

等离子喷涂法制备高温吸波涂层时的 热应力模拟

赵志雄¹, 李洋¹, 罗发¹, 张刘超¹, 李鹏², 张瑞端², 阮兴翠², 段世昌²

(1. 西北工业大学凝固技术国家重点实验室, 陕西 西安 710072;

2. 陕西华秦科技实业股份有限公司, 陕西 西安 710119)

摘要: 为研究吸波涂层制备过程中应力随涂层厚度的演变以及涂层沉积完毕最终冷却至室温的应力分布情况, 以堇青石高温吸波材料为研究对象, 采用等离子喷涂法, 在GH536基体表面制备了高温吸波涂层。利用ANSYS有限元分析软件建立了涂层的沉积过程模型, 模拟计算了涂层逐道沉积时的温度场和涂层沉积过程中不同喷涂厚度时的应力场。采用数值模拟研究涂层制备过程中应力的变化规律。结果表明: 处在火焰中心位置的涂层温度更高, 模拟计算得到的温度场与实际喷涂工作情况温度场吻合良好; 首层喷涂完毕后, 涂层表面产生条带状张应力, 在喷涂路径的中间产生更大的热应力; 随着喷涂厚度的增加, 涂层中间部分应力变小, 边缘部分保持较大应力; 冷却至室温后, 涂层表面中间部分应力降至300 MPa, 边缘部分应力为550 MPa, 结合界面中间和边缘部分的应力分别为180、550 MPa, 这表明涂层在喷涂结束冷却至室温时, 边缘受到更大的张应力, 更容易发生开裂及翘曲。

关键词: 等离子喷涂; 高温吸波涂层; 有限元分析; 残余应力

中图分类号: TG178

文献标志码: A

文章编号: 2097-2741(2024)06-078-13

Thermal Stress Simulation of Preparation of High-Temperature Absorbing Coating by Plasma Spraying Method

ZHAO Zhixiong¹, LI Yang¹, LUO Fa¹, ZHANG Liuchao¹, LI Peng²,
ZHANG Ruiduan², RUAN Xingcui², DUAN Shichang²

(1. State Key Laboratory of Solidification Processing, Northwestern Polytechnical University,
Xi'an 710072, Shaanxi;

2. Shaanxi Huaqin Technology Industry Co., Ltd., Xi'an 710119, Shaanxi)

ABSTRACT: In order to study the variation of stress along with coating thickness during the preparation of the absorbing coating and the stress distribution of the coating after deposition and cooling to room temperature, a high-temperature absorbing coating was prepared on the surface of GH536 matrix by plasma spraying method with cordierite. Then, a model of the deposition of the coating was established by ANSYS finite element analysis software. Thereby, temperature fields at different deposition stages and stress fields of the coating with different spraying thick-

收稿日期: 2024-06-20

基金项目: 国家科技重大专项 (J2019-VI-0015-0130)

第一作者: 赵志雄 (2000—), 男, 硕士研究生, 主要从事等离子喷涂涂层应力计算研究。E-mail: 107673416@qq.com

引用格式: 赵志雄, 李洋, 罗发, 等. 等离子喷涂法制备高温吸波涂层时的热应力模拟[J]. 火箭军工程大学学报, 2024, 38 (6): 78-90.

nesses during the deposition were simulated and calculated. Furthermore, the variation law of stress during coating preparation was studied by numerical simulation. Results showed that the temperature of the coating at the center of the flame is higher, and the temperature field calculated by the proposed simulation model is in good agreement with that of the actual spraying working. After the first layer is sprayed, banded tensile stresses are generated on the surface of the coating, which leads to creating greater thermal stresses between spraying paths. As the coating thickness increases, the stress in the middle part of the coating becomes smaller, and the edge part retains a big stress. After cooling to room temperature, the stress of the middle part of the coating surface is reduced to 300 MPa while that of the edge part is 550 MPa. Simultaneously, for the joint interface, the stress of the middle part is 180 MPa, and the stress of the edge part is 550 MPa. It indicates that when the coating cools to room temperature after the spraying, the edge is subjected to greater tensile stress, which is more prone to crack and warp.

KEYWORDS: plasma spraying; high-temperature absorbing coating; finite element analysis; residual stress

随着高科技侦察和雷达探测技术的发展,对装备的雷达隐身性能提出了更高的要求。在战斗机、超级飞机和导弹等武器中,某些部件的工作温度可能达到 700 °C 甚至更高,传统的雷达吸波涂层普遍不能适用。因此,为了保证军事装备在战场上的生存能力,开发高温雷达吸波涂层成为一项紧迫任务^[1]。高温吸波材料可以实现在高速飞行器鼻锥、机翼、尾喷管等高温部件上的应用,提升其在高温环境下的使用性能及服役寿命^[2]。将雷达吸波涂层涂覆在军事装备表面,可以在目标外形改动较小的情况下,减小雷达散射截面,达到目标无法被雷达探测到的目的。现有的制备工艺中,等离子喷涂具有焰心温度高、可喷涂材料种类多、工作效率高和成本低等特点,在雷达吸波涂层制备中被广泛使用^[3]。其原理是利用高温等离子火焰作为热源,在极短的时间内熔化并加速粉末粒子,将熔化或半熔化状态的粒子沉积到基底材料上,形成涂层。在等离子喷涂过程中,由于基体与涂层材料热物理性能参数的不匹配,故在等离子喷涂过程中以及涂层喷涂完毕冷却过程中会存在一定的残余应力。这些残余应力的存在可能导致涂层材料的断裂,甚至剥落,影响涂层使用性能及服役寿命。所以,认识涂层中应力的分布,了解涂层中的应力演化过程,对涂层中应力控制和工艺优化都具有重要意义,对判定涂层质量优劣及预测涂层寿命也非常必要。

目前,残余应力的检测方法主要包含两大类:有损检测和无损检测。这些方法均存在一定的局限性,无法准确给出涂层的残余应力。将实验过

程中测得的试验参数与数值模拟方法相结合可以简单直观地得到涂层的残余应力,因此,数值模拟成为计算涂层残余应力的主流研究方法^[4]。通过数值模拟方法可以分析计算等离子喷涂涂层的应力状态,有效预测涂层使用性能和服役寿命,揭示其失效机理,这对提高高温吸波涂层的性能具有非常重要的指导意义^[5]。国内外对于通过等离子喷涂制备的热障涂层力学性能及残余应力模拟研究较多。刘光等^[6]使用 ANSYS 有限元软件建立了等离子喷涂 Mo/8YSZ (YSZ 为氧化钇稳定氧化锆) 功能梯度热障涂层的二维数值模型,结果显示,随着径向距离的增大,粘结层与陶瓷层界面的残余应力逐渐由压应力变为张应力,并且径向残余张应力在涂层边缘位置达到最大值。Pang 等^[7]使用 ANSYS 有限元软件及采用激光等离子体复合热源,基于有限元理论建立了 YSZ 涂层激光等离子体单道涂层形成过程的数值模型,结果表明:随着粉末沉积温度的升高,镀层的最大温度升高;合金的侧向最大残余张应力和侧向最大残余压应力均增大;试件的纵向最大残余压应力增大,纵向最大残余张应力减小。李建坤等^[8]使用 ANSYS 有限元软件,采用生死单元法,建立了等离子喷涂涂层的有限元模型,其使用高斯热源模型模拟喷涂工况,结果显示:涂层冷却至室温后其中心区域的残余应力与边缘位置相比较,主要集中在热流中心区域,每层涂层结合界面处会产生较大应力,该结果与 XRD、拉曼光谱检测结果具有良好的匹配性。

