

两阶段悬浮液超音速火焰喷涂多相流模拟研究

何 戴, 焦建梁, 单彦广

(上海理工大学 能源与动力工程学院, 上海 200093)

摘要: 为研究两阶段悬浮液超音速火焰喷涂过程中的流场分布以及液滴/颗粒行为, 采用三维 Euler-Lagrange 耦合建模方法, 模拟悬浮液在流场中破碎雾化、运动换热、蒸发扩散并最终被基板捕捉的过程。悬浮液物性由基于实验的拟合函数编译, 并考虑了液滴形状变化的影响。结果表明: 通过调节氮气质量流量, 可以在不影响焰流速度的前提下, 调节焰流温度, 以满足不同温敏材料涂层制备的工艺要求。通过调节悬浮液的体积流量, 可以使悬浮液到达焰流中心被充分加热加速。适当减小悬浮液的体积流量有助于提高颗粒被基板捕捉时的温度与速度, 适当提高或降低悬浮液的颗粒浓度可以在不影响颗粒被基板捕捉时速度的前提下, 提高单位时间内的颗粒输出量或降低颗粒粒径, 可以根据不同的工艺要求进行相应的调整。

关键词: 悬浮液; 超音速火焰喷涂; 数值模拟; 多相流; TiO_2

中图分类号: TK 121 **文献标志码:** A

Multiphase flow simulation of two-stage suspension high-velocity oxygen fuel spraying

HE Dai, JIAO Jianliang, SHAN Yanguang

(School of Energy and Power Engineer, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: In order to study the flow field distribution and droplet/particle behavior in two-stage suspension high-velocity oxygen fuel spraying, three-dimensional Euler-Lagrange coupling modeling method was used to simulate the flow field and the process of suspension fragmentation atomization, motion heat transfer, evaporative diffusion and finally being captured by substrate. The suspension properties are compiled by an experiment-based fitting function and the influence of droplet shape changes is considered. The results show that: By adjusting the mass flow rate of nitrogen, the flame flow temperature can be adjusted without affecting the flame flow velocity, so as to meet the technological requirements of coating preparation of different temperature-sensitive materials. By adjusting the volume flow rate of suspension, the suspension can reach the center of flame flow and be heated and accelerated sufficiently. Appropriately reducing the volume flow rate of suspension is helpful to improve the temperature and velocity of particles captured by substrate, appropriately increasing or

收稿日期: 2022-05-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52176159)

第一作者: 何 戴(1996-), 男, 硕士研究生。研究方向: 悬浮液超音速火焰喷涂。E-mail: 710080433@qq.com

通信作者: 单彦广(1969-), 男, 教授。研究方向: 多相流、热喷涂等。E-mail: shan@usst.edu.cn

decreasing the particle concentration of suspension can increase the particle output per unit time or reduce the particle size without affecting the velocity of particles captured by substrate, which can be adjusted according to different process requirements.

Keywords: *suspension; high-velocity oxygen fuel spraying; numerical simulation; multi-phase flow; TiO_2*

热喷涂技术是表面工程技术的重要组成部分，其通过在基体表面沉积涂层来提高基体的表面性能^[1]。传统的粉料涂层结构粗糙、孔隙较大，结构与性能通常无法满足使用要求^[2]。悬浮液喷涂是将纳米颗粒以水、乙醇或乙二醇等作为基液，配制成纳米颗粒悬浮液作为喷涂材料^[3-4]，所制备的涂层相较于传统粉料涂层在结构与性能上有显著的改善^[5]。随着悬浮液等离子喷涂 (suspension plasma spraying, SPS) 以及悬浮液超音速火焰 (suspension high-velocity oxygen fuel, SHVOF) 喷涂技术的发展，喷涂过程中颗粒的温度与速度大幅度上升，涂层的结构致密度、结合强度以及性能也得到了显著的提高。随着材料科学的进步，逐渐出现许多具有特殊性能的喷涂材料，例如 TiO_2 因其良好的光催化活性，在自清洁涂层制备领域得到广泛应用^[6-7]。 TiO_2 在 800 ℃ 时会大量向金红石相发生转变，影响涂层的光催化性能^[8]，即使是温度相对较低的悬浮液超音速火焰喷涂，焰流温度也会达到 3000 K 左右，远远高于 TiO_2 的相变温度。两阶段悬浮液超音速火焰喷涂在燃烧室后方增加了混合室，并采用径向注入的方式注入悬浮液，从而降低了悬浮液的加热温度和加热时间，对温敏材料涂层的结构与性能起到很好的保护作用。两阶段悬浮液超音速火焰喷涂过程为：燃料在燃烧室燃烧后，焰流与常温 N_2 在混合室混合，降低温度；随后通过 Laval 喷嘴，焰流速度达到超音速，此时径向注入纳米颗粒悬浮液，悬浮液在流场中经历破碎、雾化、蒸发，最终纳米颗粒及其附聚物沉积到基板表面形成涂层。

Shan 等^[9] 通过模拟研究发现，在混合室中注入 N_2 可以降低颗粒的温度，从而改善了温敏粉料的喷涂工艺。Chadha 等^[10] 通过实验结合模拟研究发现，在悬浮超音速火焰喷涂过程中，径向注入悬浮液有助于降低悬浮液的加热温度并缩短加热时间，但是使悬浮液在注入流场后能够到达焰流中心成为该工艺的关键。Dalir 等^[11] 通过实验结合

模拟研究发现，在悬浮液等离子喷涂过程中，采用较高的悬浮液体积分数有助于提高颗粒粒径，形成的涂层更加致密。目前，悬浮液喷涂的研究主要集中在应用广泛的悬浮液高温喷涂工艺上，如悬浮液等离子喷涂以及悬浮液超音速火焰喷涂。相比之下，悬浮液低温喷涂方面的研究较少，并且在相关的模拟研究中通常对悬浮液模型做了简化处理，这不利于精确模拟悬浮液在流场中的变化过程。悬浮液喷涂的过程非常复杂，涉及气液固三相的传热与流动，采用数值模拟的方法可以更充分地展示喷涂过程中的细节。本文以两阶段悬浮液超音速火焰喷涂作为研究对象，采用了三维 Euler-Lagrange 耦合建模方法。基于实验测定的悬浮液物理性能和动态阻力系数模型，模拟了悬浮液在流场中的破碎雾化、运动换热、蒸发扩散并最终被基板捕捉的过程。同时，研究了喷涂参数对流场分布以及液滴/颗粒行为的影响，旨在预测涂层质量，并为相关实验研究与工程应用提供理论参考。

1 数学模型

1.1 连续相模型

在模拟气相流场时，将气体作为可压缩理想气体。控制方程包括质量、动量和能量守恒方程，以及理想气体状态方程，其表达式为

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_i} \tag{2}$$

$$\frac{\partial \rho e u_i}{\partial x_i} = -\frac{\partial p u_i}{\partial x_i} + \frac{\partial (u_{ij} \tau_{ij} - q_i)}{\partial x_i} \tag{3}$$

$$\rho = -\frac{P_0 + P}{(R/M_w)T} \tag{4}$$

式中： ρ , u , P , T , e , τ , M_w 分别为气体的密

度、速度、压力、温度、内能、黏度剪切应力和相对分子质量; R 为气体常数; P_0 为大气压力; P 为气体相对压力。

1.2 离散相模型

图 1 展示了在模拟纳米颗粒悬浮液时所采用的双向耦合的多组分方法^[12-13]。悬浮液的组分包括固相的 TiO_2 纳米颗粒与液相的乙醇基液。这些组分以液包的形式注入流场, 其粒径尺寸等于悬浮液注入口的直径, 。

