doi: 10. 11933 / j. issn. 1007-9289. 20230319001

# 超音速火焰喷涂(HVOF)多相流瞬时 演化机理及敏感性分析

赵晓玉 李 昌 李思语 刘鹏飞 韩 兴

(辽宁科技大学机械工程与自动化学院 鞍山 114051)

摘要:以航空煤油为燃料的超音速火焰喷涂(HVOF)技术在制备 WC-Co 涂层方面具有独特优势。目前对 HVOF 热喷涂稳 态过程的研究无法揭示燃料液滴在燃烧室中的动态燃烧行为。液体燃料进入燃烧室前需要雾化,量化揭示燃料燃烧反应瞬时 演化机理是优化喷涂工艺的关键。基于 JP5000 喷枪建立 HVOF 热喷涂过程瞬时演化数值模型。将煤油液滴破碎、气化过程、 燃烧反应焰流与喷涂粒子直接耦合。采用双向耦合欧拉-拉格朗日方法跟踪连续相和离散相,以 realizable *k-c* 湍流模型、一步 反应涡耗散模型(EDM)表述喷涂燃烧焰流特性。通过 KHRT(Kelvin-Helmholtz Rayleigh-Taylor)破碎模型描述航空煤油液 滴破碎过程。基于可靠性理论,综合分析煤油液滴直径、氧气/燃料比率及反应物质量流量对喷涂粒子飞行行为的影响。结 果表明:氧气/燃料比率对粒子温度影响程度最大,煤油液滴直径对粒子速度影响最大。HVOF 瞬时演化模型可以直观呈现 燃料的动态行为及喷涂粒子的飞行特性,可为优化热喷涂工艺提供参考和理论支撑。 关键词:超高音速火焰喷涂(HVOF);多相流;瞬时演化;灵敏度分析 中图分类号: O242.21

# Transient Evolution Mechanism and Sensitivity Analysis of Multiphase Flow in HVOF Thermal Spraying

ZHAO Xiaoyu LI Chang LI Siyu LIU Pengfei HAN Xing

(School of Mechanical Engineering and Automation, University of Science and Technology Liaoning, Anshan 114051, China)

**Abstract:** High-velocity oxygen fuel (HVOF) thermal spraying is an emerging technology for surface modification with a low cost and short cycle for preparing coatings that can deposit metal and ceramic powders on different substrate surfaces. The use of liquid kerosene can save fuel under high-power outputs. Before entering the combustion chamber, kerosene fuel was atomized using a coaxial stabilizer. The degree of atomization directly affected the combustion efficiency, which in turn affected the particle temperature and velocity. The transient solution of HVOF spraying visually presents the fragmentation, evaporation, and combustion processes of fuel droplets and more accurately reflects the change in the flame flow characteristics. Quantitatively demonstrating the transient evolution characteristics of thermal spraying is important for optimizing the spraying process. Presently, most studies have been carried out on the steady state in HVOF thermal spraying, which does not demonstrate the transient evolution of the multiphase flow. In this study, a numerical model of the transient evolution of HVOF thermal spraying was established using a JP5000 gun. The effects of the fragmentation and gasification processes of the kerosene droplets and flame flow on the flight characteristics of the

基金项目: 辽宁省应用基础研究计划(2023JH2/101300226);辽宁科技大学研究生科技创新项目(LKDYC202216)。

Fund: Applied Basic Research Project of Liaoning Province (2023JH2/101300226); Liaoning University of Science and Technology Graduate Science and Technology Innovation Project (LKDYC202216).

收稿日期: 2023-03-19; 修改日期: 2023-04-18; 接受日期: 2023-05-05; 上线日期: 2023-12-15。

Received March 19, 2023; Revised April 18, 2023; Accepted in revised form May 5, 2023; Available online December 15, 2023.

引用格式: 赵晓玉,李昌,李思语,等. 超音速火焰喷涂 (HVOF) 多相流瞬时演化机理及敏感性分析[J]. 中国表面工程, 2024, 37(1): 148-159. Citation format: ZHAO Xiaoyu, LI Chang, LI Siyu, et al. Transient evolution mechanism and sensitivity analysis of multiphase flow in HVOF thermal spraying[J]. China Surface Engineering, 2024, 37(1): 148-159.