然而,国内外对于通过等离子喷涂制备的热

障涂层力学性能及残余应力模拟研究较多，对于吸波涂层的模拟研究很少。与热障涂层相比，高温吸波涂层厚度要大得多，导致高温吸波涂层内部热应力状态更为复杂，加之试件尺寸大、形状复杂，均为高温吸波涂层应力分析带来了很大困难，迄今为止相关研究极少。为此，本文采用有限元法对等离子喷涂制备吸波涂层的过程进行模拟，获得喷涂过程中的温度场与应力场，揭示等离子喷涂制得涂层的表面及涂层和基体结合界面处的应力状态。

1 实验与建模

1.1 制备高温吸波涂层

利用喷雾干燥法制备符合等离子喷涂用的喂料。先称取堇青石吸波粉末，以去离子水为球磨介质、以氧化铝球为球磨珠，将其混合后放入球磨罐中进行球磨。其中，球磨珠、去离子水、喷涂粉末的质量比为 2 : 1 : 1，球磨转速 80 r/min，球磨时间为 24 h。待球磨完成后，从球磨罐中取出所形成的浆料，将制备好的消泡剂和粘结剂加入浆料中，并用电动搅拌机在 500 r/min 下对其进行搅拌，使之混合均匀。其中，消泡剂选用天津市恒兴化学试剂制造有限公司生产的 TBP（羧甲基纤维素）溶液；粘结剂选用西安奥维科工贸发展有限责任公司生产的 CMC（磷酸三丁酯）试剂。最后，将配置好的浆料倒入喷雾干燥机中进行喷雾干燥，得到团聚后的球形粉末以用作喷涂喂料。

将制备的喂料置于烘箱中 80 ℃ 烘干 20~30 min 以除去喂料中水分，提高喷涂喂料流动性。烘干之后，将喂料放入送粉器中进行喷涂。本实验中，选用 GH 536 与石墨板作为喷涂基板，GH 536 是一种典型的镍基高温合金钢，被广泛应用于航空领域，其组成成分如表 1 所示。石墨能耐急冷急热的变化，可以经受高温电弧的灼烧，且石墨易于去除，方便后续取下涂层进行表征。

制备吸波涂层的喷涂工艺参数如表 2 所示。喷涂过程中使用机械臂控制喷枪的移动。在喷涂开始前将基体表面进行喷砂处理，增大基体表面的粗糙度。随后使用双面胶将其粘在工作平台上对其进行预热处理：使用等离子喷枪在基体表面喷涂一遍，等离子喷枪按照事先设定好的程序进行“之”字形来回移动。

表 1 GH 536 高温合金的成分

Tab. 1 Components of GH 536 superalloy

元素	质量分数/%	元素	质量分数/%
C	0.05~0.15	Mo	8.00~10.00
Cr	20.5~23.00	Al	≤0.50
Ni	余量	Ti	≤0.15
Co	0.50~2.50	Fe	6.00~10.00
W	0.20~1.00	Nb	≤1.00

表 2 等离子喷涂制备工艺参数

Tab. 2 Parameters of plasma spraying preparation

参数	数值
一次气体(Ar)流量压力/psi	45
一次气体(H ₂)流量压力/psi	2
载气流量压力/psi	18
粉末载气流量压力/psi	20
喷涂距离/mm	80
供粉速率/(g·min ⁻¹)	30
电压/V	60
电流/A	500
喷枪移动速率/(m·s ⁻¹)	0.5
热源直径/mm	8
基体预热温度/℃	160

注：1psi = 6.894 757 kPa。

在喷涂过程中采用红外探测器监测涂层表面温度，待基体表面温度升至 160 ℃ 左右时开始喷涂涂层，等离子喷枪同样按照“之”字形来回移动。在每层喷涂结束后，等待一段时间，利用红外探测器检测其温度的变化，并测量其厚度，待其表面温度再次降至 160 ℃ 时开始下一层的喷涂。喷涂过程中红外温度如图 1 所示。可以看到，在涂层喷涂过程中，其焰流射至基体表面时所产生的最高温度在 335 ℃ 左右。

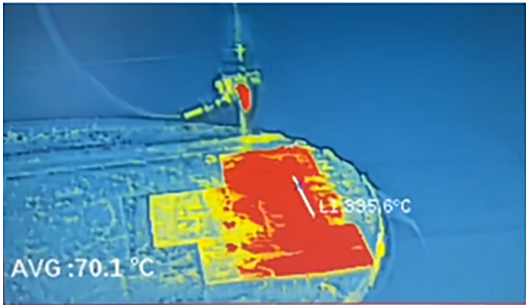


图 1 喷涂过程中红外探测温度

Fig. 1 Infrared detection temperature during spraying process

后续的模拟过程参考本工艺参数。在等离子喷涂结束后将制备好的样品放入高温电阻炉中在 900 ℃ 保温 2 h, 以增强其性能。最终制备好的吸波涂层如图 2 所示, 可以看出涂层表面呈黑色, 质地均匀。

1.2 建立模型

1.2.1 材料的物理性能参数

在模拟等离子喷涂过程中涉及的物性参数主要有弹性模量、密度、导热系数、比热容、热膨胀系数和泊松比等。高温吸波涂层和基体材料 GH 536 的物理性能参数如表 3 所示。其中, 高温吸波涂层的所有参数均为实验室实际测量所得, GH 536 的物性参数见参考文献 [9]。涂层的熔点为 1 600 ℃。

因为采用等离子喷涂制备的吸波涂层具有多孔特性。因此, 采用纳米压痕法测试所得的弹性模量不能直接使用。模拟中所采用的弹性模量均进行了换算, 换算公式^[10]为

$$E = E_0(1 - 1.9\varphi + 1.9\varphi^2)$$
 (1)

式中: E 、 E_0 分别为多孔材料的弹性模量、致密材料的弹性模量; φ 为多孔材料的孔隙率。

1.2.2 样品的几何模型

本实验模拟在 GH 536 基体表面通过等离子喷涂制备吸波涂层的过程中产生的温度与应力情况。基体模型为长宽均为 15 mm 的正方形片状样品, 厚度为 3 mm。涂层的尺寸与基体尺寸一致, 厚度为 1.5 mm。涂层喷涂轨迹共计 5 道, 每道宽度为 3 mm。如图 3 (a) 所示。

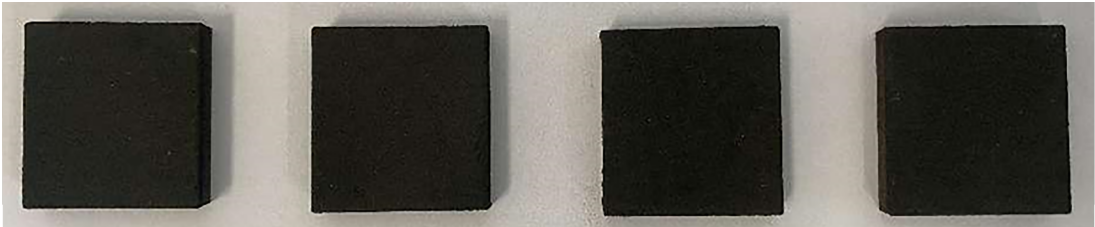


图 2 吸波涂层宏观形貌
Fig. 2 Macroscopic morphology of the absorbing coating

表 3 高温吸波涂层与基体材料 GH 536 物理性能参数
Tab. 3 Physical properties of the high-temperature wave absorbing coating and GH 536 matrix

