,邓春明,等. 等离子喷涂  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -3% $\text{TiO}_2$  涂层结构及加载绝缘性能[J]. 表面技术, 2020, 49(8): 63-72.
- [11] 赵吴彝,陈晓艺,路怀峰,等. 等离子喷涂技术在骨植入体表面改性中的研究进展[J]. 中国表面工程, 2021, 34(4): 1-11.
- [12] 王力,王海斗,底月兰,等. 热障涂层应力产生机制及分布特征[J]. 材料导报, 2021, 35(17): 17143-17149.
- [13] ELHORINY M, WENZELBURGER M, KILLINGER A, et al. Finite element simulation of residual stress development in thermally sprayed coatings[J]. Journal of Thermal Spray Technology, 2017, 26(4): 735-744.
- [14] 刘光,张啸寒,贾利,等. 等离子喷涂 Mo/8YSZ 功能梯度热障涂层结构优化与热力耦合模拟计算[J]. 表面技术, 2020, 49(3): 213-223.
- [15] 王贺权,张博,袁福河,等. 钛合金表面等离子喷涂 NiCrAl 涂层残余应力检测及模拟研究[J]. 热加工工艺, 2018, 47(22): 147-151.
- [16] 宋洪源. 等离子喷涂  $\text{Al}_2\text{O}_3$  成型层温度场及应力场的数值模拟[D]. 乌鲁木齐:新疆大学, 2017.
- [17] 庞铭张,啸寒,刘光. 喷枪扫描速度对等离子喷涂 Mo/8YSZ 梯度热障涂层温度场的影响规律研究[J]. 表面技术, 2019, 48(9): 193-203.
- [18] 段忠清,张宝霞,王泽华. 等. 离子喷涂 NiCrAl 涂层残余应力模拟分析[J]. 装备制造技术, 2009(5): 18-19.
- [19] 罗心磊,刘美红,黎振华,等. 不同热源模型对选区激光熔化 18Ni300 温度场计算结果的影响[J]. 中国激光, 2021, 48(14): 52-62.
- [20] 郭星晔,黄杰,周正,等. 基于双椭圆平面热源模型的 FeCrNiMo 激光熔覆热力耦合数值分析[J]. 热喷涂技术, 2020, 12(4): 12-21.
- [21] 顾颖,李亚东,强斌,等. 基于 ANSYS 优化设计求解双椭圆热源模型参数[J]. 焊接学报, 2016, 37(11): 15-18.
- [22] 尹瀛月. 平面等离子喷涂  $\text{TiO}_2$  涂层数值模拟基础研究[D]. 乌鲁木齐:新疆大学, 2017.

(责任编辑 吴 亮)