在对纳米颗粒悬浮液进行建模时, 采用纯基液的物性或者纳米颗粒与纯基液的平均物性都会引起较大的模拟误差。表 1 列出了基于实验数据

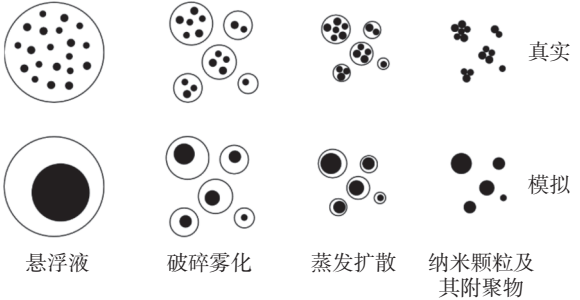


图 1 真实情况和数值模拟下悬浮液的变化过程
Fig.1 Suspension change process under the real case and model

得到的乙醇基 TiO_2 悬浮液中乙醇物性随温度变化的拟合函数^[14-15]。

表 1 TiO_2 悬浮液中乙醇物理性能
Tab.1 Physical properties of ethanol in TiO_2 suspension

乙醇物理性能	拟合函数	温度/K
密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	$\rho_l = aT^3 + bT^2 + cT + d$ $a = -3.763\ 45 \times 10^{-6}$ $b = 2.271\ 99 \times 10^{-3}$ $c = -12\ 412$ $d = 1\ 053.73$	250~385
黏度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$)	$\mu_l = aT^3 + bT^2 + cT + d$ $a = 5.98 \times 10^{-10}$ $b = -4.87 \times 10^{-7}$ $c = 1.14 \times 10^{-4}$ $d = -5.50 \times 10^{-3}$	250~385
比热/($\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)	$c_l = aT^3 + bT^2 + cT + d$ $a = 4.425\ 16 \times 10^{-5}$ $b = -6.586\ 07 \times 10^{-4}$ $c = -3.030\ 93$ $d = 2\ 227.99$	250~385
表面张力/($\text{N}\cdot\text{m}^{-1}$)	$\sigma_l = aT^6 + bT^5 + cT^4 + dT^3 + eT^2 + fT + g$ $a = -7.244\ 34 \times 10^{-16}$ $b = 1.740\ 74 \times 10^{-12}$ $c = -1.723\ 5 \times 10^{-9}$ $d = 9.00\ 117 \times 10^{-7}$ $e = -2.617\ 02 \times 10^{-4}$ $f = 4.010\ 95 \times 10^{-2}$ $g = -2.502\ 59$	270~490

在表 1 基础上通过混合函数计算悬浮液的物理性能^[16-17], 其表达式为

$$\rho_{\text{susp}} = C_v \rho_{\text{TiO}_2} + (1 - C_v) \rho_l \tag{5}$$

$$\mu_{\text{susp}} = \mu_l (1 + 2.5C_v + 1.41C_v^2) \tag{6}$$

$$c_{\text{susp}} = C_v c_{\text{TiO}_2} + (1 - C_v) c_l \tag{7}$$

式中, C_v 为悬浮液中 TiO_2 的体积分数。 TiO_2 纳米颗粒为非蒸发相, 因此还需考虑悬浮液蒸发扩散过程中组分变化对悬浮液物理性能的影响。

1.2.1 液滴/颗粒运动控制方程

液滴/颗粒的轨迹由作用在其上面的力控制, 表达式为

$$m_p \frac{d\mathbf{u}_p}{dt} = m_p \frac{\mathbf{u} - \mathbf{u}_p}{\tau_r} + m_p \frac{\mathbf{g}(\rho_p - \rho)}{\rho_p} + \mathbf{F} \tag{8}$$

$$\tau_r = \frac{\rho_p d_p^2}{18\mu} \frac{24}{C_d Re} \tag{9}$$

$$Re \equiv \frac{\rho d_p |\mathbf{u}_p - \mathbf{u}|}{\mu} \tag{10}$$

式中: m_p , $\mathbf{u}_p$, ρ_p , $\mathbf{F}$, $m_p(\mathbf{u} - \mathbf{u}_p)/\tau_r$, τ_r , d_p 分别为液滴/颗粒的质量、速度、密度、所受附加力、所受阻力、弛豫时间与粒径; $\mathbf{u}$, ρ , μ 分别为流场的速度、密度与黏度; Re 为相对雷诺数。

1.2.2 传热传质模型

当流场温度达到液滴蒸发温度且液滴有蒸发相时, 热平衡方程为

$$m_p c_p \frac{dT_p}{dt} = h A_p (T_\infty - T_p) - \frac{dm_p}{dt} h_{fg} \tag{11}$$

式中: c_p , T_p , A_p 分别为液滴的比热容、温度与表面积; T_∞ 为流场温度; h_{fg} 为潜热; h 为对流换热系数, 由此得出

$$Nu = \frac{hd_p}{k} = \frac{\ln(1 + B_T)}{B_T} (2 + 0.6Re^{1/2} Pr^{1/3}) \tag{12}$$

式中: k 为流场导热率; Pr 为流场普朗特数; B_T 为 Spalding 传热系数, 表达式为

$$B_T = \frac{c_{pv}(T_\infty - T_p)}{h_{fg} - \dot{q}_p / \dot{m}_p} \tag{13}$$

式中： $\dot{q}_p$ 为传递到液滴的热量； $\dot{m}_p$ 为液滴蒸发速率； c_{pv} 为液滴蒸气比热容。

在流场作用下，对流效应引起的液滴蒸发相的扩散方程为

$$\frac{dm_p}{dt} = k_c A_p \rho \ln(1 + B_m)$$

(14)

式中： k_c 为传质系数； B_m 为 Spalding 质量数，表达式为

$$B_m = \frac{Y_{i,s} - Y_{i,\infty}}{1 - Y_{i,s}}$$

(15)

式中： $Y_{i,s}$ 为液滴表面蒸汽质量分数； $Y_{i,\infty}$ 为流场蒸汽质量分数。

1.2.3 阻力系数模型

在传统的悬浮液喷涂模拟中，通常忽略了流场对液滴形状变化的影响，将液滴假设为球形进行处理。球形液滴的阻力系数表达式为

$$C_D = a_1 + \frac{a_2}{Re} + \frac{a_3}{Re^2}$$

(16)

