



中国稀土学报
Journal of the Chinese Rare Earth Society
ISSN 1000-4343, CN 11-2365/TG

《中国稀土学报》网络首发论文

题目: 喷涂轨迹对铝合金表面等离子喷涂 Mo/8YSZ 功能梯度热障涂层温度场的影响规律研究
作者: 庞铭, 张啸寒, 刘光, 初飞雪
网络首发日期: 2019-09-20
引用格式: 庞铭, 张啸寒, 刘光, 初飞雪. 喷涂轨迹对铝合金表面等离子喷涂 Mo/8YSZ 功能梯度热障涂层温度场的影响规律研究. 中国稀土学报.
<http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2365.TG.20190920.0945.002.html>



网络首发: 在编辑部工作流程中, 稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定, 且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式 (包括网络呈现版式) 排版后的稿件, 可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定; 学术研究成果具有创新性、科学性和先进性, 符合编辑部对刊文的录用要求, 不存在学术不端行为及其他侵权行为; 稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准, 正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性, 录用定稿一经发布, 不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容, 只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认: 纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊 (光盘版)》电子杂志社有限公司签约, 在《中国学术期刊 (网络版)》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版, 以单篇或整期出版形式, 在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊 (网络版)》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物 (ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z), 所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

喷涂轨迹对铝合金表面等离子喷涂 Mo/8YSZ 功能梯度热障涂层温度场的影响规律研究

庞铭^{1*}, 张啸寒¹, 刘光², 初飞雪¹

(1.中国民航大学机场学院, 天津 300300; 2.中国兵器科学研究院宁波分院, 宁波 315103)

摘 要: 为了突破传统 Mo/8YSZ 双层热障涂层高温易剥离的技术瓶颈, 研究喷涂轨迹对等离子喷涂功能梯度热障涂层温度场的影响规律, 利用 ANSYS 有限元仿真模拟软件, 基于“生死单元”的方法, 建立了等离子喷涂功能梯度热障涂层的有限元模型, 模型中考虑了材料的相变潜热及不同温度下的热物性参数, 分析了不同喷涂轨迹下喷涂构件温度及温度梯度的分布情况。结果表明: 当喷涂粘结层和过渡层材料时, 采用同向的喷涂轨迹时, 喷涂构件的温度最高, 采用同种材料同向喷涂, 异种材料喷涂方向相反的喷涂轨迹时, 喷涂构件的温度次之, 采用“S”型的喷涂轨迹时, 喷涂构件温度最低; 当喷涂陶瓷层材料时, 采用“S”型的喷涂轨迹时, 喷涂构件的温度最高, 采用同向的喷涂轨迹时, 喷涂构件的温度次之, 而采用同种材料同向喷涂, 异种材料喷涂方向相反的喷涂轨迹时, 喷涂构件的温度最低; 采用“S”型喷涂轨迹进行喷涂作业时, 喷涂构件左右两端面温度分布的均匀性优于另外两种喷涂方式; 采用同向的喷涂轨迹进行喷涂作业时, 基体温度的波动幅度较另外两种喷涂方式小。通过设计功能梯度热障涂层, 并合理调控喷涂轨迹, 可进一步减小喷涂构件厚度方向的温度梯度, 从而提升基体与涂层的结合强度。

关键词: 等离子喷涂; 功能梯度热障涂层; 喷涂轨迹; 温度场; 数值模拟

中图分类号: TG174.4

文献标识码: A

Research on the Influence of Spraying Trajectory on the Temperature Field of Plasma Sprayed Mo/8YSZ Functionally Gradient Thermal Barrier Coatings on Aluminum Alloy Surface

PANG Ming^{1*}, ZHANG Xiao-han¹, LIU Guang², CHU Fei-xue¹

(1. Airport College, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300; 2. China Academy of Ordnance Science Ningbo Branch, Ningbo 315103)

Abstract: In order to break through the technical bottleneck of traditional Mo/8YSZ double-layer thermal barrier coatings which is easy to be removed at high temperature, the influence of spraying trajectory on the temperature field of plasma spraying functionally gradient thermal barrier coatings was studied. Based on the method of "life and death element", the finite element model of plasma spraying gradient thermal barrier coating was established by using ANSYS finite element simulation software. The latent heat of phase change and thermophysical parameters at different temperatures were considered in the model, and the distribution of temperature and temperature gradient of spray components under different spray trajectories were analyzed. The results show that when the bonding layer and transition layer materials are sprayed, the temperature of the spraying components is the highest when the same spraying trajectory is used. When the same material is used to spray in the same direction, and different materials are used to spray in the opposite direction, the temperature of the spraying components takes second place. And the spraying component temperature is the lowest when S-shaped spraying track is adopted. When the ceramic layer material is sprayed, the temperature of the spraying component is the highest when the S-shaped spraying track is adopted. The temperature of spraying components is followed when the same direction

基金项目: 国家自然科学基金(U1633111、51206179); 中央高校基本科研业务费项目中国民航大学专项资助(3122018D020); 中国民航大学蓝天青年科研资金资助项目; 宁波市科技创新团队项目(2014B82001)

作者简介: 庞铭(1980-), 男, 教授, 博士, 硕士生导师, 主要从事结构强度评估、材料表面改性与再制造技术的研究, E-mail: pangming1980@126.com。

spraying trajectory is adopted. When the same material is sprayed in the same direction and different material is sprayed in the opposite direction, the temperature of the spraying component is the lowest. When the S-shaped spraying track is used for spraying, the uniformity of temperature distribution on the left and right ends of spraying components is better than the other two spraying methods. When the same direction spraying trajectory is used, the fluctuation range of substrate temperature is smaller than the other two spraying methods. By designing the functional gradient thermal barrier coating and adjusting the spraying trajectory reasonably, the temperature gradient in the direction of spraying component thickness can be further reduced and the bonding strength between the substrate and the coating can be improved.

Key words: plasma spraying; functionally gradient thermal barrier coatings; spray trajectory; temperature field; numerical simulation

面对新型飞行器飞行速度快、整体质量轻及输出动力足的发展趋势,为了满足恶劣工况下飞行器热端部件的抗热冲击及耐蚀性要求,需对飞行器热端部件的制备材料进行优选,7A04 超高强铝合金具有比强度高、塑性好以及耐蚀性能佳等诸多优良特性,成为制备新型飞行器热端部件的优选材料^[1],然而铝合金材料熔点低、不耐高温,故需对其采取有效的热防护措施。工程上降低零件热载荷的方式主要有强化冷却及增大零件表面热阻等方式,通过强化冷却降低零件热载荷的裕度有限,而采用增大零件表面热阻的方式可以在保留材料自身优良性能的基础上大幅度降低零件表面的热载荷。为了尽可能保留基体材料的原始力学性能,不采用涂层与基体材料冶金结合的激光熔覆工艺,等离子喷涂工艺作为一项表面再制造技术,实现了涂层与基体材料的机械结合,并可显著降低零件热载荷,近年来在航空航天、军工、冶金及机车制造等领域广泛应用^[2-9]。新型飞行器能量输出高,势必会造成热端部件承受更长周期的热流烧蚀冲刷,采用等离子喷涂技术制备的传统金属/陶瓷双层热障涂层,在高温环境下易发生鼓包、炸裂及剥落的缺陷,影响了涂层性能和飞行器工作的可靠性。功能梯度热障涂层是在传统的双层热障涂层基础上,在粘结底层和陶瓷面层中部增加梯度过渡层,实现涂层厚度方向热力学性能参数的连续平稳过渡,缩小了基体与涂层材料间的热失配,提升了涂层与基体的结合强度。