材料	温度/℃	导热系数/ (W·m ⁻² ·℃ ⁻²)	比热容/ (J·kg ⁻¹ ·℃ ⁻¹)	密度/ (kg·m ⁻³)	折合弹性 模量/GPa	泊松比	热膨胀系数/ (10 ⁻⁶ ℃ ⁻¹)
高温 吸波 涂层	20	4.19					3.89
	100	3.87					7.85
	300	2.98					11.50
	500	2.72	587	3 280	76.6	0.3	13.70
	700	2.50					15.10
	900	2.47					15.00
	1100	2.64					15.00
基体 材料 GH 536	20	13.38	372.6		206		12.1
	100	17.97	389.4		203		12.5
	300	20.27	425.4		193	0.3	13.4
	500	24.62	452.2	8 280	180		14.3
	700	29.05	515.0		166		15.5
	900	33.44	561.0		149		16.1

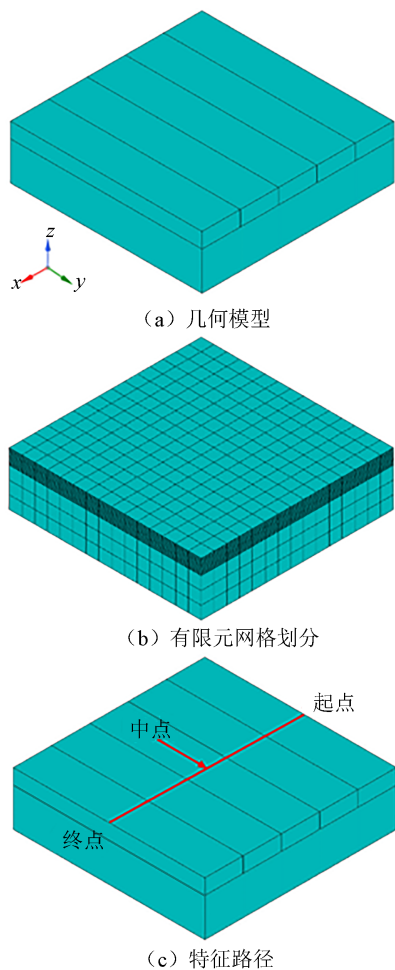


图 3 涂层模型

Fig. 3 Models of the coating

模型的单元网格采用映射网格划分, 单元尺寸手动指定。基体单元尺寸为 $1\text{ mm} \times 1\text{ mm} \times 1\text{ mm}$ 的正六面体网格, 单元数量共计 675 个。为满足单次喷涂厚度 $50\text{ }\mu\text{m}$ 的要求, 设置涂层单元为 $1\text{ mm} \times 1\text{ mm} \times 50\text{ }\mu\text{m}$ 的六面体网格, 每层 225 个单元, 共计 30 层, 涂层共 6 750 个单元。模型总计 7 425 个单元, 如图 3 (b) 所示。

在软件得出应力场的结果时, 只能看到其应力分布情况, 而无法看到应力的具体数值, 因此, 需要建立特征路径来反映模型中的应力分布数值。本模拟中存在沿着 y 轴方向的移动热源致使所得结果中应力场图会沿着 y 轴方向变化的情况, 因此, 选择 x 轴方向, 并选取样品中间部分作为特征路径以表征模拟结果在不同喷涂道上的变化, 如图 3 (c) 所示。

1.2.3 样品的物理模型

等离子喷涂过程是一个非常复杂的过程。为了便于仿真计算, 在这里进行以下假设^[11]: 1) 涂

层与基体内部不存在任何裂纹、气孔等缺陷; 2) 每层涂层与基体表面平整光滑、无起伏且结合紧密; 3) 涂层与基体各向同性, 完全弹性; 4) 相邻界面不产生相对移动; 5) 忽略内部热氧化层的影响; 6) 不考虑初始应力。

1.3 边界条件

在等离子喷涂过程中, 其喷枪焰流射到基体表面时温度场分布为中间温度高、边缘温度低, 近似于高斯正态分布。本试验中采用冲击力较小的等离子焰流, 根据焰流分布特点, 故采用高斯热源模型来模拟喷枪焰流在基体表面的移动。如图 4 所示。

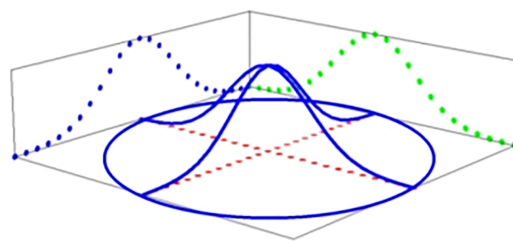


图 4 高斯热源模型

Fig. 4 Gaussian heat source model

在每个载荷步中, 以热源中心为中心, 按照高斯热源变化在面上加载, 公式^[12]为

$$Q(r) = q_m \exp\left[-\frac{3r^2}{\sigma_q^2}\right] \quad (2)$$

式中: $Q(r)$ 为热流密度; q_m 为最大热流密度; r 为距离圆心的距离; σ_q 为高斯热源分布参数。

最大热流密度的计算公式为

$$q_m = \frac{3Q}{\pi R^2} \quad (3)$$

式中: $Q = \lambda IU$, λ 、 I 和 U 分别为等离子弧有效热功率系数、电流和电压, R 为热源半径。将式 (3) 代入式 (2) 可得:

$$Q(r) = \frac{3Q}{\pi R^2} \exp\left[-\frac{3r^2}{\sigma_q^2}\right] \quad (4)$$

在喷涂过程中, 样品基体与周围空气进行对流换热。在试样的侧面与底面施加固定温度的对流载荷, 喷涂时与冷却时的对流换热系数来自参考文献 [8], 其数值分别为 $30\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot^\circ\text{C}$ 和 $10\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot^\circ\text{C}$ 。在仿真过程中, 涂层采用单元生死技术分别逐道逐层生成, 每层单元生成后删除已生成单元下层的对流载荷, 在新生成的最上层单元的表面施加新的对流载荷。

涂层与基体分别为两种不同的材料, 热量在内部传递过程中, 相同材料之间采用导热系数进

行计算。不同材料之间设置接触分析。两种材料之间的接触热阻设置为 $3 \times 10^{-5} \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$, 该结果为采用国际标准^[9]测得。在等离子喷涂过程中, 严格来讲, 温度场与应力场是双向耦合的, 但是应力场对温度场的影响相对较小。为了简化该分析过程, 提高计算效率, 本文采用热力单向耦合, 忽略应力场对温度场的影响^[13]。

1.4 计算过程

整个计算过程按照实际喷涂工艺流程进行。将基体的初始温度设置为 160°C , 采用单元生死技术来模拟涂层喷涂到基体上的生成过程。其生成顺序按照实际喷涂过程沿着 y 轴“之”字形来回喷涂的顺序依次生成, 如图 5 (a) 所示。

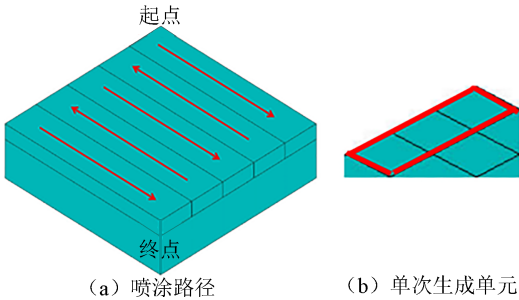


图 5 涂层生成过程
Fig. 5 Formation process of a coating

最后待所有涂层均生成完毕后施加常温对流载荷使整个样品模型冷却至室温。为提高计算效率, 单次计算时生成单元数量设置为 3 个, 形成一个长方形区域, 如图 5 (b) 所示。单元生成的同时在生成的单元表面施加高斯热源。

