



高超音速火焰喷涂粒子飞行行为研究

王文瑞 张峰 张佳明 张贺强

Particle flight behavior in hypersonic flame spraying

WANG Wen-rui, ZHANG Feng, ZHANG Jia-ming, ZHANG He-qiang

引用本文:

王文瑞, 张峰, 张佳明, 张贺强. 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. doi: 10.13374/j.issn2095-9389.2021.07.24.001

WANG Wen-rui, ZHANG Feng, ZHANG Jia-ming, ZHANG He-qiang. Particle flight behavior in hypersonic flame spraying[J]. *Chinese Journal of Engineering*, 2022, 44(2): 217–227. doi: 10.13374/j.issn2095-9389.2021.07.24.001

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13374/j.issn2095-9389.2021.07.24.001>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

拉瓦尔喷管结构模式对超音速射流流动特性的影响

Effect of Laval nozzle structure on behaviors of supersonic oxygen jet flow field

工程科学学报. 2020, 42(S): 54 <https://doi.org/10.13374/j.issn2095-9389.2020.03.15.s15>

热喷涂制备高熵合金涂层的研究现状与展望

Research progress of the preparation of high entropy alloy coatings by spraying

工程科学学报. 2021, 43(2): 170 <https://doi.org/10.13374/j.issn2095-9389.2020.10.20.001>

卧式喷淋塔烟气脱硫的数值模拟

Numerical simulation of flue gas desulfurization by horizontal spray tower

工程科学学报. 2018, 40(1): 17 <https://doi.org/10.13374/j.issn2095-9389.2018.01.003>

电弧炉内长电弧等离子体的数值模拟

Numerical simulation of a long arc plasma in an electric arc furnace

工程科学学报. 2020, 42(S): 60 <https://doi.org/10.13374/j.issn2095-9389.2020.04.08.s04>

钢中液态夹杂物聚并行为的数学物理模拟

Physical and numerical simulation of the coalescence of liquid inclusion particles in molten steel

工程科学学报. 2019, 41(10): 1280 <https://doi.org/10.13374/j.issn2095-9389.2018.11.02.001>

热喷涂制备非晶合金涂层性能的研究进展

Research progress on the properties of amorphous alloy coatings prepared by thermal spraying

工程科学学报. 2021, 43(3): 311 <https://doi.org/10.13374/j.issn2095-9389.2020.11.20.001>

高超音速火焰喷涂粒子飞行行为研究

王文瑞^{1,2)}✉, 张 峰¹⁾, 张佳明^{1,2)}, 张贺强³⁾

1) 北京科技大学机械工程学院, 北京 100083 2) 北京科技大学流体与物质相互作用教育部重点实验室, 北京 100083 3) 北华航天工业学院, 廊坊 065000

✉通信作者, E-mail: gmbitwrw@ustb.edu.cn

摘 要 以高超音速火焰喷枪为研究对象, 采用计算流体力学软件 Fluent 对高超音速火焰喷涂 (HVOF) 过程中的焰流场以及粒子飞行过程进行数值模拟。HVOF 系统以氧气为助燃气体, 煤油为燃料。研究了加入粒子前喷枪内火焰焰流温度、速度和压力分布规律, 采用离散相模型计算喷涂粒子的动力学飞行行为, 探究了粒子大小、注入速度、球形度对粒子飞行行为的影响。发现最佳粒子粒径范围应为 30 ~ 50 μm , 在此范围内粒子均匀的分布在焰流中心, 且为熔融状态, 更易形成结合强度较高的涂层; 小粒径粒子最佳注入速度为 10 ~ 15 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, 中等粒径粒子最佳注入速度为 5 ~ 10 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, 大粒径粒子最佳注入速度为 1 ~ 5 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$; 与球形颗粒相比, 非球形颗粒具有较高的阻力系数, 在飞行过程中获得更大的动能和更少热量。

关键词 HVOF 热喷涂; 数值模拟; 流体动力学; 拉瓦尔管; 飞行行为

分类号 TG174.442

Particle flight behavior in hypersonic flame spraying

WANG Wen-rui^{1,2)}✉, ZHANG Feng¹⁾, ZHANG Jia-ming^{1,2)}, ZHANG He-qiang³⁾

1) School of Mechanical Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China

2) The Key Laboratory of Fluid and Matter Interaction, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China

3) North China Institute of Aerospace Engineering, Langfang 065000, China

✉ Corresponding author, E-mail: gmbitwrw@ustb.edu.cn

ABSTRACT High velocity oxygen fuel (HVOF) coatings have high bonding strengths and compactness, which can improve the wear, corrosion, and fatigue resistance of an underlying matrix. These coatings are widely used in chemical industries, metallurgy, aerospace, and other fields. Here, we studied hypersonic flame spraying through simulating flame flow fields and particle flight processes using the computational fluid dynamics software Fluent. The HVOF system uses oxygen as a combustion-supporting gas and kerosene as fuel. The temperature, velocity, and pressure distributions of the flame flow in a spray gun before adding particles were studied. The dynamic flight behavior of spray particles was calculated using a discrete phase model, and the effects of particle size, injection velocity, and sphericity on particle trajectory, velocity, and temperature were investigated. The optimal particle size range was 30–50 μm . Particles that were too large collided with the inner walls of the spray gun, hindering the combination of the particles and matrix. Particles that were too small were liquid during flight, and readily reacted with oxygen, leading to a reduction in the amorphous content of the prepared coatings. In the optimal size range, particles were uniformly distributed in the center of the flame flow, and the particles were in a molten state, ideal for forming coatings with higher bonding strengths. A systematic study of injection velocities on spray particle dynamics, determined the optimal injection velocity for small, medium, and large particles as 10–15, 5–10, and 1–5 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, respectively. Compared with spherical particles, nonspherical particles had higher drag coefficients, greater acceleration in the flow field of the flame, and gained more kinetic energy and less heat during flight.

收稿日期: 2021–07–24

基金项目: 国家重点研发计划资助项目 (2020YFA0405700)

KEY WORDS HVOF thermal spraying; numerical simulation; fluid dynamics; Laval nozzle; flight behavior

超音速火焰喷涂(HVOF)是热喷涂表面处理技术中一种极其重要的手段. 得益于适中的焰流温度($1300\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 3000\text{ }^{\circ}\text{C}$)和较高的焰流速度(可达 $2000\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$), 实现了热能和动能的良好结合, 所制备的涂层孔隙率低、结合强度高且耐腐蚀性能好, 非常适合冶金结合涂层的制备^[1-2]. 热喷涂过程是一个复杂的过程, 涉及燃烧和传热、可压缩超音速流动、湍流混合和多相相互作用^[3-6]. 影响喷涂工艺的因素众多, 当粒子具有较高的飞行速度能够形成较密的涂层; 粒子为半熔融状态则有利于提高涂层与基体的结合强度; 粒子温度过低会导致涂层与基体结合强度的不足; 因此有必要对喷涂过程中粒子行为进行研究来确定较为合适的工艺参数.

Tabbara 和 Gu^[7]建立了 JP5000 液体燃料超音速火焰喷枪的几何模型, 采用计算流体力学 Fluent 软件研究了燃料液滴尺寸对气相焰流的影响. Patel 等^[8]研究了氧燃比、总气体流量及燃烧室尺寸对超音速火焰喷枪气态焰流的影响, 结果表明, 燃烧室温度随氧燃比的增加呈现先增高后降低的趋势. 王汉功等^[9]运用 Fluent 软件, 在气固两相流的基础上, 计算了纯氧、空气及氧-空气联合助燃 3 种情况下超音速火焰喷涂的燃烧特性. 王建文和李智^[10]以 D-jet 型喷嘴为研究对象, 采用数值模拟技术对超音速火焰喷涂过程的焰流进行数值模拟, 研究喷嘴几何参数的变化对焰流的影响. 何新宝等^[11]采用数值模拟技术研究喷涂距离对铁基非晶涂层孔隙率的影响, 当喷涂距离为 $360 \sim 380\text{ mm}$ 时, 非晶粉末颗粒在撞击基板时处于半融化状态, 可获得孔隙率较低的涂层. Liu 等^[12-14]对比了不同拉瓦尔喷管结构在高温条件下的射流马赫数分布、动压及射流卷吸特性.