式中： a_1 、 a_2 与 a_3 为根据不同 Re 确定的常数^[18]。

当球形液滴通过流场时，根据图 2 所示，随着韦伯数的增大，液滴的形状会逐渐趋向圆盘形，此时，液滴所受到的阻力明显高于球形液滴。

考虑到更加准确地模拟悬浮液在流场中的变化过程，引入了液滴形状变化的动态阻力系数模型^[2,19]，阻力系数 C_d 表达式为

$$C_{d, \text{ sphere}} \begin{cases} 0.424 & Re > 1\,000 \\ \frac{24}{Re} \left(1 + \frac{1}{6} Re^{2/3} \right) & Re \leq 1\,000 \end{cases}$$

(17)

$$C_d = C_{d, \text{ sphere}} (1 + 2.632y)$$

(18)

式中： y 为液滴的形状变化程度。当 $y=0$ 时，没有发生形变(球形)；当 $y=1$ 时，发生最大形变(圆盘形)。

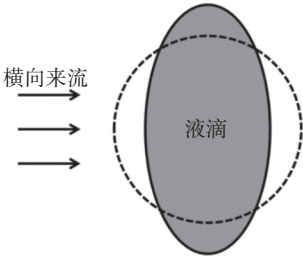


图 2 液滴形状变化示意图

Fig. 2 Schematic diagram of droplet shape change

1.3 数值计算方法

1.3.1 计算区域

图 3 给出了两阶段悬浮液超音速火焰喷涂的计算域，包括燃烧室、混合室、Laval 喷嘴、平直枪管和外部区域^[9]。

1.3.2 边界条件

边界条件如表 2 所示，采用 $\text{CH}_4\text{-O}_2$ 作为非预混燃料， N_2 作为常温掺混气体。

其他悬浮液参数如表 3 所示，温度为 300 K，注入口直径为 $4.0 \times 10^{-4} \text{ m}$ ，采用乙醇基 TiO_2 纳米颗粒悬浮液作为喷涂材料。

1.3.3 网格划分

采用六面体结构化网格对计算域进行网格划分，并对气体入口，Laval 喷嘴喉部、枪管出口和边界层的网格进行加密，以更准确地显示流场特征。计算域的结构化网格如图 4 所示。

1.3.4 数值方法

采用有限体积法 (finite volume method, FVM) 进行数值计算，用 Coupled 算法耦合求解压力速度。采用 SST $k\text{-}\omega$ 模型求解 N-S 方程模拟气体的湍流流动，运用一步燃烧机理的涡耗散模型 (eddy dissipation model, EDM) 模拟 CH_4 与 O_2 的燃烧^[11]。同时，使用 KH-RT (Kelvin Helmholtz-Rayleigh Taylor) 模型对悬浮液的破碎雾化进行模拟^[11,20]。

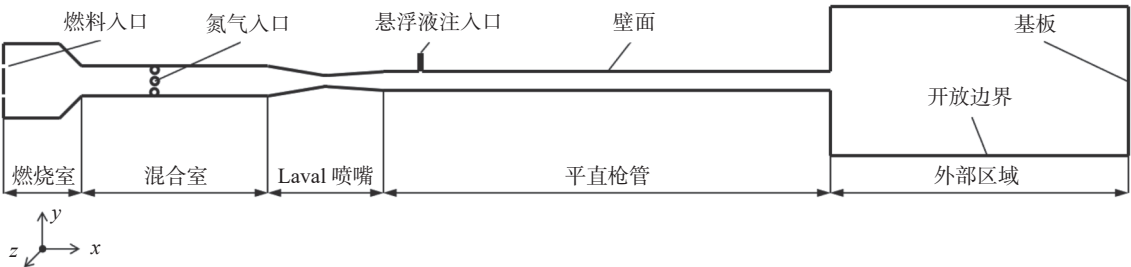


图 3 两阶段悬浮液超音速火焰喷涂计算域示意图

Fig.3 Schematic diagram of computing domain of two-stage SHVOF

表 2 数值模拟的边界条件

Tab.2 Boundary conditions of numerical simulation

边界名称	边界条件
CH ₄ 入口	$5.96\times10^{-4}\text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$, 300 K
O ₂ 入口	$2.38\times10^{-3}\text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$, 300 K
N ₂ 入口 方案1	$2.08\times10^{-4}\text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$, 300 K
N ₂ 入口 方案2	$4.17\times10^{-4}\text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$, 300 K
N ₂ 入口 方案3	$6.25\times10^{-4}\text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$, 300 K
出口	压力出口
壁面	373 K
基板	573 K

表 3 喷涂过程中的悬浮液参数

Tab.3 Suspension parameters during spraying

颗粒体积分数/%	体积流量/(mL·min ⁻¹)	质量流量/(kg·s ⁻¹)
15	50	1.08×10^{-3}
15	100	2.17×10^{-3}
15	150	3.26×10^{-3}
15	200	4.35×10^{-3}
5	100	1.61×10^{-3}
10	100	1.89×10^{-3}
20	100	2.46×10^{-3}
25	100	2.75×10^{-3}

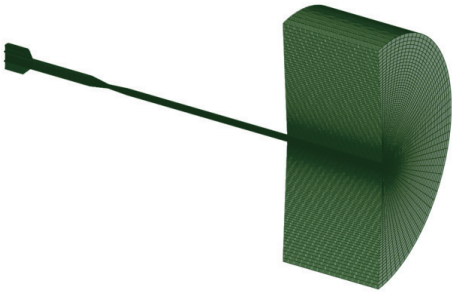


图 4 计算域结构化网格

Fig. 4 Structured grid of computing domain

2 结果与讨论

在进行研究工作之前, 需要对模型的可靠性进行验证。如图 5 所示, 比较在相同喷涂参数下的模拟结果与实验数据^[9], 若整体偏差小于 10%, 则表明模型较为可靠, 可以继续后进行序的研究工作。

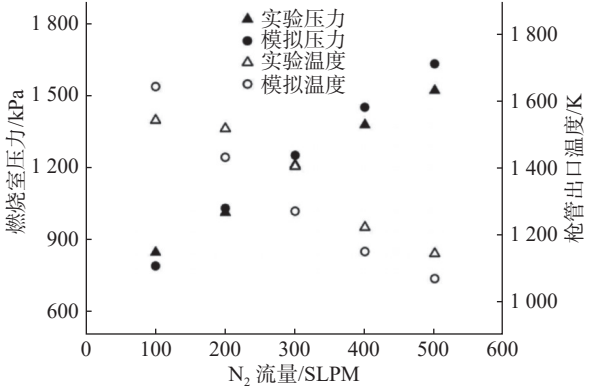


图 5 实验与模拟燃烧室压力和枪管出口温度对比图

Fig. 5 Comparison of experimental and simulated combustor pressure and barrel exit temperature

2.1 场场分析

图 6 给出了在不同 N₂ 质量流量下, 流场中心沿轴线方向的参数变化。燃料注入燃烧室后, 压力与温度迅速上升, 达到 3000 K 以上。随后, 常温 N₂ 注入混合室, 导致焰流温度急剧下降。当焰流通过 Laval 喷嘴时, 压力急剧下降, 速度则急剧上升。在 Laval 喷嘴渐扩段末端, 压力达到最低, 速度达到超音速。设置悬浮液注入入口能够降低悬浮液注入压力, 有利于促进悬浮液的破碎、雾化、蒸发。此外, 随着 N₂ 质量流量的增加, 枪管出口附近流场中心的温度显著下降, 而速度几乎保持不变。因此, 通过调节注入混合室的 N₂ 质量流量来调节焰流温度, 以满足不同温敏材料涂层制备的工艺要求。