由于功能梯度热障涂层各梯度涂层的热力学性能不同,故需合理调控等离子喷涂的喷涂轨迹这一关键工艺参数,不同的喷涂轨迹将影响涂层厚度及热应力的分布情况,从而影响涂层的服役寿命,工程上采用的传统喷涂方式是操作工手持喷枪进行喷涂作业,由于不可避免的人为因素,势必会造成喷涂轨迹控制差以及涂层厚度分布不均等问题,喷涂质量无法得到保障,现阶段的智能喷涂机器人可替代人力,实现精准喷涂作业,近年来关于自动化等离子喷涂轨迹控制及优化的问题得到了国内外学者的关注及重视^[10-11]。目前已有学者开展了喷涂轨迹对涂层影响的相关研究,盐城工学院机械工程学院的曾勇等人^[12],提出运用微分几何面积放大定理建立考虑喷枪倾角因素喷涂模型的方法,为倾角喷涂模型在喷涂轨迹优化中的应用提供了理论基础;广州有色金属研究院新材料研究所的毛杰等人^[13],设计和采用不同的喷涂轨迹,通过超音速火焰喷涂技术在铝齿柱表面制备了 WC-10CO4Cr 涂层,并分析了涂层的微观性能;中国地质大学(武汉)的孙明及华中科技大学的韩光超等人^[14],通过对机器人等离子喷涂几何模型的实验研究,从而确定了最佳的轨迹间距;武汉工程大学的潘洋等人^[15],在平面静态喷涂模型的基础上,提出了一种面向复杂曲面的喷涂机器人轨迹规划方法,为解决涂料不均匀堆积问题提供了新的思路;同济大学机械与能源工程学院的马淑梅等人^[16],针对船舶外板喷涂机器人多层喷涂轨迹优化问题,根据平面单层膜厚分布,推导建立平面多层漆膜分布模型,并采用快速非支配排序遗传算法优化了各层喷涂轨迹;广东省现代表面工程技术重点实验室的吴洪键等人^[17],建立了机器人喷涂涂层厚度分布数学计算模型,优化平面喷涂轨迹,求出最佳喷涂步距,获得平整连续的涂层。

目前还没有针对于喷涂轨迹对等离子喷涂 Mo/8YSZ 功能梯度热障涂层温度场影响规律的相关研究,本文借助 ANSYS 仿真模拟软件,建立了等离子喷涂 Mo/8YSZ 功能梯度热障涂层的数值模型,揭示了喷涂轨迹对功能梯度热障涂层温度场的影响规律,研究结果可为工程上等离子喷涂功能梯度

热障涂层喷涂轨迹工艺参数的优化提供数据支撑。

1 等离子喷涂数值模型的建立

1.1 等离子喷涂有限元模型

图 1 为等离子喷涂的有限元模型，在 ANSYS 有限元仿真模拟软件中，选用三维实体 SOLID70 六面体八节点热单元，建立等离子喷涂有限元模型，为了提高仿真精度，涂层区域厚度方向的网格精细划分，网格尺寸为 0.05 mm，基体区域网格粗略划分，网格尺寸为 1 mm。在仿真计算中涂层的单层厚度为 50 μm ，分 12 层进行，其中第 1~2 层喷涂粘结层材料，第 3~6 层喷涂过渡层材料，第 7~12 层喷涂陶瓷层材料，利用“生死单元法”模拟等离子喷涂不同涂层材料沉积的先后过程，在喷涂过程开始前将涂层单元全部“杀死”，伴随着喷涂过程的进行，逐步逐层激活涂层单元，最终完成整个喷涂过程。如图 1 所示，为了研究等离子喷涂过程中基体材料的温度变化情况，在 ANSYS 仿真模拟软件中通过定义监测点的方式，在基体右端面中心位置选取一个节点定义为监测点 A；在基体的左端面与右端面中轴线所在位置分别选取一条监测路径，两条监测路径的起始点均为基体左右端面的最底端。

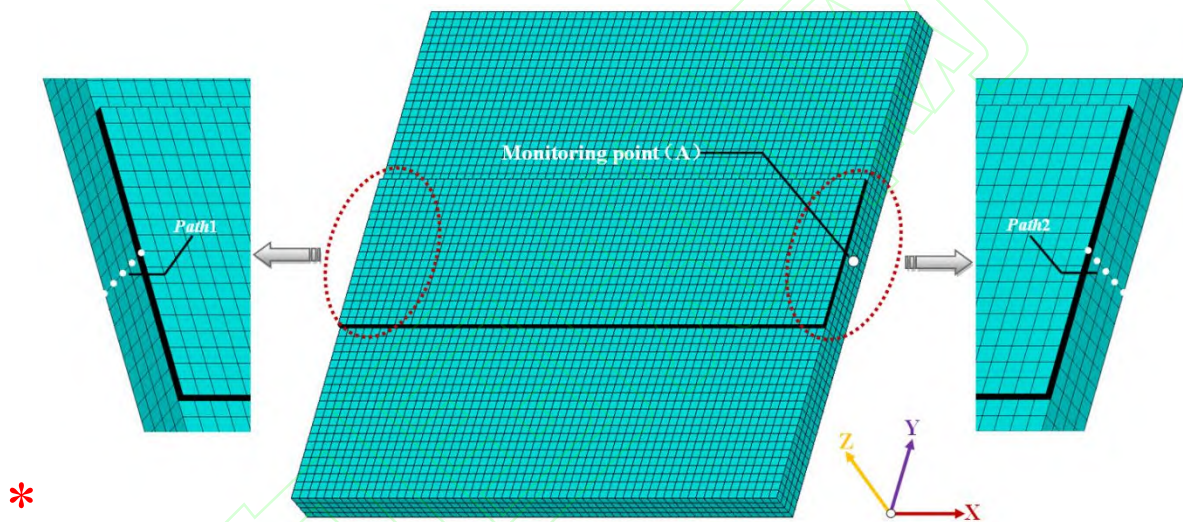


图 1 等离子喷涂有限元模型

Fig.1 Finite element model of plasma spraying

1.2 等离子喷涂物理模型

图 2 为等离子喷涂的物理模型，基体尺寸为 60 mm \times 60 mm \times 4 mm，基体材料选用 7A04 铝合金；在基体上方喷涂的功能梯度热障涂层，涂层总厚度为 0.6 mm，梯度涂层的设计为：粘结层厚度为 0.1mm，粘结层材料选用熔点高达 2620 $^{\circ}\text{C}$ 的纯钼金属 (Mo)，此外金属钼还具有弹性模量高、膨胀系数低、自粘结性能强及抗烧蚀性能强等诸多优良性能^[18]；陶瓷层厚度为 0.3 mm，陶瓷层选用熔点为 2680 $^{\circ}\text{C}$ 的 8%氧化钇部分稳定氧化锆 (8YSZ) 材料，该种陶瓷材料具有高熔点、低导热、高硬度的特性，有利于陶瓷面层实现优异的隔热性、耐烧蚀性及抗冲刷性能；过渡层总厚度为 0.2 mm，每种梯度材料的厚度均为 0.05 mm，过渡层梯度材料自下而上分别为 80%Mo/20%8YSZ、60%Mo/40%8YSZ、40%Mo/60%8YSZ 及 20%Mo/80%8YSZ。