近年来, 对于超音速火焰喷涂的研究大多集中在以气体为燃料的喷涂特性上, 对于液体燃料喷涂特性的研究很少^[15-16], 并且主要分析在于超音速

火焰喷涂流场特性, 对于颗粒飞行行为的研究较少. 因此本文通过计算流体动力学软件 Fluent 探究煤油燃料热喷涂枪的燃烧特性, 研究氧气及煤油流量比、粒子直径、粒子注入速度及粒子球形度对粒子飞行行为的影响, 选择合适的制备工艺参数.

1 模型建立

1.1 物理模型

本文主要研究超音速火焰喷涂工艺在镁合金基体上制备铁基非晶涂层时的物理过程. 此过程中选用的超音速火焰喷涂系统为常规的单级 HVOF 热喷涂系统, 喷枪为径向送粉结构, 主要由高压燃烧室、拉法尔管、平直喷管、径向送粉口及冷却管道组成, 其喷枪示意图如图 1 所示.

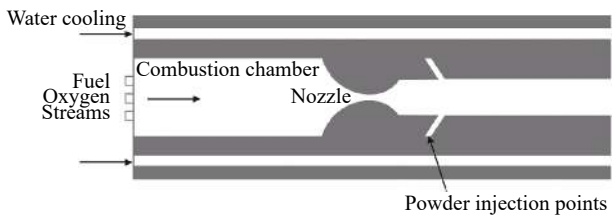


图 1 超音速火焰喷枪示意图

Fig.1 Schematic diagram of a supersonic flame spray gun

系统使用煤油为燃料, 助燃气体为氧气, 氧气和煤油在燃烧室内混合, 点火后剧烈燃烧, 产生大量高温高压气体, 气体经喷枪的收缩扩张结构——拉瓦尔管加速后达到超音速. 铁基非晶粉末由径向注入高温高速气流中, 经过气流的加热、加速最终撞击到基板上进而形成涂层. 在此过程中, 气相焰流的行为决定了粒子的飞行行为, 而粒子撞击基板时的状态对涂层的性能有着很大的影响.

1.2 几何模型及网格划分

采用的超音速火焰喷枪及外流场的几何模型如图 2 所示, 为了更具体的分析喷枪射流流场的情况, 外流场区域应划分足够大, 本文划分外流场范围为 $400\text{ mm} \times 220\text{ mm}$. 喷枪具体几何参数见表 1.

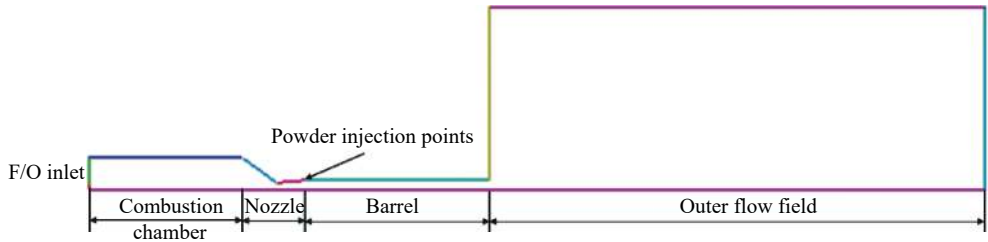


图 2 喷枪及外流场的几何模型

Fig.2 Geometric model of a spray gun and external flow field

表1 喷枪几何参数

Table 1 Geometric parameters of a spray gun

Geometric parameter	Length/ mm	Diameter/ mm
Combustion chamber	92.5	37.8
Nozzle	37.5	7.9
Barrel	111.1	11
Outer flow field	400	220

网格划分采用 ICEM 进行, 选用中等密度网格用作计算, 模型的网格划分情况如图 3 所示, 模型共包含 91083 个节点, 90099 个单元. 对于流场变化较大的喉管处, 网格划分的足够细以保证计算的准确性, 对于远离中心线射流区域的外流场, 网格划分稍粗以节省计算时间.

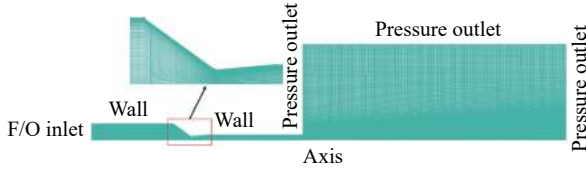


图3 喷枪及外流场的网格划分情况

Fig.3 Grid division of a spray gun and external flow field

1.3 边界条件及湍流模型

选择合适的边界条件有利于计算的收敛, 合理的边界条件同样影响计算结果的准确性. 在本文中, 选用的边界条件如下: 燃料及氧气的入口处, 选用质量入口边界条件 (Mass flow inlet); 外流场的边界处, 选用压强出口边界条件 (Pressure outlet); 由于实际喷枪壁面采用冷却水冷却, 因此模拟过程中选用恒温非滑移壁面.

此外, 超音速火焰为高速剧烈流动的焰流, 涉及到强烈的湍流问题^[17-18], 主项为焰流气相, 而相对于气相来讲, 煤油液滴及铁基非晶颗粒的体积占比很小, 因此液滴及粒子的存在对气相的影响不大^[19]. 为此, 计算中选用的是离散相模型.

超音速火焰焰流中存在旋转的气相流动. 与标准 $k-\varepsilon$ 模型相比, Realizable $k-\varepsilon$ 将旋转及曲率相关内容引入了方程, 这种额外的旋转效应在对超音速火焰焰流模拟计算时, 优于标准的 $k-\varepsilon$ 模型, 因此在本次计算中被选用^[20-21]. 在 Realizable $k-\varepsilon$ 湍流模型中, 传输方程为:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho k u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Z_M + S_k \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \varepsilon u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon \quad (2)$$

式中, t 为时间, ρ 为气流密度, k 为湍流动能, ε 为耗散率, u_j 为 j 方向上的速度, μ 为黏性系数, μ_t 为湍流动能黏度, G_k 为由于平均速度而产生的湍动能, G_b 为由于浮力而产生的湍动能, Z_M 为可压缩湍流脉动膨胀对总耗散率的影响系数, $C_{1\varepsilon}$ 、 $C_{2\varepsilon}$ 、 $C_{3\varepsilon}$ 为经验常数, σ_k 和 σ_ε 为 k 和 ε 的湍流普朗特数, S_k 和 S_ε 为自定义源项.

对于燃料燃烧中化学物种守恒方程的求解, ANSYS Fluent 的计算方式是求解超音速焰流中各个物种的对流扩散方程, 以此来对燃料燃烧的反应物及生成物的局部质量分数进行预测. 这个守恒方程的一般形式为:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho Y_i) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} Y_i) = -\nabla \cdot \vec{j}_i + R_i + Q_i \quad (3)$$

式中, Y_i 为物种 i 的质量分数, $\vec{v}$ 为传输速度矢量, $\vec{j}_i$ 为物种 i 的质量扩散通量, R_i 为化学反应产生的物种 i 的净产生速率, Q_i 为离散相导致的物种 i 的产生速率.

ANSYS Fluent 中的拉格朗日离散相模型遵循 Euler-Lagrange 方法^[22-23]. 其主要方法是求解 Navier-Stokes 方程, 将超音速火焰喷涂中的气相视为一个连续体, 通过计算气态焰流流场跟踪铁基非晶颗粒及煤油液滴来求解分散相^[24-25]. 模型通过对超音速焰流气相中的铁基非晶粒子的力平衡进行积分来计算粒子的位置, 以此达到对其轨迹的预测. 这个力平衡方程为:

$$\frac{d\vec{u}_p}{dt} = \frac{\vec{u} - \vec{u}_p}{\tau_r} + \frac{\vec{g}(\rho_p - \rho)}{\rho_p} + \vec{F} \quad (4)$$

式中, $\vec{u}_p$ 为颗粒速度, $\vec{u}$ 为连续相的流速, τ_r 为粒子的弛豫时间, $\vec{g}$ 为重力加速度, ρ_p 为粒子密度, $\vec{F}$ 为压力梯度引起的附加作用力.

铁基非晶粒子在飞行过程中, 不可避免的会发生旋转, 会对粒子在流体中运动的轨迹产生影响, 为了解决粒子旋转问题, 需要为粒子的角动量求解一个附加的常微分方程:

$$I_p \frac{d\vec{\omega}_p}{dt} = \frac{\rho_p}{2} \left(\frac{d}{2} \right)^5 C_\omega \vec{\omega} = \vec{T} \quad (5)$$

式中, I_p 为粒子转动惯量, $\vec{\omega}_p$ 为粒子的角速度, d 为颗粒直径, C_ω 为旋转阻力系数, $\vec{T}$ 为应用于流体域中粒子的扭矩, $\vec{\omega}$ 与粒子-流体角速度有关, 其计算公式为:

$$\vec{\omega} = \frac{1}{2} \nabla \times \vec{u}_f - \vec{\omega}_p \quad (6)$$

式中, $\vec{u}_f$ 为流体速度.

