

doi: 10.11933/j.issn.1007-9289.20190116001

等离子喷涂过程基体温度场分布的数值模拟

丁述宇¹, 马国政¹, 丁发军², 王海斗¹, 吴治永³, 徐滨士¹

(1. 陆军装甲兵学院 装备再制造技术国防科技重点实验室, 北京 100072; 2. 中国民用航空飞行学院, 广汉 618300; 3. 中国科学院 电工研究所, 北京 100190)

摘要: 等离子喷涂的热源温度高, 涂层成形区域温度梯度大、热量累积快, 涂层中常存在较大的残余应力。研究通过数值模拟并辅以必要的试验测试研究了等离子喷涂过程基体表面热量累积行为: 建立了二维静态喷枪加热模型, 研究了在不同喷涂距离时基体表面温度场分布规律; 建立了移动热源加热模型, 研究了在不同喷枪移动速度和扫描遍数时基体热量累积规律。结果表明: 在静态喷枪加热作用下, 基体温度场呈中间高两端低的对称分布状态; 随着喷涂距离减小, 基体表面最高温度与平均温度显著升高, 温度梯度变化明显, 高温区域半径显著增大。在动态喷枪加热过程中, 基体左右边界热量累积现象明显, 且喷枪移动速度越快, 基体表面热量累积越少, 温度分布梯度越小; 随着喷枪扫描遍数的增加, 基体中心区域温度呈波浪式上升, 温度增长幅度逐渐变小。

关键词: 热量累积; 温度分布; 等离子喷涂; 数值模拟

中图分类号: TG174.442

文献标志码: A

文章编号: 1007-9289(2019)02-0098-11

Numerical Simulation on Temperature Distribution of Substrate During Plasma Spraying

DING Shuyu¹, MA Guozheng¹, DING Fajun², WANG Haidou¹, WU Zhiyong³, XU Binshi¹

(1. National Key Laboratory for Remanufacturing, Army Academy of Armored Forces, Beijing 100072, China; 2. Civil Aviation Flight University of China, Guanghan 618300, China; 3. Institute of Electrical Engineering, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: The temperature of heat sources is high during plasma spraying. Coating forming area has the feature of large temperature gradient and fast heat accumulation, therefore, large residual stress is often induced by this factor in coatings. The numerical simulation and experimental measurement were implemented to investigate the heat accumulation behavior on the substrate surface during plasma spraying. A 2D model of static heating model was established by numerical simulation, and the temperature distribution was studied at different spraying distances. The moving heat model was established and the heat accumulation was studied at different moving speeds and scanning numbers. The results show that the substrate temperature presents symmetrical distribution. The temperature in the middle is high and the two sides are low in the static heating model. With the decrease of spraying distance, the maximum and average temperature significantly increases. The temperature gradient also significantly changed, and the radius of the high-temperature region increases. In the move heating model, the heat accumulation is obvious at the left and right boundaries of the substrate. The faster the spray gun moves, the less heat accumulation and the smaller temperature gradient on the substrate. With the increase of the scanning number of the spray gun, the temperature in the central region rises in a wavy manner and the temperature increment gradually declines.

Keywords: heat accumulation; temperature distribution; plasma spraying; numerical simulation

收稿日期: 2019-01-16; 修回日期: 2019-04-02

通信作者: 马国政 (1984—), 男 (汉), 副研究员, 博士; 研究方向: 再制造工程、表面工程与摩擦学; E-mail: magz0929@163.com

基金项目: 国家自然科学基金 (51675531, 51535011); 北京市自然科学基金 (3172038)

Fund: Supported by National Natural Science Foundation of China (51675531, 51535011) and Beijing Municipal Natural Science Foundation (3172038)

引用格式: 丁述宇, 马国政, 丁发军, 等. 等离子喷涂过程基体温度场分布的数值模拟[J]. 中国表面工程, 2019, 32(2): 98-108.

DING S Y, MA G Z, DING F J, et al. Numerical simulation on temperature distribution of substrate during plasma spraying[J]. China Surface Engineering, 2019, 32(2): 98-108.

0 引言

等离子喷涂热源温度高, 能够喷涂金属、陶瓷等多种材质材料, 赋予零件良好的综合性能, 延长装备的服役寿命^[1-3]。在喷涂过程中, 高温热源与涂层/基体体系之间的热交互作用, 使体系积累过多的热量, 涂层残余应力累积量大, 涂层易开裂与失效, 最终影响成形涂层的质量^[4-5]。因此, 掌握涂层/基体空间温度场的分布规律, 对空间温度场进行实时监控, 有助于优化喷涂工艺, 改善涂层喷涂质量。

数值模拟作为一种低成本、高效率的研究方法, 能够实时监控空间温度场的变化规律, 并且动态显示体系热量累积程度^[6-7]。针对涂层成形过程温度场变化规律, Selvan 等^[8-9]建立三维静态喷枪模型模拟等离子射流与基体的热交互过程, 预测加热过程基体的空间分布特性。在喷涂前对基体进行预热处理, 随着预热时间的延长, 传递到基体的热源热量多, 基体温度也随之上升, 便于去除基体表面吸附质, 提高涂层与基体的结合性能^[10-11]。Bolot 等^[12]早期研究喷枪以简单运动轨迹(即沿基体横向与纵向中轴线直线运动)对基体加热, 获取基体表面最高温度与平移速度和喷涂距离之间成反比的关系。Yi 等^[6]结合模拟与试验探究喷涂过程中不同位置喷枪单道扫描对基体的热流密度输入变化, 以及整个喷涂过程基体的温升变化。Liu 等^[13]研究喷枪在沿基体中轴线直线运动喷涂十层涂层过程中基体表面温度变化情况。Zhang 等^[14]以对温升敏感的有机涂层为对象, 用数值模拟方法研究在移动热源加热作用下, 涂层/基体温度随时间的变化过程, 研究体系不同位置温度场的变化规律。Bolot 等^[15]建立移动热源加热模型, 获取不同时间基体表面与截面空间温度场分布云图, 了解单遍喷涂过程基体表面的热量累积规律。在此基础上, 蔡振华等^[16]构建喷枪运动轨迹与涂层成形过程传热行为的耦合模型, 以此探究不同喷涂轨迹对基体热影响。前期学者主要是针对单遍喷涂与固定喷枪移动速度进行研究, 对不同喷枪移动速度与扫描遍数下基体热量累积过程的研究还比较少。

文中以数值模拟的方式分别研究静动态喷枪作用下, 基体温度场空间分布及动态变化规律。在静态喷枪加热作用下, 通过改变不同喷涂距

离, 探究基体空间温度场分布。而对动态喷枪加热作用的研究, 主要是改变喷枪移动速度与扫描遍数, 对空间中温度场进行实时监控, 掌握喷枪在运动轨迹不同位置与时间下基体空间温度场分布。基于静动态喷枪对基体的热影响, 预测基体温度场的演变规律及发展态势, 并根据数值模拟的结果, 可用于指导控制涂层/基体热量累积的方法, 寻找优化的喷涂工艺参数。