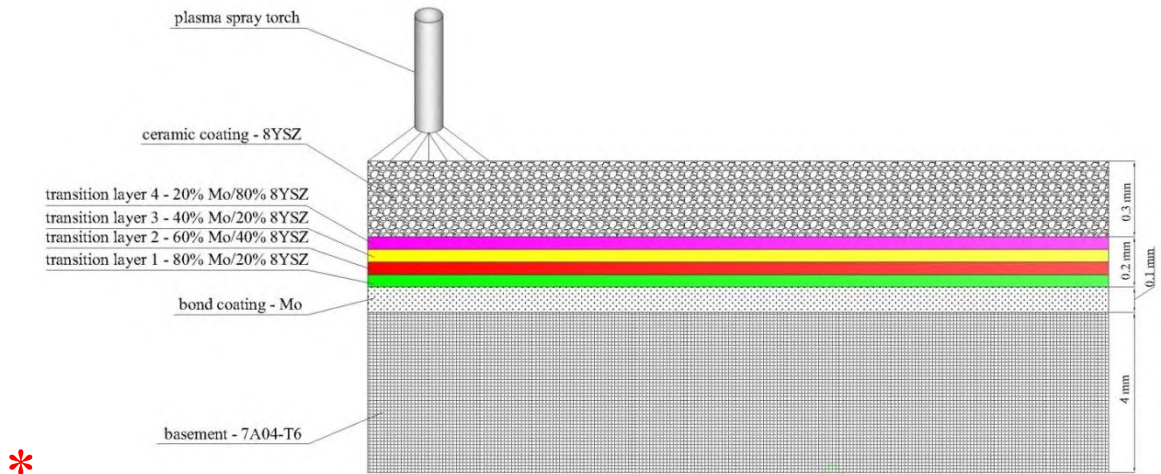


图 2 等离子喷涂物理模型

Fig. 2 Physical model of plasma spraying

1.3 等离子喷涂轨迹的定义

图 3 为等离子喷涂轨迹示意图，喷涂方向如图 3 蓝色箭头所示，其中图 3 (a) 为喷涂轨迹①，在喷涂每层涂层材料时，喷枪在喷涂构件上方自左向右移动；图 3 (b) 为喷涂轨迹②，喷涂粘结层材料时，喷枪在喷涂构件上方自左向右移动，在喷涂过渡层材料时，喷枪在喷涂构件上方自右向左移动，在喷涂陶瓷层材料时，喷枪在喷涂构件上方自左向右移动，即同种材料同向喷涂，异种材料的喷涂方向相反；图 3 (c) 为喷涂轨迹③，即相邻单层涂层的喷涂方向相反的“S”型喷涂方式，其中在基体上表面喷涂第一层粘结层的喷涂方向为自左向右。

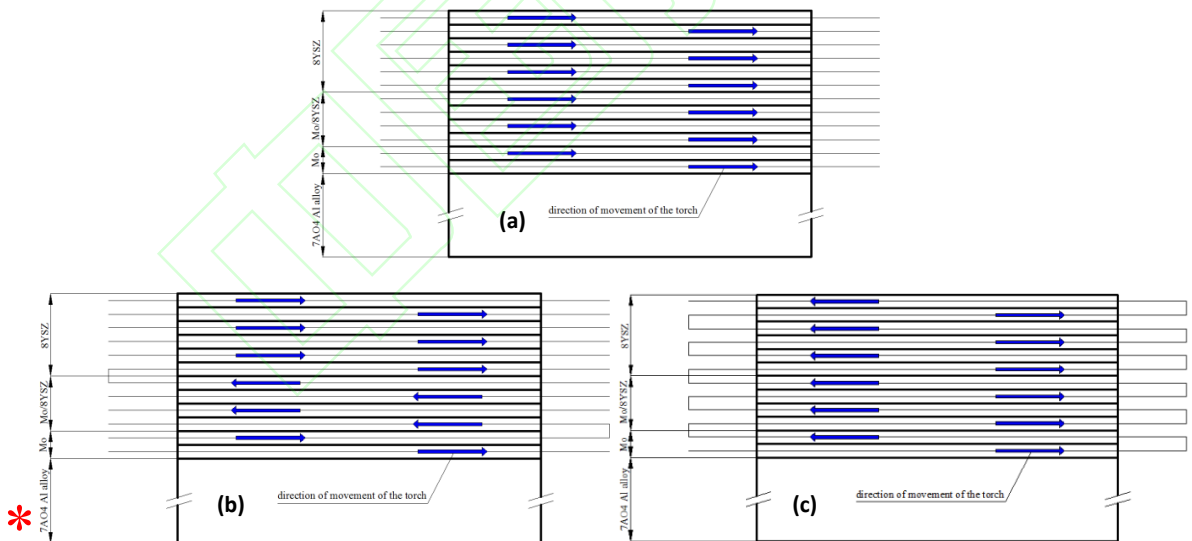


图 3 等离子喷涂轨迹类型

(a) 喷涂轨迹①; (b) 喷涂轨迹②; (c) 喷涂轨迹③

Fig.3 Plasma spray trajectory type

(a) spray trajectory①; (b) spray trajectory②; (c) spray trajectory③

1.4 等离子喷涂热源模型及热边界条件

等离子喷涂所处的环境温度为 25 ℃，喷涂构件的初始温度与环境相同，喷枪移动速度为

1000mm/s。结合等离子喷涂过程中熔滴撞击基材后喷涂构件的温度分布情况，将喷涂热源简化为高斯热源，热源函数的表达式方程为^[19]：

$$q = q_s \exp\left(-\frac{3L^2}{R^2}\right) \quad (1)$$

式中 q 为等离子弧的热流密度； L 为任意点至电弧高温光斑圆心的距离； R 为等离子弧的热源加热半径； q_s 为等离子焰流中心的大热流密度，其表达式为^[19]：

$$q_s = \frac{3P}{\pi R^2} \quad (2)$$

$$P = \eta IU \quad (3)$$

式中 P 为等离子喷涂功率，在整个喷涂过程中等离子体的喷涂功率为50 KW， I 为喷涂电流， U 为喷涂电压， η 为涂层材料的能量吸收率。

在等离子喷涂过程中，喷涂热源直接作用区域考虑等离子喷涂热源的作用及喷涂构件与外界的换热情况；喷涂热源非直接作用区域，仅考虑喷涂构件与外界的换热情况。

1.5 等离子喷涂相变潜热的处理

喷涂粉末经高温等离子焰流加热至熔融或半熔融态，并以一定速度撞击在基材表面的同时，熔滴与基材间发生热量的传输及热交换，由于材料相变会伴随着能量变化，在实际仿真运算过程中，当材料的温度超过相变点时，通过焓值的变化来考虑材料的相变潜热，焓值的计算方程为^[20]：

$$H = \int \rho c(T) dT \quad (4)$$

式中 H 为材料的焓值， ρ 为材料的密度， c 为材料的比热容， T 为材料的温度。

1.6 材料的热物性参数

等离子喷涂功能梯度热障涂层的过程中考虑了材料的热物性参数随温度的变化，其中基体材料的热物性参数见表1，粘结层材料的热物性参数见表2，陶瓷层材料的热物性参数见表3，通过差值及外推的方法获取基体及涂层材料未知温度下的热物性参数。其中过渡层梯度材料的热物性参数，采用混合定律进行计算^[20]：

$$X'_i = \sum k_i \cdot X_i \quad (5)$$

式中 X'_i 为混合后材料的热物性参数， X_i 为混合前材料的热物性参数， k_i 为材料的质量分数， i 为材料编号。

表 1 7A04 铝合金的热物性参数^[21]