2 结果与分析

2.1 温度场

计算过程中, 将高斯热源施加到新生成的单元上。其产生的温度场形式如图 6 所示。

采用高斯热源模型可以很好地模拟等离子喷涂焰流在样品表面产生的温度场的情况。图 6 中热源呈现中间大、边缘小的分布, 但是其中间部分显示为菱形, 这是因为在模拟过程中, 为了提高分布的。可以看到, 图中基体在预热以后, 表面的温度为 160°C 左右, 焰流的存在使得样品表面温度升高, 其温度随着焰流的移动而逐渐变化。当一层喷涂完毕后, 整个样品表面的温度在 200°C 以上。综上, 本模拟计算得到的温度场、最大温度与实际喷涂工作情况温度场吻合良好, 具有良好的匹配度。

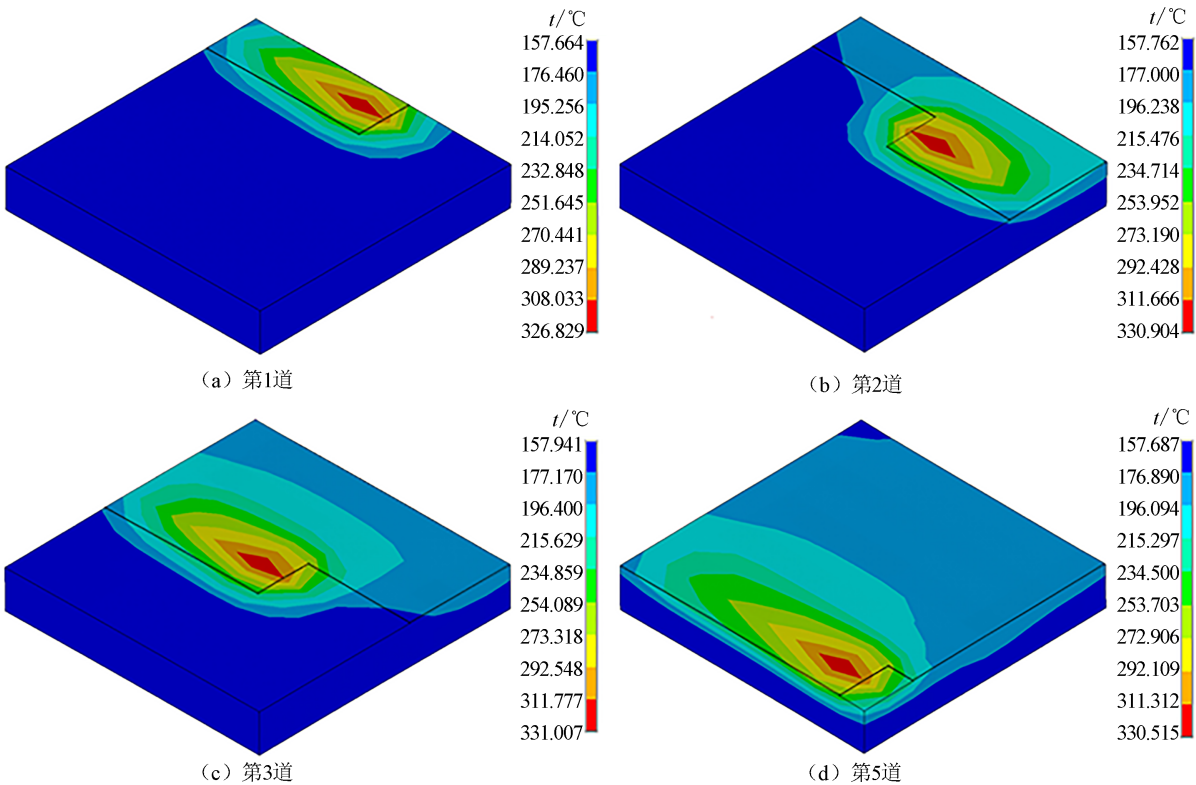


图 6 喷涂过程中的温度场
Fig. 6 Temperature fields during spraying

涂层在喷涂过程中层数较多,因此,选取具有代表性的第 1、15、30 层结果进行分析。

2.2 应力场

图 7 展示了第 1 层喷涂完毕时涂层表面的应力分布情况。

可以看到 x 方向、 z 方向和等效应力均出现条纹状的应力分布。这是因为一方面在涂层形成过程中内部产生了淬火应力,另一方面涂层的温度要高于基体的温度,从而在涂层中产生了热失配张应力。而产生条纹状的原因是喷枪的火焰中心温度更高、边缘温度更低,使得涂层在喷涂路径的中间产生更高的热应力,最终导致涂层形成后产生条纹状的应力分布。图 7 中, y 方向应力场并没有出现这种条纹分布,这可能是因为 y 方向是沿着喷涂路径的方向,从而使得对该方向上应力的影响较小。该结果与文献[7]图 4~8 中结果相比稍大,但是考虑到文献中的材料为 8YSZ,其弹性模量相较本文使用的吸波涂层要小,以及文献中为单层涂层模拟,涂层单层厚度为 1 mm,远高于本文单层 50 μm 的厚度。因此,本文的结果仍有一定的可靠性。

图 8 展示了喷涂 1 层后涂层表面特征路径上的

应力分布情况。可以看出,由于在第 1 层喷涂完毕时涂层的厚度较小,涂层表面与涂层与基体界面上的距离很小,其应力大小及分布的差异也较小,因此,只展示了涂层表面的应力分布情况。

可以看到,在进行第 1 层等离子喷涂时,涂层表面产生了较大的张应力,其数值大小在 700 MPa 左右。这是因为喷涂时陶瓷熔滴本身带有较高的温度,且熔滴从熔点骤降至基体表面温度时产生了很大的温度差,从而使得涂层内部产生了较大的淬火张应力;加上由于温度梯度产生的热应力以及热膨胀系数不匹配产生的热失配应力,因而导致该应力较大。图中 x 轴应力与等效应力都出现了高低不同的“峰谷”式起伏。这种“峰谷”就是由图 6 中出现的条纹式应力分布产生的。

图 8 中出现了 5 个峰值,这是因为在模拟过程中设定了 5 条喷涂道,每条道的中间部分承受较大的 x 轴向张应力,数值大小可以达到 750 MPa 左右。而每条道之间的 x 轴向应力相比较小,略低于 700 MPa。从图中也可以看出特征路径的起点与终点所承受的张应力相对中间部分更小,仅为 600 MPa 左右。这是因为涂层的边缘部分会释放部分应力从而使涂层中的应力减小。

