

# 基体预热温度对涂层表面形貌及残余应力影响的数值模拟

渠志刚, 贺辛亥, 刘江南, 邢圆圆, 钟鹏

(西安工程大学 机电工程学院, 西安 710048)

**摘要:** **目的** 为了更好地研究分析不同的基体预热温度对所制备涂层质量的影响。**方法** 采用求解热传导和能量方程, 运用有限体积 FVM 法、流体体积跟踪法 VOF 追踪熔滴自由表面, 建立熔滴撞击基体的三维几何模型, 模拟了层片形成过程, 分析不同基体预热温度对层片表面形貌的影响以及熔滴内部液滴形态变化的过程, 在上述基础上, 继续模拟第 2 个熔滴撞击在已凝固层片, 从而形成涂层, 进一步分析了不同基体预热温度对涂层表面形貌和残余应力的影响规律。**结果** 随着基体预热温度的提高, 沉积物与基体之间的温度梯度减少, 有利于熔滴的铺展, 铺展时间变长, 气体的排放更顺畅, 层片中的孔隙率降低, 且层片铺展厚度随温度的提高而逐渐降低, 而铺展半径逐渐增大, 沉积物形貌更接近圆盘状。随着基体预热温度的提高, 最终涂层形貌都是边缘厚、中间薄, 但涂层中央的致密程度不断提高, 且组织中的孔隙量越来越低。**结论** 基体预热温度需处在一个范围, 涂层的残余应力才会有一个最优值, 使得涂层与基体有比较好的结合强度。

**关键词:** 模拟; 基体预热温度; 表面形貌; 层片; 涂层; 残余应力

**中图分类号:** TG174.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2017)07-0057-08

**DOI:** 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2017.07.010

## Numerical Simulation of Influence of Substrate Preheating Temperature on Coating Morphology and Residual Stress

QU Zhi-gang, HE Xin-hai, LIU Jiang-nan, XING Yuan-yuan, ZHONG Peng

(School of Mechanical & Electrical Engineering, Xi'an Polytechnic University, Xi'an 710048, China)

**ABSTRACT:** The work aims to better study effects of different substrate preheating temperature on as-prepared coating quality. Based upon heat conduction and energy equation, free surface of molten droplets was tracked in finite volume method (FVM) and fluid volume tracking method (VOF), and 3D geometry model in which droplets strike the substrate was built to simulate slice forming process. Effects of different substrate preheating temperature on the slice morphology and morphologic change process of internal droplets were analyzed. On this basis, the second droplet striking solidified slice was simulated to form the

收稿日期: 2017-03-26; 修订日期: 2017-06-05

Received: 2017-03-26; Revised: 2017-06-05

基金项目: 西安市科技计划项目 (CX201425); 西安工程大学研究生创新基金项目 (CX201633)

Fund: Xi'an Science and Technology Plan Projects (CX201425); Xi'an Polytechnic University Innovation Fund for Graduate Students (CX201633)

作者简介: 渠志刚 (1990—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为表面工程。

Biography: QU Zhi-gang (1990—), Male, Master, Research focus: surface engineering.

通讯作者: 贺辛亥 (1971—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为复合材料。

Corresponding author: HE Xin-hai (1971—), Male, Doctor, Professor, Research focus: composite material.

coatings. Law of influence of different substrate preheating temperature on coating morphology and residual stress was further analyzed. As substrate preheating temperature rose, temperature gradient between sediment and substrate decreased, which was conducive to the spreading of droplets. As spreading time advanced, gas was emitted more smoothly and porosity in slice decreased. The slice spreading thickness decreased gradually as temperature rose. Spreading radius increased gradually and morphology of the sediment was more close to discoid. Final coating morphology featured in thick edges and thin center as the substrate temperature rose. However, center density of coating increased constantly and void volume in the structure decreased gradually. Substrate preheating temperature shall fall in a certain range, then residual stress is likely to have an optimal value which guarantees better bonding strength between the coating and substrate.

**KEY WORDS:** modeling; substrate preheating temperature; morphology; slice; coating; residual stress

用等离子喷涂技术可以大幅度强化材料表面,提高材料使用寿命,增强材料的耐磨、耐热和耐蚀等性能。大量试验表明,涂层与基体的结合性能是涂层的一个重要指标<sup>[1-3]</sup>。基体与涂层的相互作用数值模拟,主要是研究涂层的形成过程,在此形成过程中,又受到基材温度、喷涂距离、空气压力、熔滴速度等诸多因素的影响。其中不同的基体温度在现实工艺中比较常见,基体预热温度的不同将直接影响喷涂熔滴撞击表面瞬间时的状态、粒子扁平化以及基体附近处的硬度和晶粒尺寸,进而决定了随后形成的层片形貌特性,最终影响整个涂层的结构。而层片的形貌直接影响涂层和基体的结合度以及涂层中层片间的结合度,还直接决定了涂层质量(如结合强度、孔隙率等)及涂层残余应力的特性、分布和大小,这些对涂层质量至关重要,因此研究基体预热温度对涂层表面形貌和残余应力的影响有重要意义。其中所谓“粒子扁平化”是指在粒子以极高的速度撞击基体表面,并沿粗糙表面向四周铺展变形。