Table 1 Thermal physical properties of 7A04 aluminum alloy

Temperature / °C	Thermal conductivity / (W·m ⁻¹ ·°C ⁻¹)	Specific heat capacity / (J·kg ⁻¹ ·°C ⁻¹)	Density /(kg·m ⁻³)
0	155	830	2788
25	156	860	2788
50	158	870	2788
100	161	900	2788
200	175	970	2788

300	185	1020	2788
400	193	1120	2788
500	197	1320	2788

表 2 Mo 的热物性参数^[22]

Table 2 Thermal physical properties of Mo

Temperature /°C	Thermal conductivity / (W·m ⁻¹ ·°C ⁻¹)	Specific heat capacity / (J·kg ⁻¹ ·°C ⁻¹)	Density /(kg·m ⁻³)
20	142.01	250.25	10200
200	116.27	275.48	10200
400	114.95	292.03	10200
800	110.43	325.12	10200

表 3 8YSZ 的热物性参数^[23-24]

Table 3 Thermophysical properties parameters of 8YSZ

Temperature /°C	Thermal conductivity / (W·m ⁻¹ ·°C ⁻¹)	Specific heat capacity / (J·kg ⁻¹ ·°C ⁻¹)	Density /(kg·m ⁻³)
20	2.66	492.39	5650
200	2.60	538.03	5650
400	2.54	588.74	5650
800	2.41	690.17	5650
1000	2.34	740.89	5650

2 数值模拟结果分析与讨论

图 4 为 $t=0.42$ s 不同喷涂轨迹等离子喷涂到过渡层结束时刻喷涂构件温度场云图，从图 4 可以观察到，整个喷涂构件呈现出不同的温度梯度分布，喷枪热源直接作用区域温度高，喷枪热源非直接作用区域温度低，喷涂粉未经送粉气体送入高温等离子焰流中被加热至熔融或半熔融状态，并以一定速度撞击在基体或已沉积的涂层表面，由于新沉积的涂层温度较基体或已沉积的涂层高，根据传热学，热量由高温涂层向温度较低的已沉积涂层和基体区域传递，这就使得等离子喷涂作业的瞬间，喷涂构件形成了不同的温度分布；采用喷涂轨迹①进行喷涂作业时，喷涂构件的最高温度为 531 °C，采用喷涂轨迹②进行喷涂作业时，喷涂构件的最高温度为 516 °C，采用喷涂轨迹③进行喷涂作业时，喷涂构件的最高温度为 509 °C，不同喷涂轨迹在同一时刻喷涂构件的最高温度不同，呈现了喷涂轨迹①最高、喷涂轨迹②次之、喷涂轨迹③最低的分布，这是由于在不同的喷涂轨迹下，喷枪热源与喷涂构件相互作用的区域及时间不同，导致喷涂构件的温升程度及散热情况也不同。

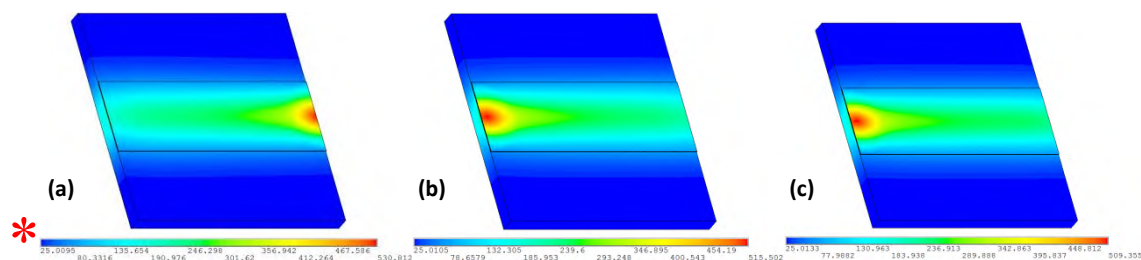


图 4 $t=0.42$ s 不同喷涂轨迹等离子喷涂到过渡层结束时刻喷涂构件温度场云图（单位：°C）

(a) 喷涂轨迹①；(b) 喷涂轨迹②；(c) 喷涂轨迹③

Fig.4 $t=0.42$ s Cloud chart of sample temperature field at different spraying trajectories from plasma spraying to the end of

transition layer(unit: $^{\circ}\text{C}$)

图 5 为 $t=0.84\text{ s}$ 不同喷涂轨迹等离子喷涂到陶瓷层第 6 层结束时刻温度场云图,从图 5 可以观察到:采用喷涂轨迹①进行喷涂作业时,喷涂构件的最高温度为 $3006\text{ }^{\circ}\text{C}$,采用喷涂轨迹②进行喷涂作业时,喷涂构件的最高温度为 $3002\text{ }^{\circ}\text{C}$,采用喷涂轨迹③进行喷涂作业时,喷涂构件的最高温度为 $3170\text{ }^{\circ}\text{C}$,对比图 4 发现,在等离子喷涂陶瓷层的结束时刻,不同喷涂轨迹对应喷涂构件的最高温度异于图 4,呈现了使用喷涂轨迹③进行喷涂作业时喷涂构件的温度最高、喷涂轨迹①次之、喷涂轨迹②最低的分布形式,这是由于粘结层和过渡层材料的热物性参数的差异性较陶瓷层和基体小,故热量在粘结层与过渡层内部传递速度较陶瓷层快,伴随着陶瓷层厚度的增加,由于不同种类涂层间热物性参数的差异性,导致了在不同喷涂轨迹下喷涂构件的温度分布情况不同。

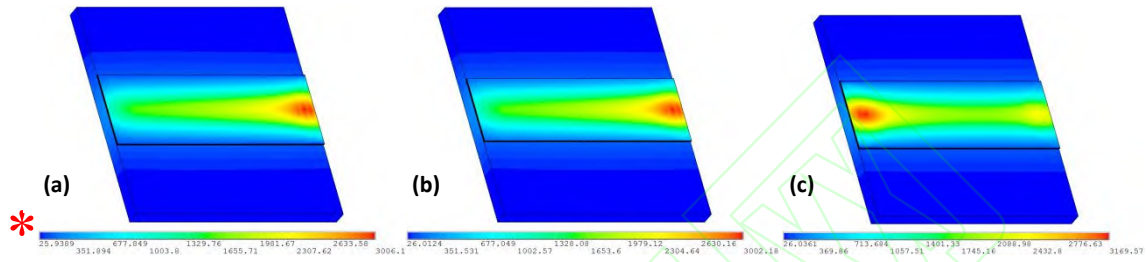


图 5 $t=0.84\text{ s}$ 不同喷涂轨迹等离子喷涂到陶瓷层第 6 层结束时刻温度场云图 (单位: $^{\circ}\text{C}$)