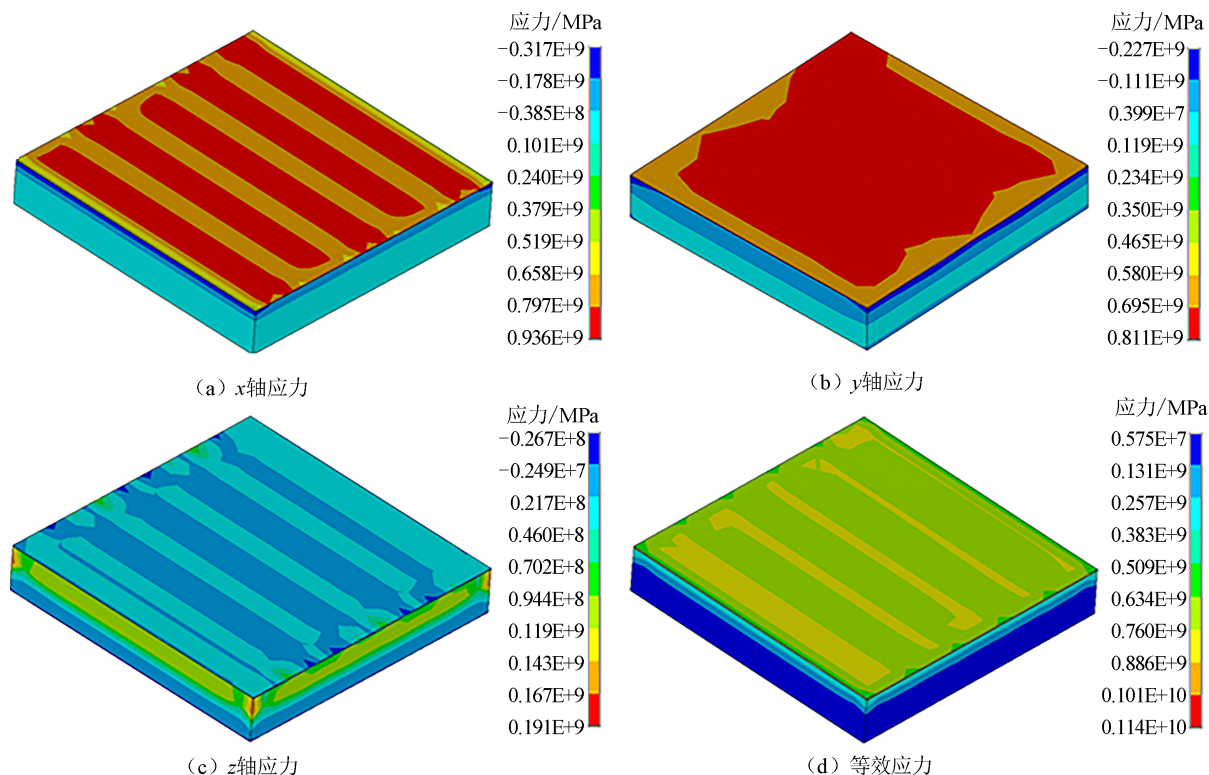


图 7 喷涂 1 层后的应力分布

Fig. 7 Stress distributions after spraying of 1 layer

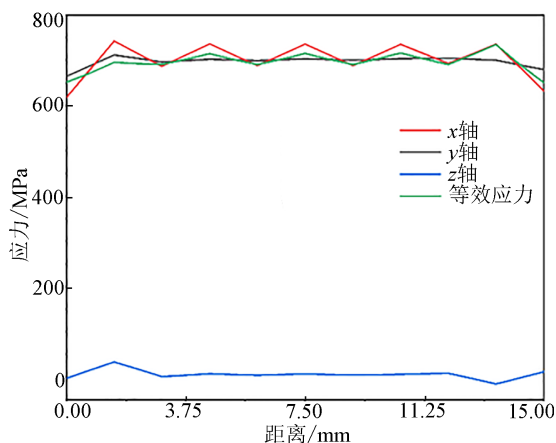


图 8 喷涂 1 层后涂层表面特征路径上的应力分布

Fig. 8 Stress distributions on characteristic paths of coating surface after spraying of 1 layer

图 9 展示了喷涂完 15 层 (厚度 0.75 mm) 后的应力分布情况。可以看到, 涂层表面的 x 轴应力分布相较第 1 层喷涂完之后的应力分布条纹状不明显。这是因为在经历多层喷涂之后, 样品本身不同位置的温差会增大, 涂层及基体内部应力分布更加复杂, 每个部分的应力数值大小差距变大, 而涂层表面相邻区域的应力数值大小相对而言差距更小, 因此在图中条纹状变得不明显。

图 10 展示了喷涂 15 层后特征路径上的应力分布情况。图 10 (a) 显示涂层表面的应力分布同样出现了峰谷起伏, 5 个峰值分别对应 5 道喷涂路径的中间部分。相较第 1 层喷涂完之后的结果, 特征路径上的应力起伏变化不大, 只有在起点与终点的部分 x 轴应力下降至 520 MPa 左右, x 轴应力的下降也导致等效应力下降至 570 MPa 左右。这是因为: 随着涂层厚度的增加, 涂层的表面与基体距离变大, 从而使得基体部分对其产生的影响减小, 且涂层的边缘产生了部分应力释放。由图 10 (b) 可以看到, 界面的中间部分承受较小的 x 轴方向的张应力, 但是仍能看到峰谷式的起伏变化。与表面结果相比, 出现峰值的位置在界面处则变成了谷值。这可能是因为喷涂刚结束的时候涂层路径中间部分相较边缘部分温度较高, 从而承受较小的淬火应力, 边缘部分承受了较大的淬火应力; 而当其温度降低至与边缘部分相近时, 这部分淬火应力使边缘部分承受的应力稍大于中间部分的应力。在特征路径的起点与终点位置则出现了较大的 z 轴张应力, 最大值在最边缘处, 其数值能达到 400 MPa。涂层在边缘部分也承受了较大的等效应力, 其数值能达到 700 MPa 左右。 z 轴

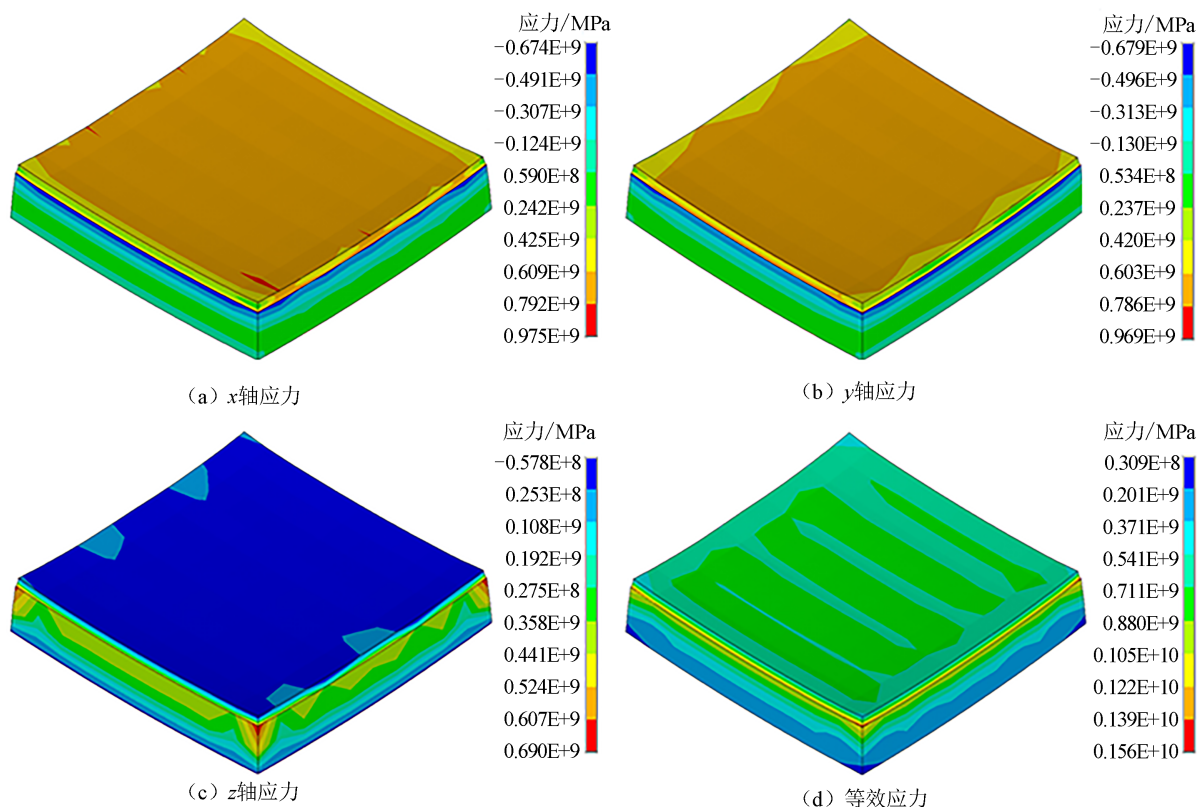


图 9 喷涂 15 层后的应力分布

Fig. 9 Stress distributions after spraying of 15 layers

应力在涂层表面特征路径上分布基本为 0。

图 11 展示了最后一层（厚度 1.5 mm）涂层喷涂完毕后的应力分布场，可以看到由于样品应力变化过大而在涂层的表面基本看不到条纹。

图 12 展示了喷涂完毕后该时刻特征路径的应力分布情况。由图 12（a）可以看到在涂层表面特征路径上仍有峰谷式的应力分布，但是其数值大小相较第 1 层与第 15 层都有少许下降。其中： x 轴