王桂兰等<sup>[4]</sup>利用一种基于法矢量的算法先生成基体四面体网格,再利用喷涂表面节点求得三角形表面单元,并自动生成涂层三棱柱单元,由此实现了在基体自由曲面上进行等离子喷涂,在模拟不同基体温度场的条件下,形成了不同的涂层表面形貌。杨定富等<sup>[5]</sup>通过选取不同的基体表面温度,研究得出合适的基体温度,可以使热障涂层的热残余应力降低,为后续制备涂层过程中选择基体预热温度提供了参考。侯平等<sup>[6]</sup>应用有限元分析软件,对等离子喷涂典型双层热障涂层沉积过程中的基体温度与涂层应力变化关系进行了数值模拟,只是分析了某种温度下的关系,具有其代表性,并没有在几种温度下说明基体温度与涂层应力的关系。

## 1 模拟前处理设置

### 1.1 模型建立及计算过程

模拟 Ni 熔滴撞击碳钢基体, Ni 熔滴的物性参数

如表 1 所示。模型的建立及数值计算过程见图 1。它包含熔滴(最顶端)到基板(最底端)之间的整个区域,并且在 Fluent 的 Patch 功能中设置熔滴的大小、速度和温度等参数。数学模型主要分为 3 个区域——物性区域分别为熔滴 C 和基体 B,区域的其余部分则被空气 A 占据。

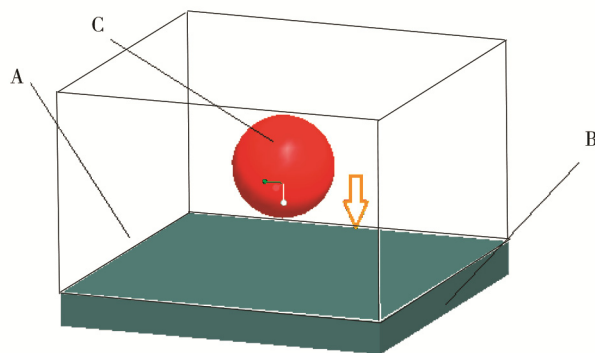


图 1 数学模型的示意

Fig.1 Schematic diagram of the mathematical model

根据以上描述,建立计算模型控制区域及网格划分效果,如图 2 所示。选取熔滴(最顶端)到基板(最底端)之间为整个计算区域, $x$  和  $y$  方向总长度为 1 mm,  $z$  方向总长度为 0.2 mm。Ni 熔滴半径为 0.1 mm。基体材料为碳钢,其三维参数  $x$ 、 $y$  和  $z$  分别为 1、1、0.1 mm,基体物性参数见表 2。网格划分由前处理软件 GAMBIT 来完成,所有区域采用四边形为主的

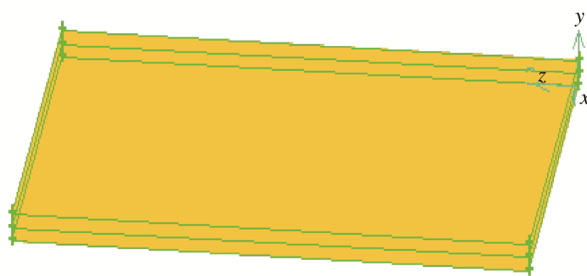


图 2 计算模拟区域及网格划分

Fig.2 Computational simulation area and meshing

表 1 熔滴物性参数  
Tab.1 Drop physical parameters

| 材料 | 密度/( kg·m <sup>-3</sup> ) | 黏度/(Pa·s) | 微滴半径/mm | 撞击速度/(m·s <sup>-1</sup> ) | 表面张力系数/(N·m <sup>-1</sup> ) |
|----|---------------------------|-----------|---------|---------------------------|-----------------------------|
| Ni | 8000                      | 0.005     | 0.01    | 100                       | 1.778                       |

表 2 基体物性参数  
Tab.2 Basic physical parameters

| 基体材料 | 温度/K | 弹性模量/GPa | 热膨胀系数/K <sup>-1</sup> | 泊松比  | 热导/(W·m <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> ) | 比热/(J·kg <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> ) |
|------|------|----------|-----------------------|------|--|---|
| 碳钢   | 300  | 215      | 11.3×10 <sup>6</sup>  | 0.26 | 71                                       | 460.24                                    |

Tgrid 类型、Tet/Hybird 为辅的非结构化网格划分，计算区域网格总数 137 万多个。

1.2 模拟的原理与方法

本文采用的数值模拟方法为有限体积法 FVM，应用有限体积法推导离散化方程时，采用一阶迎风格式对微分方程进行离散。FVM 是将所计算的区域划分成一系列控制体积，每个控制体积都有一个节点代表，通过将控制方程对控制体积作积分来导出离散方程，在给定的初值基础上，用 Simple 理论对离散化后的差分方程组进行迭代计算，直到满足收敛准则为止，最后可得到相应各未知变量的代数方程组，如压力、速度等变量<sup>[7-9]</sup>。