(a) 喷涂轨迹①; (b) 喷涂轨迹②; (c) 喷涂轨迹③

Fig.5 $t=0.84\text{ s}$ Cloud picture of temperature field at the end of the 6th layer of ceramic layer by plasma spraying with different spraying trajectories(unit: $^{\circ}\text{C}$)

图 6 为 $t=0.84\text{ s}$ 等离子喷涂结束时刻左端面 *Path1* 温度分布曲线,观察图 6 发现,在不同的等离子喷涂轨迹下,监测路径的温度变化情况相似,在监测路径 $0\sim 0.0043\text{ m}$ 的区间内,温度上升幅度较其他区间小,在距离监测路径起始点 0.0043 m 位置处温度迅速升高, *Path1* 温度分布曲线存在一个明显的转折点,这是由于在监测路径 $0\sim 0.0043\text{ m}$ 的区间范围内,对应了在铝合金基体表面喷涂粘结层和过渡层的作业过程,由于粘结层与基体材料的热导率差异较其他涂层小,故粘结层与基体温度分布差异小,又由于过渡层实现了基体及陶瓷材料热物性参数连续平滑变化,故在基体、粘结层和过渡层三者的温度差异甚小,在距离监测路径起始点 0.0043 m 位置处,由于陶瓷层的热导率较其他涂层小,故陶瓷层的散热效果差,造成了热量在陶瓷层的大量积聚,因而温度较其他涂层高。

观察不同喷涂轨迹下 *Path1* 的温度分布情况发现,采用喷涂轨迹①及②进行喷涂作业时,监测路径的温度变化更为相似:喷涂轨迹①对应的路径起始点温度为 $231\text{ }^{\circ}\text{C}$,终止点温度为 $975\text{ }^{\circ}\text{C}$,两者相差 $744\text{ }^{\circ}\text{C}$;喷涂轨迹②对应的路径起始点温度为 $236\text{ }^{\circ}\text{C}$,终止点温度为 $981\text{ }^{\circ}\text{C}$,两者相差 $745\text{ }^{\circ}\text{C}$;喷涂轨迹③对应的路径起始点温度为 $258\text{ }^{\circ}\text{C}$,终止点温度为 $2566\text{ }^{\circ}\text{C}$,两者相差 $2308\text{ }^{\circ}\text{C}$,采用喷涂轨迹③进行喷涂作业时,监测路径的起始点温度与终止点温度差值较其他喷涂轨迹大,这是由于喷涂轨迹③“S”型的喷涂作业方式使得在喷涂作业结束时刻,喷枪恰好移动至喷涂构件左端面监测路径的终止点,故采用喷涂轨迹③进行喷涂作业时,监测路径的终止点温度高,而采用另外两种喷涂轨迹时,在喷涂作业结束时刻,喷枪均移动至右端面监测路径的终止端位置,故监测路径的终止温度低;对比喷涂轨迹①及喷涂轨迹②,发现喷涂轨迹②对应监测路径的温度差值较喷涂轨迹①大,这是由于采用喷涂轨迹②进行喷涂作业时,在喷涂过渡层材料时,喷枪自喷涂构件的右端向左端移动,造成了喷涂构件左端面温度的大量积累。

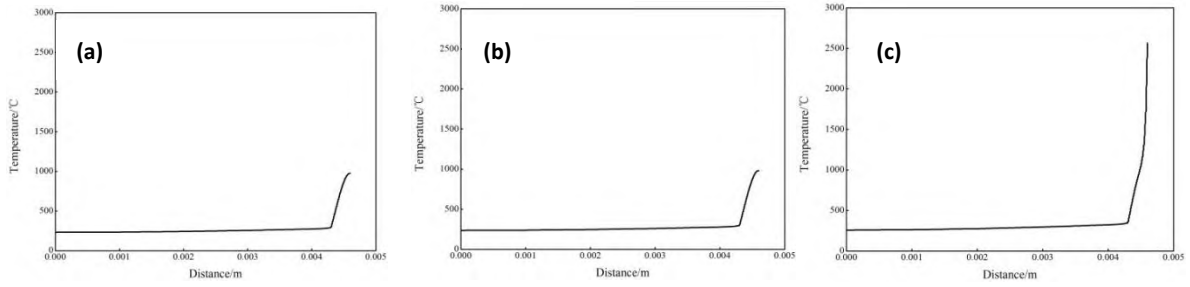


图6 $t=0.84$ s 等离子喷涂结束时刻左端面 *Path1* 温度分布曲线

(a) 喷涂轨迹①; (b) 喷涂轨迹②; (c) 喷涂轨迹③

Fig.6 $t=0.84$ s Temperature distribution curve of left end *Path1* at the end of plasma spraying

图7为 $t=0.84$ s 等离子喷涂结束时刻右端面 *Path2* 温度分布曲线, 观察图7发现, 在不同喷涂轨迹下, 监测路径的温度分布情况与图6 *Path1* 相似, 喷涂轨迹①对应的监测路径起始点温度为 245°C , 终止点温度为 2744°C , 两者差值为 2499°C , 喷涂轨迹②对应的监测路径起始点温度为 241°C , 终止点温度为 2740°C , 两者差值为 2499°C , 喷涂轨迹③对应的监测路径起始点温度为 275°C , 终止点温度为 1830°C , 对比图6发现, 采用喷涂轨迹①及②喷涂时, 喷涂构件右端面的温差较左端面大, 而采用喷涂轨迹③进行喷涂时, 喷涂构件右端面的温差较左端面小, 这是由于喷涂轨迹③S型的喷涂作业方式, 使得喷涂构件温度分布的均匀性优于另外两种喷涂轨迹; 喷涂轨迹①右端面监测路径终止点温度最高, 喷涂轨迹②次之, 喷涂轨迹③最低, 这是由于采用喷涂轨迹①进行喷涂作业时, 喷枪自喷涂构件左端向右端喷涂, 造成了热量在右端面的大量积累。

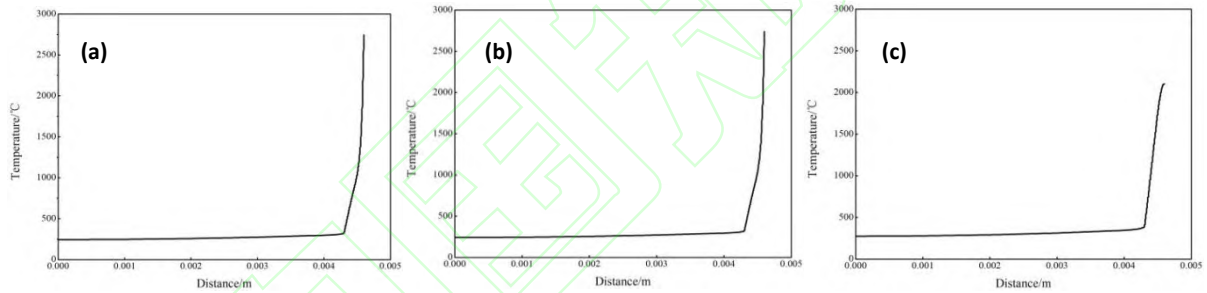
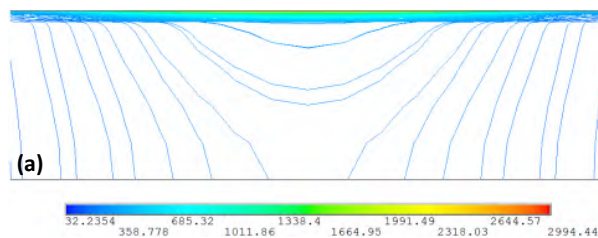


