

低功率AC-HVAF热喷涂的模拟及纯铝涂层的制备

宋超¹, 刘富强¹, 薛勇¹, 王高², 刘云¹

(1. 中北大学材料科学与工程学院, 山西太原 030051; 2. 中北大学信息与通信工程学院, 山西太原 030051)

摘要: AC-HVAF喷涂是一种新型的超音速火焰热喷涂技术, 涉及复杂的高速可压缩流体动力学问题与流固耦合问题。前期研究往往聚焦高功率的AK-07喷枪, 该喷枪适用于制备高熔点涂层, 但对于低功率的AK-05喷枪研究较少。本文以AK-05喷枪为研究对象建立了二维模型, 然后基于计算流体动力学方法分析了AK-05喷枪的流体速度、流体温度和流体成分分布。此外, 本研究还利用离散相模型计算了不同粒径的铝颗粒通过流场时的速度和温度变化, 并通过实际铝涂层的制备进行了验证。流体速度与温度模拟结果表明: AK-05喷枪兼具射流速度高与射流温度低的特点; 特别是引入辅助燃料氢气将进一步降低射流温度, 最大温降可达300 K。流体组分分布模拟结果显示空气中的氧气能够快速侵入射流, 这可能导致涂层中的含氧量提高。粒子速度与温度模拟结果暗示小颗粒速度高, 过热熔化概率也高; 大颗粒则反之。模拟分析与实际铝涂层制备均表明AK-05喷枪适合制备低熔点涂层。

关键词: AC-HVAF喷涂; AK-05喷枪; 喷涂流场

中图分类号: TG174.4 **文献标识码:** A **doi:** 10.62756/jnuc.issn.1673-3193.2024.11.0001

引用格式: 宋超, 刘富强, 薛勇, 等. 低功率AC-HVAF热喷涂的模拟及纯铝涂层的制备[J]. 中北大学学报(自然科学版), 2025, 46(3): 379-388.

SONG Chao, LIU Fuqiang, XUE Yong, et al. Simulation of low-power AC-HVAF and preparation of pure aluminum coating[J]. Journal of North University of China(Natural Science Edition), 2025, 46(3): 379-388.

Simulation of Low-Power AC-HVAF and Preparation of Pure Aluminum Coating

SONG Chao¹, LIU Fuqiang¹, XUE Yong¹, WANG Gao², LIU Yun¹

(1. School of Materials Science and Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China;

2. School of Information and Communication Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: Activated combustion high-velocity air-fuel (AC-HVAF) is a novel supersonic flame thermal spray technology that involves complex problems relating to high-speed compressible fluid dynamics and fluid-solid coupling. Previous studies focused on the high-power AK-07 gun which was usually suitable for producing high melting point coatings, but less research had been done on the low-power AK-05 gun. In this paper, a two-dimensional model was established with AK-05 spray gun as the research object, and then the fluid velocity, fluid temperature and fluid composition distribution of AK-05 spray gun were analyzed based on computational fluid dynamics. In addition, the present study calculated the velocity and temperature variations of aluminum particles of different particle sizes as they passed through the flow field using a discrete phase model, which was validated by the preparation of actual aluminum coatings. The fluid velocity and temperature in the simulation results show that the AK-05 gun is characterized by both high jet velocity and low jet

收稿日期: 2024-11-05

作者简介: 宋超(1997-), 男, 硕士生, 主要从事热喷涂流场数值模拟的研究。

通信作者: 刘富强(1978-), 男, 副教授, 博士, 主要从事材料表面与界面的研究。E-mail: lfq@nuc.edu.cn.

temperature; In particular, the incorporation of auxiliary fuel hydrogen will significantly reduce the jet temperature, with a maximum potential temperature decrease of 300 K. The fluid composition distribution in the simulation results suggest that oxygen in the air can rapidly intrude into the jet stream, which may lead to an increase in the oxygen content of the coating. The velocity and temperature of the particles in the results indicate that small particles are fast and have a high probability of been superheated and melted, while the opposite is true for large particles. Both simulated and actual aluminum coatings have shown that the AK-05 gun is suitable for the preparation of low melting point coatings.

Key words: AC-HVAF spray; AK-05 spray gun; flow field of thermal spray

0 引言

热喷涂技术从研发至今已有100余年,这是一种提高零部件耐腐蚀、耐磨损、耐高温等性能的重要方法,在现代工业中得到了广泛应用^[1]。与其他表面改性技术相比,热喷涂具有涂层制备灵活度高、易于自动化加工、适应性强等诸多优点^[2]。随着热喷涂技术的不断丰富与发展,多种喷涂方法应运而生,主要包括火焰喷涂、电弧喷涂、冷喷涂、等离子喷涂和爆炸喷涂等。2001年,美国UniqueCoat公司在前苏联科学研究成果的基础上成功开发出了新型超音速火焰喷涂(Activated Combustion High-Velocity Air-Fuel, AC-HVAF),该喷涂技术一经问世便受到学者广泛关注。与传统的以氧气为助燃气体的超音速火焰喷涂(High-Velocity Oxygen-Fuel, HVOF)不同,AC-HVAF喷涂的助燃剂由氧气更换为更廉价的高压空气,既可有效降低喷涂成本,又可产生更低的火焰温度与更高的气流速度^[3-4]。

当前国内外不同厂商生产了多种型号的AC-HVAF喷枪,具有代表性的有美国Kermetico公司的AK系列喷枪。其中,AK-07喷枪具有较大功率,适合对大型辊件进行喷涂;AK-06喷枪适用于在各种几何形工件表面制备碳化钨涂层;AK-05喷枪适合喷涂低熔点材料;AK-5H喷枪具有小巧灵活的特点,可有效完成机械手无法进行的喷涂作业。美国UniqueCoat公司生产的M³™喷枪所制备的硬质合金涂层具有较高质量。郑州立佳公司的HA系列喷枪所制备涂层也具有孔隙率低、结合力强等优异特点。这些不同配置的喷枪基本原理大体相同,即处于燃烧室内的红热陶瓷片能够持续点燃燃料与空气的混合物,从而被称为激发燃烧。超音速火焰喷涂技术涉及复杂的高速可压缩流体动力学问题与流固耦合问题。从已有文献来看,学者对于喷枪特性的研究较多地集中于Kermetico公司的AK-07喷枪。Jiang