所谓 VOF 模型，它的基本原理是通过研究网格单元中流体和网格体积比函数  $F$  来确定自由面，追踪流体的变化，而非追踪自由液面上质点的运动。该方法根据体积比函数  $F$  来构造和追踪自由面。若  $F=1$ ，则说明该单元全部为指定相流体所占据；若  $F=0$ ，则该单元为无指定相流体单元；当  $0<F<1$  时，则该单元称为交界面单元<sup>[9-11]</sup>。假定流场中任意一点  $(x,y)$ ，定义函数  $f(x,y,t)$  如下：

$$f(x,y,t)=\begin{cases} 0 & \text{在 } (x,y) \text{ 点有该相流体质点} \\ 1 & \text{在 } (x,y) \text{ 点无该相流体质点} \end{cases} \quad (1)$$

1.3 控制方程

当 Ni 熔滴以一定速度  $v$  撞击基体时，熔滴会发生变形、铺展、传热和凝固过程，且必须满足质量、动量和能量守恒方程<sup>[9-12]</sup>。

连续性方程为：

$$\frac{d\rho}{d\tau} + \rho \operatorname{div} v = 0 \quad (2)$$

式中： $\rho$  为流体微团密度； $v$  为流体微团速度。因

熔滴不可压缩，故  $\frac{d\rho}{d\tau} = 0$ ，该方程简化为：

$$\operatorname{div} v = 0 \quad (3)$$

运动方程为：

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \nabla(u \cdot u) = \frac{1}{\rho} \nabla p + \mu \nabla^2 u + \frac{1}{\rho} F_b \quad (4)$$

式中： $u$  为流体速度； $p$  和  $F_b$  分别为作用在流体上的压力和力； $\mu$  为动力黏度。

能量方程为：

$$\rho \frac{dE}{dt} + \rho \frac{d}{dt} \left( \frac{u^2}{2} \right) = \nabla \cdot (K \nabla T) + \rho q + \rho F \cdot u + \nabla \cdot (p \cdot u) \quad (5)$$

式中： $\rho$  为流体微团密度； $K$  为热导率； $F$  为单位质量上的质量力。其中， $\rho \frac{dE}{dt}$  是单位体积内内能

的随体导数， $\rho \frac{d}{dt} \left( \frac{u^2}{2} \right)$  是单位体积内动能的随体导

数， $\nabla \cdot (K \nabla T)$  是单位体积内热传导传入的热量， $\rho q$  是单位体积由于辐射或其他原因传入的热量； $\rho F \cdot u$  是单位体积内质量力所做的功， $\nabla \cdot (p \cdot u)$  是单位体积内面力所做的功。

1.4 初始条件的设置

Fluent 软件在考虑粗糙度影响时给出 2 个参数供设置<sup>[13]</sup>：一是粗糙度高度  $K_s$  (Roughness Height)，Fluent 默认粗糙度高度为 0，即表面光滑；二是粗糙度常数  $C_s$  (Roughness Constant)，默认值为 0.5。为了详细研究三因素对涂层表面形貌预测结果的影响，全文在粗糙度高度  $K_s=30 \mu\text{m}$  下进行比较。由于撞击前，熔滴圆心到基体表面的距离会影响熔滴撞击后的变形、最终层片和涂层的质量，故设置距离为  $10 \mu\text{m}$ 。设置熔滴撞击基体的环境压强为  $101.3 \text{ kPa}$  (常压)，熔滴初始速度为  $100 \text{ m/s}$ ，尽量减小其他因素对模拟实验的影响。

2 基体预热温度对层片和涂层表面形貌的影响

不同的基体温度在现实工艺中比较常见，其对喷涂熔滴撞击表面瞬间时的状态、粒子扁平化以及基体附近处的硬度和晶粒尺寸均有很大的影响，适当地预热基体能够显著改变熔滴铺展后的表面形貌。当基体温度逐渐上升时，熔滴扁平化更明显。模拟时采用不同的基体温度如表 3 所示。

表 3 不同的基体预热温度  
Tab.3 The different temperatures of substrate preheating

| 实验对象 | 基体温度/K |
|------|--------|
| a    | 300    |
| b    | 400    |
| c    | 500    |

## 2.1 不同基体预热温度对层片表面形貌的影响

图 3 为不同基体温度对层片表面形貌形成过程的影响。当  $t \leq 0.2 \mu\text{s}$  时, 熔滴形貌没有发生太大改变, 这是由于熔滴在掉落之前, 熔滴最低点与基体表面有一段距离, 故在撞击基体之前, 熔滴的飞行形态不变。随着熔滴继续撞击以及铺展, 由于基体预热温度不

同, 熔滴在同一时间上撞击基体的形貌有明显变化。当  $t=0.6 \mu\text{s}$  时, 基体温度为 500 K 的熔滴铺展速度明显比其他基体温度快很多, 这是因为基体预热温度越高, 温度梯度越小, 越有利于熔滴的铺展。当  $t=1.5 \mu\text{s}$  时, 所有形状呈“薄饼状”, 且均出现孔隙和边缘溅射状, 基体温度越高, 铺展越充分, 扁平化程度更高, 孔隙、溅射状等缺陷越少。当  $t=3 \mu\text{s}$  时, 溅射状和孔隙数量随基体温度的提高逐渐减少。