图7 $t=0.84$ s 等离子喷涂结束时刻右端面 *Path2* 温度分布曲线

(a) 喷涂轨迹①; (b) 喷涂轨迹②; (c) 喷涂轨迹③

Fig.7 $t=0.84$ s the temperature distribution curve of right end *Path2* at the end of plasma spraying

图8为 $t=0.84$ s 等离子喷涂结束时刻喷涂构件横截面等温线图, 等温线的疏密程度可以反应喷涂构件各部分的温度梯度大小, 等温线密集的区域, 温度梯度大, 等温线疏松的地方, 温度梯度小。观察图8发现, 陶瓷层的等温线较喷涂构件其他区域密集, 这是由于陶瓷层材料的热导率较过渡层材料低, 热量在涂层内部传递速度慢, 造成热量在涂层内部大量积累, 故导致在喷涂陶瓷层材料时的瞬时最高温度梯度较喷涂构件其他部分大; 在不同喷涂轨迹下, 喷涂构件横截面的等温线的疏密程度不同, 说明在等离子喷涂过程中的同一时刻, 不同喷涂方式对应喷涂构件横截面的最高温度梯度不同, 这是由于喷涂轨迹影响喷涂构件同一位置涂层材料的沉积的先后时间, 造成喷涂构件厚度方向的温度梯度分布不同, 温度梯度的差异性将影响涂层之间的层间应力分布及热应力的分布不同。



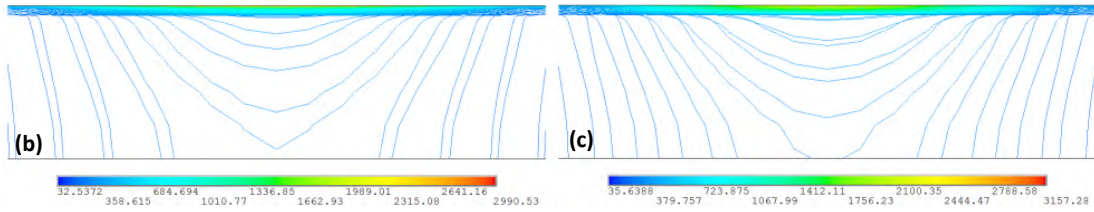


图 8 $t=0.84$ s 等离子喷涂结束时刻喷涂构件横截面等温线图 (单位: $^{\circ}\text{C}$)

(a) 喷涂轨迹①; (b) 喷涂轨迹②; (c) 喷涂轨迹③

Fig.8 $t=0.84$ s cross section isotherm diagram of spraying components at the end of plasma spraying (unit: $^{\circ}\text{C}$)

为了进一步研究不同喷涂轨迹对喷涂构件横截面厚度方向温度梯度的影响规律, 绘制了喷涂构件左、右端面监测路径在不同喷涂轨迹下的温度梯度分布情况, 图 9 为 $t=0.84$ s 喷涂构件左端面 *Path1* 温度梯度分布曲线, 观察图 9 发现, 在监测路径 $0\sim0.0043$ m 的区间范围内, 各喷涂轨迹对应监测路径的温度梯度近似为零, 再次说明了基体、粘结层及过渡层温度差异甚小, 在距离监测路径起始点 0.0043 m 的时间范围内, 温度梯度增大, 对应了陶瓷层与过渡层存在较大的温度差, 观察图 9 (a) 及图 9 (b) 发现, 当采用喷涂轨迹①及喷涂轨迹②进行喷涂作业时, 在监测路径 $0.0044\sim0.0046$ m 的区间范围内, 伴随着陶瓷层厚度的增加, 温度梯度逐渐降低, 这是由于喷枪自喷涂构件左端向右端移动, 造成了热量在喷涂构件右端大量积累, 在喷涂构件左端热量相对较少, 且越靠近监测路径终止点, 则越靠近涂层上表面, 涂层与外界的对流换热效果越明显; 观察图 9 (c) 发现, 采用喷涂轨迹③进行喷涂作业时, 喷枪在基体上表面往复式移动, 造成了在喷涂陶瓷涂层时, 因陶瓷涂层热导率小, 热量无法及时散失, 随着陶瓷层厚度的增加, 陶瓷层路径的温度梯度也随之增加。

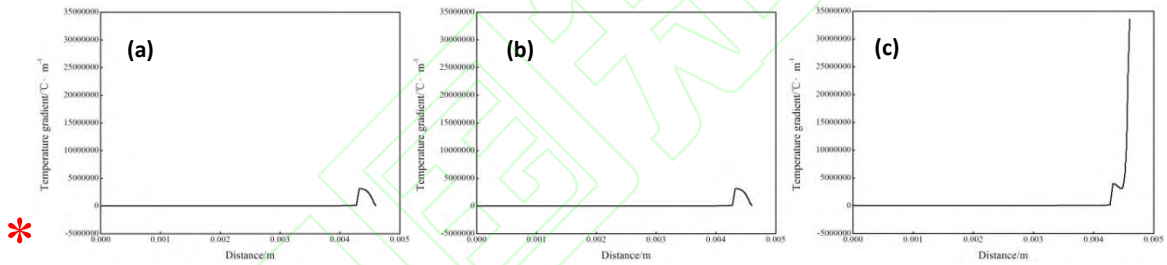


图 9 $t=0.84$ s 喷涂构件左端面 *Path1* 温度梯度分布曲线

(a) 喷涂轨迹①; (b) 喷涂轨迹②; (c) 喷涂轨迹③

Fig.9 $t=0.84$ s the temperature gradient distribution curve of the left end face *Path1* of the spraying component

图 10 为 $t=0.84$ s 喷涂构件右端面 *Path2* 温度梯度分布曲线, 观察图 10 发现, 喷涂轨迹①及喷涂轨迹②对应监测路径的温度梯度分布更为相似, 这是由于在监测路径 $0.0044\sim0.0046$ m 的区间范围内, 喷枪在涂层上方自喷涂构件左端向右端移动时, 造成了热量在喷涂构件右端面的大量积累, 故伴随着陶瓷层厚度的增大, 监测路径的温度梯度增大, 相比之下, 采用喷涂轨迹③进行喷涂作业时, 由于喷枪采用“S”型的移动, 故热量在喷涂构件喷枪移动方向温度分布更为均匀, 温度梯度较另外两种喷涂方式小。结合图 6~图 10 分析发现, 从喷涂构件左、右两端面温度分布的均匀性来看, 采用喷涂轨迹③S 型的喷涂方式进行喷涂作业时, 喷涂构件温度分布的均匀性优于另外两种喷涂方式。