方向最大张应力位置不变，数值下降至 710 MPa 左右，最小值仍位于特征路径的起始点，但是数值降至 500 MPa 左右； z 轴应力在涂层表面特征路径上分布基本为 0。由图 12（b）可以看到： x 轴与 y 轴两个水平方向上的应力曲线基本重合，都承受了最大 -400 MPa 左右的压应力，分别位于涂层两侧喷涂路径的中央；涂层中间承受 -300 MPa 左右的压应力；而界面特征路径上承受的 z 轴张应力

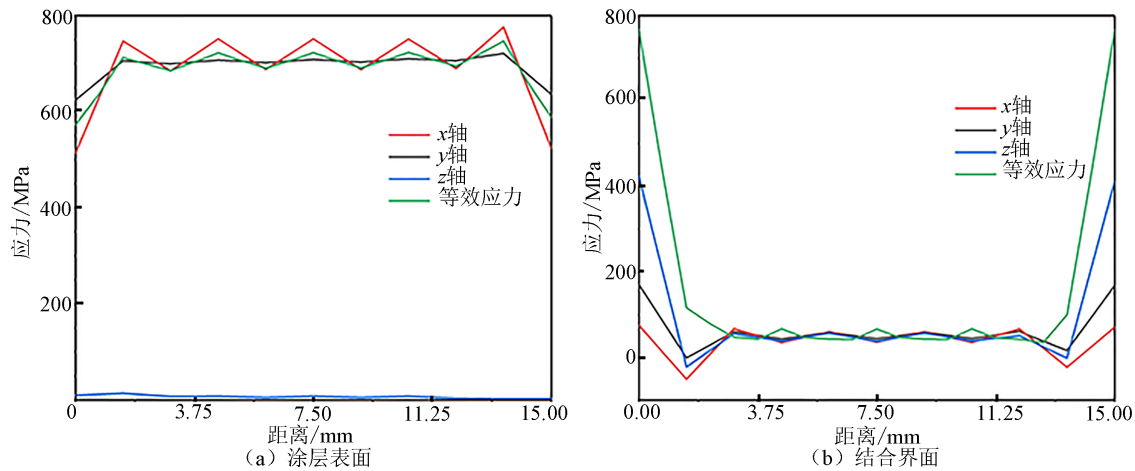


图 10 喷涂 15 层后沿特征路径上的应力分布

Fig. 10 Stress distributions along characteristic paths after spraying of 15 layers

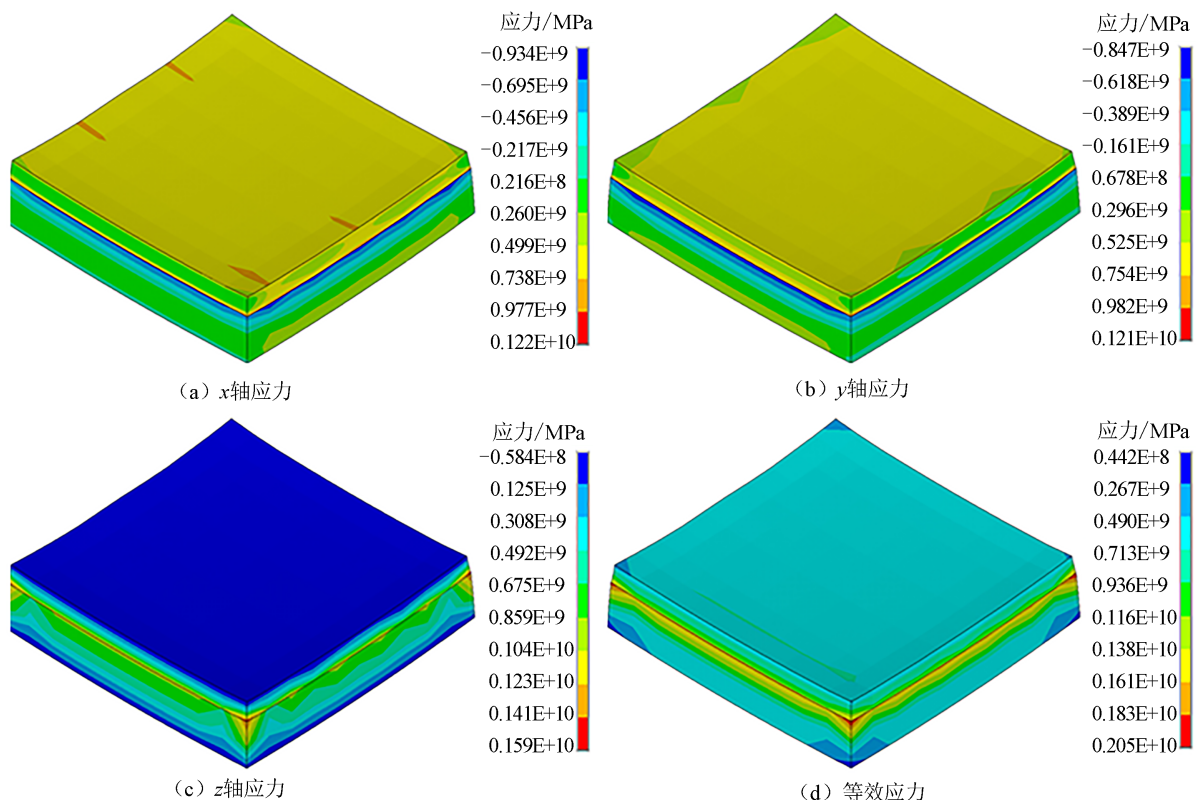


图 11 喷涂 30 层后的应力分布

Fig. 11 Stress distributions after spraying of 30 layers

则相当大, 最大值位于特征路径的起点与终点, 其数值能达到 900 MPa 左右。这说明涂层喷涂厚度越大越容易在边缘发生翘曲。等效应力在涂层的中间部分为 400 MPa 左右, 而在涂层的边缘为 1 100 MPa。

图 13 展示的是涂层在经历整个喷涂过程后冷却至室温所产生的应力分布情况。

可以看到: 沿着水平方向 x 轴 y 轴的应力最大值都分布在涂层垂直于该方向的边缘表面处, 中间部分应力值则较小; 等效应力分布也呈现出这种情况, 涂层的边缘部分承受更大的应力。这是因为应力更容易在物体的边缘产生集中的缘故。