等^[5]构建了三维流体动力学模型,研究了非晶态合金颗粒在流场中的飞行行为。研究表明,颗粒尺寸及注入位置均会对颗粒在流场中的速度与温度产生很大影响。此外,氮气流量过大是导致喷嘴堵塞的重要原因。Gao等^[6-7]开发了二维流体动力学模型,用于比较丙烷燃料和氢燃料在AC-HVAF喷涂流场中特性的差异,并在后期研究中探讨了喷嘴几何形状对流场的影响。研究发现,氢燃料在喷涂流场中表现出较低的温度和较高的速度。减小喷嘴喉口直径可提升粒子的飞行速度,而对其温度影响甚微。Li等^[8]基于动态网格法,研究了辊筒速度对喷涂火焰特性和颗粒飞行行为的影响。计算结果表明,随着辊筒速度的增加,接触气流压力逐渐增大,但温度变化不大。以上学者主要关注了喷管结构、燃料类型及气体流量等因素对喷涂流场的影响,却忽视了其他辅助结构的重要性。

Liu等^[9]分析了陶瓷片对流体流动的影响并讨论了喷枪中径向入口的优势。结果显示,陶瓷片能有效减少气流间的湍流,提高流体运动方向的一致性。同时,在喷枪中添加径向进气口可使气体混合更充分。Bobzin等^[10]进行了全面的数值模拟,研究了在不同喷涂距离和载气条件下,不同粒径粉末的速度和温度变化,并通过实验验证了模拟结果,表明数值模拟可为实际喷涂参数的选择提供可靠依据。上述学者构建了较为完善的三维几何模型,对喷涂流场中的流体动力学特性进行了深入分析。然而,这些研究均是基于高功率的AK-07喷枪展开的。

对于适用于低熔点材料的小功率喷枪的相关研究尚未在公开文献中见到。这种小功率喷枪对于一些应用场景具有重要意义。例如:在镁合金表面制备铝基涂层,以改善镁合金的防腐性能;在高精度表面制备低热应力涂层,以稳定其表面组织结构,提高其表面精度。本文以AK-05喷枪为原型建立二维模型,并基于计算流体动力学(Computational Fluid Dynamics, CFD)方法,模拟分析了这种小功率喷枪

的温度、速度等流场特征,重点分析了辅助燃料氢气对于射流温度的影响。最后,采用模拟与实验相结合的方法,探讨了喷涂颗粒大小对沉积状态的影响。

1 模型设计及理论基础

1.1 喷枪喷涂原理

AK-05喷枪喷涂过程如图 1 所示。在喷涂过程中,汽化后的丙烷与空气在预混室内混合,然后通

过陶瓷片上的小孔流入燃烧室。燃烧室壁面上的火花塞能够点燃初始的混合气体。在随后的燃烧过程中,陶瓷片温度升高,故而能够持续点燃后续进入燃烧室的混合气体。燃烧产物流经拉伐尔喷管并加速形成超音速射流。粉末粒子同载气氮气轴向输送至燃烧室并加热加速,之后由高速气流携带,最终撞击基体形成涂层。压缩空气流经喷枪外壁后径向注入预混室,因此压缩空气既是燃料的助燃剂,同时也可对喷枪的外壁面起到冷却作用。

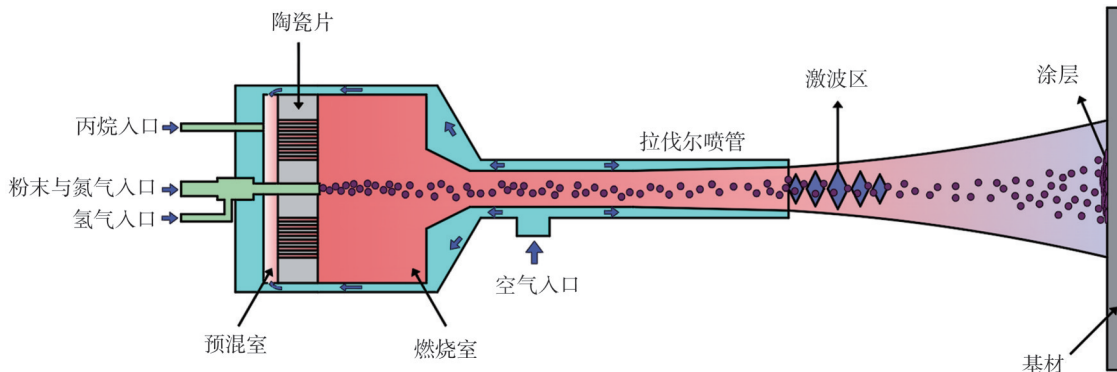


图 1 AK-05 喷枪喷涂过程示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the AK-05 spray process

1.2 流体动力学基本物理定律

喷枪内部流场的模拟计算建立在流体动力学之上,因此也遵循质量守恒、动量守恒与能量守恒^[11]。

质量守恒方程

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0, \tag{1}$$

动量守恒方程

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\bar{\tau}), \tag{2}$$

能量守恒方程

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\rho \left(e + \frac{v^2}{2} \right) \right) + \nabla \cdot \left(\rho v \left(h + \frac{v^2}{2} \right) \right) = \nabla \cdot \left(k_{\text{eff}} \nabla T - \sum_j h_j \vec{J}_j + \bar{\tau}_{\text{eff}} \cdot \vec{v} \right), \tag{3}$$

式中: ρ 为气体密度; p 为静压; \vec{v} 为气体速度; $\bar{\tau}$ 为应力张量; k_{eff} 为有效导热率; \vec{J}_j 为物质 j 的扩散通量; h 为焓; e 为内能; $\bar{\tau}_{\text{eff}}$ 为有效应变率张量。

1.3 湍流模型

如图 1 所示, AK-05 喷枪的内部结构非常复杂,包括预混室、陶瓷片、燃烧室及拉伐尔喷管等。这些复杂结构必然导致流体流动形式呈现多种变化。根据流体动力学理论,可以预测喷枪内部将包含剪切流、向后台阶流及圆管射流等^[12]。描述这些复杂