需要注意的是, 在 Laval 喷嘴渐扩段末端流场会发生波动, 这是由于在该位置会产生斜激波, 在斜激波作用下, 流场的压力与温度会有所回升, 速度会有所下降。在枪管出口处, 流场发生剧烈波动, 这是由于在该位置压力迅速释放, 焰流处于欠膨胀状态, 从而产生膨胀波, 膨胀波在自由边界反射产生压缩波, 两者不断反射与相交, 形成连续的马赫锥, 马赫锥的存在也是焰流达到超音速的重要依据。能观察到以上细节, 说明网格的数目和质量符合模拟要求。

2.2 悬浮液体积流量分析

图 7 和图 8 分别为体积流量 100 mL/min、颗粒体积分数 15% 的悬浮液进行喷涂时, 液滴/颗粒在不同距离下的温度与和速度分布。悬浮液注入流场后, 液滴/颗粒的温度与速度会迅速上升。随着液滴/颗粒运动至枪管出口, 焰流中心的液滴/颗粒温度和速度会显著高于焰流周围液滴/颗粒的温

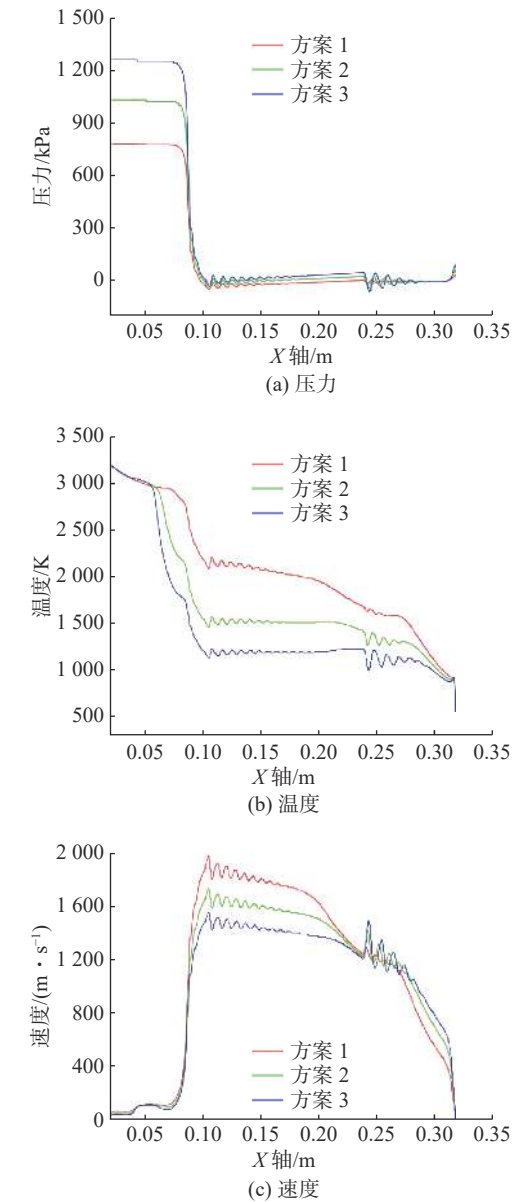


图 6 流场中心沿轴线方向压力、温度与速度变化

Fig. 6 Changes of pressure, temperature and velocity in the center of flow field along the axis

度与速度。这是因为中心焰流的温度与速度受冷却系统与边界层效应的影响，比靠近壁面焰流的温度与速度高，进而显著增强了对液滴/颗粒的加热和加速效果，直至被基板捕捉，基板中心颗粒的温度与速度仍高于基板周围颗粒的温度与速度。因此，悬浮液注入流场后使其到达焰流中心，有助于液滴/颗粒被充分加热和加速，从而提高颗粒被基板捕捉时的温度与速度。

图 9 为不同悬浮液体积流量下，流场中心沿轴线方向的参数变化。悬浮液注入流场后，随着热能与动能的交换，流场中心的温度与速度会有所下降。在注入口直径确定的情况下，随着悬浮液体积流量的增加，悬浮液的质量流量与注入速度逐渐增大。当体积流量为 50 mL/min 时，由于动能不足，悬浮液无法达到焰流中心，导致流场中心温度与速度下降幅度很小。当体积流量增加至 100 mL/min 时，悬浮液得以到达焰流中心，引起了流场中心温度与速度的显著下降。随着悬浮液体积流量增加至 150 mL/min，伴随悬浮液质量流量的增大，流场中心温度与速度下降的幅度进一步增大。然而，当悬浮液体积流量增至 200 mL/min 时，由于动能过大，悬浮液直接穿过焰流中心冲击枪管下壁面，导致流场中心的温度与速度不再下降，还在悬浮液注入口附近有回升的趋势。因此，在注入口直径确定的情况下，通过调节悬浮液的体积流量，可以确保悬浮液注入流场后能够到达焰流中心，实现充分加热和加速。

图 10 给出了在喷涂过程中不同悬浮液体积流量下液滴/颗粒平均温度与速度的变化。随着悬浮液体积流量的增加，液滴/颗粒在喷涂过程中的温度逐渐降低。随着悬浮液体积流量的增加，悬浮液的质量流量随之增大。在相同的火焰热功率