图 14 展示了涂层冷却至室温后沿着特征路径上的应力分布情况。

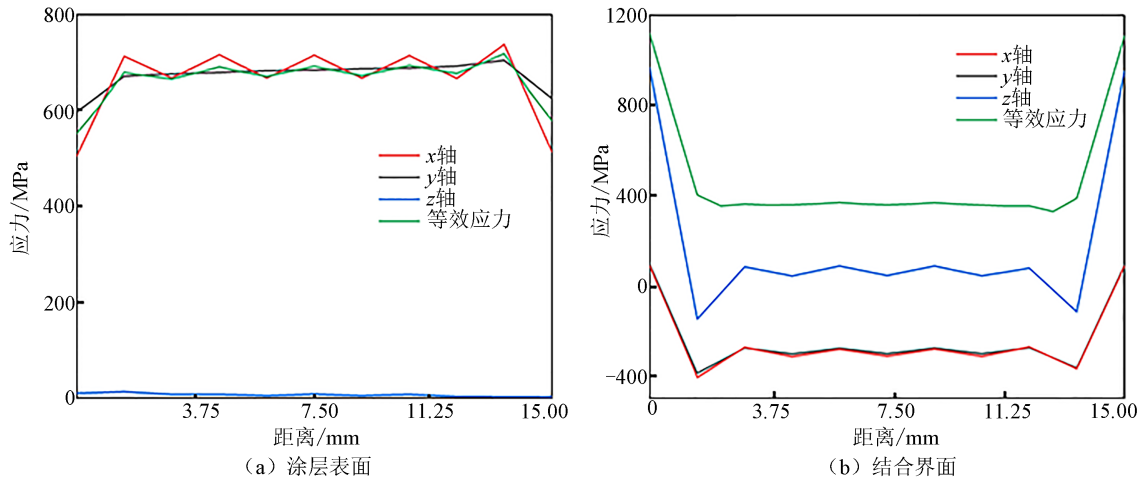


图 12 喷涂 30 层后特征路径上的应力分布

Fig. 12 Stress distributions on characteristic paths after spraying of 30 layers

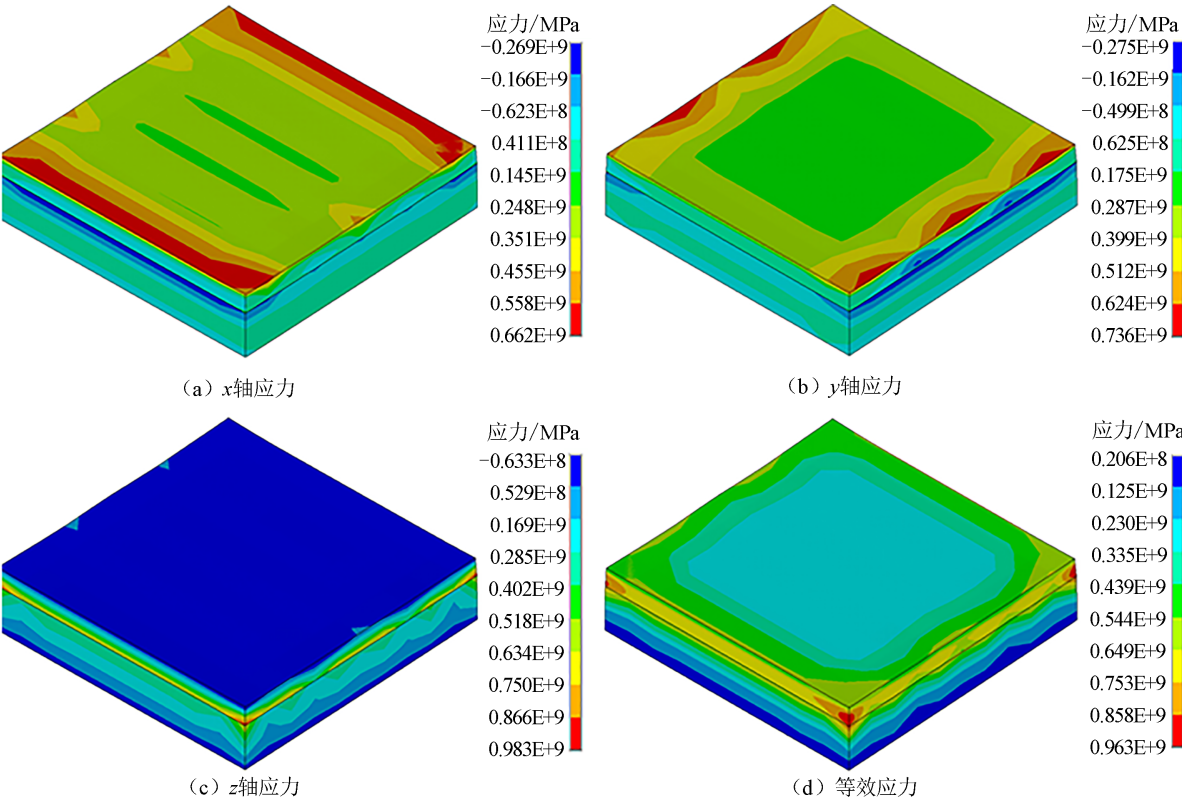


图 13 冷却至室温后的应力分布

Fig. 13 Stress distributions after cooling to room temperature

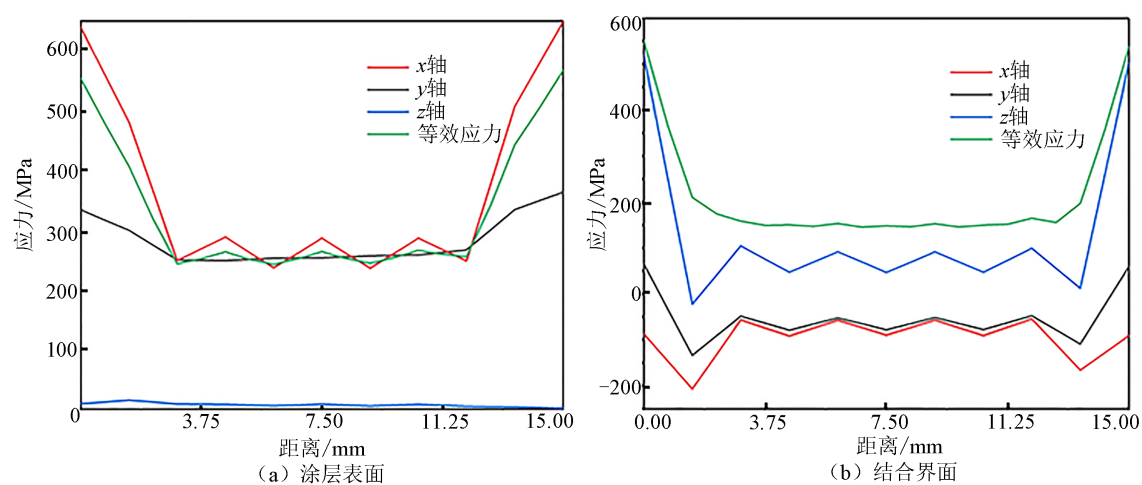


图 14 冷却至室温后沿特征路径的应力分布

Fig. 14 Stress distributions along characteristic paths after cooling to room temperature

由图 14 (a) 可以看到：涂层表面中间部分 x 轴向应力与等效应力的张应力分布仍是峰谷形式，峰值在 300 MPa 左右，而谷值则在 250 MPa 左右；在特征路径的起点与终点， x 轴向应力迅速增大，到边缘点时最大，其数值大小在 640 MPa 左右； y 轴向应力则在边缘部分稍有上升，最边缘部分的数值为 330 MPa 左右；等效应力则在 x 轴向应力的影响下在边缘处增大至 550 MPa 左右。这可能是在边缘部分更容易造成应力集中形成的。