的流动需要选择恰当的湍流模型。前期研究显示 $k-\epsilon$ 湍流模型能够较好地描述喷涂流场的特征^[8,13-14]。 $k-\epsilon$ 湍流模型主要包括 3 个子模型,分别为 standard $k-\epsilon$ 模型、RNG $k-\epsilon$ 模型和 Realizable $k-\epsilon$ 模型。相比 standard 模型和 RNG 模型, Realizable $k-\epsilon$ 模型具有三个优势^[12]: a) 模型湍流动力粘性系数计算公式发生改变,引进了与旋转相关的函数; b) 模型耗散率方程导出了均方涡度波动运输的精确方程; c) 消除了圆形射流的流动异常。因此,本研究选用 Realizable $k-\epsilon$ 湍流模型来描述喷涂过程的气体流场。模型的微分方程为

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho k u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \epsilon - Y_M, \tag{4}$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho \epsilon u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + \rho C_1 S \epsilon - \rho C_2 \frac{\epsilon^2}{k + \sqrt{\nu \epsilon}} + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} C_{3\epsilon} G_b, \tag{5}$$

式中: k 为湍流动能; u_j 为 j 方向上的速度; ϵ 为湍流能量耗散率; G_k 为平均速度梯度产生的湍流动能; G_b 为浮力产生的湍流动能; Y_M 为总体耗散率; C_2 和 $C_{1\epsilon}$ 为常数; σ_k 和 σ_ϵ 分别为 k 和 ϵ 的湍流普朗特数; μ_t 为湍流粘度。

1.4 燃烧模型

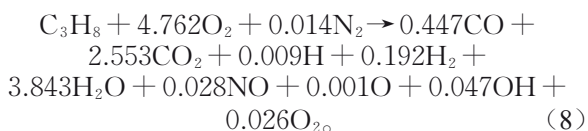
本文选择丙烷(C₃H₈)作为主燃料。由于主燃料在高压条件下燃烧,燃烧反应的阿伦尼乌斯速率非常大,因而涡流耗散模型(Eddy Dissipation Model, EDM)能够较好地描述燃烧过程。也就是说,EDM模型假定反应的阿伦尼乌斯速率无限大,反应主要由燃料与助燃剂的混合速率控制。反应 r 中物质 i 的产生速率 R_{ij} 由式(6)和式(7)中较小者表示^[15]。

$$R_{i,r} = v'_{i,r} M_{w,i} A \rho \frac{\epsilon}{k} \min \left(\frac{Y_R}{\sum_P Y_P}, \frac{Y_R}{v'_{R,r} M_{w,R}} \right), \quad (6)$$

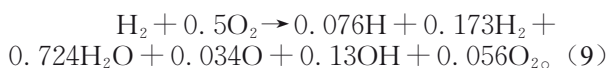
$$R_{i,r} = v'_{i,r} M_{w,i} A B \rho \frac{\epsilon}{k} \frac{\sum_P Y_P}{\sum_j v'_{j,r} M_{w,j}}, \quad (7)$$

式中: $v'_{i,r}$ 为反应 r 中反应物 i 与 j 的化学计量系数; $M_{w,i}$ 为反应物 i 的分子量; Y_P 为反应生成物 P 的质量分数; Y_R 为反应物 R 的质量分数; $\sum_P Y_P$ 为所有反应物质量分数的总和; N 为反应体系中反应物的总和; $\sum_j v'_{j,r} M_{w,j}$ 为所有反应物 j 在反应体系中的湍流速度分量与分子量的乘积之和; A 与 B 均为常数,其值分别为4.0与0.5。

理想情况下,丙烷与氢气两种可燃物完全燃烧后的产物为H₂O和CO₂。但是,在实际喷涂作业中,燃烧室内的高温高压会引起产物热解、电离等,生成CO、H、O等物质^[6,16]。因此,本研究采用Gordon与McBride开发的化学平衡反应代码^[17],反应式为^[5]



辅助燃料(氢气)的燃烧反应式为



1.5 离散相模型

实际喷涂过程中,粒子与流体间存在复杂的

双向耦合作用。然而前期研究表明^[18-20],单向耦合足以说明粒子在喷涂过程中的飞行特性。本研究假设粒子外观为球形,且只受曳力的作用。根据牛顿第二定律,粒子运动方程表示为

$$\frac{d\vec{u}_p}{dt} = \frac{3}{4} \frac{C_d \rho (\vec{u} - \vec{u}_p) |\vec{u}_p - \vec{u}|}{\rho_p d_p}, \quad (10)$$

式中: \vec{u} 为流体速度; \vec{u}_p 为粒子速度; ρ 为流体密度; ρ_p 为粒子密度; C_d 为曳力系数; d_p 为粒子粒径。

1.6 网格划分及边界条件

网格质量与数量对模拟结果的精确性具有重要影响^[21-22]。本研究采用结构化四边形网格,并注重网格长宽比、扭曲度、正交性等关键指标,确保所有网格(边界层网格除外)均具有较高质量。为验证网格数量的独立性,本研究设计了3种密度网格,网格总数分别为 6.4×10^4 , 25.2×10^4 和 45.6×10^4 。计算结果显示,网格数对速度场的影响很小,对温度场影响较大。网格数为 6.4×10^4 与 25.2×10^4 时对燃烧室内温度场的预测差异较大,而网格数为 25.2×10^4 与 45.6×10^4 的计算结果差异较小,表明网格数为 25.2×10^4 时满足计算精度要求。

模型几何参数和边界条件如图2所示,模型主要包括预混室、陶瓷片、燃烧室、喷管和被喷涂的基体等。需要注意的是,由于采用二维旋转轴对称模型,模型中的一些小孔实际表示圆环,这种简化是由于气体在小孔(如陶瓷蜂窝孔)附近的周向速度较小。模型中出口设定为压力出口,其值为0.1 MPa;气体入口均设定为质量流入口,各种气体的流量见表1。

表1 试验方案及参数
Tab. 1 Experimental program and parameters

模拟方案	空气流量/ (kg·s ⁻¹)	丙烷流量/ (kg·s ⁻¹)	氮气流量/ (kg·s ⁻¹)	氢气流量/ (kg·s ⁻¹)
H ₂ -0	3.5×10^{-2}	2.1×10^{-3}	3×10^{-4}	—
H ₂ -10	3.5×10^{-2}	2.1×10^{-3}	3×10^{-4}	3×10^{-5}