基体在常温情况下 (300 K) 直接喷涂, 飞行熔滴撞击基体瞬间会将自身的动能迅速转化为热能并传递给基体。虽然具有较高速度的熔滴的部分动能不能被表面张力所吸收, 但由于碳钢的热传导性较好, 基体预热温度较低, 基体与层片之间的温度梯度较大, 有利于热传导的进行。很短时间内, 熔滴在基体表面迅速冷却凝固, 没有足够的时间向四周延伸, 导致气体排放不顺畅, 从而凝固后沉积物内部有较多的

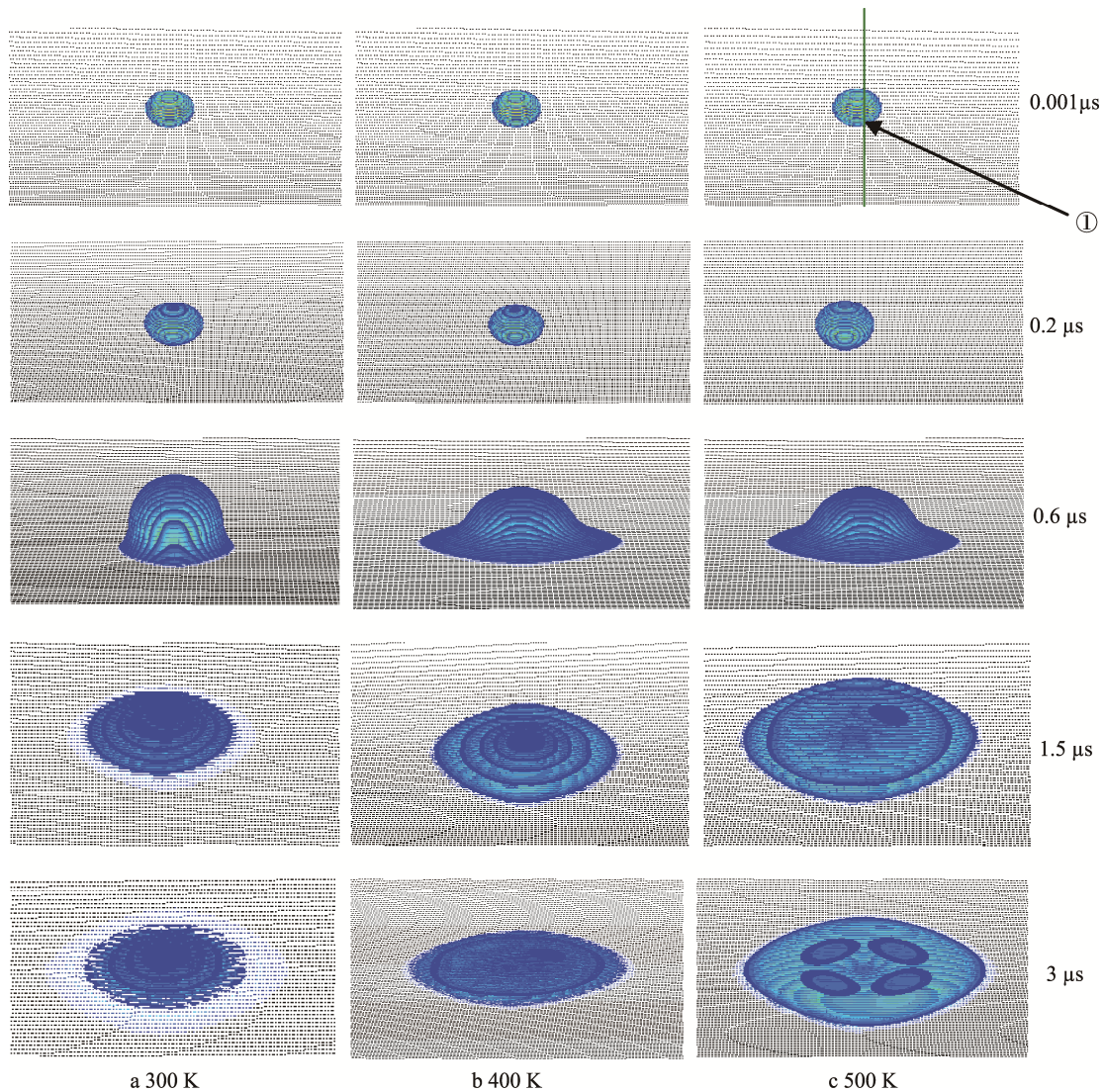


图 3 不同基体温度下层片形成过程的表面形貌

Fig.3 The formation process of surface topography at the different substrate temperatures



孔隙存在, 且边缘溅射状较多。

基体预热至 500 K 后, 飞行熔滴撞击基体表面后进行热传递。由于基体此时的温度较高, 温度梯度有所减小, 熔滴有充分的时间在基体表面向四周扩展, 从而有更长的时间排放气体, 导致最终熔滴内部的孔隙明显减少, 且边缘的溅射状较小, 因此层片性能有明显的改善。

## 2.2 层片形成过程中温度场的变化云图

为了更好地分析基体温度对层片表面形貌的影响, 提取图 3 位置① ( $t=0.001 \mu\text{s}$ ) 来分析温度场的变化云图。图 4 为基体预热温度为 500 K 下层片形成过程的温度变化云图, 上部分代表环境温度 300 K, 下半部分代表基体温度 500 K。