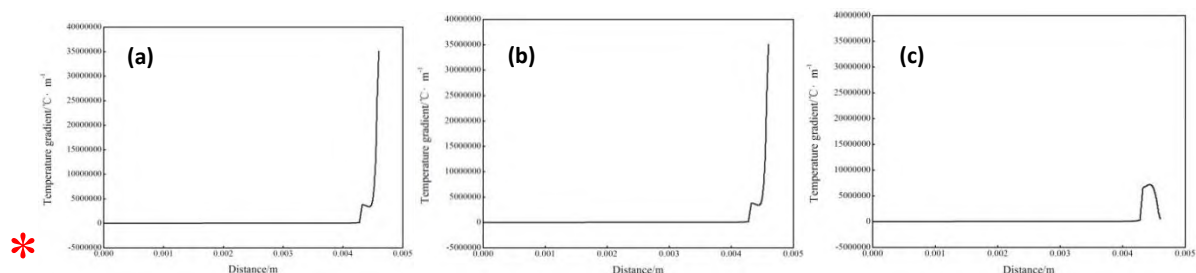


图 10 $t=0.84$ s 喷涂构件右端面 *Path2* 温度梯度分布曲线

(a) 喷涂轨迹①; (b) 喷涂轨迹②; (c) 喷涂轨迹③

Fig.10 $t=0.84$ s the temperature gradient distribution curve of the right end surface *Path2* of the spraying component

图 11 为基体监测点 A 温度随时间变化曲线图, 观察图 11 发现, 不同喷涂轨迹对应的监测点 A 温升曲线相似, 均呈现出了温度迅速升高然后迅速降低的“台阶式”变化趋势, 这是由于先沉积的涂层对后沉积的涂层存在一个预热作用; 伴随着陶瓷层厚度的增加, 基体监测点的温度波动减小, 这是由于伴随着陶瓷层厚度的增加, 陶瓷材料的热防护效果越明显, 陶瓷层以下涂层及基体的温度分布越来越均匀; 采用喷涂轨迹①及喷涂轨迹③进行喷涂作业时, 基体监测点 A 的温度波动较喷涂轨迹②小, 这是由于在进行不同类型涂层材料的喷涂作业时, 喷涂轨迹①及喷涂轨迹③对应的喷枪移动较喷涂轨迹②更为稳定, 喷涂轨迹②对应的喷枪移动方向在喷涂过渡层材料时, 与粘结层及陶瓷层材料的喷涂方向相反, 势必会造成基体温度的波动情况较另外两种喷涂轨迹明显; 在 $t=0\sim0.4$ s 的区间范围内, 基体监测点 A 的单次温升值为 38°C , 喷涂结束时刻监测点 A 的温度为 258°C , 而采用喷涂轨迹③进行喷涂时, 基体监测点 A 的单次温升值为 74°C , 喷涂结束时刻监测点 A 的温度为 291°C , 说明采用喷涂轨迹③进行喷涂作业时, 基体监测点的温升幅度较喷涂轨迹①大, 这是由于喷涂轨迹③对应的喷枪移动方式为 S 型, 在 $t=0.13\sim0.132$ s 的时间范围内, 喷枪两次移动至右端面基体监测点 A 上方, 对监测点 A 有一个二次加热作用, 而在相同时间范围内, 若采用喷涂轨迹①进行喷涂作业时, 喷枪仅一次移动至基体监测点 A 上方, 故基体监测点 A 的温升幅度相对较小。因此从等离子喷涂过程中, 基体温度的波动幅度来看, 采用喷涂轨迹①单向喷涂进行喷涂作业, 基体温度波动幅度最小。

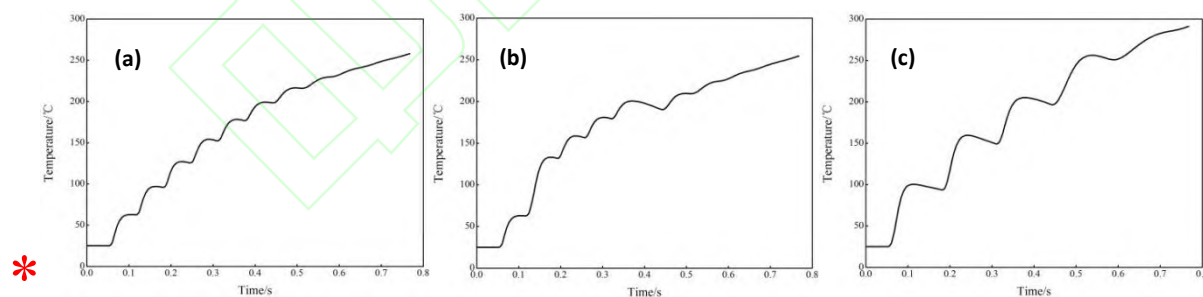


图 11 基体监测点 A 温度随时间变化曲线图

(a) 喷涂轨迹①; (b) 喷涂轨迹②; (c) 喷涂轨迹③

Fig.11 Graph of the temperature at the matrix monitoring point A changing with time

3 结论

基于有限元的思想, 利用 ANSYS 数值模拟软件, 建立了等离子喷涂 Mo/8YSZ 功能梯度热障涂层的数值模型, 通过分析了不同扫描轨迹下喷涂构件的瞬态温度场发现:

(1) 当喷涂粘结层和过渡层材料时, 由于两者的热物性参数与基体差异小, 故采用同向的喷涂

轨迹时,喷涂构件的温度最高,采用同种材料同向喷涂,异种材料喷涂方向相反的喷涂轨迹时,喷涂构件的温度次之,采用“S”型的喷涂轨迹时,喷涂构件温度最低;

(2) 当喷涂陶瓷层材料时,由于热物性参数与其他涂层差异大,故采用“S”型的喷涂轨迹时,喷涂构件的温度最高,采用同向的喷涂轨迹时,喷涂构件的温度次之,而采用同种材料同向喷涂,异种材料喷涂方向相反的喷涂轨迹时,喷涂构件的温度最低;

(3) 采用“S”型的喷涂轨迹进行喷涂作业时,喷涂构件左、右端面温度分布的均匀性优于另外两种喷涂方式;