1 射流与基体热交互过程模型建立

1.1 模型假设

(1) 等离子喷涂是声、光、热、电、磁等多物理场耦合复杂过程。假设热交互模型仅考虑喷枪出口至基体空间区域的热作用, 忽略喷枪内部复杂多物理场耦合作用。

(2) 假设喷枪出口处热源的温度与速度均为恒定常数。

(3) 假设初始的状态下基体温度与周围大气保持一致, 且基体形状为平面, 不考虑基体表面粗糙度对温度场演变的影响。

(4) 假设基体为固体, 不考虑在加热过程中基体的熔化。

(5) 等离子喷涂过程基体表面易形成一层氧化膜, 不考虑膜层的导热性能及膜与基体之间的界面热阻对基体温度场的影响。

(6) 等离子喷涂过程基体温度上升主要源于等离子射流加热, 而喷涂粒子对基体的温升影响相对较小, 忽略喷涂粒子对基体温度变化影响。

1.2 控制方程

等离子射流与基体的热交互模型中, 分别涉及喷枪出口到基体上表面所在的流场区域, 以及基体所在的固体区域。在流场区域中, 考虑连续方程、动量方程与能量守恒方程的共同作用研究射流空间温度场分布, 在固体区域主要考虑能量方程与导热方程研究基体空间温度场的变化规律, 具体表达式^[17-18]如下:

(1) 连续方程

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{V}) = 0 \quad (1)$$

(2) 动量方程

$$\frac{\partial(\rho V)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho V V) = -\nabla P + \nabla \cdot \tau + \rho \cdot g \quad (2)$$

(3) 能量方程

$$\frac{\partial(\rho H)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho V H) = \nabla \cdot (k \nabla T) + \frac{DP}{Dt} - S_R \quad (3)$$

焓值 H 的定义为:

$$H = h + \frac{1}{2} V^2 \quad (4)$$

理想气体方程为:

$$P = \rho RT \quad (5)$$

(4) 导热方程

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} (\lambda \frac{\partial T}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (\lambda \frac{\partial T}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z} (\lambda \frac{\partial T}{\partial z}) + \Phi \quad (6)$$

式中: ρ 为气体密度; V 为速度矢量; τ 为切应力张量; P 为气体压力; g 为重力加速度; λ 为热导率, T 为温度, S_R 为源项, H 为焓值; t 为时间, Φ 为单位时间单位体积的内热源生成热。

1.3 几何建模与网格划分

1.3.1 二维静态喷枪模型

基于模型假设与物理模型的抽象简化, 建立射流与基体的热交互模型, 如图 1 所示为 ICEM CFD 划分的有限元网格。蓝色网格为流场区域, 绿色网格为固体区域, 基体上表面 Hotsurface 作为流固耦合区域, 流场左右边界 Outlet 为流场出口。涉及的对象主要有喷枪出口为圆面, 在二维模型中为 Hotin 即尺寸 6 mm 的线段, 基体为轴对称圆柱体, 在二维模型中为 Solid Zone 尺寸 100 mm×5 mm 的长方形。

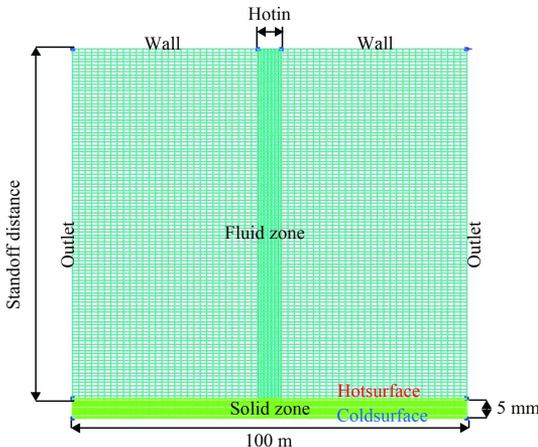


图 1 二维静态喷枪加热模型

Fig.1 Heating model of two-dimension static spray gun

建立不同喷涂距离的二维加热模型, 喷涂距离尺寸从 60~100 mm 变化, 其中喷涂距离每间隔 10 mm 建立一个模型。并对几何模型进行结构化网格划分, 不同喷涂距离模型的网格数与节点数根据模型尺寸有所不同, 喷涂距离为 60 mm 时, 网格数量为 7981, 节点数量为 7722。同一喷涂距离下网格数量比节点数量多 200, 喷涂距离每增加 10 mm, 两种数量均增加 1000。

1.3.2 动态喷枪加热模型

动态喷枪的加热模型的研究主要是通过改变热源的运动轨迹, 研究对象主要为基体, 其尺寸为 400 mm×200 mm×5 mm 的长方体。有限元网格划分过程中, 整个基体设置为固体区域, 四面体网格数量为 36 015 个, 网格节点为 32 000 个。基体上表面设置为加热面, 下表面设置为冷却面, 分别用于后期加载移动热流密度与冷却系数, 四周设置为壁面, 探究在不同喷涂工艺参数作用下基体空间温度场的分布规律以及热量累积过程。

2 模型参数加载

2.1 静态喷枪计算域与边界条件参数加载

二维静态喷枪加热模型在 Fluent 流体力学软件中进行参数加载, 二维模型的求解器设置、物理模型设置、材料属性设置和边界条件设置依据实际情况进行设置。求解器类型设置为压力基, 时间为瞬态; 考虑等离子射流经过的流场区域, 因此物理模型设置包括能量守恒方程与湍流模型, 其中湍流模型为 $k-\epsilon$ 模型; 材料属性设置中流场区域为 air, 固体区域为 Steel(45 钢), 不同材质的密度、比热容、热导率及粘性系数如表 1 所示。

表 1 不同材质热物性参数

Table 1 Thermophysical properties of different materials		
Material	Air	Steel
Density / ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	1.125	7850
Specific Heat / ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)	1006.23	480
Thermal conductivity / ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)	0.0242	16.27
Viscosity / ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)	1.7894×10^{-5}	

模型边界条件为: 在喷枪出口处设置为 velocity-inlet, 即为热源进入流场中的入口, 温度恒定为 13 500 K, 速度为 1000 m/s; 二维模型中流场区域左右边界及三维流场区域圆柱面设置为 Pressure-

outlet, 绝对压力值设置为 0, 流场周围温度为 300 K, 不考虑辐射的影响; 基体上表面设置为 Wall, 壁面类型为静态壁面, 热边界条件设置为流固耦合 Couple 模型, 下表面也设置为 Wall, 为了模拟基体与周围大气的热对流及试验中的冷却过程, 在热边界条件上设置为对流换热 Convection, 传热系数为 $10 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$, 基体初始温度为 300 K。计算时间步长为 $1\text{e-}05$, 总步数为 600。