在熔滴撞击前期 ( $t < 0.06 \mu\text{s}$ ) 形貌已发生改变, 但熔滴温度并没有明显变化, 这就是图 3 中  $t=0.6 \mu\text{s}$  时刻, 熔滴可以保持规则地向外铺展的根本原因。当  $t=0.001 \mu\text{s}$  时, 飞行状态的熔滴和基体之间已经有了温度, 原因是熔滴在高速下落过程中, 排挤空气, 并将热量传递给环境。当  $t=0.03 \mu\text{s}$  时, 基体表面开始出现“三角形”状的温度云图 (见图 4 的①处), 这是

因为熔滴虽未与基体接触, 但环境温度与基体温度相差太大, 基体中心位置从环境中吸收热量, 使基体温度迅速提高。当  $0.06 \mu\text{s} \leq t \leq 0.2 \mu\text{s}$  时, 上部熔滴继续向下运动, 其热量不断地向撞击点处补充, 使撞击点处附近的温度大幅度提高, 基体表面温度也开始提高, 并逐渐向下传热, 从开始“三角形”状变成“半椭圆”状。

当  $t=0.6 \mu\text{s}$  时, 基体与熔滴之间的温度呈“高斯分布”状, 这是由于基体与涂层材料的温度梯度过大, 熔滴温度向基体传播、与周围空气热量进行交换以及熔滴上部能量不断补充等综合作用的结果, 这与图 3 中  $t=0.6 \mu\text{s}$  时刻的熔滴铺展形状一致。当熔滴完全铺展, 撞击点处的上层温度和铺展的最大两侧处先开始有微小的下降趋势 (见图 4 的②处), 受熔滴温度的影响, 基体的温度云图开始收缩, 这就是  $t=1.5 \mu\text{s}$  时的温度云图分布。当  $t=3 \mu\text{s}$  时, 撞击点处的温度梯度 (见图 4 的③处) 有明显凹处, 这是因为撞击点处的熔滴没有热量补充, 以及与空气周围持续性的热交换, 热量缺失导致此处开始凝固收缩, 熔滴最上端与空气对流的“通道” (见图 4 的④处) 逐渐消失, 其原因在于撞击点处囤积大量的热量已经传递出去。