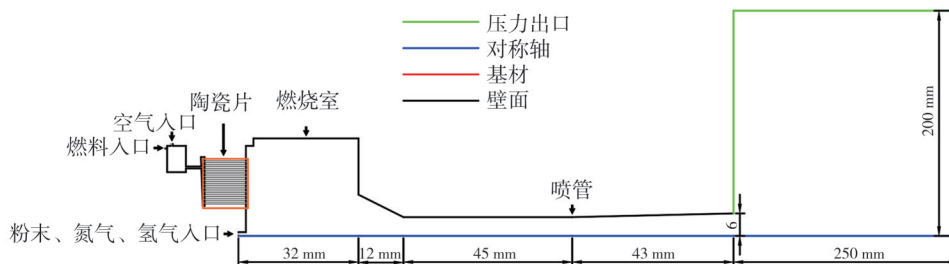


图2 几何参数及边界条件

Fig. 2 Geometric parameters and boundary conditions

1.7 研究思路

表 1 中的试验名称是依据喷涂过程中辅助燃料(氢气)与载气(氮气)的质量分数比进行命名的,在模拟方案 H₂-0 中并没有采用辅助燃料氢气,而模拟方案 H₂-10 中注入辅助燃料氢气的质量流量占 N₂ 质量流量的 10%。前者主要研究仅点燃主燃料 C₃H₈ 时的喷涂流场特征,后者则主要研究点燃辅助燃料氢气对喷涂流场的影响。以上研究结果分别见 2.1 节和 2.2 节。第 2.3 节对比分析了两种情况(使用辅助

燃料氢气与不使用辅助燃料氢气)时的粒子速度与粒子温度。最后本文通过在镁合金基体上制备纯铝涂层来论证模拟结果的正确性。

2 实验结果与分析

2.1 喷枪内流体特性分析

速度和温度是喷涂流场的重要指标,直接影响颗粒的飞行状态,对涂层性能有重要影响^[23]。图 3 为模拟方案 H₂-0 的流场温度与速度特征。

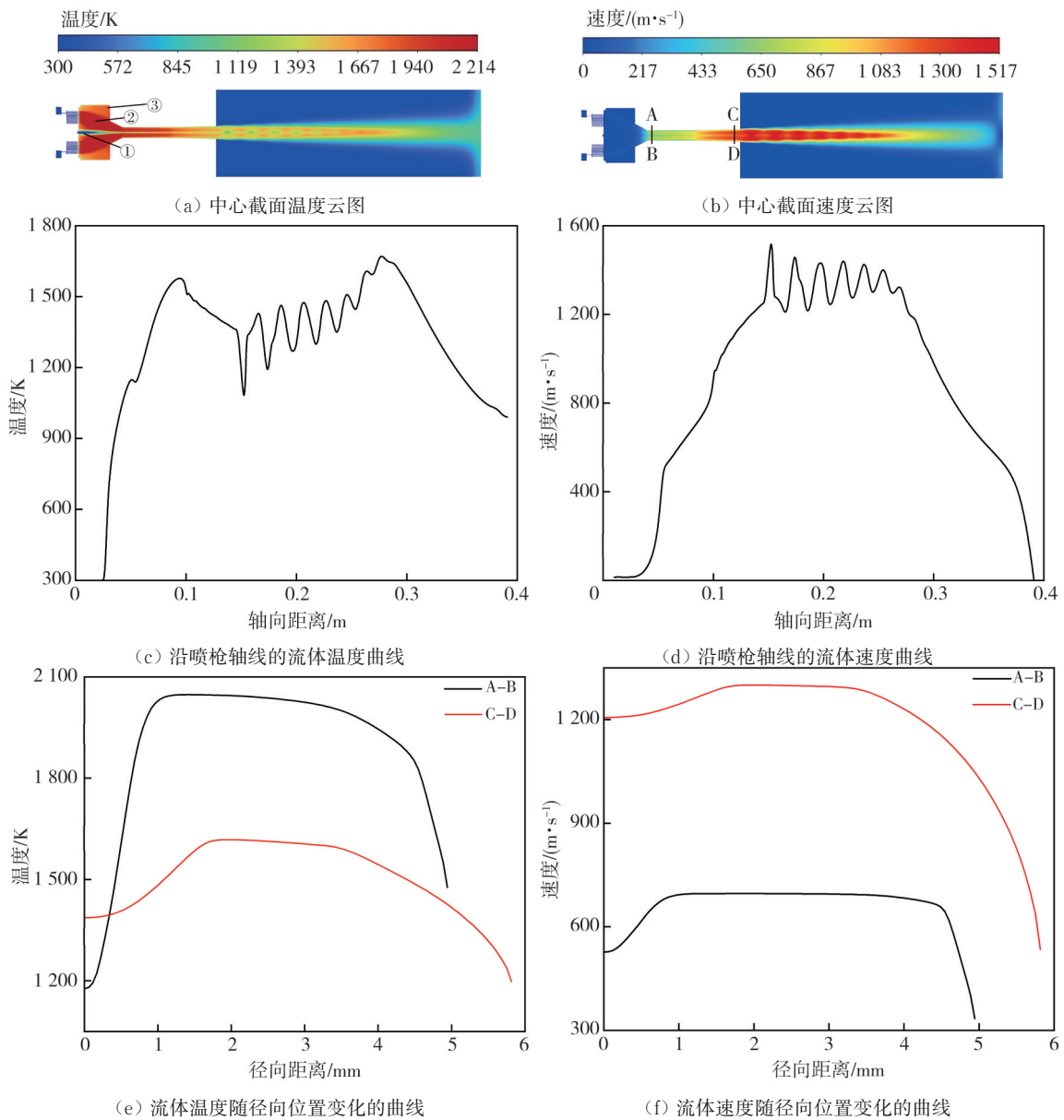


图 3 流体温度与流体速度的二维云图及其在轴向和径向的一维变化

Fig. 3 Two-dimensional cloud of fluid temperature and velocity, and their one-dimensional variations in the axial and radial directions