1.4 喷枪及外流场网格无关验证

本文在计算中选用的是结构化网格, 其高计算效率及计算精度非常适合可压缩流体的计算.

采用相同尺寸的超音速火焰喷枪, 运用 4 种不同密度的网格, 计算出的喷枪焰流温度分布云图如图 4 所示.

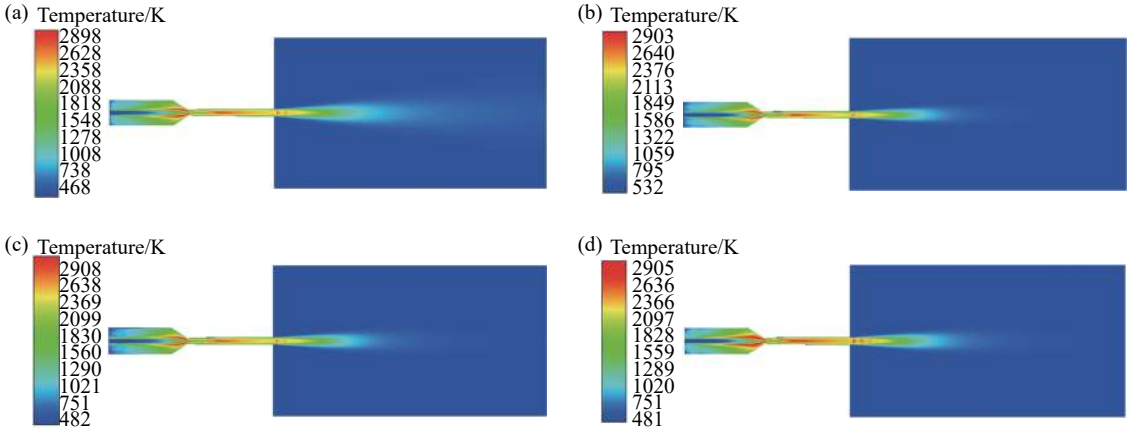


图 4 不同网格质量下温度结果对比. (a) 粗化网格结果; (b) 正常密度网格结果; (c) 细化网格结果; (d) 极细化网格
Fig.4 Temperature results under different mesh qualities: (a) coarse mesh; (b) medium mesh; (c) fine mesh; (d) finer mesh

可以看出, 在网格逐渐加密的过程中, 喷枪焰流温度计算结果为震荡状态, 计算结果的最大值与最小值之差为 10 K, 小于计算结果的 1%, 可以说明计算结果与网格密度无关, 证明网格收敛性较好.

1.5 火焰流场仿真结果

选取氧气流量 $0.0144 \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$, 煤油流量为 $0.0036 \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$, 即氧气煤油流量比 $n=4$ 作为超音速火焰喷涂数值模拟工艺参数, 喷枪气相焰流流场的温度、速度、压强分布云图如图 5 所示.

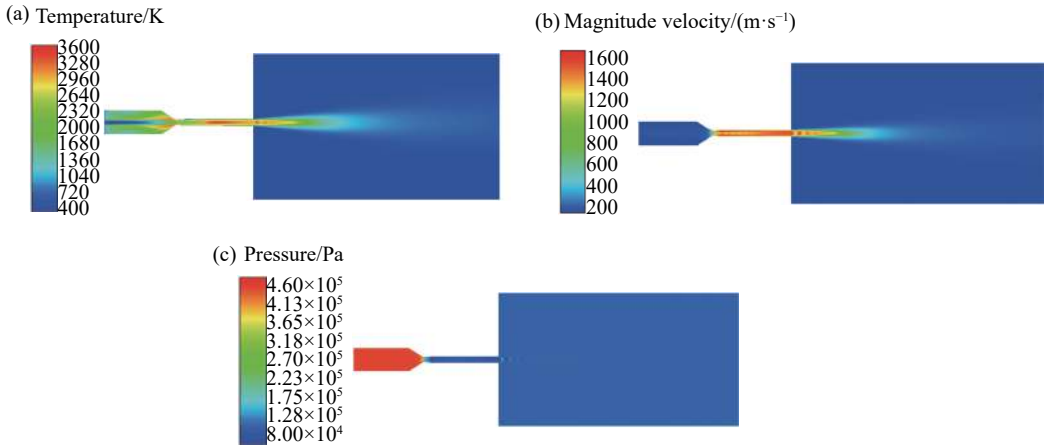


图 5 喷枪焰流特征分布云图. (a) 焰流温度; (b) 焰流速度; (c) 焰流压强
Fig.5 Flame flow characteristic distributions of a spray gun: (a) flame temperature; (b) flame velocity; (c) flame pressure

由流场温度分布云图可以看出, 燃烧室靠近氧气及煤油入口的部分, 煤油液滴尚未蒸发, 因此尚未发生燃烧化学反应, 温度最低; 而燃烧室靠近拉法尔管的部分, 煤油完全蒸发, 在燃烧室内形成了高温剧烈燃烧区, 温度较高.

由流场速度、压强分布云图可以看出, 在燃烧室内部焰流速度较小、压强值最大. 燃气流经横截面较小的拉法尔喉管时, 气流流速达到超音速状态并产生一系列的速度波动, 而流速越大的地方压强

越小, 因此拉法尔喉管内压强迅速降低. 喷管出口附近存在明显的马赫锥, 由于焰流与大气混合导致焰流速度波动剧烈, 马赫锥的产生致使压强随之剧烈变化, 在速度较大的马赫锥内部, 压强较小.

2 超音速火焰喷涂颗粒飞行行为研究

超音速火焰喷涂制备铁基非晶涂层时, 铁基非晶颗粒飞行行为对涂层的性能影响很大. 本文采用计算流体力学(CFD)方法研究颗粒的飞行行

为, 遴选合适的工艺参数.

2.1 超音速火焰喷涂颗粒体系选择

结合现有的关于 Fe 基非晶涂层合金成分体系的研究, 针对应用需求, 添加微量元素改性, W、Mo 元素可以提高合金的熔点, Cr、Mn 元素可以提高非晶合金的耐腐蚀性能, Y 可显著提高非晶的形成能力, B 可提高非晶转变温度和结晶温度. 通

过对不同体系 Fe 基非晶合金进行分子动力学模拟发现, $\text{Fe}_{41}\text{Co}_7\text{Cr}_{15}\text{Mo}_{14}\text{C}_{15}\text{B}_6\text{Y}_2$ 合金具有较高的非晶含量.

为进一步对 $\text{Fe}_{41}\text{Co}_7\text{Cr}_{15}\text{Mo}_{14}\text{C}_{15}\text{B}_6\text{Y}_2$ 体系粉末进行研究, 对该成分的合金进行雾化制粉, 观察粉末的球形度并测定其非晶含量, 研究路线图如图 6 所示.

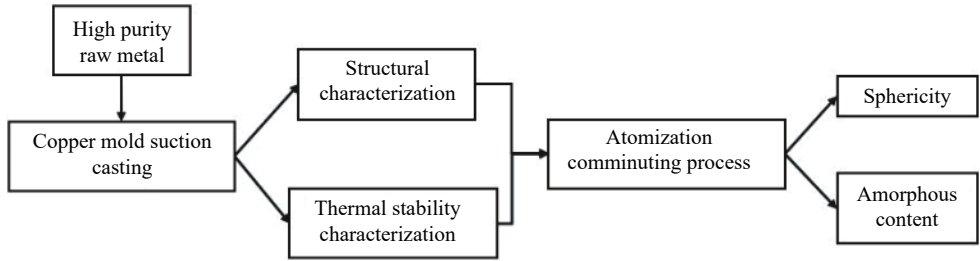


图 6 铁基非晶合金粉末研究路线图
Fig.6 Research roadmap of Fe-based amorphous alloy powders

对该成分合金雾化制粉后, 筛选粉末粒度范围为 $33 \sim 50 \mu\text{m}$, 粉末的扫描电镜 (SEM) 形貌如图 7 所示, 可以看出粉末的表面较为光滑, 具有较好的流动性. 非晶合金粉末的 X 射线衍射图 (XRD) 如图 8 所示, 图像上出现了典型的“馒头状”非晶相衍射峰, 表明合金体系具有较好的非晶形成能力.