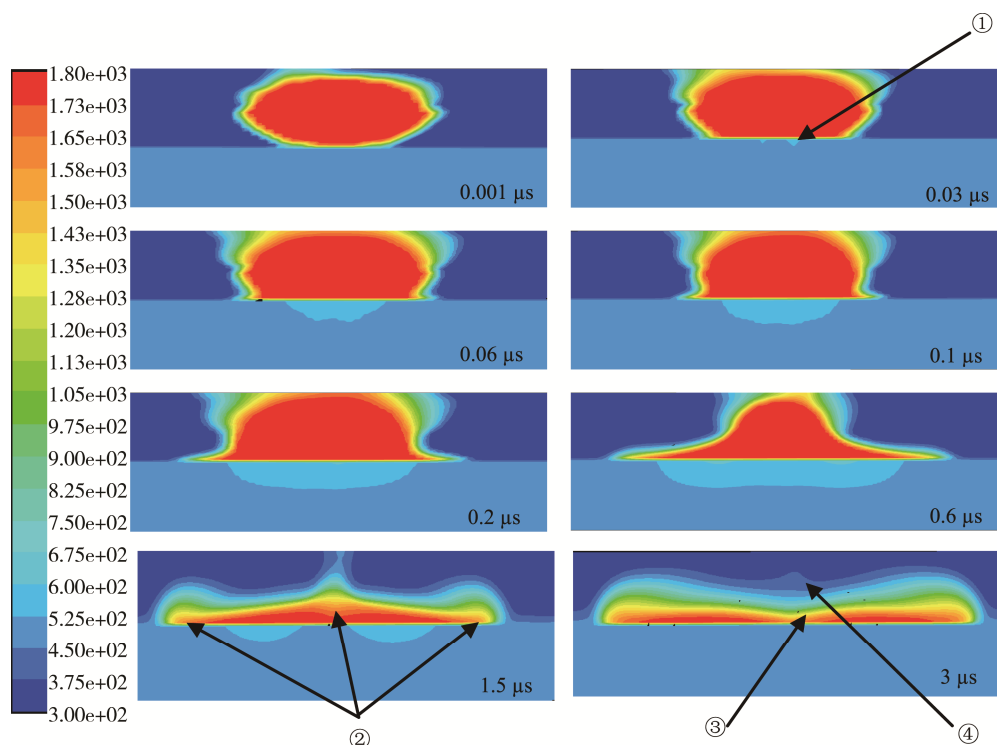


图 4 基体温度为 500 K 时的温度场云图

Fig.4 The temperature field nephogram of substrate temperature at 500 K

## 2.3 基体预热温度对涂层最终表面形貌的影响

模拟基体预热温度分别 300、400、500 K 时, 第 2 个熔滴垂直撞击已凝固层片基体的过程, 分析不同

基体预热温度对涂层形成过程的影响, 见图 5 所示, 其他参数均相同。

图 5 为两熔滴在基体表面沉积凝固后的涂层表面形貌, 可以明显地看出, 随着基体预热温度的增大, 涂层组织中的孔隙量越来越低。这是因为基体温度越

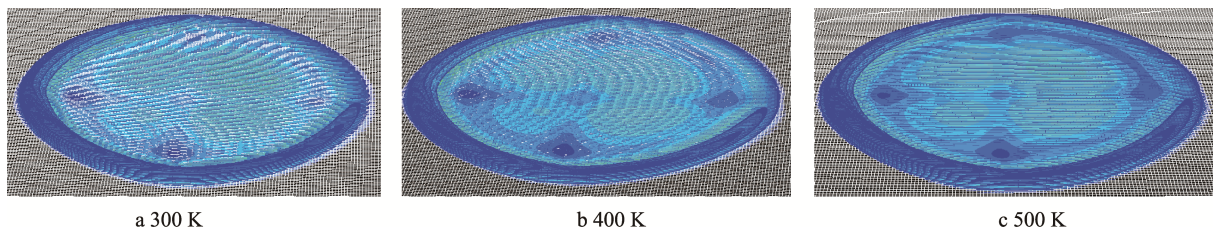


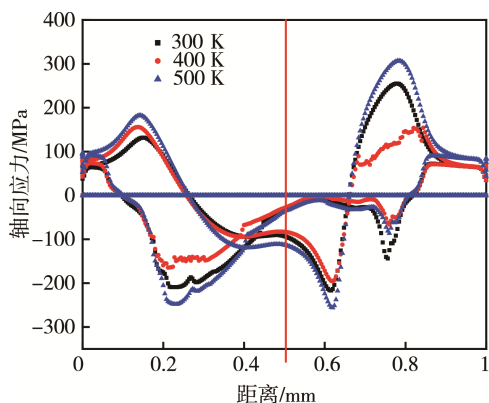
图5 不同基体温度下涂层最终表面形貌

Fig.5 The coatings surface morphology at different substrate temperatures

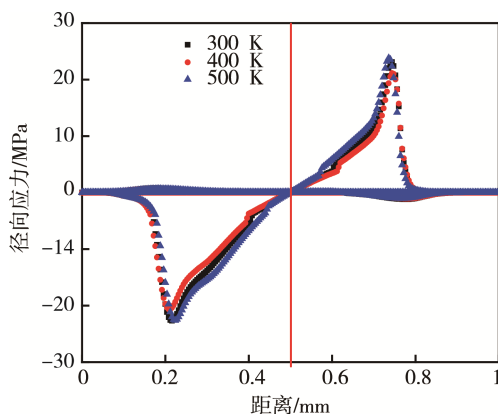
高, 温度梯度越小, 冷却凝固时间越长, 气体排放越顺畅, 熔滴有充分的时间向四周扩展延伸, 因此凝固后沉积物的内部有较小的孔隙, 且产生的边缘溅射状较小。同时还发现, 形成涂层最终形貌都是边缘厚、中间薄, 但涂层中央的致密程度不断提高。

### 3 基体预热温度对涂层残余应力的影响

图6—7为界面轴向和径向应力随基体温度的分布曲线, 中间直线代表了撞击位置。从图6—7可以看出, 基体预热温度的选择将直接影响涂层界面应力的分布大小, 但不能改变各应力的分布形态。温度为300 K和500 K时, 界面最大应力都比较大, 而基体温度为400 K时, 其最大值明显减小, 说明基体预热温度在300~500 K之间有一较优值, 使涂层的界面应力较小。

图6 不同基体温度下在不同位置的轴向应力  $z=0$  ( $x$  轴) 分布图Fig.6 The axial stress  $z=0$  ( $x$  axis) distribution map of the different substrate temperatures and different positions

基体温度为500 K时, 界面轴向应力的最大压应力为286 MPa; 当基体预热温度降低到400 K时, 此时的最大压应力为158 MPa, 界面轴向应力的最大压应力明显减小。这是因为基体与涂层材料之间的热膨胀匹配系数不同而产生残余应力, 但当基体预热温度提高时, 材料之间的温度梯度减小, 残余应力随之减小, 有利于涂层与基体的结合。

图7 不同基体温度下在不同位置的径向应力  $z=0$  ( $y$  轴) 分布图Fig.7 The axial stress  $z=0$  ( $y$  axis) distribution map of the different substrate temperatures and different positions

### 4 不同基体预热温度下层片的仿真与实验对比

马壮等<sup>[4]</sup>在研究不锈钢基体预热温度对涂层颗粒变形的影响时, 基体材料选用抛光不锈钢, 基体预热温度为300、375、475 K, 结果表明基体预热温度对涂层沉积物形貌造成了不同的影响, 如图8a1、b1和c1。而本文在Fluent中设置碳钢基体预热温度分别为300、400、500 K, 模拟结果分别是图8a2、b2和c2, 熔滴直径为20  $\mu\text{m}$ 。虽然实验和模拟中设置的基体预热温度有微小差别, 但趋势相似, 通过对比可知: (1) 由图8a可见, 颗粒完全熔化, 熔滴沉积后的形貌呈葵花样圆盘状; 基体无预热时, 即常温(300 K)下, 沉积物边缘呈条束放射状, 周围飞溅形成的碎块比较少, 如箭头1所示。(2) 基体预热温度达400 K时, 熔滴变形形貌见图8b, 中心圆盘状占据的比例明显大于基体温度为300 K的, 边缘束状溅射部分也呈同样的趋势, 如箭头2所示。(3) 升高基体温度至500 K时, 熔滴变形形貌见图8c, 随基体预热温度的增大, 沉积物边缘溅射状物的尺寸和数目减小, 且沉积物形貌更接近圆盘形; 同时, 沉积物单位面积内的龟裂纹长度减小, 龟裂碎块数目减少。