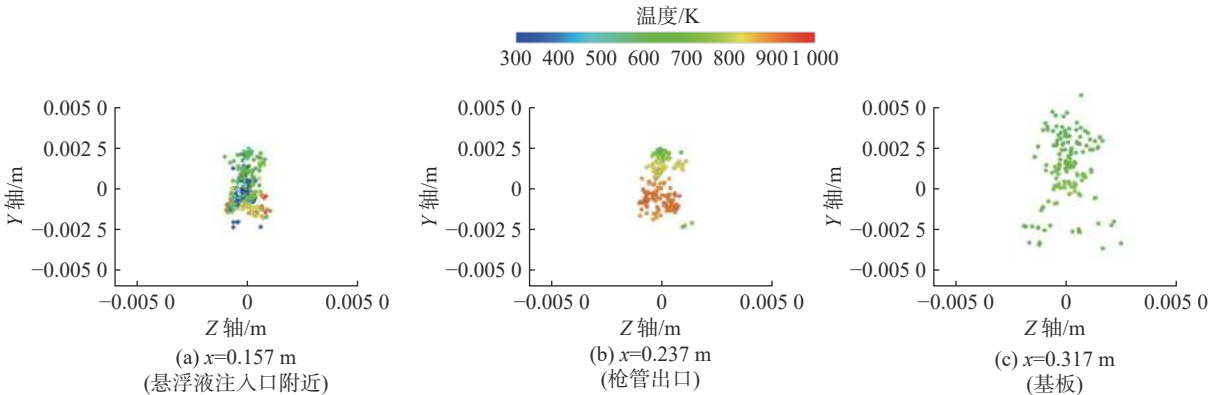


图 7 不同距离液滴/颗粒温度分布

Fig.7 Droplet/particle temperature distribution at different distances

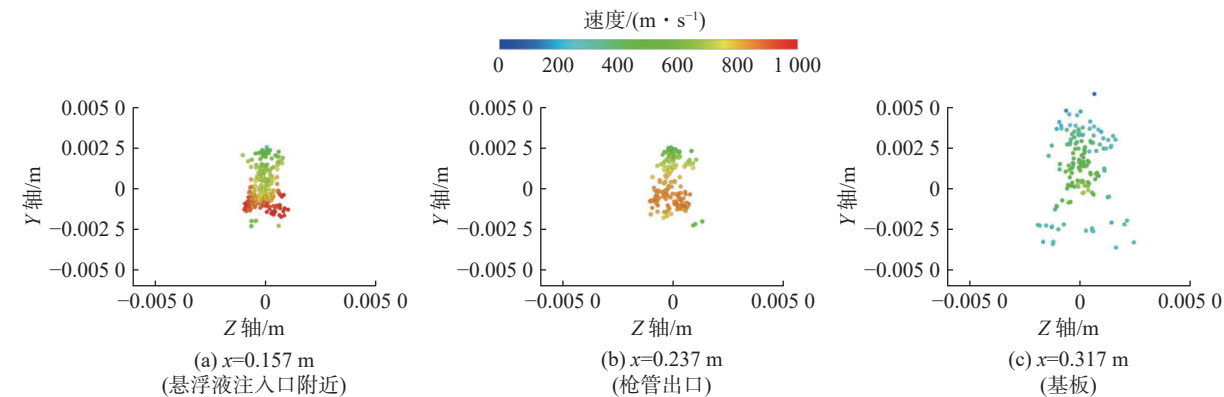


图 8 不同距离液滴/颗粒速度分布

Fig.8 Droplet/particle velocity distribution at different distances

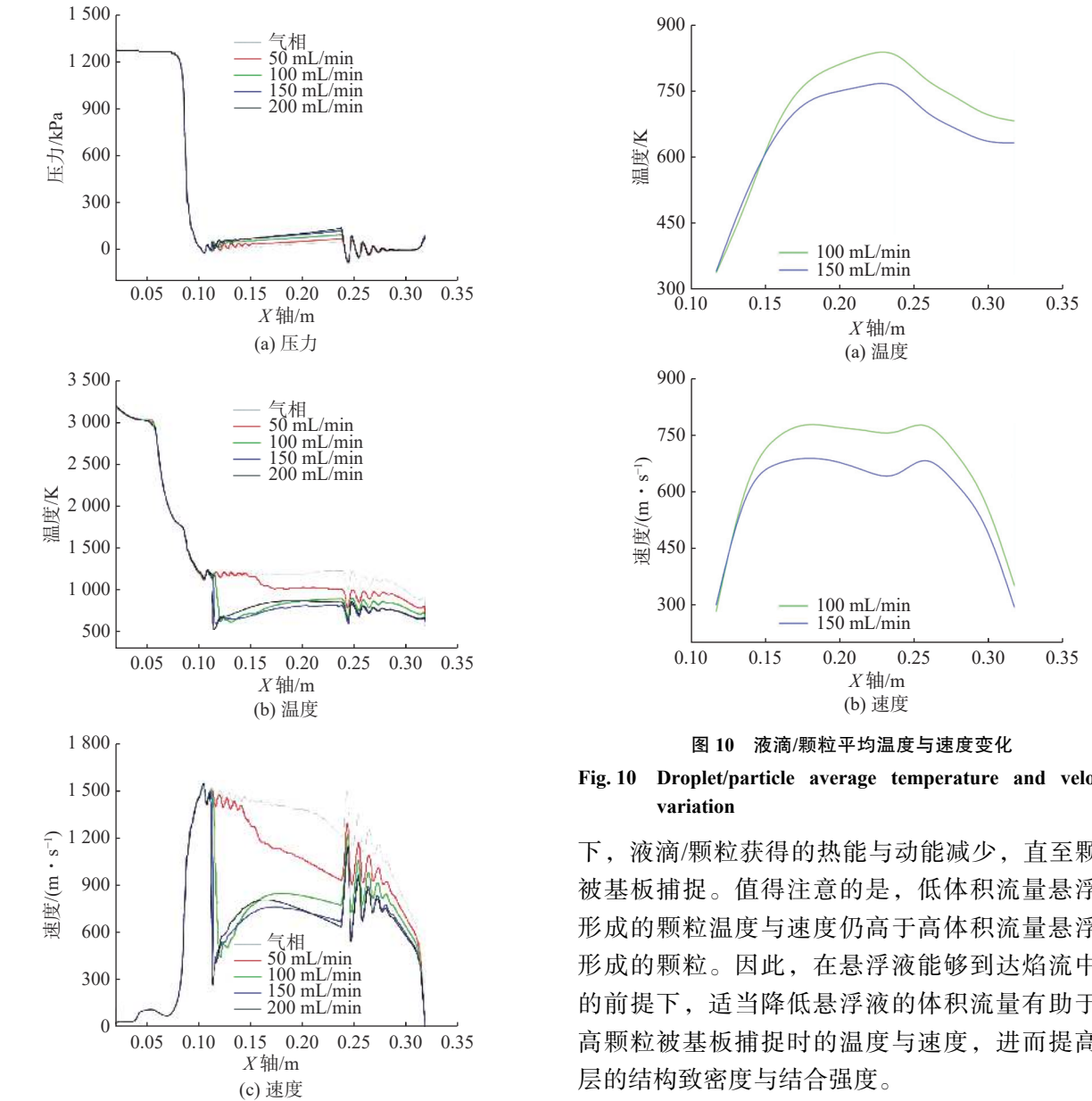


图 10 液滴/颗粒平均温度与速度变化

Fig.10 Droplet/particle average temperature and velocity variation

下，液滴/颗粒获得的热能与动能减少，直至颗粒被基板捕捉。值得注意的是，低体积流量悬浮液形成的颗粒温度与速度仍高于高体积流量悬浮液形成的颗粒。因此，在悬浮液能够到达焰流中心的前提下，适当降低悬浮液的体积流量有助于提高颗粒被基板捕捉时的温度与速度，进而提高涂层的结构致密度与结合强度。

在基板附近会产生弓形激波，这种激波的作用导致流场的压力与温度出现回升，速度会显著下降，从而形成滞止区，导致基板附近颗粒的速

图 9 流场中心沿轴线方向压力、温度与速度变化

Fig.9 Changes of pressure, temperature and velocity in the center of flow field along the axis

度大幅降低。

2.3 悬浮液颗粒体积分数分析

图 11 为不同悬浮液颗粒体积分数下，流场中心沿轴线方向的参数变化。由于注入口径与体积流量相同，悬浮液的注入速度保持一致。随着悬浮液颗粒体积分数的变化，悬浮液到达焰流中心的情况也有所不同。当颗粒体积分数为 5% 的悬浮液注入流场时，由于动能不足，无法立即到达焰流中心，因此流场中心的温度与速度并未立即