2.2 动态喷枪扫描参数与热源参数加载

动态喷枪加热模型的建立主要是研究不同喷涂工艺参数作用下, 监控基体温度场的变化与热量累积规律。动态喷枪模型在 CFX 软件中进行参数加载, 但该模型中不考虑流体区域, 将静态喷枪热源在流场区域的作用以热流密度的形式加载至基体表面, 通过编写 Heat flux 运动轨迹方程并加载在模型中, 模拟喷枪在基体表面周期性加热运动。在参数设置中, 求解器设置、物理模型、材料属性在固体区域与静态喷枪加热模型一致。边界条件设置中, 基体上表面设置为 Wall, 在近壁面处加载热流密度 Heat flux, 下表面设置也为 Wall, 传热系数为 $10 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$, 同时将辐射对基体的热影响作为等效热对流考虑, 周围大气温度为 300 K。

结合静态喷枪加热模型模拟研究及前期研究学者的研究^[15,19] 将近壁面热流密度 Heat flux 的表达式定义为:

$$\phi(r) = \phi_0 / [1 + (\frac{r}{R_0})^2] \quad (7)$$

$$R_0 = 11(d/80)^{1.76} \quad (8)$$

式中 ϕ_0 为最大热流密度, r 为基体表面径向上距离射流中心点的距离, R_0 为特定喷涂距离下的射流最大扩展半径, d 为喷涂距离。动态喷枪加热模型的喷涂距离 d 固定为 100 mm, 最大热流密度 ϕ_0 为 $0.99 \text{ MW}/\text{m}^2$, 射流最大扩展半径 R_0 为 20 mm。

移动热源在基体表面的运动轨迹如图 2 所示, 在单遍扫描过程中需经过不同的位置节点 i , i 的变化范围为 0~20, 移动热源在水平方向运动过程中超过基体左右边界 20 mm, 起始位置距离基体下边界距离为 20 mm, 在垂直方向每次上升距离为 20 mm。

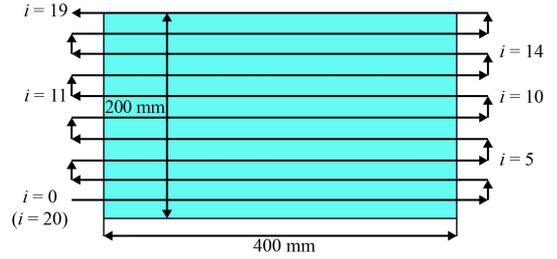


图 2 移动热源运动轨迹示意图

Fig.2 Schematic diagram of moving heat source trajectory

因此, 移动热源按照既定轨迹运动过程中, 热源所在的位置与加热时间密切相关。喷枪移动速度为 v , 水平方向每次从左到右移动时间为 t_h , 垂直方向每次从下至上移动时间为 t_v , 由于喷枪在基体表面运动为匀速运动, 其表达式为:

$$t_h = \frac{440}{v} \quad (9)$$

$$t_v = \frac{20}{v} \quad (10)$$

在不同位置节点处 i 喷枪所运动的时间对应为 t_i , 具体表达式如下:

$$t_i = \begin{cases} \frac{i+1}{2}t_h + \frac{i-1}{2}t_v, & i = 0, 1, 3, 5, \dots, 19 \\ \frac{i}{2}(t_h + t_v), & i = 0, 2, 4, 6, \dots, 18 \\ 10t_h + 18t_v, & i = 20 \end{cases} \quad (11)$$

3 结果与讨论

3.1 静态喷枪作用下基体空间温度场分布

针对二维静态喷枪加热模型, 获取流场空间中射流温度场分布云图如图 3 所示。等离子焰流在流场区域的温度场分布成轴对称分布, 靠近喷

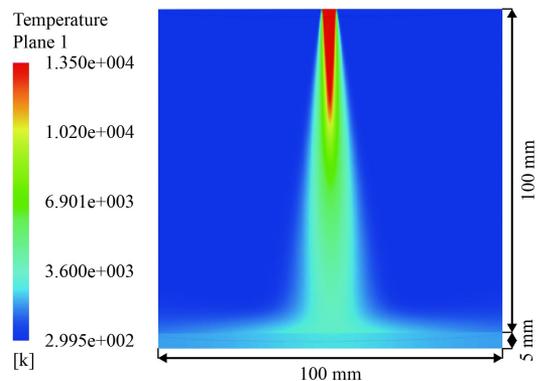


图 3 二维喷枪加热模型 YZ 平面射流温度分布图

Fig.3 Temperature distribution diagram of plasma jet in YZ plane jet in the 2D heating model

涂出口(热源入口)温度越高,远离喷枪出口温度越低。通过等离子射流与基体之间的冲击换热,基体温度逐渐呈现升高的趋势,基体不同区域的温度梯度变化明显。

图4(a)为不同喷涂距离作用下的二维基体表面温度分布图,基体表面温度以基体中心线为轴成对称分布,中间温度最高,沿X轴向基体边缘温度不断下降。当喷涂距离为60 mm时,基体表面最高温度为952 K,最低温度为585 K;与喷涂距离为60 mm的温度场相比,喷涂距离为100 mm时,最高温度下降了234 K,最低温度下降了107 K。随着喷涂距离减小,在基体表面最高温度增加的同时,基体表面平均温度随着整体温度的升高而显著增加。定义 $T > 573$ K为高温区域,从图中可明显看出不同喷涂距离在该区域的作用半径随着喷涂距离减小而增大。当喷涂距离在60~80 mm区间变化时,基体表面整体温度分布曲线大致相近;随着喷涂距离的继续增加,整体温度分布曲线下降幅度明显增大,且基体表面温度梯度变

小。图4(b)为基体截面温度分布图,可明显看出在靠近射流一侧深度为0.7 mm左右的基体截面区域温度梯度变化明显,并且喷涂距离越小,截面温度梯度变化越明显。而远离温度区域,即靠近基体背面位置,温度在300 K左右波动。

通过分析二维静态模型不同喷涂距离对基体表面温度场的影响,可明显得出喷涂距离与温度场大小成反比。而基体温度场与加载高斯热源数值大小相关,即喷涂距离与高斯热源数值成反比。同理,保持其他参数不变,喷枪口径尺寸越小,喷枪对等离子射流的机械压缩越强,则高斯热源与喷枪口径成反比;而喷枪功率越大,单位时间电能转化为热能数值高,则高斯热源与喷枪功率成正比。