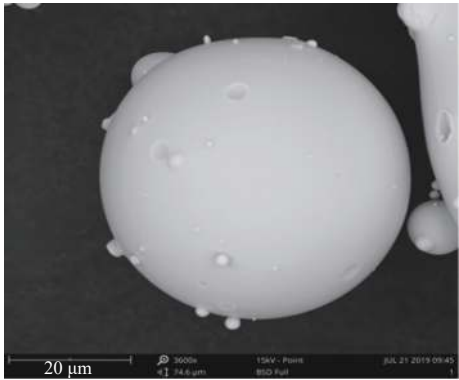


图 7 铁基非晶合金粉末 SEM 形貌图

Fig.7 Scanning electron microscope image of a Fe-based amorphous alloy powder

综上所述, 本文选用 $\text{Fe}_{41}\text{Co}_7\text{Cr}_{15}\text{Mo}_{14}\text{C}_{15}\text{B}_6\text{Y}_2$ 体系铁基非晶颗粒作为研究对象, 铁基非晶粉末的材料物性见表 2.

2.2 铁基非晶颗粒大小对颗粒飞行行为的影响

不同粒径的铁基非晶粒子飞行轨迹分别如图 9 所示. 当氧气煤油流量比 $n=4$ 、4.5 及 5 时, 直径为 $60 \mu\text{m}$ 、 $70 \mu\text{m}$ 的粒子运动轨迹均发生了改变, 考虑到数值模拟计算过程中, 离散相的壁面边界条件设置为 reflect, 因此直径大于 $50 \mu\text{m}$ 的粒子

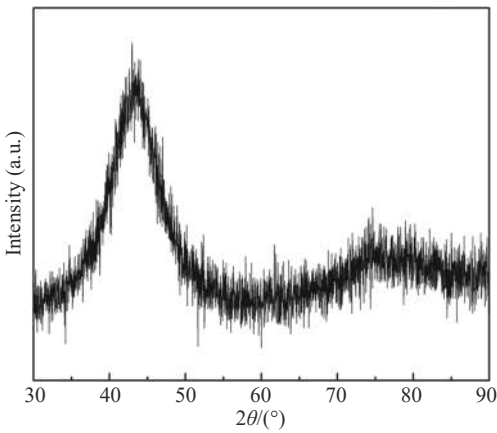


图 8 铁基非晶合金粉末 XRD 图谱

Fig.8 X-ray diffraction pattern of a Fe-based amorphous alloy powder

表 2 铁基非晶颗粒材料物性

Table 2 Physical properties of iron-based amorphous granular materials

Density/ $(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	Specific heat capacity/ $(\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$	Melting point/ K
7700	520	1388

均会撞击到喷枪的内壁, 粒子撞击内壁会减弱粒子的动能, 不利于粒子与基体的结合. 当 $n=5.5$ 时, 粒径为 $50 \mu\text{m}$ 的粒子同样撞击到喷枪内壁, 应尽量避免, 因此本文将不再讨论 $n=5.5$ 时粒子的飞行速度及飞行温度.

不同粒径的铁基非晶粒子飞行速度如图 10 所示, 粒径在 $5 \sim 10 \mu\text{m}$ 的粒子在远离喷枪进入大气环境时, 喷枪外部的空气流速小, 施加在高速粒子上的空气阻力较大, 因此直径较小粒子速度下降更为明显. 制备时很难控制小粒径粒子撞击基板

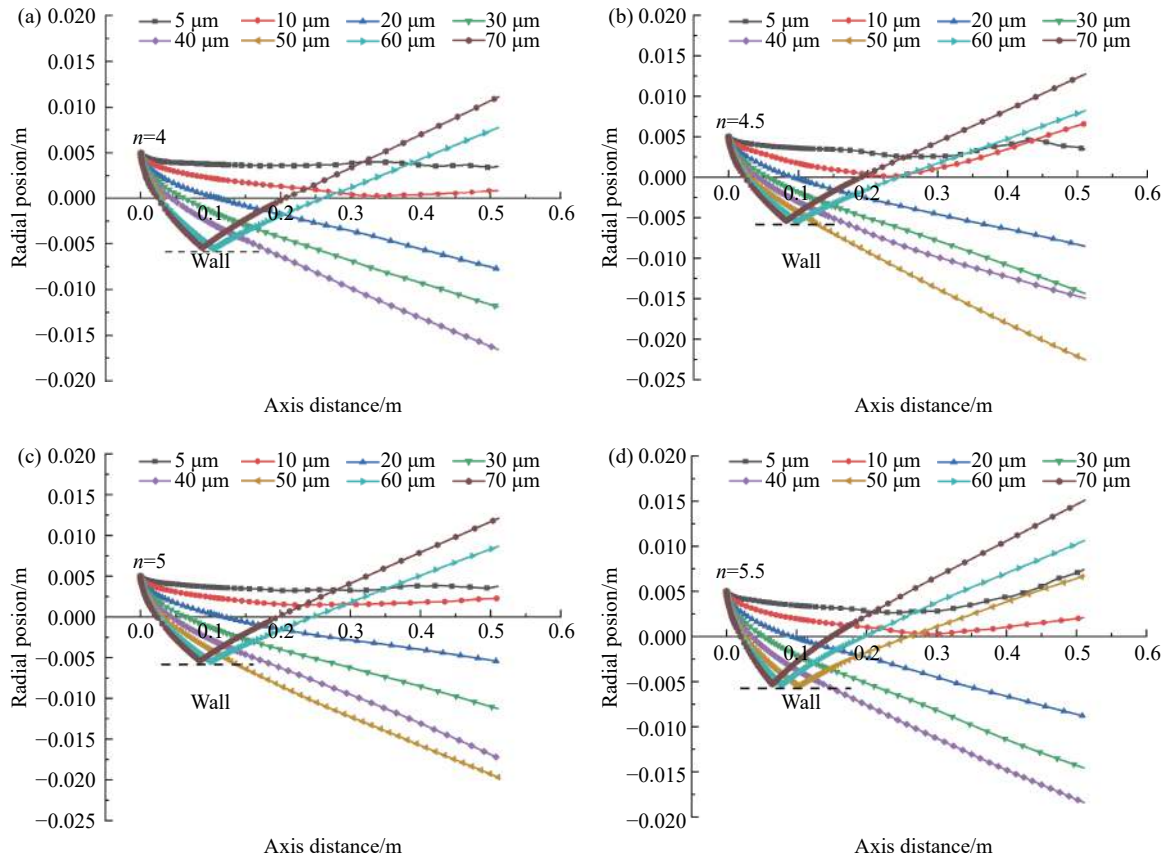


图 9 不同工艺参数下不同粒径的粒子飞行轨迹. (a) $n=4$; (b) $n=4.5$; (c) $n=5$; (d) $n=5.5$

Fig. 9 Flight trajectories of different particle sizes under different process parameters: (a) $n=4$; (b) $n=4.5$; (c) $n=5$; (d) $n=5.5$

时的速度, 无法保证其结合强度及致密程度, 因此粒子直径应大于 $10\ \mu\text{m}$ 较为合适.

不同粒径粒子飞行温度变化曲线如图 11 所示, 三种工况下, 直径为 5 、 10 及 $20\ \mu\text{m}$ 的粒子其最高温度均在 $1500\ \text{K}$ 以上, 远高于熔点 ($1388\ \text{K}$), 证明这些粒子在飞行过程中为高温液态, 高温液态的铁基非晶粒子易与氧气发生反应, 制备出的铁基非晶涂层中非晶含量降低, 这不利于涂层硬度、耐腐蚀性能的提高, 因此粒子粒径应选 $20\ \mu\text{m}$ 以上.

综合考虑粒子不能撞击枪管造成枪管的堵塞、工艺参数易于控制、降低涂层制备难度等因素, 超音速火焰喷涂最佳粒径范围为 $30\sim 50\ \mu\text{m}$.