由图 3(a) 可以看出,燃烧室内流体温度在 3 个区域内具有不同特征,3 个区域分别为喷枪轴线附近的低温区(区域①),燃烧室壁面附近的中

温区(区域②)及燃烧室中部的高温区(区域③)。显然,低温区主要是低温载气流动区域,有利于刚刚进入流场的粒子以低速低温穿越燃烧室,从

而避免粒子被高温的丙烷火焰加热融化。中温区空燃比较高,单位体积内放出热量较低,这有利于防止壁面过热。高温区空燃比较低,更多的燃烧热在这一区域内释放,有利于气流在拉伐尔喷管内产生更高速的超音速射流。结合以上特征,燃烧室内温度分布有利于粒子在喷枪内部实现低温高速飞行。图 3(b) 直观地反映出流体的加速主要发生在拉伐尔喷管内,其最大流速出现在拉伐尔喷管出口附近,约为 1 500 m/s。以上结果表明,AK-05 喷枪不仅可以在短距离内使气流从亚音速转变到超音速,而且有效缩短了流体与粒子之间的热交换时间。换言之,喷涂粒子可以低温高速撞击基体,从而在撞击界面处产生较大的塑性变形能与塑性变形热^[24],这对提高涂层的致密性及结合力至关重要。

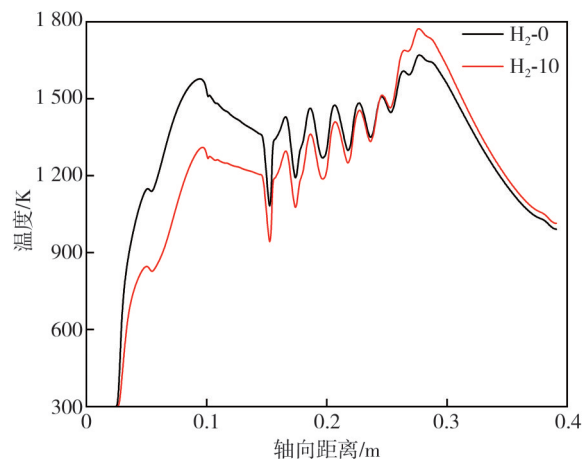
喷涂颗粒的温度与速度主要受中心轴线周围气流特性的影响。图 3(c) 与图 3(d) 更加精细地展示了沿喷枪轴线的流体温度与速度曲线。从图中可以看出,沿喷枪轴线气流温度与速度可以分为 3 个阶段:大梯度升温提速、周期性波动与急速降温减速。在第一阶段,流体提速主要受拉伐尔喷管的作用,升温则主要是由轴线处的低温载气与高温丙烷火焰强烈的热交换造成的;在第二阶段,流体的速度波动与温度波动均是因为流体受到激波的影响造成的;在第三阶段,流体的降温主要是由高温射流与周围冷空气的热交换造成的,减速主要是由高速射流受到基体阻碍并产生弓形激波所致。

实际喷涂中,喷涂颗粒并不全是沿喷枪轴线飞行,一些颗粒会偏离轴线一定距离,因此图 3(e) 与图 3(f) 中给出了流体温度与速度随径向位置变化的曲线,图中曲线分别对应图 3(b) 中的 A-B 与 C-D 两条直线。鉴于喷管为轴对称结构,仅需分析中心轴线一侧即可。从图中可以看到,流体温度沿径向的变化从剧烈(A-B 线)转为平缓(C-D 线),这种变化主要是因为流体运动至 A-B 线时,轴线附近主要为低温载气,而远离轴线处为高温丙烷燃烧产物;而当流体运动至 C-D 线时,载气与丙烷燃烧产物已经进行了较为充分的热交换。流体速度沿径向的变化总体上较为平缓,但靠近壁面时会因边界层效应而发生大梯度变化。

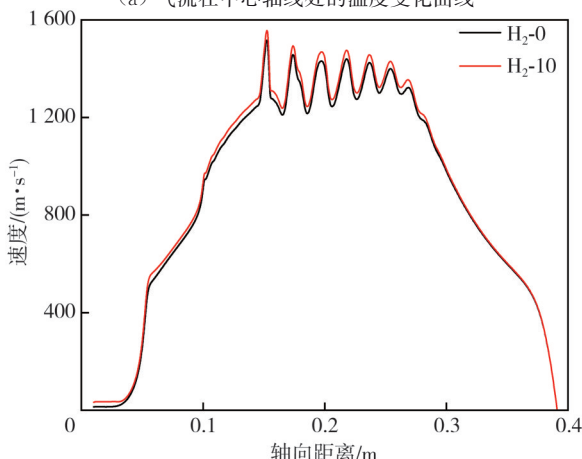
2.2 氢气对流场的影响

氢气具有燃烧速率高、单位质量燃烧热值高

的特征^[25]。一般而言,氢气的燃烧应提高喷枪轴线处流体的温度,从而提高沿轴线飞行粒子的温度。然而,本研究的模拟结果却与以上推理完全相反。图 4 对比了两种模拟方案中心轴线处流体温度与速度变化的情况。



(a) 气流在中心轴线处的温度变化曲线



(b) 气流在中心轴线处的速度变化曲线

图 4 两种试验下喷枪轴线处的温度与速度变化的曲线

Fig. 4 Temperature and velocity variations at gun axis under two experiments

由图 4(a) 可以明显看出,注入氢气后喷枪内轴线处的流体温度显著降低,最高温降可达到 300 K。只有当轴线处流体流经激波区后,氢气的注入才使流体的温度显著升高。造成这种结果的主要原因是氢气的火焰是一种薄膜火焰,这种火焰能够有效阻止轴线处低温流体(主要是氮气)与高温流体(丙烷燃烧产物)的热交换,从而使低温流体在很长的距离上保持低温。氢气燃烧的这一独特作用对于防止粒子过热融化具有重要意义。激波区后方的流体升温则主要是因为未完全反应的氢气会与大气中的氧气发生反应,从而导致温度升高。由图 4(b) 可以看出,两种方案下轴线处

的流体速度差异较小,表明喷枪注入氢气对流体速度不产生显著影响。

图 5 对比了两种不同模拟条件下喷枪轴线区域氧气摩尔分数的变化情况。从图中可以得知,在未注入氢气的条件下,喷枪轴线区域存在一定量的氧气,其摩尔分数随着轴向距离的增加而增大;而当喷枪注入氢气后,轴线区域的氧气摩尔分数趋近于 0,这一结果再次表明氢气的注入可有效避免氧气向喷枪轴线区域流动,从而可以降低喷涂粒子被氧化的几率。此外,在参数 H2-10 设定条件下,喷枪轴线附近的氧气摩尔分数在距离喷枪出口约 120 mm 处开始显著增加,当距离达到 144 mm 时,射流中心的氧气摩尔分数升高至 5%。在喷涂过程中,火焰中氧气含量的增加可能导致涂层结合性能的下降^[26]。因此,鉴于氧气与涂层性能之间的紧密关联,可以将氧气摩尔分数作为判定喷涂距离的标准之一。