3.2 动态喷枪基体温度场分布及热量累积特性

移动热源按照图2的轨迹对基体进行加热,如图5所示,喷枪速度为500 mm/s,选取喷枪移动过程中6个不同时间段(间隔时间为1.6 s)的基体表面温度分布图,随着喷涂时间的延长,基体表面的温度不断上升。当 $t=0.45$ s时,移动热源沿着基体下边界从左向右运动,并对基体开始进行加热。当时间为2.05 s时,与初始状态相比在垂直方向上运动两个步长0.04 m,热源运动方向从基体左边界向右边界运动。当时间 $t=3.65$ s时,云图中呈现的为移动热源在垂直方向上运动对基体的热影响。当时间 $t=5.25$ 、6.85和8.45 s时,分别代表在垂直坐标0.12、0.16以及0.2 m处,移动热源从右到左运动过程中基体温度场的变化趋势,基体表面最高温度为348.6 K。通过云图可以明显看出基体左右边界温度场数值相对较高,热量累积现象明显。

在单遍扫描结束后,分别提取基体水平与垂直方向上6处的位置的温度曲线,探究基体表面温度场的分布状态。如图6(a)为基体垂直位置 $Y=0.05$ 、0.1和0.15 m处,基体表面水平方向温度分布为左右边界高,中间低规律,原因是热源运动轨迹在基体左右边界处有垂直向上的运动过程,因而在基体左右边界处较其他位置加热时间长,导致热量累积明显。基体中轴线位置($Y=0.1$ m)整体温度均高于其他两个位置的温度;而 $Y=0.05$ m处温度梯度变化最大, $Y=0.15$ m处温度梯度最小,主要是在单遍扫描结束时,移动热源离加热 $Y=$

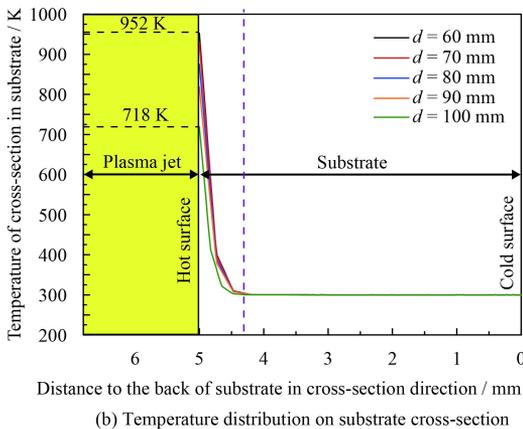
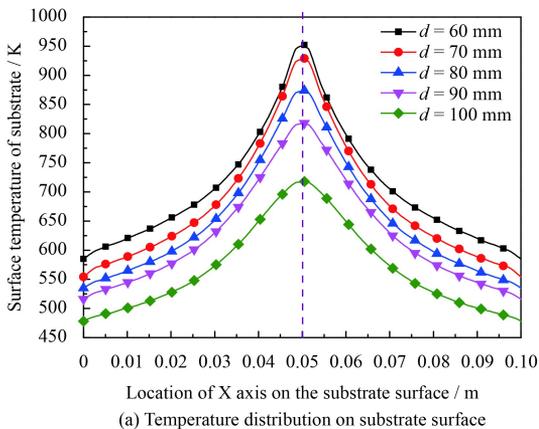


图4 二维基体温度场分布

Fig.4 2D temperature distribution of the substrate

0.05 m 处比 $Y=0.15$ m 处的时间长, 因此 $Y=0.05$ m 处与周围大气自然换热时间较长, 温度梯度变化小。图 6(b) 为基体水平位置 $X=0.1, 0.2$ 和 0.3 m 处的温度分布, 基体表面垂直方向温度分布呈中间高, 上下边界低的规律, 证明高温区集中分布

于基体中间部位, 原因是热源在运动过程中与中间区域的热交换时间最长; 且从图中可知基体上边界处的温度略高于下边界, 因为热源远离下边界的时间较长, 导致下边界与周围热交换的时间长, 温度下降。

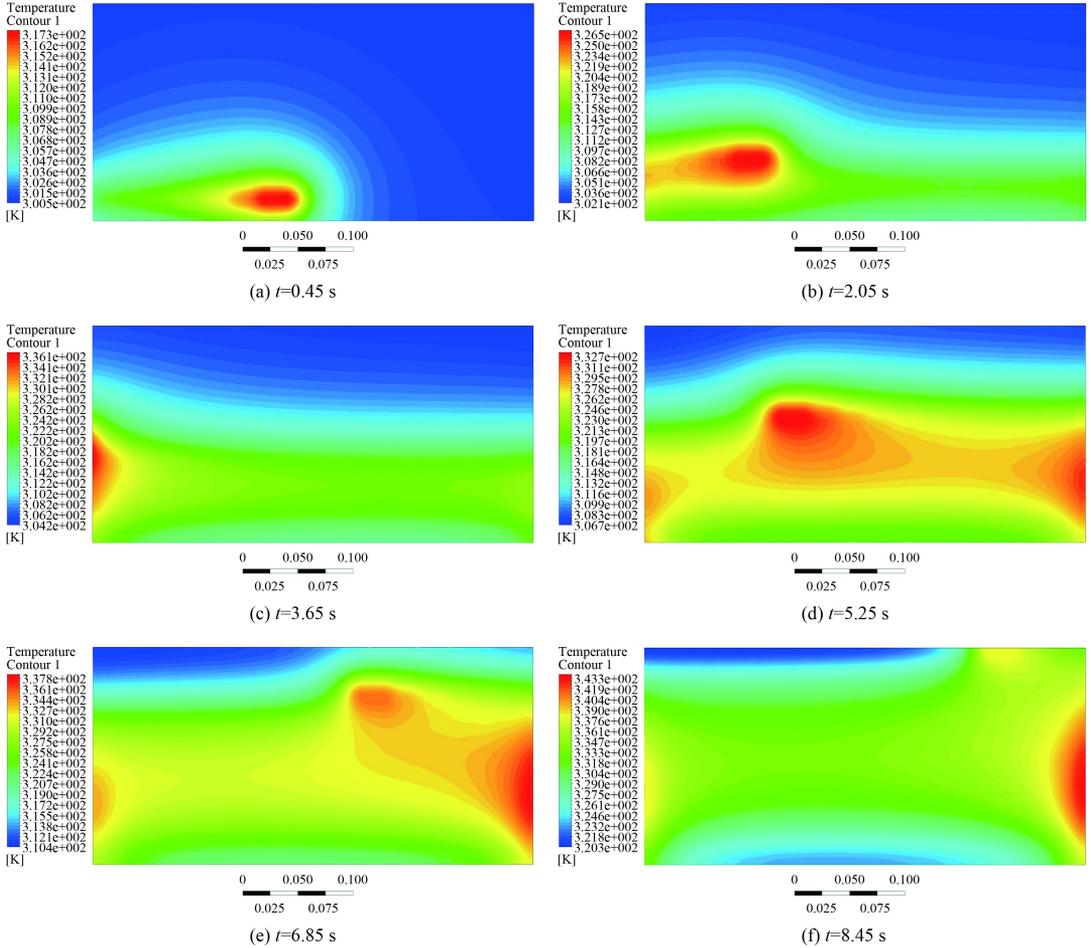


图 5 移动热源运动过程 6 个不同时间段基体表面温度场分布状态

Fig.5 Temperature distribution of substrate surface in six different time during the moving heating process