由图 14 (b) 可以看到：界面上 x 、 y 两个水平方向的轴向应力都变成了压应力，最大压应力出现在第 1 道与第 5 道喷涂路径的中间部分， x 轴最大压应力达到 -200 MPa 左右， y 轴则相对较小，最大值为 -130 MPa 左右。这种现象出现的原因可能是：一方面，随着喷涂的进行，界面处的涂层温度逐渐减小，基体与界面处的涂层温度差逐渐减小；另一方面，该结构模型为对称结构，当涂层因受到高温而发生拉伸变形时，中间部分变形小，边缘部分变形大，因而在涂层界面上产生了这种中间应力小边缘应力大的现象。

选取涂层特征路径上的起点与中间点作为特征点，表 4 为喷涂过程中特征点上的 x 轴水平应力变化情况。

可以看出，在喷涂完第 1 层之后，由于单层涂层厚度很薄，因此其界面与表面相差不大，在起点承受 600 MPa 左右的张应力，而在中间承受 750 MPa 左右的张应力。当喷涂至第 15 层涂层 (0.75 mm) 时起点位置的涂层表面承受 520 MPa x 轴张应力，该数值相较第 1 层而言有所下降。在中间点位置的 x 轴张应力则变化不大，仍为 750

MPa 左右。与之相比，界面部分的应力虽仍承受水平张应力的影响，其数值则相对较小，仅为 80 MPa 与 50 MPa 左右。当喷涂至第 30 层 (1.5 mm) 时，涂层表面起点位置的 x 轴方向水平张应力进一步减小为 500 MPa 左右，中间点部分的张应力也减少至 710 MPa 左右。界面部分此时在起点位置承受 90 MPa 左右的 x 轴水平张应力，相较第 15 层稍大，而在中间点位置的应力变化明显，从 15 层的 50 MPa 的 x 轴水平张应力变为 -300 MPa 的 x 轴水平压应力。

表 4 喷涂过程中特征点 x 轴水平张应力

Tab. 4 x -axis horizontal tensile stress of characteristic points during spraying MPa

涂层	起点应力	中间点应力
第 1 层	600	750
第 15 层表面	520	750
第 15 层结合界面	80	50
第 30 层表面	500	710
第 30 层结合界面	90	-300
冷却后第 30 层表面	680	300
冷却后第 30 层结合界面	-100	-100

当涂层冷却至室温以后，涂层表面起点位置的张应力增大至 680 MPa 左右，而中间点的张应力降至 300 MPa 左右。在结合界面上，起点与中间点均承受 -100 MPa 左右的压应力。这与涂层更易在边缘部分翘起卷曲脱落的实际情况相吻合。本文模拟中获得的应力数值相对较大，这是由模拟过程中对涂层进行的一些假设所引起的，属于

正常误差, 本论文所模拟等离子喷涂制备吸波涂层的应力结果仍有一定参考价值。

3 结论

本文利用 ANSYS 有限元分析软件建立了等离子喷涂高温吸波涂层的沉积过程模型, 模拟计算了涂层逐道沉积时的温度场和涂层沉积过程中不同喷涂厚度时的应力场。模拟计算得到的温度场与实际喷涂工作情况温度场吻合良好。喷涂过程应力场的模拟结果表明: 涂层边缘受到更大的张应力, 更容易发生开裂以及出现翘曲, 揭示了涂层最先发生失效的位置是涂层与基体结合界面的边缘处。研究结果可以应用于各种复杂的零件形状, 通过对所得到的喷涂过程中应力变化规律的研究, 可以帮助找到降低涂层残余应力的方法, 从而提高涂层的使用寿命。

参考文献

- [1] SHAO T Q, MA H, WANG J, et al. High temperature absorbing coatings with excellent performance combined Al_2O_3 and TiC material[J]. Journal of the European Ceramic Society, 2020, 40(5): 2013-2019.
- [2] 高基磊, 刘俐. 耐高温吸波陶瓷及其涂层的研究进展[J]. 材料工程, 2024, 52(4): 24-33.
GAO J L, LIU L. Research progress in high temperature microwave absorbing ceramics and coatings[J]. Journal of Materials Engineering, 2024, 52(4): 24-33.
- [3] 周亮, 周万城, 刘涛, 等. 雷达吸波涂层制备技术的研究进展[J]. 材料导报, 2012, 25(5): 10-14.
ZHOU L, ZHOU W C, LIU T, et al. Research development of preparation technology of radar absorbing coating[J]. Materials Reports, 2012, 25(5): 10-14.
- [4] 李苏芸. 反应等离子喷涂 TiCN 涂层残余应力的数值模拟[D]. 天津: 河北工业大学, 2022: 6-7.
LI S Y. Numerical simulation of residual stress of TiCN coating by reactive plasma spraying[D]. Tianjin: Hebei University of Technology, 2022: 6-7.
- [5] 武志红. Al_2O_3 基高温吸波涂层制备及性能研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2013: 54-58.
WU Z H. Preparation and properties of Al_2O_3 -based high-temperature absorbing coating[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2013: 54-58.
- [6] 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.
LIU G, ZHANG X H, JIA L, et al. Structural optimization and thermo-mechanical coupling simulation of plasma sprayed Mo/8YSZ functionally graded thermal barrier coating[J]. Surface Technology, 2020, 49(3): 213-223.
- [7] PANG M, LIU Q X, ZHANG X H, et al. Simulation research on the thermal-mechanical coupling of YSZ thermal protective coatings prepared by laser-plasma composite heat source on the surface of high-intensity diesel engine cylinder head[J]. Optik, 2020, 207: 164425.
- [8] 李建坤, 罗军明, 苏宇航, 等. 等离子喷涂热障陶瓷涂层冷却累计残余应力的有限元模拟与验证[J]. 表面技术, 2023, 52(2): 385-394.
LI J K, LUO J M, SU Y H, et al. Finite element simulation and verification of accumulated cooling residual stress in plasma-sprayed thermal barrier ceramic coatings[J]. Surface Technology, 2023, 52(2): 385-394.
- [9] American Society for Testing and Materials. Standard test method for thermal transmission properties of thermally conductive electrical insulation materials: ASTM D5470—2017 [S/OL]. 2017[2024-07-15]. <https://www.astm.org/d5470-17>.
- [10] 张红松, 王富耻, 马壮, 等. 等离子涂层孔隙研究进展[J]. 材料导报, 2006, 20(7): 16-18, 26.
ZHANG H S, WANG F C, MA Z, et al. Research development of pores in plasma sprayed coatings[J]. Materials Reports, 2006, 20(7): 16-18, 26.
- [11] 王东生, 田宗军, 沈理达, 等. TiAl 合金表面激光重熔等离子喷涂 MCrAlY 涂层热力耦合有限元分析[J]. 应用激光, 2008, 28(2): 92-98.
WANG D S, TIAN Z J, SHEN L D, et al. Thermal-mechanical coupling finite element analysis of laser remelting MCrAlY coating prepared by plasma spraying on TiAl alloy surface[J]. Applied Laser, 2008, 28(2): 92-98.
- [12] 鲍万辉. 等离子喷涂热障涂层残余应力模拟分析研究[D]. 沈阳: 沈阳航空航天大学, 2019: 5-20.
BAO W H. Simulation analysis of residual stress in plasma sprayed thermal spraying layer[D]. Shenyang: Shenyang Aerospace University, 2019: 5-20.
- [13] 李守卫, 沈以赴, 顾冬冬, 等. 多组元金属粉末激

光选区烧结热力耦合有限元应力场分析[J]. 中国机械工程, 2007, 18(6): 751-755.

LI S W, SHEN Y F, GU D D, et al. Thermal-mechanical coupling finite element analysis of stress

field in selective laser sintering of multi-component metal powder[J]. China Mechanical Engineering, 2007, 18(6): 751-755.