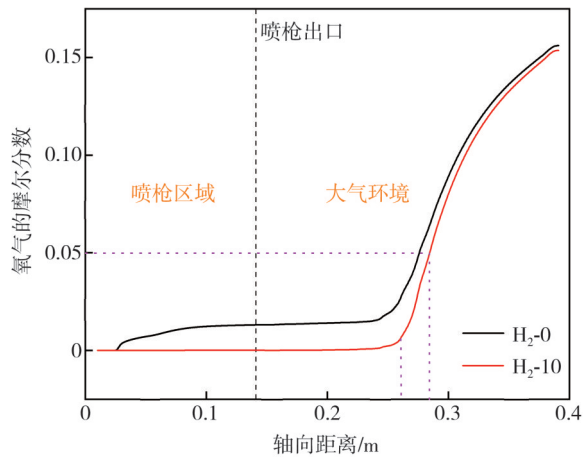


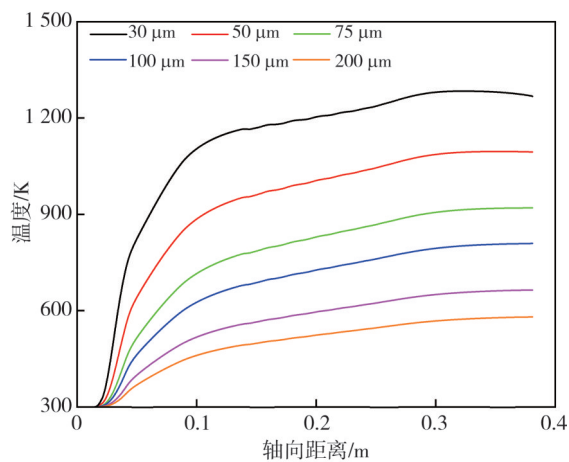
图 5 轴线区域的氧气摩尔分数
Fig. 5 Oxygen molar fraction in the axial region

2.3 粒子在流场中的飞行行为

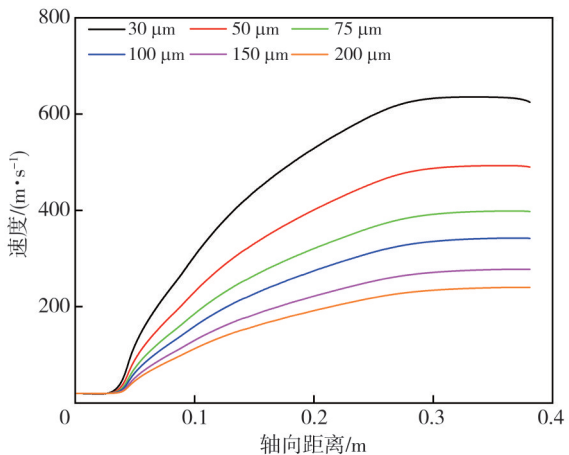
涂层的性能很大程度上取决于喷涂颗粒冲击基体时的物理化学状态,而颗粒状态主要受其速度、温度等因素影响^[27-29]。本研究以低熔点的铝粒子为研究对象,讨论了其在喷涂流场中温度与速度变化的情况。计算前假定铝粒子的初始温度为 300 K,初始速度为 20 m/s,且速度方向平行于中心轴线。

图 6 为粒径处于 30~200 μm 间的粒子在中心轴线附近的温度与速度变化的曲线,该结果是在模拟方案 H₂-0 的基础上得到的。由图 6(a) 可以看出,颗粒尺寸越小,越有利于实现更高的加热速率。粒径为 30 μm 的颗粒在飞行过程中可达到约 1 200 K 的最高温度,这表明小尺寸颗粒更容易在飞行过程中过热,甚至可能达到熔点。同时,小颗粒对气流温度

的波动也非常敏感,如图 6 中 30 μm 的粒子穿越激波区时温度曲线产生了明显波动。对于尺寸较大的颗粒(如 75 μm 的颗粒),其熔化概率显著降低,最高温度仅为 920 K,这表明较大尺寸的颗粒更倾向于以固态或半固态的形式沉积在基体表面。图 6(b) 展示了不同大小颗粒在流场中的速度变化,结果表明质量轻的小颗粒速度高,随流性好,而质量较大的颗粒速度低,表现出较高的惯性。这一结果与 Bobzin 等^[28]在 AC-HVAF 中粒子飞行行为研究中所得到的结论相同。图 7 展示了不同粒径颗粒沉积基材时的温度与速度,这些结果是在喷涂距离为 130 mm 的情况下获得的。结果再次表明,喷枪中注入氢气不仅显著降低了喷涂颗粒的温度,而且对其速度影响极小。



(a) 不同粒径颗粒轴向运动的温度变化



(b) 不同粒径颗粒轴向运动的速度变化

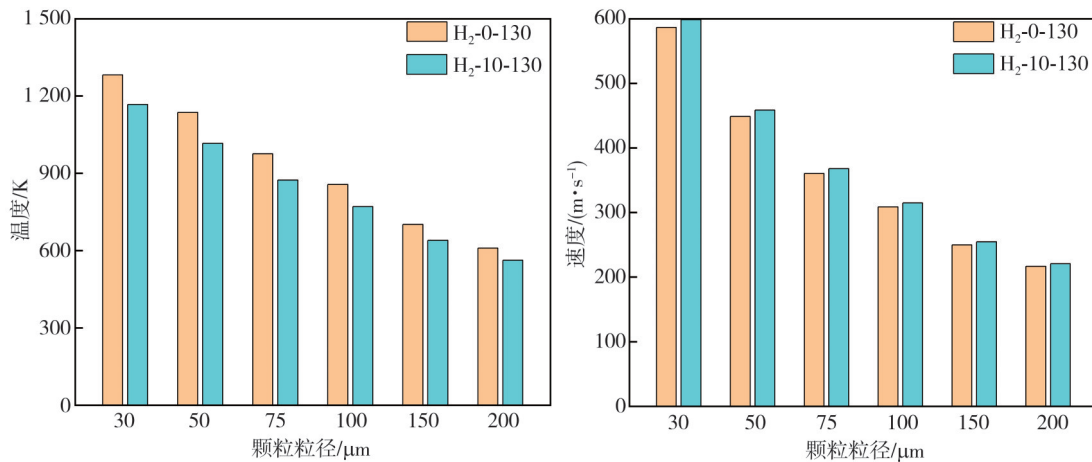
图 6 轴线处颗粒的温度和速度变化曲线

Fig. 6 Temperature and velocity trends of particles in the center axis

为了进一步验证模拟结果的准确性,在 AZ91D 铝合金基体上沉积了纯铝涂层。图 8(a) 展示了通过扫描电子显微镜(SU-1500, 日本株式会社日立制造所)观察到的铝颗粒形貌,结果表明