基体预热温度增加, 沉积物边缘溅射状数目和尺寸都减少, 原因是当提高基体预热温度时, 减少了基



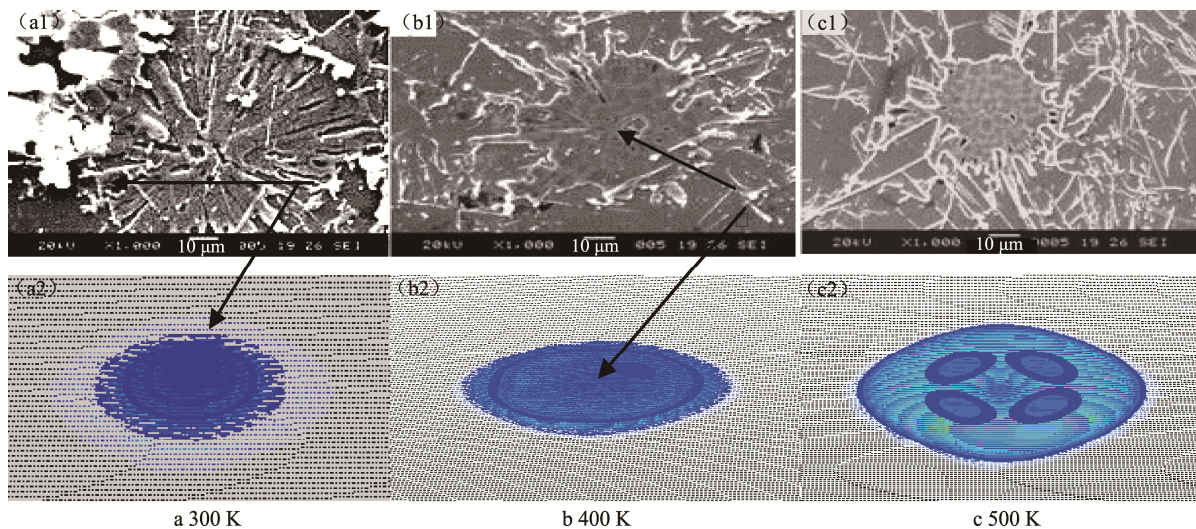


图 8 不同基体预热温度下层片表面形貌对比图

Fig.8 The compared graph of the layer surface topography at the different substrate preheating temperatures

体与涂层材料之间的温度梯度, 铺展加速度减小。熔滴加速度与条束溅射间的关系可以由 Rayleigh-Taylor 不稳定理论来解释, 其熔滴边缘的波长符合公式 (6) [14]:

$$\lambda = 2\pi \left( \frac{2\gamma}{\alpha\rho} \right)^{0.5} \quad (6)$$

式中:  $\gamma$  为表面张力 (N/m);  $\alpha$  为流散加速度 ( $\text{m/s}^2$ );  $\rho$  为熔滴密度 ( $\text{kg/m}^3$ )。

由公式 (6) 分析可知, 基体预热温度越高, 熔滴流散加速度越小, 边缘波长的溅射状数目和尺寸减小, 溅射部分占沉积物整体的比例降低 [14]。Fukumo 等 [15] 的研究也表明了适当提高基体预热温度可使沉积物更接近圆盘形。

从图 8 可以看出, 由于 Ni 受其流动性、熔化状态等物理因素的影响, 熔滴铺展变形较顺利。随着基体预热温度的提高, 熔滴变形时间减少, 最终涂层表面形貌中的孔隙率降低, 这与马壮等 [14] 在不锈钢基体无预热 300 K 及 475 K 时, 涂层孔隙率的变化趋势一样。

## 5 结论

1) 当基体预热温度从 300 K 提高到 500 K 时, 沉积物与基体之间的温度梯度减少, 有利于熔滴的铺展, 铺展时间变长, 气体的排放更顺畅, 层片中的孔隙率降低。层片铺展厚度随温度的提高逐渐降低, 铺展半径则逐渐增大, 沉积物形貌更接近圆盘状。

2) 随着基体预热温度的提高, 最终涂层形貌都是边缘厚、中间薄, 但涂层中央的致密程度不断提高, 且组织中的孔隙量越来越低。

3) 在基体温度为 300、400、500 K 时, 最大压

应力分别为 286、158、243 MPa, 说明基体预热温度需处在一个范围, 使涂层的界面应力较小。

4) 简单地与相近实验条件下文献作者的实验数据进行对比, 发现对涂层表面形貌和残余应力的模拟结果与实验结果比较吻合, 说明本文所建立的模型正确合理, 采用数值模拟方法对等离子喷涂工艺具有指导意义。