2.3 颗粒注入速度对颗粒飞行行为的影响

为了研究粒子注入速度对粒子运动轨迹的影响, 以 $n=5$ 工艺参数为例, 粒径为 $5\sim 70\ \mu\text{m}$ 的粒子在不同注入速度下的运动轨迹如图 12 所示. 当粒子速度 $v_y=1\ \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时, $5\sim 70\ \mu\text{m}$ 的粒子未能穿过焰流中心, 此时不利于焰流对粒子的加速. 当 v_y 增加到 $5\ \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时, 较大直径的粒子穿过焰流中心而较小直径的粒子未能穿过焰流中心, 此时, 粒子较为均匀的分布在中心轴线两侧. 当 v_y 增加到 $10\ \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$

以后, 大直径的粒子如 $60\ \mu\text{m}$ 及 $70\ \mu\text{m}$ 的粒子撞击到了喷枪壁面并发生了反射, 继续增大粒子速度, $40\ \mu\text{m}$ 及 $50\ \mu\text{m}$ 的粒子同样撞击到喷枪内壁, 这不利于涂层的制备.

颗粒直径 d 为 $5\sim 70\ \mu\text{m}$ 的粒子主要可以分为三个范围, 即粒径小于 $20\ \mu\text{m}$ 小粒径粒子、粒径大于 $60\ \mu\text{m}$ 的大粒径粒子和直径在 $30\sim 50\ \mu\text{m}$ 的中等粒径粒子. 分别选取具有代表性的 5 、 40 及 $70\ \mu\text{m}$ 的粒子为研究对象. 在 $n=5$ 工况下, 绘制出粒子速度随 v_y 的变化曲线如图 13 所示.

对于小粒径粒子, v_y 为 $10\ \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 和 $15\ \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时, 粒子的飞行速度较大且基本保持不变, 结合粒子的运动轨迹可以发现, 当 v_y 大于 $10\ \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的小粒径粒子更靠近焰流中心, 因此, 小粒径粒子 v_y 应在 $10\ \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 以上较为合适. 对于中等粒径的粒子, 粒子飞行速度随 v_y 的变化不明显, v_y 的选择范围较大. 对于大粒径粒子, 当 $v_y=15\ \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时, 粒子飞行速度下降明显, 因此, 大直径粒子 v_y 应在 $10\ \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 以内较为合适.

5 、 40 及 $70\ \mu\text{m}$ 的粒子温度随 v_y 的变化曲线如图 14 所示.

对于小粒径的粒子, v_y 增大时, 小粒径粒子更

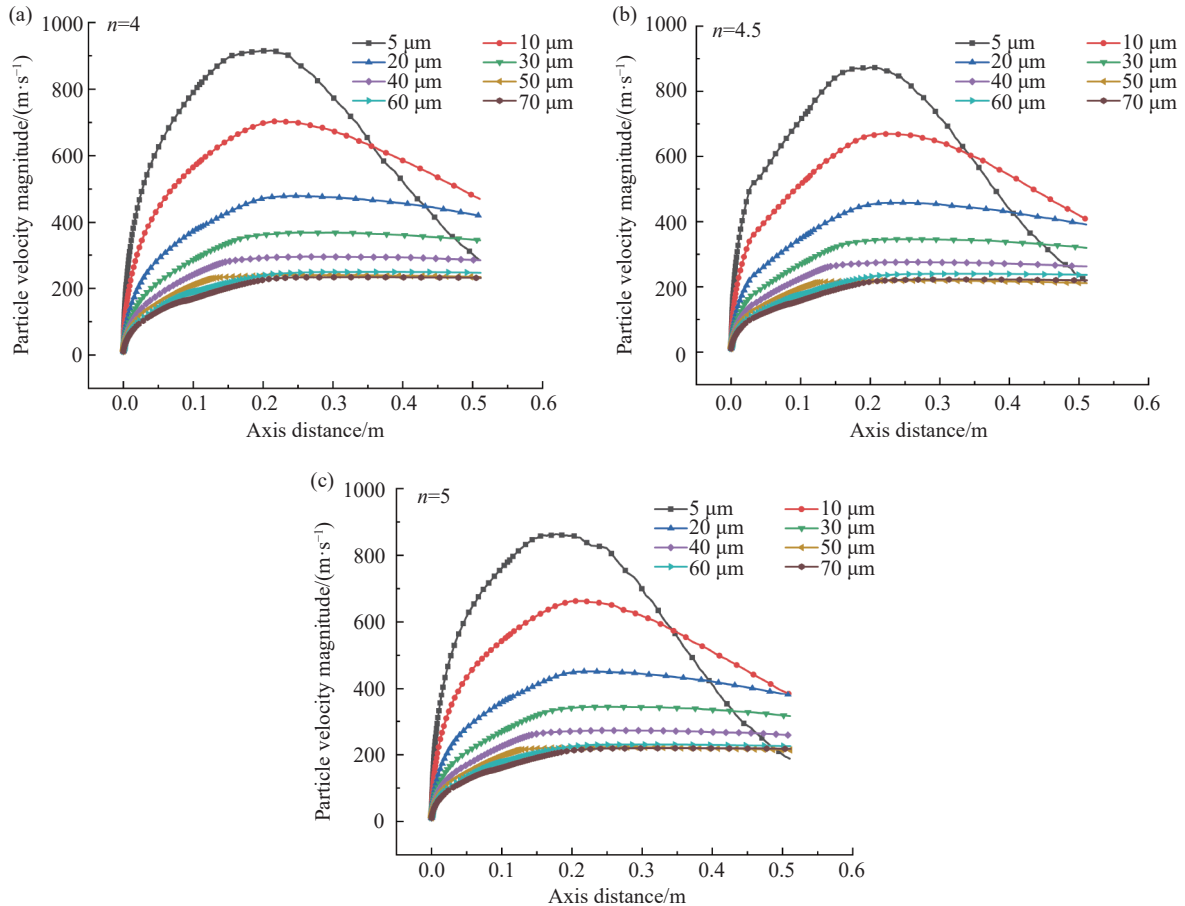


图 10 不同工艺参数下不同粒径的粒子飞行速度. (a) $n=4$; (b) $n=4.5$; (c) $n=5$

Fig.10 Flight velocities of different particle sizes under different process parameters: (a) $n=4$; (b) $n=4.5$; (c) $n=5$

靠近焰流中心, 粒子温度呈现出上升趋势. 对于中等粒径的粒子, 当 v_y 由 $1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 增加到 $10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时, 粒子温度呈现出先增加后减小的趋势, 而当 v_y 增加到 $15 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时, 粒子温度再次升高, 结合运动轨迹可以发现, v_y 为 $15 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时, 粒子发生发射, 焰流对粒子进行了二次加热导致粒子温度的升高, 所以 $v_y=15 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 不适合中等粒径的粒子选用. 考虑到粒子在整个运动过程中未能达到熔点 1388 K , 而半熔融状态的粒子更易形成结合强度较高的涂层, 所以应让中等粒径粒子温度较高些, 即 v_y 应在 $5 \sim 10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 较为合适. 对于大粒径的粒子, $v_y=1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时, 粒子的温度较低; 当 v_y 增加到 $5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时, 由于粒子经过焰流中心的加热而导致粒子温度相对较高. v_y 大于 $10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时, 粒子与喷枪内壁发生碰撞, 因此大粒径粒子 v_y 应大于 $1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 且小于 $5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.

综合考虑注入速度对不同粒径粒子飞行轨迹、温度、速度的影响, 不同粒径粒子最佳注入速度如表 3 所示.

2.4 粒子形状对颗粒飞行行为的影响

采用超声气体雾化法制备出的铁基非晶粉末

往往为球形或近似球形, 对于不同的材料, 制备出的粉末形状一般不同. 一般用球形度 (Shape Factor, 以下简称 SF) 来表示粒子的形状, 不同球形度粒子形状如表 4 所示. 本部分研究不同球形度 (SF) 的颗粒在焰流中的飞行行为, 以揭示其对铁基非晶涂层制备的影响.

在 $n=5$ 且注入速度为 $5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的工况下, 粒径为 $50 \mu\text{m}$ 时不同形状的粒子飞行轨迹如图 15 所示. 随着 SF 的减小, 粒子运动轨迹更加靠近焰流中心, 这是由于较低 SF 值的粒子, 粒子进入气态流场后受到的阻力更大, 进而导致粒子轴向速度增大, 粒子轨迹也就越靠上.

不同 SF 值下粒子飞行速度变化曲线如图 16 所示. 随着 SF 的降低, 粒子的最高飞行速度由 $200 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 增加到 $600 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 这表明随着 SF 的降低, 粒子在焰流中的受力是不断增加的, 致使粒子在焰流中有较高的加速度, 粒子加速明显. 同样 SF 越小的粒子其远离喷枪后减速更加明显.