下降。但是，当悬浮液颗粒体积分数增加至 15% 时，流场中心的温度与速度立即开始下降，表明此时悬浮液注入流场后能够迅速到达焰流中心。值得注意的是，随着悬浮液颗粒体积分数进一步增加至 25% 时，悬浮液注入流场后到达焰流中心的情况几乎没有变化。与颗粒体积分数相比，质量流量对悬浮液到达焰流中心状况的影响更为显著。

图 12 为不同悬浮液颗粒体积分数下，喷涂过程中液滴/颗粒平均温度与速度的变化。随着颗粒体积分数的增加，枪管出口液滴/颗粒的温度与速度逐渐降低，但是温度方面的差异较小。当颗粒运动到基板附近时，速度几乎没有差异，主要是由于随着悬浮液颗粒体积分数的增加，质量流量逐渐增大，在相同的火焰热功率下，液滴/颗粒获得的热能与动能也会更少。然而，低颗粒体积分数的悬浮液形成的颗粒粒径小、质量轻，当运动到基板附近时，相对于高颗粒体积分数形成的颗粒，受滞止区的影响更加显著。这导致在颗粒被基板捕捉时，不同颗粒体积分数的悬浮液产生的颗粒的速度接近。

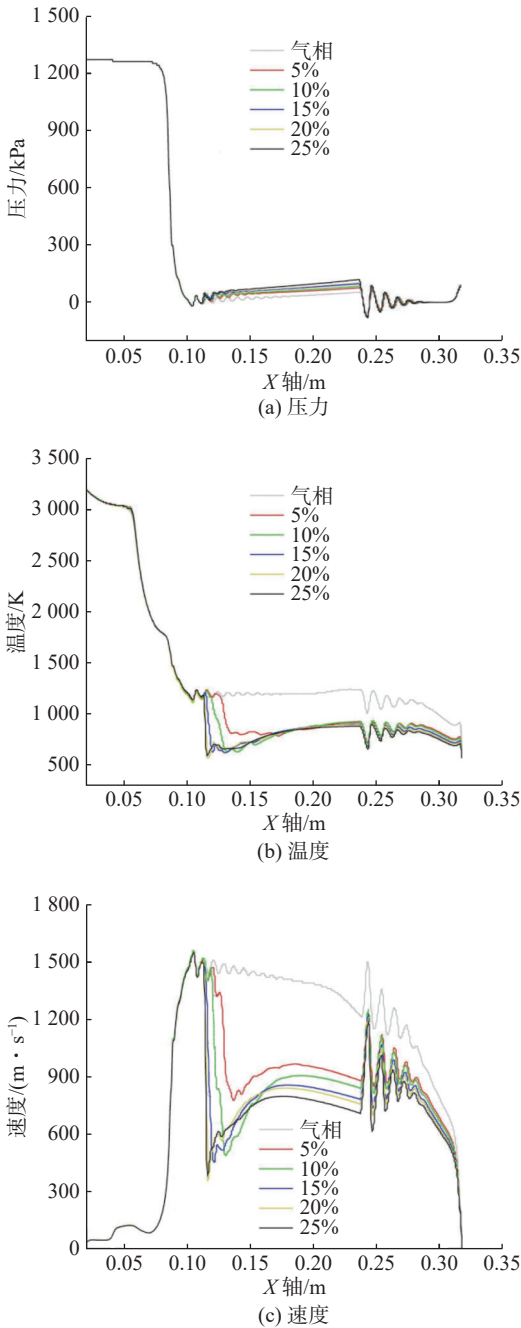


图 11 流场中心沿轴线方向压力、温度与速度变化
Fig. 11 Changes of pressure, temperature and velocity in the center of flow field along the axis

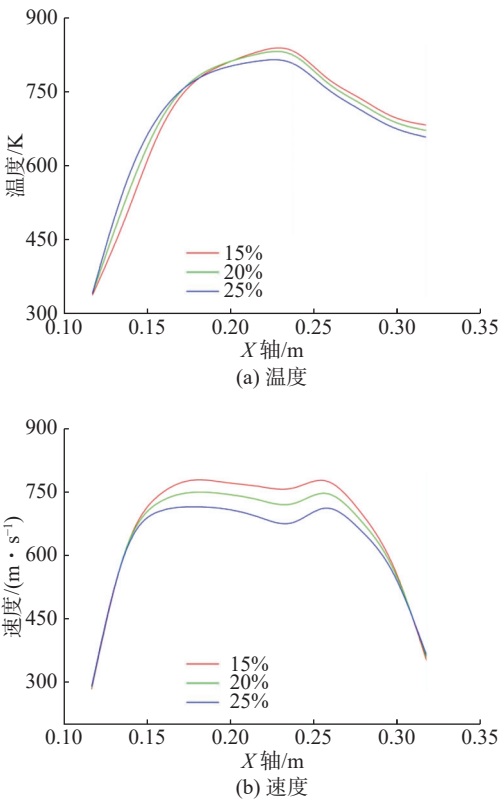


图 12 液滴/颗粒平均温度与速度变化
Fig. 12 Droplet/particle average temperature and velocity variation

图 13、图 14 和图 15 分别为不同悬浮液颗粒体积分数下, 颗粒被基板捕捉时的粒径、温度与速度分布情况。随着颗粒体积分数的提高, 颗粒被基板捕捉时的粒径逐渐增大, 但其主要分布范

围保持不变; 同时, 温度逐渐减小, 速度则几乎没有差异。因此, 在悬浮液能够到达焰流中心的前提下, 适当提高悬浮液颗粒体积分数可以在不影响颗粒被基板捕捉的情况下, 提高单位时间内