(4) 采用同向的喷涂轨迹进行喷涂作业时,基体温度的波动幅度小于另外两种喷涂方式。

参考文献

- [1]吴大方,潘兵,王岳武,赵寿根,杨洪源,黄良.瞬态热冲击环境下超硬铝合金 7A04 的力学性能[J].金属学报,2011,47(6):757-762.
- Wu D F, Pan B, Wang Y W, Zhao S G, Yang H Y, Hang L. Mechanical properties of super-high strength Al alloy 7A04 at transient heating [J]. Acta Metallurgica Sinica, 2011, 47(6):757-762.
- [2]陈涛,惠宇,胥佳颖,邹兵林,曹学强,赵修建.纳米 8YSZ 粉的热处理对等离子喷涂涂层热震性能的影响[J].中国稀土学报,2016,34(2):189-198.
- Chen T, Hui Y, Xu J Y, Zou B L, Cao X Q, Zhao X J. Effect of heat treatment of nano 8YSZ powder on thermal shock lifetime of plasma sprayed coating [J]. Journal of the Chinese Society of Rare Earths,2016,34(2):189-198.
- [3]王引真,孙永兴,何艳玲.CeO₂ 对等离子喷涂 Cr₂O₃ 涂层抗热震性的影响[J].中国稀土学报,2000(1):76-78.
- Wang Y Z, Sun Y X, He Y L. Effect of additive CeO₂ on thermal shock resistance of plasma-sprayed Cr₂O₃ coating [J]. Journal of the Chinese Society of Rare Earths,2000(1):76-78.
- [4]马臣,李慕勤,邵德春,刘克勇,郭面煊.CeO₂ 对等离子喷涂 Al₂O₃ 涂层抗热震性的影响[J].中国稀土学报,1998(2):48-53.
- Ma C, Li M Q, Shao D C, Liu K Y, Guo M H. Effect of additive CeO₂ on the thermal shock resistance of plasma-sprayed Al₂O₃ coating [J]. Chinese journal of rare earths,1998(2):48-53.
- [5]吴朝军.热喷涂技术在我国航天领域的应用[J].金属加工:热加工,2009(18):23-27.
- Wu C J. Application of thermal spraying technology in China's aerospace field [J]. Metal Working: Thermal Working, 2009(18):23-27.
- [6]Espallargas N. Future Development of Thermal Spray Coatings: Types, designs, manufacture and applications [M]. Cambridge: Wood Head Publishing Limited, 2015:17.
- [7]Kasparova M, Zahalka F, Houdkova S. WC-Co and Cr₃C₂-NiCr coatings in low-and high-stress abrasive conditions[J]. J Therm Spray Technol, 2011,20(3):412
- [8]Kaushal G, Singh H, Prakash S. High-Temperature Erosion-Corrosion Performance of High-Velocity Oxy-Fuel Sprayed Ni-20 Cr Coating in Actual Boiler Environment[J]. Metallurgical & Materials Transactions A, 2011, 42(7):1836-1846.
- [9]Espallargas N, Berget J, Guilemany J M, et al. Cr₃C₂-NiCr and WC-Ni thermal spray coatings as alternatives to hard chromium for erosion-corrosion resistance[J]. Surface & Coatings Technology, 2008, 202(8):1405-1417.
- [10]Azarmi F, Coyle T W, Mostaghimi J. Optimization of Atmospheric Plasma Spray Process Parameters using a Design of Experiment for Alloy 625 coatings[J]. Journal of Thermal Spray Technology, 2008, 17(1):144-155.
- [11]张燕军,张超,邓思豪,廖汉林.热喷涂轨迹对涂层结构及性能影响的研究进展[J].材料导报,2016(23):47-52+70.
- Zhang Y J, Zhang C, Deng S H, Liao H L. A survey on trajectory dependences of structure and performance of thermally sprayed coatings[J]. Materials Review, 2016(23):47-52+70.
- [12]曾勇,龚俊,许宁,查文炜.倾角喷涂轨迹优化方法研究[J].机械设计与制造,2014(8):240-243.

- Zeng Y, Gong J, Xu N, Zha W W. The dip angle spray trajectory optimization method research [J]. Machinery Design & Manufacture, 2014(8):240-243.
- [13]毛杰, 邓畅光, 黄科, 邓春明, 林秋生. 喷涂轨迹对齿柱表面耐磨涂层沉积均匀性的影响[J]. 材料导报, 2013, 27(18):35-38.
- Mao J, Deng C G, Huang K, Deng C M, Lin Q S. Influence of spraying trajectory on uniformity of wear-resistant coating sprayed on teeth column[J]. Materials Review, 2013, 27(18):35-38.
- [14]孙明, 韩光超, 张海鸥. 机器人等离子喷涂轨迹间距优化及实验研究[J]. 食品科学技术学报, 2007, 25(4):15-17.
- Sun M, Han G C, Zhang H O. Experimental study and optimization of robotic plasma spraying path interval [J]. Journal of Food Science and Technology, 2007, 25(4):15-17.
- [15]潘洋, 冉全, 邹梦麒. 喷涂机器人的喷涂轨迹规划[J]. 武汉工程大学学报, 2018, 40(3):333-339.
- Pan Y, Ran Q, Zou M Q. Trajectory planning of spray painting robots [J]. Journal of Wuhan Institute of Technology, 2008, 40(3):333-339.
- [16]马淑梅, 谢涛, 周云中, 李爱平, 杨连生. 船舶外板喷涂机器人多层喷涂轨迹优化研究[J]. 机电一体化, 2017(8):24-31.
- Ma S M, Xie T, Zhou Y Z, Li A P, Yang L S. Research on optimization of multi-layer trajectory for ship outer plate painting robot [J]. Mechatronics, 2017(8):24-31.
- [17]吴洪键, 刘敏, 邓思豪, 邓春明, 牛少鹏. 涂层厚度数学模型的建立及喷涂轨迹间距优化[J]. 热加工工艺, 2017(16):136-140.
- Wu H J, Liu M, Deng S H, Deng C M, Niu S P. Establishment of coating thickness mathematic model and optimization of spacing of spray track[J]. Hot Working Technology, 2017(16):136-140.
- [18]刘贵民, 杨忠须, 魏敏, 闫涛. 超音速等离子喷涂 Mo 涂层的摩擦磨损性能[J]. 装甲兵工程学院学报, 2015, 29(6):82-88.
- Liu G M, Yang Z X, Wei M, Yan T. Friction and wear properties of Mo coatings prepared by supersonic plasma spraying [J]. Journal of Academy of Armored Force Engineering, 2015, 29(6):82-88.
- [19]尹瀛月. 平面等离子喷涂 TiO₂ 涂层数值模拟基础研究[D]. 新疆大学, 2017.
- Yin Y Y. Basic research on Numerical Simulation of Planar Plasma Sprayed TiO₂ coating [D]. Xinjiang University, 2017.
- [20]赵运才, 张佳茹, 何文. 基于 ANSYS 生死单元法的多层等离子喷涂体系仿真[J]. 金属热处理, 2017, 42(12):225-231.
- Zhao Y C, Zhang J R, He W. Simulation of multi-layer plasma spraying system based on ANSYS life-death element method [J]. Heat Treatment of Metals, 2017, 42(12):225-231.
- [21]王秋成. 航空铝合金残余应力消除及评估技术研究[D]. 浙江大学, 2003.
- Wang Q C. Research on residual stress elimination and evaluation technology of aviation aluminum alloy [D]. Zhejiang University, 2003.
- [22]鲁帅. 快速凝固技术中激冷辊材的热疲劳性能研究[D]. 北京有色金属研究总院, 2012.
- Lu S. Research on thermal fatigue performance of chilled roll materials in rapid solidification technology [D]. General Research Institute for Nonferrous Metals, 2012.
- [23]凌锡祥. 8YSZ 热障涂层隔热性能及热冲击性能的数值研究[D]. 上海交通大学, 2015.
- Ling X X. Numerical study on thermal insulation performance and thermal shock performance of 8YSZ thermal barrier coating [D]. Shanghai Jiao Tong University, 2015.
- [24]谢义英, 李强. 等离子喷涂 8YSZ 涂层在铝熔体作用下热冲击行为的数值模拟[J]. 表面技术, 2018(4).
- Xie Y Y, Li Q. Numerical simulation of thermal shock behavior of plasma spraying 8YSZ coating under the action of aluminum melt [J]. Surface Technology, 2018(4).