不同 SF 值下粒子温度变化曲线如图 17 所示. 随着 SF 的降低, 粒子的温度是逐渐降低的. SF 越

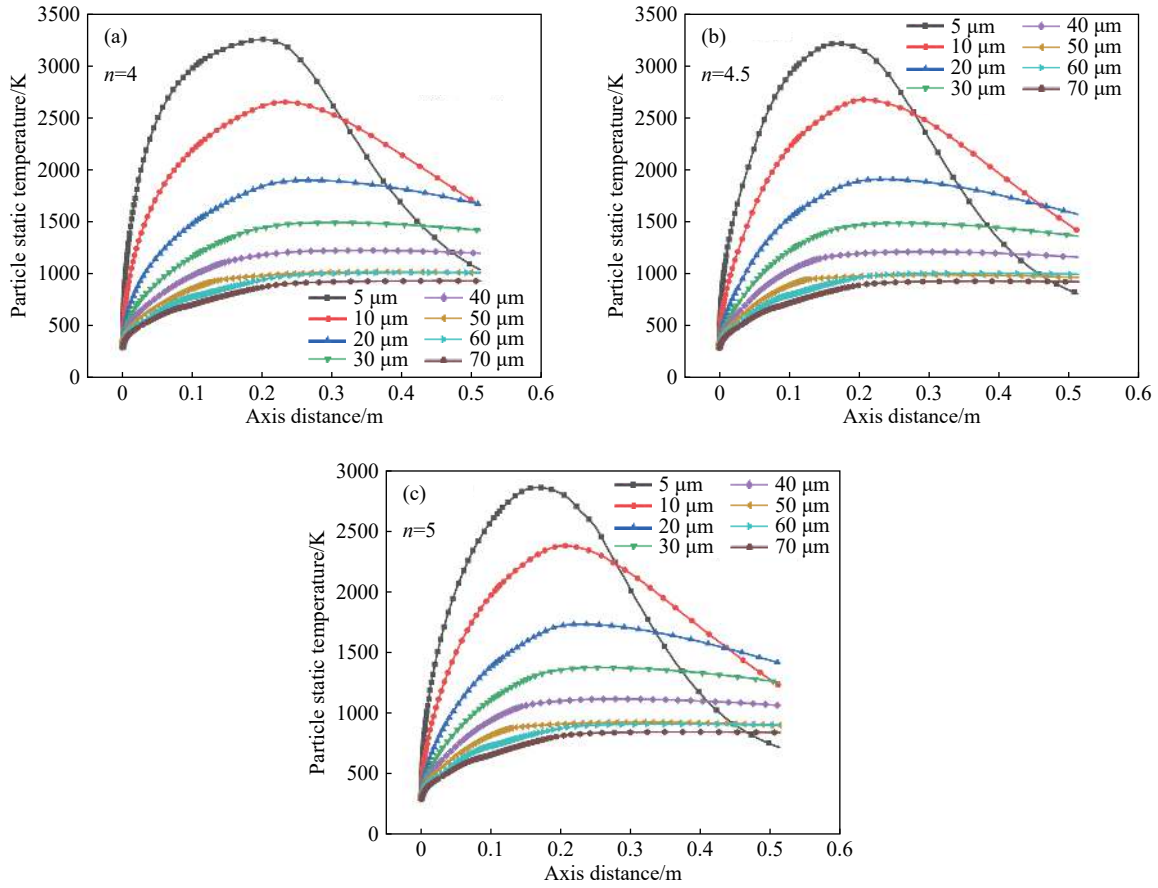


图 11 不同工艺参数下不同粒径的粒子温度曲线. (a) $n=4$; (b) $n=4.5$; (c) $n=5$

Fig.11 Temperature curves of different particle sizes under different process parameters: (a) $n=4$; (b) $n=4.5$; (c) $n=5$

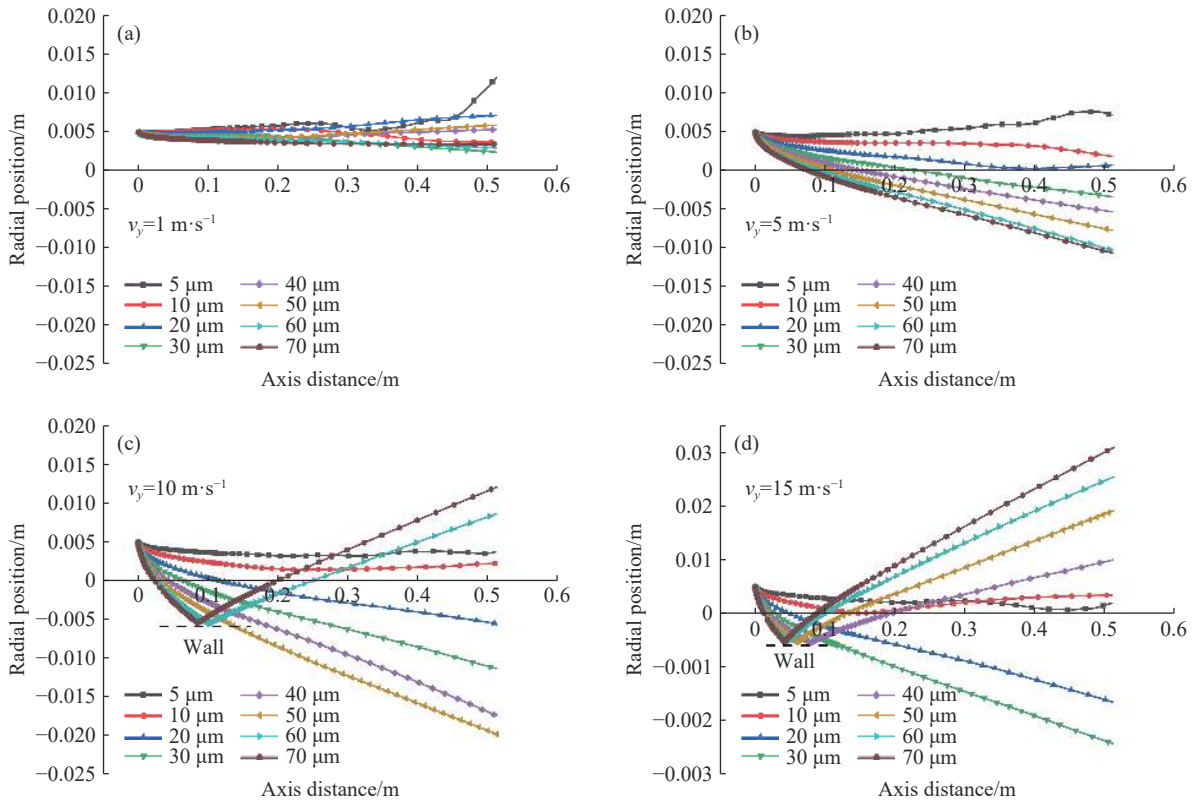


图 12 不同注入速度下粒子的运动轨迹. (a) $v_y = 1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$; (b) $v_y = 5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$; (c) $v_y = 10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$; (d) $v_y = 15 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$

Fig.12 Flight trajectories of particles under different injection velocities: (a) $v_y = 1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$; (b) $v_y = 5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$; (c) $v_y = 10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$; (d) $v_y = 15 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$