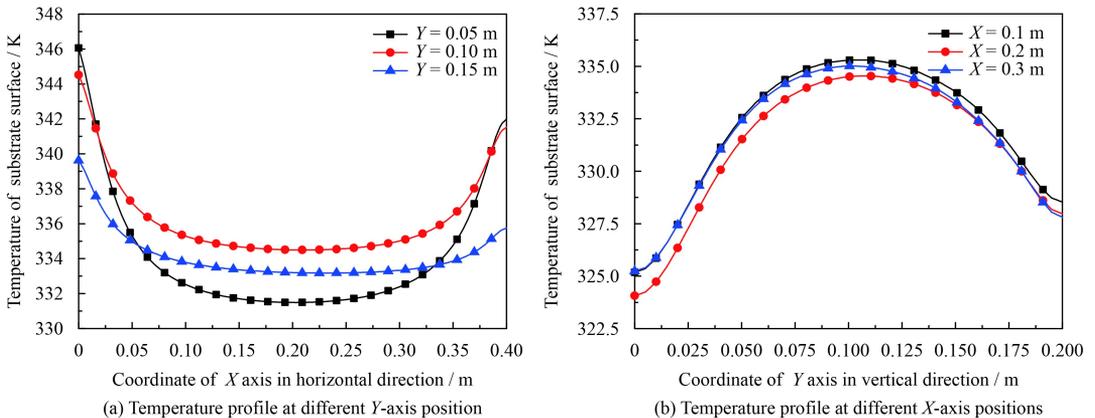


图 6 移动热源作用下不同位置基体温度场分布图

Fig 6 Distribution diagram of substrate temperature at different positions under the action of moving heat source

3.3 不同扫描速度对基体热量累积的影响

针对不同喷枪移动速度对基体温度场分布进行研究,并对喷涂过程的基体温度进行监控。图7(a)与图7(b)为不同喷枪移动速度作用下单个循环后,基体水平方向中心线($X=0.2\text{ m}$ 处)与垂直方向中心线($Y=0.1\text{ m}$ 处)的温度分布曲线图。可知,在一定范围内,喷涂移动扫描移动速度越慢,基体表面温度越高,同一位置的温度梯度越大,但整体温度分布规律一致为水平方向温度左右边界高中间低,而垂直方向中间高上下边界低。基体中心线位置在不同速度作用下,整体温度之间差距随着速度的增加逐渐减小,速度为 200 mm/s 的 500 mm/s 之间整体温度差距约为 60 K ,而后分别减小为 15 K 与 10 K ,且温度梯度变化程度小。

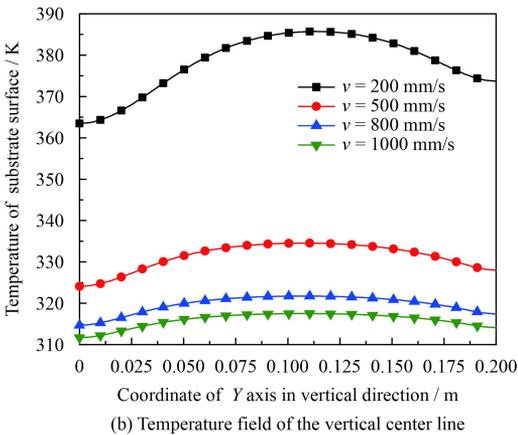
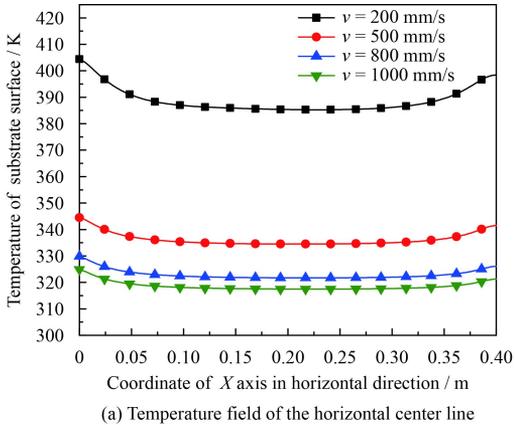


图7 不同喷枪移动速度的基体表面温度场分布

Fig.7 Temperature distribution of substrate surface with different moving speeds of spray gun

将基体上表面 $15\text{ mm}\times 15\text{ mm}$ 中心区域作为温度监控区域,以此评估基体热量累积行为。如图8所示,分别为热源处于不同移动速度时监控区域

平均温度随时间的热量累积过程。单次循环周期中,热源在基体表面周期性进行10个往复加热,每个往复运动过程中离监控区域最近处温度达到峰值,离监控区域最远处温度最小,但从整体上看监控区域温度呈波浪式上升。温度场中存在波动性与上升幅度大的峰值点,主要是热源在每次往复运动中存在最接近监控区域的时间段,导致对监控区域传输的热流密度较其他时间多。当移动速度为 200 mm/s 时,喷涂前后温度上升幅值最大,温度梯度大。随着移动速度的增加,整体温度上升幅值逐渐降低,当 $v=1000\text{ mm/s}$ 时基体中心区域温度变化幅度为 $v=200\text{ mm/s}$ 的16%。因此,在实际喷涂过程中为了减小对基体过度的热量累积可在喷涂工艺参数方面,增加喷枪的移动速度。

为了证明模拟结果的可靠性,基于模拟加载参数展开相应试验验证。非接触式红外测温仪用于测量基体表面喷涂后不同位置的温度值,PT100热电阻连接待测物体并通过MIK-9600无纸记录仪测量读取喷涂过程基体中心区域的温度随时间变化规律。喷枪以不同移动速度对基体加热,基体水平方向中心线与垂直方向中心线在扫描一遍后的温度分布如图9所示。试验测量值显示基体水平方向中心线温度分布为左右边界高中间低,垂直方向中心线温度以中心线为轴对称分布,在温度分布规律上数值模拟与试验测量呈现相同的变化规律,结果也比较吻合。即喷枪移动速度越快,对应的温度越低,并且温度梯度变化缓和。数值模拟与试验测量在温度场的数值大小对比上,在喷枪加热作用后迅速测量基体不同位置温度值存在一定时间差,同时基体与空气进行热量交换,导致两者之间在数值上存在一定误差。