## 参考文献:

- [1] 陈丽梅, 李强. 等离子喷涂技术现状及发展[J]. 热处理技术与装备, 2006, 27(1): 1—5.  
CHEN Li-mei, LI Qiang. The Present Status and Development of Plasma Spraying Technology[J]. Heat Treatment Technology and Equipment, 2006, 27(1): 1—5.
- [2] 路学成, 阎殿然, 黄勇, 等. 等离子喷涂结构涂层研究[J]. 热处理, 2007, 22(1): 12—18.  
LU Xue-cheng, YAN Dian-ran, HUANG Yong, et al. Research on Plasma Sprayed Structural Coatings[J]. Heat Treatment, 2007, 22(1): 12—18.
- [3] 唐家伟, 谢淑兰, 潘鑫. 等离子喷涂涂层的研究进展[J]. 热喷涂技术, 2011, 3(2): 35—39.  
TANG Jia-wei, XIE Shu-lan, PAN Xin. Research Development of Plasma Spray Coating[J]. Thermal Spray Technology, 2011, 3(2): 35—39.
- [4] 王桂兰, 胡帮友, 严波, 等. 三维等离子喷涂的涂层生长过程温度场数值模拟[J]. 固体力学学报, 2005, 26(2): 151—156.  
WANG Gui-lan, HU Bang-you, YAN Bo, et al. Numerical Simulation of Temperature Field in Forming Process of 3D Plasma Spray Coating[J]. Acta Mechanica Solida Sinica, 2005, 26(2): 151—156.
- [5] 杨定富, 韩树, 袁伟. 基体预热温度对热障涂层热残余应力影响的研究[J]. 表面技术, 2004, 33(2): 22—28.  
YANG Ding-fu, HAN Shu, YUAN Wei. Study on the In-

- fluences of the Substrate Preheating Temperature on the Thermal Residual Stress of the Thermal Barrier Coating[J]. Surface Technology, 2004, 33(2): 22—28.
- [6] 侯平均, 王汉功, 汪刘应, 等. 等离子喷涂双层热障涂层沉积过程的数值模拟[J]. 焊接学报, 2009, 30(11): 97—100.  
HOU Ping-jun, WANG Han-gong, WANG Liu-ying, et al. Numerical Simulation on Deposition Process of Duplex Thermal Barrier Coating by Plasma Spraying[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2009, 30(11): 97—100.
- [7] 朱红钧, 林元华, 谢龙汉, 等. FLUENT12 流体分析及工程仿真[M]. 北京: 清华大学出版社, 2011.  
ZHU Hong-jun, LIN Yuan-hua, XIE Long-han, et al. 12 of FLUENT Fluid Analysis and Engineering Simulation[M]. Beijing: Qinghua University Press, 2011.
- [8] 韩占忠, 王敬, 兰小平. FLUENT 流体工程仿真计算实例与应用[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2004.  
HAN Zhan-zhong, WANG Jin, LAN Xiao-ping. FLUENT Fluid Engineering Simulation Calculation Example and Application[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2004.
- [9] 崔长生. 等离子喷涂涂层形成过程数值模拟[D]. 福州: 福州大学, 2011.  
CUI Chang-sheng. Three Dimensional Numerical Simulation of Coating Forming in Plasma Spraying[D]. Fuzhou: Fuzhou University, 2011.
- [10] 王志东, 汪德. VOF 方法中自由液面重构的方法研究[J]. 水动力学研究与进展, 2003, 18(1): 52—56.  
WANG Zhi-dong, WANG De. Free Surface Reconstruction with VOF Method[J]. Journal of Hydrodynamics, 2003, 18(1): 52—56.
- [11] 张健, 方杰, 范波芹. VOF 方法理论与应用综述[J]. 水利水电科技进展, 2005, 25(2): 67—70.  
ZHANG Jian, FANG Jie, FAN Bo-qin. Advances in Research of VOF Method[J]. Journal of Hydrodynamics, 2005, 25(2): 67—70.
- [12] 吕琦. FLUENT 在液相等离子喷涂中的应用[D]. 武汉: 华中科技大学, 2013.  
LV Qi. Application of FLUENT in Liquid Phase Plasma Spraying[D]. Wuhan: Hua Zhong University of Science and Technology, 2013.
- [13] 谈明高, 刘厚林, 吴贤芳, 等. 粗糙度对离心泵性能数值预测的影响[J]. 中国农村水利水电, 2011(2): 131—134.  
TAN Ming-gao, LIU Hou-lin, WU Xian-fang, et al. The Effect of Roughness on the Numerical Prediction of the Characteristics of Centrifugal Pumps[J]. China Rural Water And Hydropower, 2011(2): 131—134.
- [14] 马壮, 曹素红, 王富耻, 等. 不锈钢基体温度对 NiCrCoAlY 和 ZrO<sub>2</sub> 涂层颗粒变形的影响[J]. 复合材料学报, 2006, 23(6): 114—119.  
MA Zhuang, CAO Su-hong, WANG Fu-chi, et al. Effects of Stainless Steel Substrate Temperature on Flattening Behavior of Plasma Sprayed NiCrCoAlY and ZrO<sub>2</sub> Droplets[J]. Acta Materialia Composita Sinica, 2006, 23(6): 114—119.
- [15] FUKUO M, KATOH S, OKANC I. Splat Behavior of Plasma Sprayed Particles on Flat Substrate Surface[C]// Ohmori A. 14th International Conference on Thermal Spraying. Kobe: High Temperature Society of Japan, 1995: 353—358.