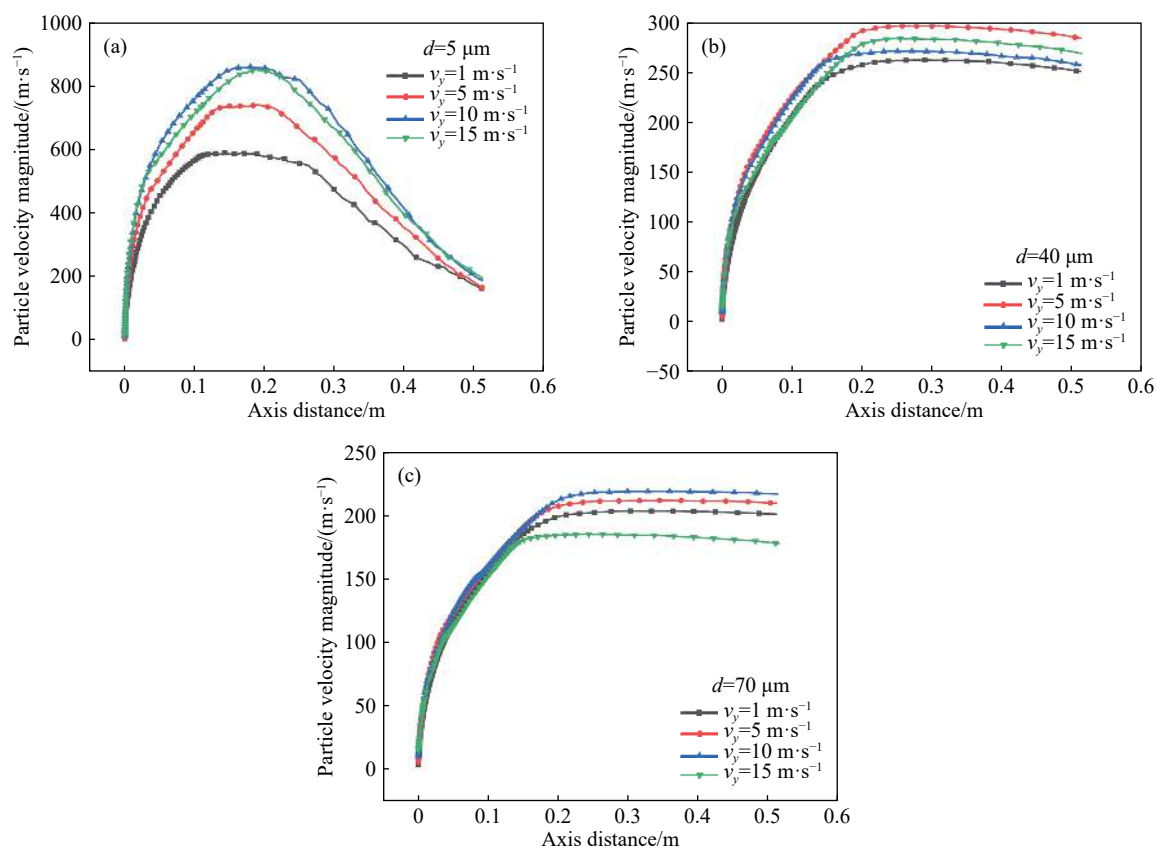
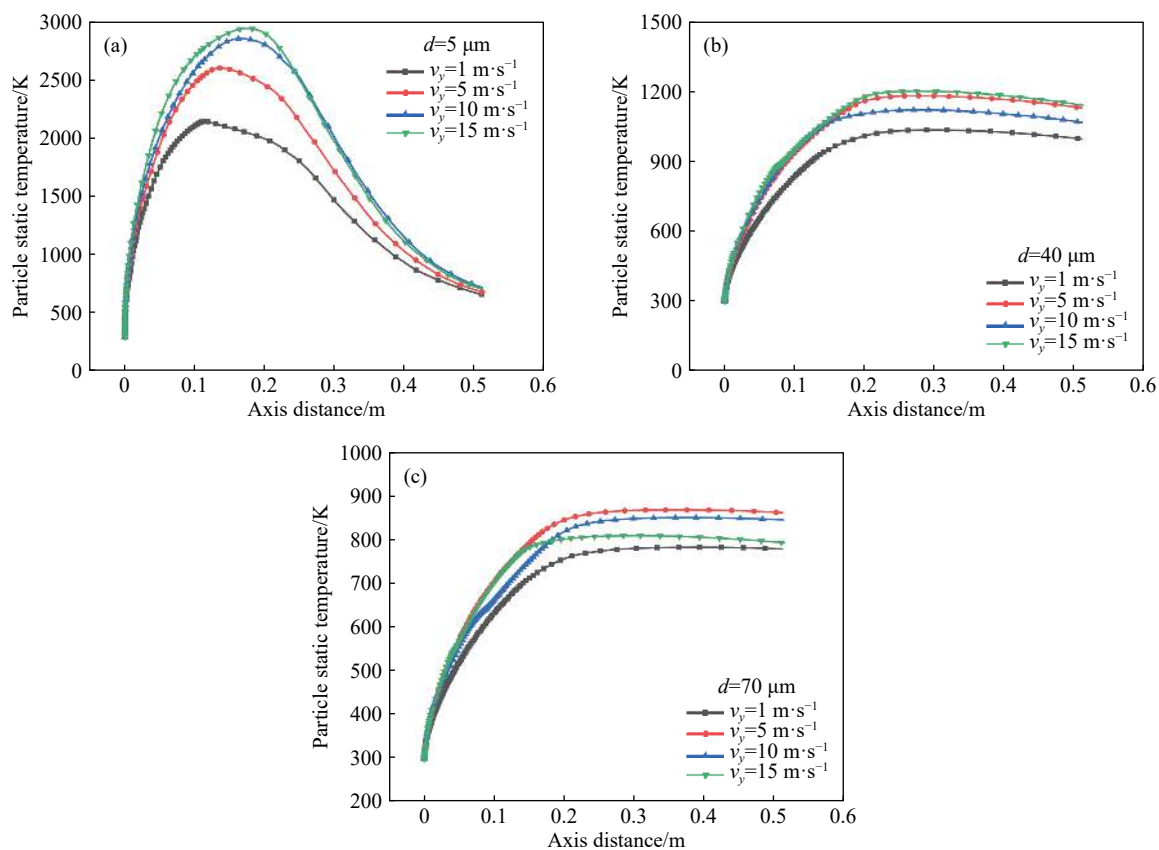
图 13 不同注入速度下不同粒径的粒子飞行速度. (a) $d=5\ \mu\text{m}$; (b) $d=40\ \mu\text{m}$; (c) $d=70\ \mu\text{m}$ Fig.13 Flight velocities of different particle sizes under different injection velocities: (a) $d=5\ \mu\text{m}$; (b) $d=40\ \mu\text{m}$; (c) $d=70\ \mu\text{m}$ 图 14 注入速度对不同粒径的粒子温度影响. (a) $d=5\ \mu\text{m}$; (b) $d=40\ \mu\text{m}$; (c) $d=70\ \mu\text{m}$ Fig.14 Flight temperatures of different particle sizes under different injection velocities: (a) $d=5\ \mu\text{m}$; (b) $d=40\ \mu\text{m}$; (c) $d=70\ \mu\text{m}$

表 3 不同粒径范围粒子最适注入速度

Table 3 Optimum injection velocities for different particle size ranges

Particle diameter/ μm	Injection speed/ $(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$
5–20	10–15
30–50	5–10
60–70	1–5

表 4 不同球形度的粒子形状

Table 4 Particle shapes under different shape factors (SF)

Shape factor	Shape
1	
0.9	
0.8	
<0.8	

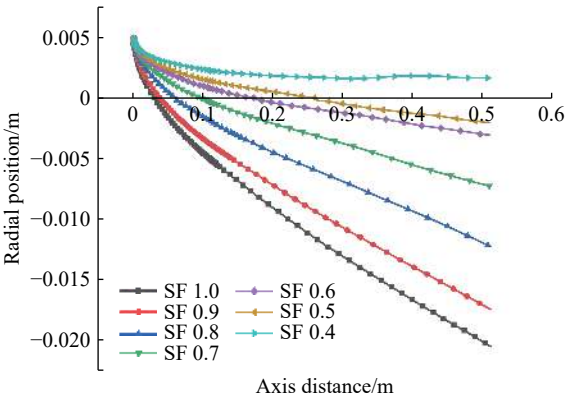


图 15 不同 SF 的粒子运动轨迹曲线

Fig.15 Flight trajectories of particles with different shape factors

小的粒子飞行速度较高, 在焰流中停留的时间短, 加热时间也就短, 相应粒子温度上升较低。

3 结论

本文使用计算流体动力学软件 Fluent 研究了 HVOF 热喷涂过程中的火焰流场和粒子行为, 分析了粒子大小、粒子注入速度、粒子球形度对喷涂工艺的影响, 并确定了合适的工艺参数, 根据数值仿真结果, 可以得出以下结论。

(1) 对喷枪内粒子的飞行行为进行分析, 粒径较大的粒子飞行过程中速度及温度相对稳定, 但容易撞击喷枪内壁; 粒径较小的粒子速度及温度不稳定且随焰流波动较为明显; 较为合适的粒径范围应为 30 ~ 50 μm 的中等粒径粒子。