图10为喷枪不同移动速度下基体中心区域平均温度在喷涂过程中随时间的变化趋势。整体呈现喷枪移动速度越快,基体中心区域温度上升幅度越小,且随着加热时间延长,基体中心区域的温度上升速度开始逐渐变缓的规律。试验测量与模拟结果对比可知在温度变化趋势上,试验测量也呈现与模拟结果相同的规律,即随喷涂时间延长,基体温度不断上升,并且在喷涂后期温度上升趋势变缓。但由于无纸记录仪精度为每秒测试一个温度值,无法实现小步长,高精度的测量效果。并且由于喷枪速度较快,加热运动时间较

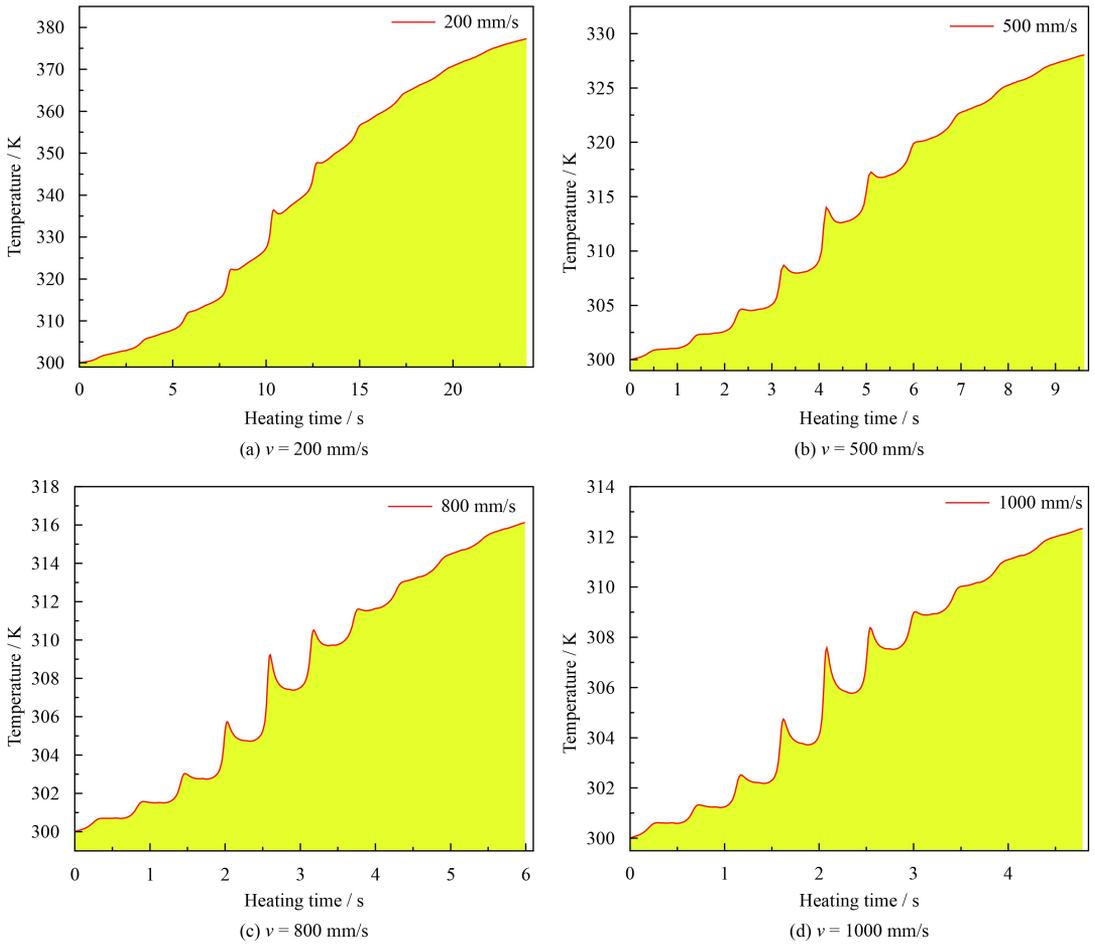


图 8 不同扫描速度下基体中心区域平均温度

Fig.8 Average temperature of the central region of the substrate at different scanning speeds

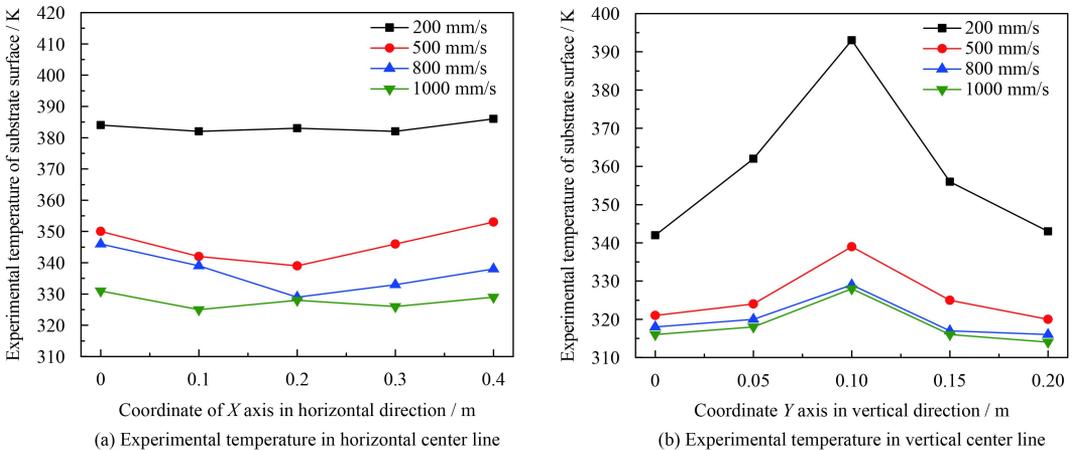


图 9 不同喷枪移动速度的基体表面试验测量温度分布

Fig.9 Experimental temperature distribution of substrate surface with different moving speeds of spray gun

短, 温度变化曲线仅由几个步长间距大的温度点绘制成, 数据样本的数量与精度不足导致实际测量温度变化趋势没有呈现模拟中“波浪式”上升的状态。而在喷涂过程温度数值大小方面, 两种方式测量的温度值相近, 但试验测量的温度数值比