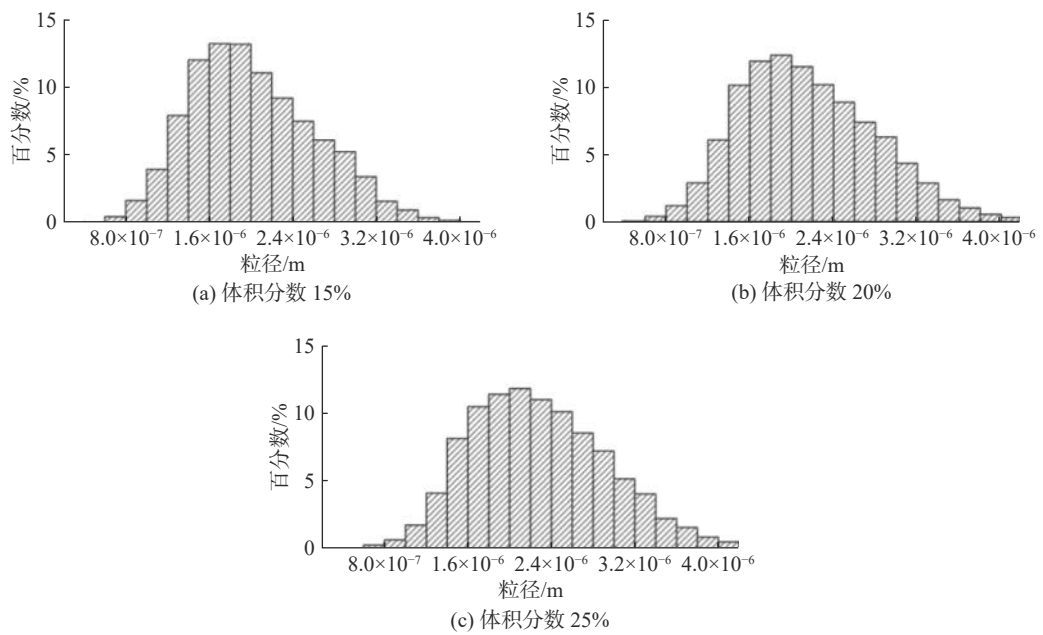


图 13 颗粒被基板捕捉时的粒径分布

Fig.13 Diameter distribution of particles captured by substrate

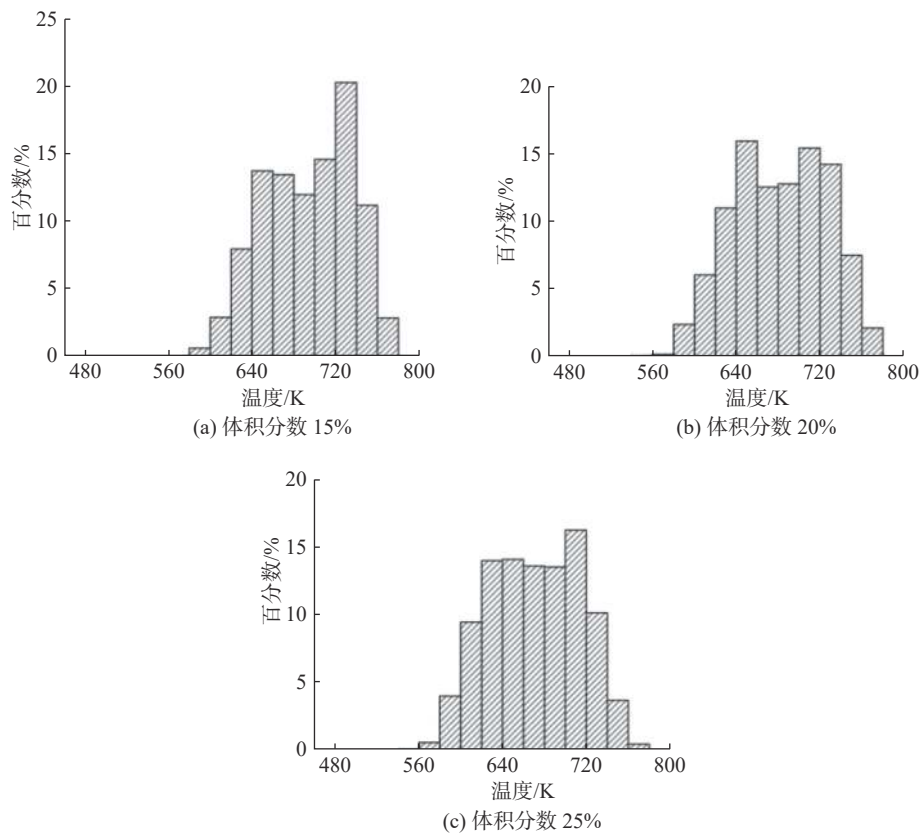


图 14 颗粒被基板捕捉时的温度分布

Fig.14 Temperature distribution of particles captured by substrate

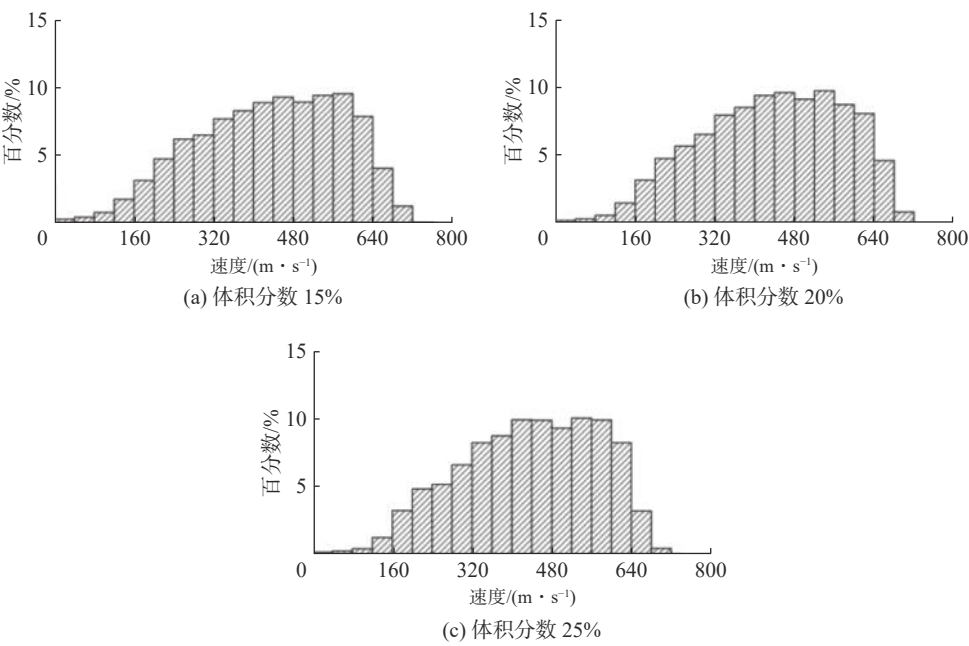


图 15 颗粒被基板捕捉时的速度分布

Fig.15 Velocity distribution of particles captured by substrate

的颗粒输出量，从而提高涂层的沉积效率。另一方面，适当降低悬浮液颗粒体积分数则可以在不影响颗粒被基板捕捉的前提下，降低颗粒粒径，进而提高涂层的结构精细度。

3 结 论

采用三维 Euler-Lagrange 耦合建模的方法，研究了两阶段悬浮液超音速火焰喷涂过程中的流场分布以及液滴/颗粒行为，得出以下结论：

- a. 随着注入混合室 N₂ 质量流量的增加，枪管出口的温度逐渐降低，而速度几乎没有变化。在不影响焰流速度的前提下，调节 N₂ 质量流量可以调节焰流温度，进而影响颗粒温度，以满足不同温敏材料涂层制备的工艺要求。
- b. 在悬浮液注入口直径确定的情况下，调节悬浮液的体积流量，使其能够迅速到达焰流中心被充分加热和加速。在悬浮液能够到达焰流中心的前提下，适当降低悬浮液的体积流量有助于提高颗粒被基板捕捉时的温度与速度，从而提高涂层的结构致密度与结合强度。
- c. 在悬浮液能够立即到达焰流中心的情况下，适当提高或降低悬浮液颗粒体积分数可以在不影响颗粒被基板捕捉时，提高单位时间内的颗粒输出量或降低颗粒粒径，从而提高涂层的沉积效率或提高涂层的结构精细度，具体调整可根据不同的工艺要求进行。

参考文献：

[1] AGHASIBEIG M, TARASI F, LIMA R S, et al. A review on suspension thermal spray patented technology evolution[J]. *Journal of Thermal Spray Technology*, 2019, 28(7): 1579–1605.