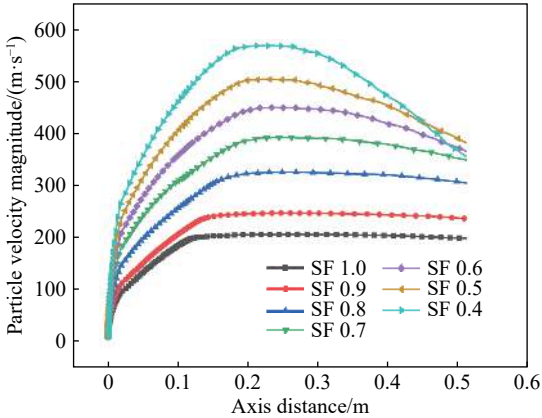


图 16 不同 SF 的粒子飞行速度曲线

Fig.16 Flight velocities of particles with different shape factors

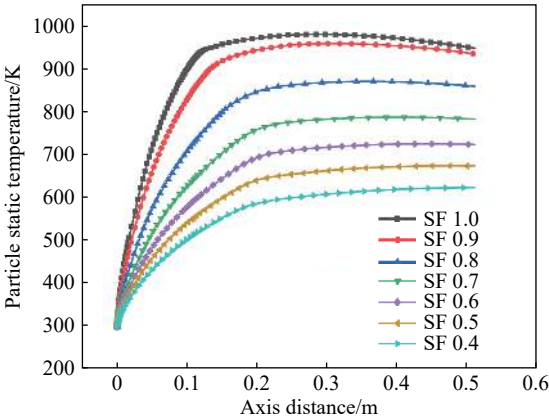


图 17 不同 SF 的粒子温度变化曲线

Fig.17 Temperature curves of particles with different shape factors

(2) 粒子注入速度对粒子的飞行行为有较大影响, 粒径小于 20 μm 的粒子注入速度应选用 10 ~ 15 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, 粒径在 30 ~ 50 μm 之间的粒子注入速度应选用 5 ~ 10 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, 粒径大于 60 μm 的粒子注入速度最宜选用 1 ~ 5 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

(3) 当球形度变小时, 由于非球形颗粒的阻力系数更高, 在焰流中停留的时间更短, 粒子轨迹越靠近焰流中心, 飞行速度更大、温度更低。

参 考 文 献

[1] Zhou Z, Wang L, Wang F C, et al. Formation and corrosion behavior of Fe-based amorphous metallic coatings by HVOF thermal spraying. *Surf Coat Technol*, 2009, 204(5): 563

[2] Zhou Z, Wang L, He D Y, et al. Microstructure and wear resistance of Fe-based amorphous metallic coatings prepared by HVOF thermal spraying. *J Therm Spray Technol*, 2010, 19(6): 1287

[3] Pan J J, Hu S S, Yang L J, et al. Numerical analysis of flame and particle behavior in an HVOF thermal spray process. *Mater Des*, 2016, 96: 370

[4] Kamnis S, Gu S. Study of in-flight and impact dynamics of

- nonspherical particles from HVOF guns. *J Therm Spray Technol*, 2010, 19(1-2): 31
- [5] Bang S S, Park Y C, Lee J W, et al. Effect of the spray distance on the properties of high velocity oxygen-fuel (HVOF) sprayed WC-12Co coatings. *J Nanosci Nanotechnol*, 2018, 18(3): 1931
- [6] Feng C, Zhu R, Han B C, et al. Effect of nozzle exit wear on the fluid flow characteristics of supersonic oxygen lance. *Metall Mater Trans B*, 2020, 51(1): 187
- [7] Tabbara H, Gu S. Computational simulation of liquid-fuelled HVOF thermal spraying. *Surf Coat Technol*, 2009, 204(5): 676
- [8] Patel J R, Agrawal D H, Patel C P. Influence of sensitive parameters and flow characteristics in HVOF coating. *Procedia Eng*, 2012, 38: 1367
- [9] Wang H G, Yuan X J, Hou G L, et al. Dynamic simulation of Ni particle behaviors in supersonic oxygen/air fuel spray process. *Acta Armamentarii*, 2006, 27(2): 310
(王汉功, 袁晓静, 侯根良, 等. 超音速火焰喷涂Ni粒子特性数值仿真. *兵工学报*, 2006, 27(2): 310)
- [10] Wang J W, Li Z. Influence of geometric parameters of D-jet spray Gun on the flow behavior of HVOF field. *J Combust Sci Technol*, 2014, 20(1): 26
(王建文, 李智. D-jet喷嘴几何参数对超音速喷射流场的影响. *燃烧科学与技术*, 2014, 20(1): 26)
- [11] He X B, Wu N C, Zhang S D, et al. Spraying distance effect on the porosity of Fe-based amorphous coatings. *Mater Sci Technol*, 2020, 28(1): 31
(何新宝, 吴念初, 张锁德, 等. 喷涂距离对Fe基非晶涂层孔隙影响的研究. *材料科学与工艺*, 2020, 28(1): 31)
- [12] Liu F H, Sun D B, Zhu R, et al. Effect of shrouding gas temperature on characteristics of a supersonic jet flow field with a shrouding Laval nozzle structure. *Metall Mater Trans B*, 2018, 49(4): 2050
- [13] Liu F H, Sun D B, Zhu R, et al. Characteristics of flow field for supersonic oxygen multijets with various Laval nozzle structures. *Metall Mater Trans B*, 2019, 50(5): 2362
- [14] Liu F H, Zhu R, Dong K, et al. Effect of Laval nozzle structure on behaviors of supersonic oxygen jet flow field. *Chin J Eng*, 2020, 42(Suppl 1): 54
(刘福海, 朱荣, 董凯, 等. 拉瓦尔喷管结构模式对超音速射流流动特性的影响. *工程科学学报*, 2020, 42(增刊1): 54)
- [15] Li M H, Shi D, Christofides P D. Diamond jet hybrid HVOF thermal spray: Gas-phase and particle behavior modeling and feedback control design. *Ind Eng Chem Res*, 2004, 43(14): 3632
- [16] Li M H, Christofides P D. Multi-scale modeling and analysis of an industrial HVOF thermal spray process. *Chem Eng Sci*, 2005, 60(13): 3649
- [17] Wang Y Z, Zhang Y A, Sun Y W, et al. Numerical modeling of gas flow field in high velocity oxygen-fuel thermal spray Gun. *Ordnance Mater Sci Eng*, 2012, 35(2): 39
(王引真, 张永昂, 孙玉伟, 等. 超音速火焰喷枪气体流场的数值模拟分析. *兵器材料科学与工程*, 2012, 35(2): 39)
- [18] Li Z L, Zhang L L, Cang D Q. Modeling study on the entrainment of the supersonic jet at high ambient temperature. *J Eng Thermophys*, 2018, 39(3): 545
(李子亮, 张玲玲, 苍大强. 超音速射流在高温气体环境中引射特性的模拟研究. *工程热物理学报*, 2018, 39(3): 545)
- [19] Zhang S L, Li C X, Li C J, et al. Application of high velocity oxygen fuel flame (HVOF) spraying to fabrication of $\text{La}_{0.8}\text{Sr}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{Mg}_{0.2}\text{O}_3$ electrolyte for solid oxide fuel cells. *J Power Sources*, 2016, 301: 62
- [20] Zeoli N, Gu S, Kamnis S. Numerical simulation of in-flight particle oxidation during thermal spraying. *Comput Chem Eng*, 2008, 32(7): 1661
- [21] Li C, Gao X, Zhang D C, et al. Numerical investigation on the flame characteristics and particle behaviors in a HVOF spray process using kerosene as fuel. *J Therm Spray Technol*, 2021, 30(3): 725
- [22] Wang X G, Song Q Z, Yu Z Y. Numerical investigation of combustion and flow dynamics in a high velocity oxygen-fuel thermal spray Gun. *J Therm Spray Technol*, 2016, 25(3): 441
- [23] Cui C, Hu J, Lu G X, et al. Numerical modeling of HVOF flame and in-flight particle. *Therm Spray Technol*, 2010, 2(3): 18
(崔崇, 胡江, 陆冠雄, 等. 超音速火焰喷涂焰流和粒子流的数值模拟研究. *热喷涂技术*, 2010, 2(3): 18)
- [24] Gaona M, Lima R S, Marple B R. Influence of particle temperature and velocity on the microstructure and mechanical behaviour of high velocity oxy-fuel (HVOF)-sprayed nanostructured titania coatings. *J Mater Process Technol*, 2008, 198(1-3): 426
- [25] Khan M N, Shamim T. Investigation of a dual-stage high velocity oxygen fuel thermal spray system. *Appl Energy*, 2014, 130: 853