模拟监控的数值大一些, 误差为 3% 左右, 主要是模拟过程进行假设简化, 并且实际测量过程也存在有一定的误差。

基于上述研究结果可知, 模拟的模型得出的结论基本符合实际喷涂加热中温度变化规律, 可

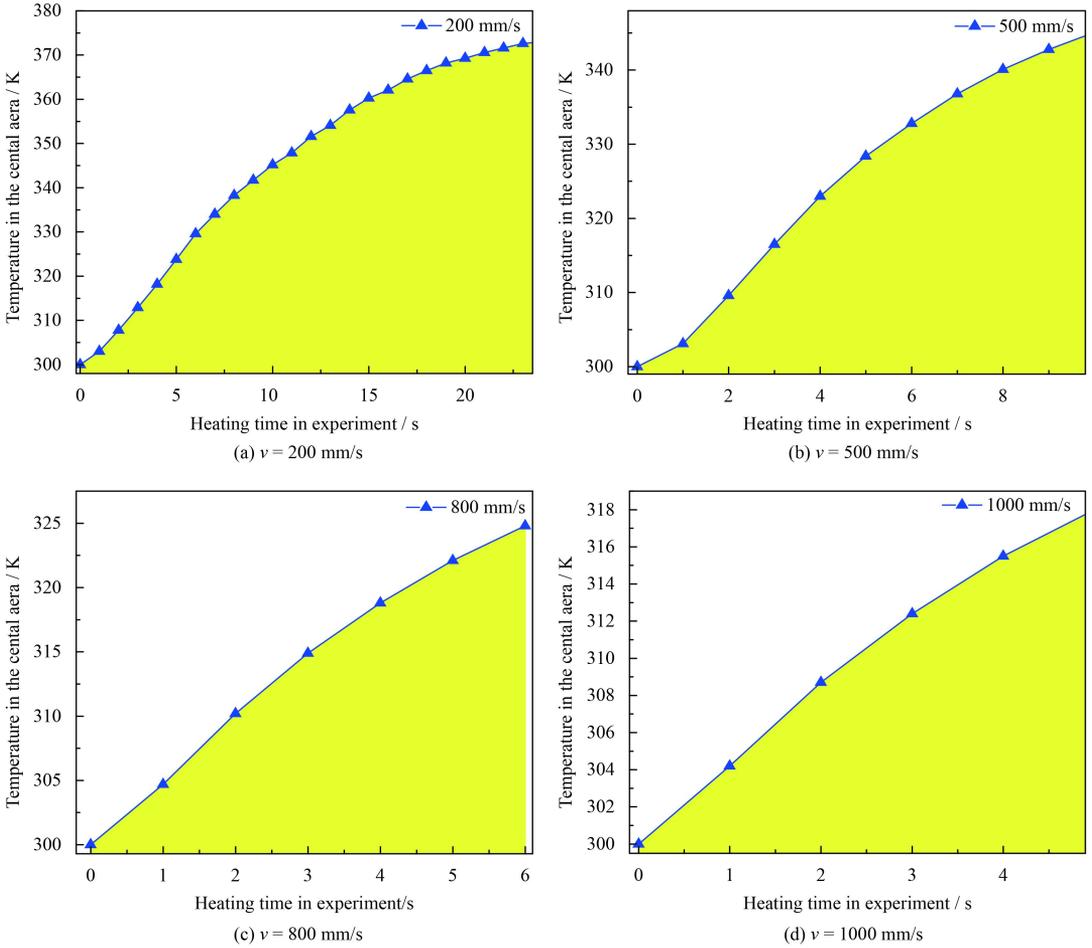


图 10 不同扫描速度下基板中心区域试验测量平均温度

Fig.10 Average experimental temperature of the central area of the substrate at different scanning speeds

基于现有的模型进一步探究喷涂工艺参数(扫描遍数等)对基板温度变化与热量累积的影响。

3.4 不同扫描遍数对基板热量累积的影响

基于不同喷枪移动速度对基体的热影响结果,以移动速度为 500 mm/s 的热源为研究对象,研究扫描遍数对基板热量累积的影响。通过对基板中心区域的温度监控如图 11 所示,7 个 Stage 分别代表不同扫描遍数(1~7 遍)。随着扫描遍数的增加,监控区域的温度呈波浪式上升,但温度增长幅度逐渐降低。为了定量掌握扫描遍数与温度变化关系,提取相应参数进行多项式拟合。图 12 为扫描遍数与其对应的温度差之间的关系,拟合多项式表达式为:

$$\Delta T_i = 51.57 - 23.67i + 11.54i^2 - 2.72i^3 + 0.29i^4 - 0.012i^5 \quad (12)$$

式中: i 为扫描遍数, ΔT_i 为温度增长幅度。

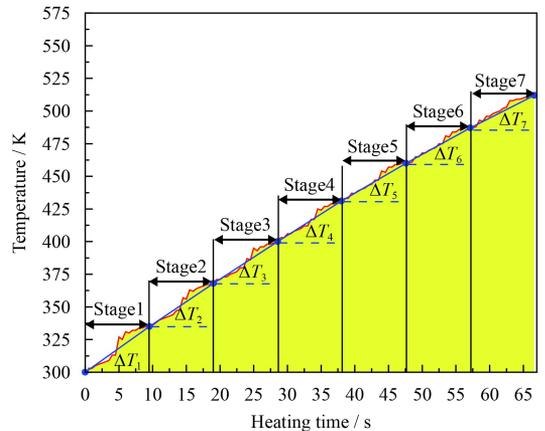


图 11 不同扫描遍数下基板中心区域热量累积图

Fig.11 Heat accumulation diagram of the central region of the substrate at different scanning numbers

随着扫描遍数的增加,温度增长幅度不断减小最终将为 0,届时基板温度将不再上升,也就是热输入量与热损量处于平衡状态。当温度达到临界值时,涂层由于热量累积存在较大残余应

力, 影响最终涂层质量。因此, 针对模拟结果预测不同扫描遍数下热量累积规律, 选择合适的喷涂扫描遍数, 为涂层成形创造良好的温度环境。

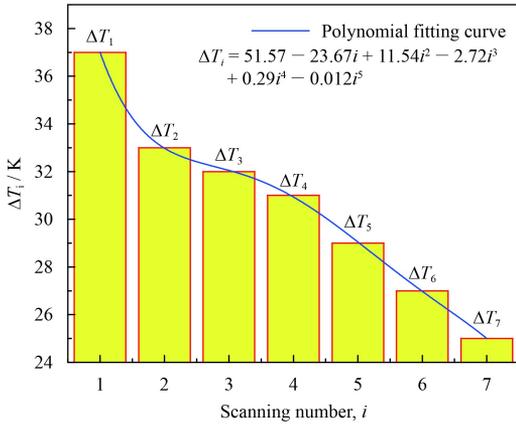


图 12 不同扫描遍数下基体温度差值变化

Fig.12 Variations of substrate temperature difference under different scanning numbers