[2] DALIR E, DOLATABADI A, MOSTAGHIMI J. Modeling the effect of droplet shape and solid concentration on the suspension plasma spraying[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2020, 161: 120317.

[3] JADIDI M, MOGHADERNEJAD S, DOLATABADI A. A comprehensive review on fluid dynamics and transport of suspension/liquid droplets and particles in High-Velocity Oxygen-Fuel (HVOF) thermal spray[J]. *Coatings*, 2015, 5(4): 576–645.

[4] GADOW R, KILLINGER A, RAUCH J. Introduction to high-velocity suspension flame spraying (HVSFS)[J]. *Journal of Thermal Spray Technology*, 2008, 17(5/6): 655–661.

[5] GANVIR A, CURRY N, MARKOCSAN N, et al. Comparative study of suspension plasma sprayed and suspension high velocity oxy-fuel sprayed YSZ thermal barrier coatings[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2015, 268: 70–76.

[6] KHATIBNEZHAD H, AMBRIZ-VARGAS F, BEN ETTOUIL F, et al. Role of phase content on the photocatalytic performance of TiO₂ coatings deposited by suspension plasma spray[J]. *Journal of the European Ceramic Society*, 2022, 42(6): 2905–2920.

[7] 付耀耀, 李华. 利用热喷涂技术制备二氧化钛光催化涂层研究现状与展望 [J]. *热喷涂技术*, 2019, 11(1): 1–8.

[8] BOZORGTABAR M, RAHIMPOUR M, SALEHI M.

Effect of thermal spray processes on anatase-rutile phase transformation in nano-structured TiO_2 photo-catalyst coatings[J]. *Surface Engineering*, 2010, 26(6): 422–427.

- [9] SHAN Y G, SHEN C H, JIA L B, et al. Modeling of two-phase flow and heat transfer in low-temperature oxygen-fuel spray process[J]. *Journal of Thermal Spray Technology*, 2014, 23(1/2): 14–20.
- [10] CHADHA S, JEFFERSON-LOVEDAY R, VENTURI F, et al. A computational and experimental investigation into radial injection for suspension high velocity oxy-fuel (SHVOF) thermal spray[J]. *Journal of Thermal Spray Technology*, 2019, 28(6): 1126–1145.
- [11] DALIR E, DOLATABADI A, MOSTAGHIMI J. Modeling of suspension plasma spraying process including arc movement inside the torch[J]. *Journal of Thermal Spray Technology*, 2019, 28(6): 1105–1125.
- [12] JADIDI M, MOGHTEADERNEJAD S, DOLATABADI A. Numerical modeling of suspension HVOF spray[J]. *Journal of Thermal Spray Technology*, 2016, 25(3): 451–464.
- [13] JADIDI M, MOUSAVI M, MOGHTEADERNEJAD S, et al. A three-dimensional analysis of the suspension plasma spray impinging on a flat substrate[J]. *Journal of Thermal Spray Technology*, 2015, 24(1/2): 11–23.
- [14] CHADHA S, JEFFERSON-LOVEDAY R, HUSSAIN T. Effect of nozzle geometry on the gas dynamics and evaporation rates of Suspension High Velocity Oxy Fuel

(SHVOF) thermal spray: a numerical investigation[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2019, 371: 78–89.

- [15] MAHRUKH M, KUMAR A, GU S, et al. Modeling the effects of concentration of solid nanoparticles in liquid feedstock injection on high-velocity suspension flame spray process[J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2016, 55(9): 2556–2573.
- [16] FARROKHPANAH A, COYLE T W, MOSTAGHIMI J. Numerical study of suspension plasma spraying[J]. *Journal of Thermal Spray Technology*, 2017, 26(1/2): 12–36.
- [17] GOZALI E, MAHRUKH M, GU S, et al. Numerical investigation on effects of nanoparticles on liquid feedstock behavior in High Velocity Oxygen Fuel (HVOF) suspension spraying[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2015, 280: 370–377.
- [18] LIU A B, MATHER D, REITZ R D. Modeling the effects of drop drag and breakup on fuel sprays[J]. *SAE Transactions*, 1993, 102(3): 83–95.
- [19] MORSE S A, ALEXANDER A J. An investigation of particle trajectories in two-phase flow systems[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1972, 55(2): 193–208.
- [20] BEALE J C, REITZ R D. Modeling spray atomization with the Kelvin-Helmholtz/Rayleigh-Taylor hybrid model[J]. *Atomization and Sprays*, 1999, 9(6): 623–650.

(编辑: 董 伟)

[上接第 551 页]

- [17] WANG S Q, FAN Y N, JI S Y. Interaction between superquadric particles and triangular elements and its application to hopper discharge[J]. *Powder Technology*, 2018, 339: 534–549.
- [18] 刘璐, 季顺迎. 基于扩展多面体包络函数的快速接触搜索算法 [J]. *中国科学:物理学 力学 天文学*, 2019, 49(6): 064601.
- [19] ZHONG W Q, YU A B, LIU X J, et al. DEM/CFD-DEM modelling of non-spherical particulate systems: theoretical developments and applications[J]. *Powder Technology*, 2016, 302: 108–152.
- [20] 崔泽群, 陈友川, 赵永志, 等. 基于超二次曲面的非球形离散单元模型研究 [J]. *计算力学学报*, 2013, 30(6): 854–859.
- [21] CLEARY P W, SINNOTT M D, MORRISON R D, et al. Analysis of cone crusher performance with changes in material properties and operating conditions using DEM[J]. *Minerals Engineering*, 2017, 100: 49–70.
- [22] WANG S Q, ZHOU Z Y, JI S Y. Radial segregation of a gaussian-dispersed mixture of superquadric particles in a horizontal rotating drum[J]. *Powder Technology*, 2021, 394: 813–824.

- [23] ZHENG Z M, ZANG M Y, CHEN S H, et al. A GPU-based DEM-FEM computational framework for tire-sand interaction simulations[J]. *Computers & Structures*, 2018, 209: 74–92.
- [24] BARR A H. Superquadrics and angle-preserving transformations[J]. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 1981, 1(1): 11–23.
- [25] ZHAO Y Z, XU L, UMBANHOWAR P B, et al. Discrete element simulation of cylindrical particles using super-ellipsoids[J]. *Particulate*, 2019, 46: 55–66.
- [26] PODLOZHNYUK A, PIRKER S, KLOSS C. Efficient implementation of superquadric particles in Discrete Element Method within an open-source framework[J]. *Computational Particle Mechanics*, 2016, 4(1): 101–118.
- [27] 王嗣强, 季顺迎. 考虑等效曲率的超二次曲面单元非线性接触模型 [J]. *力学学报*, 2018, 50(5): 1081–1092.
- [28] JONSÉN P, PÅLSSON B I, TANO K, et al. Prediction of mill structure behaviour in a tumbling mill[J]. *Minerals Engineering*, 2011, 24(3/4): 236–244.

(编辑: 丁红艺)