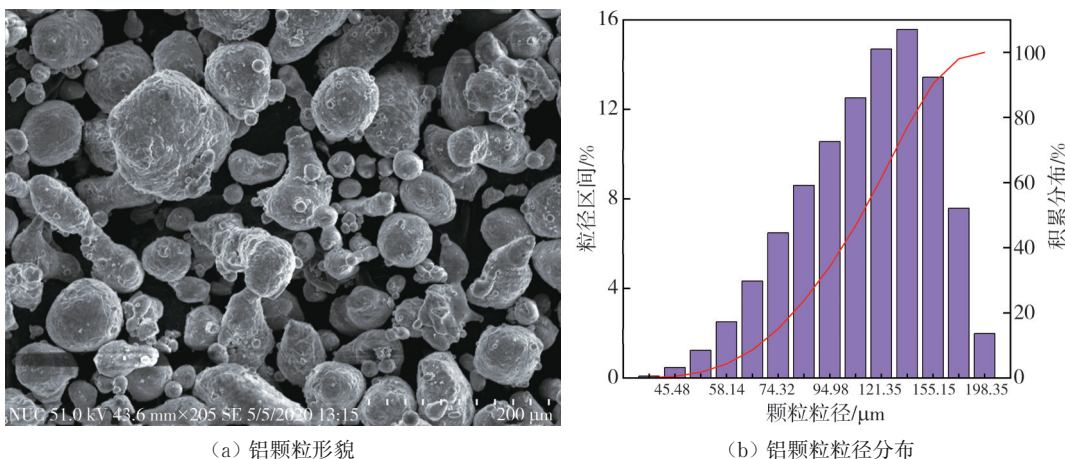
粉末颗粒球形度一般。图 8(b) 展示了使用激光粒度分布仪(BT-9300ST, 中国丹东百特仪器有

限公司)测量得到的铝颗粒粒径分布情况, 其中大多数粒子尺寸集中在 90~165 μm 之间。



(a) 颗粒沉积基材时的温度 (b) 颗粒沉积基材时的速度
图 7 不同粒径颗粒沉积基材时的温度与速度

Fig. 7 Temperature and velocity of particles before deposition on substrate



(a) 铝颗粒形貌 (b) 铝颗粒粒径分布
图 8 铝颗粒粉末的形貌及粒径分布

Fig. 8 Morphology and particle size distribution of aluminum powder

图 9 展示了所制备纯铝涂层的截面形貌。

的熔化程度较低。相比之下, 较小的颗粒在图像中难以辨识其完整结构, 这可能是由于它们的熔化程度较高, 并且受到相邻颗粒的挤压, 导致其存在于间隙空间中。扫描图像获得的结果与模拟分析结果高度一致, 综合实验与模拟结果表明 AK-05 喷枪适合喷涂制备低熔点涂层。

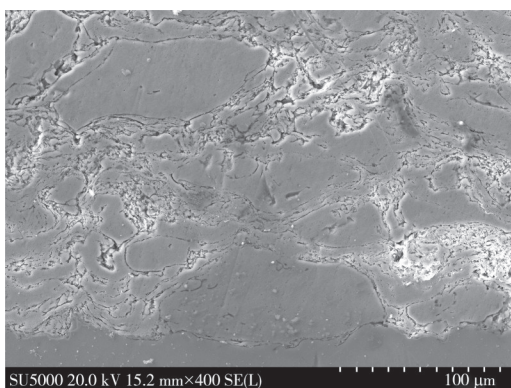


图 9 纯铝涂层的截面形貌

Fig. 9 The morphology of pure aluminum coating

由图 9 可以看出, 较大的铝颗粒具有明显的边界轮廓, 其内部结构相对完整, 表明这些颗粒

3 结 论

本文以 AK-05 喷枪为研究对象, 建立二维模型模拟研究了喷枪内的流场特性, 讨论了辅助燃料氢气对喷涂流场的影响, 分析了喷涂粒子的速度与速度的变化。主要结论如下:

1) AK-05 喷枪是一种适合喷涂低熔点材料的特殊喷枪, 它可使气流在短距内实现亚音速向超

音速的转变,且最大流速可达 1 500 m/s。同时,AK-05 喷枪中的流场温度与速度变化情况有利于颗粒实现高速低温飞行。

2) 辅助燃料氢气在喷枪内部以薄膜火焰的形式稳定燃烧。氢气的引入显著降低了沿喷枪轴线方向的流体温度,同时对流体的速度几乎没有影响。

3) 较小的颗粒表现出更高的温度与速度,容易在喷涂火焰中发生熔化。相反,较大的颗粒具有较低的温度与速度,其熔化程度相对较低。

参考文献:

- [1] JIANG H, ZHAO X, SONG H, et al. The effect of high-velocity air-fuel WC-¹²Co coatings on the wear and corrosion resistance of TC18 titanium alloy [J]. *Coatings*, 2023, 13(4): 755.
- [2] 李长久. 热喷涂技术应用及研究进展与挑战[J]. *热喷涂技术*, 2018, 10(4): 1-22.
LI Changjiu. Applications, Research progresses and future challenges of thermal spray technology [J]. *Thermal Spray Technology*, 2018, 10(4): 1-22. (in Chinese)
- [3] MA H R, LI J W, JIAO J, et al. Wear resistance of Fe-based amorphous coatings prepared by AC-HVAF and HVOF [J]. *Materials Science and Technology*, 2017, 33(1): 65-71.
- [4] LIU S L, ZHENG X P. Microstructure and properties of AC-HVAF sprayed Ni60/WC composite coating [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2009, 480(2): 254-258.
- [5] JIANG H R, LI M L, WEI X S, et al. Numerical investigation of in-flight behavior of Fe-based amorphous alloy particles in AC-HVAF thermal spray process [J]. *Journal of Thermal Spray Technology*, 2019, 28(6): 1146-1159.
- [6] GAO X, LI C, XU Y, et al. Effects of fuel types and process parameters on the performance of an activated combustion high velocity air-fuel (AC-HVAF) thermal spray system[J]. *Journal of Thermal Spray Technology*, 2021, 30(7): 1875-1890.
- [7] GAO X, LI C, ZHANG D, et al. Numerical analysis of the activated combustion high-velocity air-fuel (AC-HVAF) thermal spray process: A survey on the parameters of operation and nozzle geometry [J]. *Surface and Coatings Technology*, 2021, 405: 126588.
- [8] LI C, CHEN X, HAN X, et al. Research of numerical simulation for HVAF thermal spraying process on rotational roll [J]. *International Journal of Applied Ceramic Technology*, 2023, 20(5): 2829-2846.
- [9] LIU F, LI Z, FANG M, et al. Numerical analysis of the activated combustion high-velocity air-fuel spraying process: A three-dimensional simulation with improved gas mixing and combustion mode [J]. *Materials*, 2021, 14(3): 657.
- [10] BOBZIN K, HEINEMANN H, JASUTYN K. Numerical and experimental investigation for application of CoNiCrAlY coatings by HVAF [J]. *Journal of Thermal Spray Technology*, 2024, 33(4): 1167-1177.
- [11] ANSYS. Fluent (2022 R1) Theory Guide [Z/OL]. [2024-11-05]. <http://ansyshelp.ansys.com>.
- [12] 潘小勇. 流体力学与传热学[M]. 南昌: 江西高校出版社, 2019.
- [13] ZHAO X, LI C, LI S, et al. Mechanism study on the influence of combustion models and spray gun geometric parameters on high-velocity oxygen-fuel (HVOF) thermal spraying [J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2023, 98: 173-185.
- [14] 王文瑞, 张峰, 张佳明, 等. 高超音速火焰喷涂粒子飞行行为研究 [J]. *工程科学学报*, 2022, 44(2): 217-227.
WANG Wenrui, ZHANG Feng, ZHANG Jiaming, et al. Particle flight behavior in hypersonic flame spraying [J]. *Chinese Journal of Engineering*, 2022, 44(2): 217-227. (in Chinese)
- [15] KAMNIS S, GU S. 3-D modelling of kerosene-fuelled HVOF thermal spray gun [J]. *Chemical Engineering Science*, 2006, 61(16): 5427-5439.
- [16] 侯根良, 王汉功, 袁晓静, 等. 超音速火焰喷涂燃烧室燃气成分与温度的计算 [J]. *兵器材料科学与工程*, 2005, 28(2): 16-18.
HOU Genliang, WANG Hangong, YUAN Xiaojing, et al. Combustion gas components and temperature analysis for supersonic flame spray [J]. *Ordnance Material Science and Engineering*, 2005, 28(2): 16-18. (in Chinese)
- [17] GORDON S, MCBRIDE B J. Computer program for calculation of complex chemical equilibrium compositions and applications. Part 1: Analysis [J]. NASA Reference Publication, 1994: 4561.
- [18] JAFARI H, EMAMI S, MAHMOUDI Y. Numerical investigation of dual-stage high velocity oxy-fuel (HVOF) thermal spray process: A study on nozzle geometrical parameters [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2017, 111: 745-758.

- [19] TABBARA H, GU S, MCCARTNEY D G. Computational modelling of titanium particles in warm spray [J]. *Computers & Fluids*, 2011, 44(1): 358-368.
- [20] KHAN M N, SHAMIM T. Investigation of a dual-stage high velocity oxygen fuel thermal spray system [J]. *Applied Energy*, 2014, 130: 853-862.
- [21] KAMNIS S, GU S. Numerical modelling of propane combustion in a high velocity oxygen - fuel thermal spray gun [J]. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 2006, 45(4): 246-253.
- [22] 刘宇宁. 叶片曲率半径变化对离心泵叶轮水力性能影响的研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2020.
- [23] WANG X, SONG Q, YU Z. Numerical investigation of combustion and flow dynamics in a high velocity oxygen-fuel thermal spray gun [J]. *Journal of Thermal Spray Technology*, 2016, 25(3): 441-450.
- [24] 曾祥国, 陈华燕, 胡益平. 工程弹塑性力学[M]. 成都: 四川大学出版社, 2013.
- [25] 田亮, 张世毅, 王洪信, 等. 氢气化学反应机理在超声速燃烧数值仿真中的应用研究[J]. *空天技术*, 2024(3): 11-23.
TIAN Liang, ZHANG Shiyi, WANG Hongxin, et al. Application of hydrogen chemical reaction mechanism in numerical simulation of supersonic combustion [J]. *Aerospace Technology*, 2024 (3): 11-23. (in Chinese)
- [26] 肖猛. 超音速火焰喷涂 AlCuFeCr 多组元合金及其复合涂层的结构、性能研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2022.
- [27] MYALSKA H, SZYMAŃSKI K, MOSKAL G. Microstructure and properties of WC-Co HVAF coatings obtained from standard, superfine and modified by sub-micrometric carbide powders [J]. *Archives of Metallurgy and Materials*, 2015, 60(2): 759-766.
- [28] BOBZIN K, HEINEMANN H, JASUTYN K. Correlation between process parameters and particle in-flight behavior in AC-HVAF [J]. *Journal of Thermal Spray Technology*, 2023, 32(2/3): 559-567.
- [29] 董脉鸣, 辛红敏, 李光平, 等. 冷喷涂过程中颗粒加速特性的数值模拟 [J]. *机械工程材料*, 2024, 48(9): 87-95.
DONG Maiming, XIN Hongmin, LI Guangping, et al. Numerical simulation of particle acceleration characteristics during cold spraying [J]. *Materials for Mechanical Engineering*, 2024, 48(9): 87-95. (in Chinese)