在动态喷枪移动模型中综合考虑喷涂距离、喷枪移动速度与扫描遍数对基体温度场的影响, 得出喷涂距离对基体温度场影响最大。喷涂过程基体温度场大小取决于高斯热源大小与加热时间, 而喷涂距离决定作用在基体表面的高斯热源数值大小, 喷枪移动速度与扫描速度决定热源加热时间。但在实际的喷涂过程中由于机械手的移动速度与基体热平衡等因素影响, 喷枪移动速度与喷枪扫描遍数造成加热时间差异, 没有喷涂距离导致高斯热源变化对基体温度变化程度高。

在模型假设中忽略喷涂粒子对金属基体温度的影响, 因此文中研究结果适用于大多数金属材料粒子喷涂过程。而当喷涂粒子材质为陶瓷时, 因热导率、热扩散系数等热物性参数与金属基体差异较大, 需对模型进行重新修正。

4 结论

通过等离子喷涂空间温度场分布与热量累积规律的数值模拟研究, 从微观角度呈现了喷涂过程中喷涂距离、喷枪移动速度与扫描遍数等对基体热量累积的影响, 得到如下结论:

(1) 二维静态喷枪加热模拟表明基体温度场呈中间高四周低对称分布状态, 二维温度场以基体中心线为轴对称分布。随着喷涂距离减小, 基体表面温度增加明显, 截面温度梯度变大, 表面高温区域半径变大。

(2) 动态喷枪加热模型可显示在不同喷涂时间后基体不同区域温度场的分布状态。温度分布规律为水平方向左右边界高中间低, 垂直方向上下边界低中间高, 且左右边界热量累积明显, 与试验结果较为吻合。

(3) 热源以不同移动速度运动对基体的热量输入量不同, 移动速度越快, 对基体加热时间越短, 则热量累积量越小。通过监控基体中心区域平均温度, 温度呈波浪式增长趋势, 且喷枪移动速度越快, 喷涂前后温度上升幅度越小, 温度梯度越小。通过试验验证, 中心区域平均温度变化幅度与数值大小与模拟结果基本吻合。

(4) 不同扫描遍数作用下, 基体中心区域整体温度呈上升趋势, 但每增加一遍温度差幅值在递减。通过多项式拟合, 获取扫描遍数与其对应温度差的定量表达式, 可预测温度最终增长到一定数值后将不再变化。

参考文献

- [1] VARDELLE A, MOREAU C, AKEDO J, et al. The 2016 Thermal Spray Roadmap[J]. *Journal of Thermal Spray Technology*, 2016, 25(8): 1376-1440.
- [2] An Y, Li S, HOU G, et al. Mechanical and tribological properties of nano/micro composite alumina coatings fabricated by atmospheric plasma spraying[J]. *Ceramics International*, 2017, 43(6): 5319-5328.
- [3] DONG S, SONG B O, HANSZ, et al. Improvement in the microstructure and property of plasma sprayed metallic, alloy and ceramic coatings by pre-/during-treatment of dry-ice blasting[J]. *Surface & Coatings Technology*, 2013, 220(5): 199-203.
- [4] HEINIG K P, STEPHENSON D A, BEYER T G, et al. Thermal response of aluminum engine block during thermal spraying of bores: comparison of FEA and thermocouple results[J]. *SAE International Journal of Materials and Manufacturing*, 2017, 10(3): 360-365.
- [5] BAO Y, GAWNE D T, GAO J, et al. Thermal-spray deposition of enamel on aluminium alloys[J]. *Surface & Coatings Technology*, 2013, 232(10): 150-158.
- [6] YI D, ZHANG M. Heat flux investigations during flame thermal spray process using the lumped capacitance method[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2017, 123: 554-561.
- [7] ZHANG Y, MATTEWS S, HYLAND M. Role of solidification in the formation of plasma sprayed nickel splats through simulation and experimental observation[J]. *International*

- Journal of Heat & Mass Transfer, 2017, 115: 488-501.
- [8] SELVAN B, RAMACHANDRAN K, PILLAI B C, et al. Modelling of the plasma-substrate interaction and prediction of substrate temperature during the plasma heating[J]. *The European Physical Journal D*, 2011, 61(3): 663-675.
- [9] SELVAN B, RAMACHANDRAN K, PILLAI B C, et al. Numerical modelling of Ar-N₂ plasma jet impinging on a flat substrate[J]. *Journal of Thermal Spray Technology*, 2010, 20(3): 534-548.
- [10] YANG K, FUKUMOTO M, YASUI T, et al. Study of substrate preheating on flattening behavior of thermal-sprayed copper particles[J]. *Journal of Thermal Spray Technology*, 2010, 19(6): 1195-1205.
- [11] ZHANG Y, MATTHEWS S, TRAN A T T, et al. Effects of interfacial heat transfer, surface tension and contact angle on the formation of plasma-sprayed droplets through simulation study[J]. *Surface & Coatings Technology*, 2016, 307: 807-816.
- [12] BOLOT R, LI J, BONNET R, et al. Modeling of the substrate temperature evolution during the APS thermal spray process[C]. *Proceeding of International Thermal Spray Conference*, Orlando, 2003: 949-954.
- [13] LIU J, BOLOT R, COSTIL S. Residual stresses and final deformation of an alumina coating: Modeling and measurement[J]. *Surface & Coatings Technology*, 2015, 268: 241-246.
- [14] ZHANG T, BAO Y, Gawne D T, et al. Effect of a moving flame on the temperature of polymer coatings and substrates[J]. *Progress in Organic Coatings*, 2011, 70(1): 45-51.
- [15] BOLOT R, DENG S, CAI Z, et al. A coupled model between robot trajectories and thermal history of the workpiece during thermal spray operation[J]. *Journal of Thermal Spray Technology*, 2013, 23(3): 296-303.
- [16] 蔡振华, 李正, 曾春年, 等. 基于轨迹-传热耦合模型的温度场特性研究[J]. *武汉理工大学学报*, 2016, 38(1): 84-87.
- CAI Z H, LI Z, ZENG C N, et al. Research on APS temperature field characteristics based on different robot trajectory patterns[J]. *Journal of Wuhan University of Technology*, 2016, 38(1): 84-87 (in Chinese).
- [17] 胡福胜, 魏正英, 谭超, 等. 普通大气等离子喷涂过程的数值分析[J]. *西安交通大学学报*, 2013, 47(9): 92-99.
- HU F S, WEI Z Y, ZENG C N, et al. Numerical analysis on atmospheric plasma spray process[J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2013, 47(9): 92-99 (in Chinese).
- [18] KANG C W, TAN J K, PAN L, et al. Numerical and experimental investigations of splat geometric characteristics during oblique impact of plasma spraying[J]. *Applied Surface Science*, 2011, 257(24): 10363-10372.
- [19] BOLOT R, IMBERT M, CODDET C. On the use of a low-Reynolds extension to the Chen-Kim (k- ϵ) model to predict thermal exchanges in the case of an impinging plasma jet[J]. *International Journal of Heat & Mass Transfer*, 2001, 44(6): 1095-1106.