particles were comprehensively considered. The continuous and discrete phases were tracked by a two-way coupled Eulerian-Lagrangian method, where the flame flow was considered as the continuous phase and tracked by the Eulerian method, whereas the WC-12Co particles and kerosene droplets were regarded as the discrete phase and tracked by the discrete phase. The realizable k-ɛ turbulence model and eddy dissipation model (EDM) with the one-step reaction were used to express the flame flow characteristics. The KHRT (Helmholtz Rayleigh) Taylor fragmentation model was used to describe the fragmentation process of aviation kerosene droplets, revealing the interaction between the evaporation and fragmentation of droplets, flame flow, and particle swarm during spraying. The effects of the kerosene droplet diameter, oxygen / fuel ratio, and reactant mass flow rate on the flight characteristics (temperature and velocity) of the particles were evaluated based on the reliability theory. The results showed that HVOF thermal spraying has the characteristics of highly nonlinear and transient evolution. The flame flow shows irregular turbulent behavior from ignition to combustion and obvious regularity as the combustion proceeds. As the particle size decreased, the particle flight trajectory became more concentrated, which was conducive to the heating and acceleration of the particles. The flight temperature and velocity of the particles decreased with an increase in the particle size. The temperature and velocity of the flame flow were high in the barrel, the particle residence time was short, and the heating and acceleration efficiencies were limited. Therefore, the temperature and velocity of particles were low in the barrel and rapidly increased in the air domain, which was because the Mach cone at the gun outlet played a vital role in heating and acceleration of the particles. Particles impacting the substrate in the molten state produce significant melt deformation, which is critical for the formation of high-quality coatings. During impact, the velocity of the particles should be as high as possible at a suitable temperature. This causes the particles to undergo significant deformation at the moment of impacting the substrate, improving the bonding strength of the coating and substrate and reducing the porosity of the coating. Owing to the effect of the high pressure in the combustion chamber, kerosene droplets aggregate to form large droplets, which gather near the fuel inlet in the form of a suspension. The surface of the suspension droplets underwent fragmentation and evaporation, and evaporation occurred in the same region as fragmentation. The influences of the reactant mass flow rate, oxygen / fuel ratio, and fuel droplet diameter on the particle temperature and velocity were demonstrated by sensitivity calculations. The combination of numerical modeling and sensitivity analysis is the most cost-effective means of optimizing the thermal spraying process and provides a theoretical reference for parametric optimization.

Keywords: high-velocitg oxygen fuelc(HVOF); multiphase flow; instantaneous evolution; sensitivity analysis

# 0 前言

超音速火焰喷涂 (High-velocity oxy-fuel, HVOF) 热喷涂是一种新兴表面改性技术, 其制备 涂层的工艺成本低、周期短,可在不同基体表面沉 积金属、陶瓷粉末,目前已广泛应用于航空航天、 国防军工、石油化工等领域<sup>[1-2]</sup>。HVOF 系统多以航 空煤油为燃料,在保证更高动力输出的同时节省了 燃料成本<sup>[3-5]</sup>。HVOF 喷涂过程影响因素众多,且具 有较强的相关性。尤其是航空煤油燃料燃烧前要雾 化<sup>[6]</sup>。燃料的雾化机制与燃烧反应过程对热喷涂粒 子的飞行速度和温度有直接影响。量化揭示燃料燃 烧反应瞬时演化机理是优化喷涂工艺的关键。采用 试验法捕捉煤油液滴破碎、气化、燃烧反应过程瞬 时演化行为是极其困难的。目前针对超音速喷涂过 程瞬时演化机理方面的研究相对较少,亟须量化揭 示喷涂工艺参数对喷涂过程瞬时演化行为的影响 规律。

当前,针对热喷涂的数值模拟研究通常采用有

限元法 (Finite Element Method, FEM)。陆冠雄等<sup>[7]</sup> 研究了 HVOF 过程预混气体当量比对焰流特性的影 响,通过 LS-DYNA 计算了不同粒径 Ni60 粒子的撞 击行为,与试验结果进行了对比。MAHRUKH 等<sup>[8]</sup> 设计了一种气泡双流体雾化喷嘴,研究了 CH-2000 喷枪热喷涂过程颗粒液滴分解和蒸发行为。PAN 等<sup>[9]</sup>和 LI 等<sup>[10]</sup>对煤油燃料 JP5000 喷枪热喷涂过程 进行了数值计算,分析了 WC-Co 颗粒的飞行行为。 王文瑞等<sup>[11]</sup>和 YU 等<sup>[12]</sup>在文献[9-10]的基础上,进 一步分析了工艺参数及粒子参数对 Fe 基非晶涂层 性能的影响。尽管人们对 HVOF 热喷涂过程进行了 大量相关研究,但均是针对稳态热喷涂过程开展的, 缺少对热喷涂瞬时演化机理方面的研究。

液态燃料在进入燃烧室前需经同轴稳定器雾 化,雾化程度直接影响其燃烧效率,进而影响粒子 温度、速度。对 HVOF 喷涂过程进行瞬态求解,可 以直观呈现燃料液滴的破碎、气化及燃烧过程,更 客观反应焰流特性的变化规律。定量化揭示喷涂过 程的瞬时演化特征对优化喷涂工艺具有指导意义。 本文基于 JP5000 喷枪建立 HVOF 热喷涂过程瞬时 演化数值模型,综合考虑煤油液滴破碎、气化过程、 燃烧反应焰流对喷涂粒子飞行特性的影响。采用双 向耦合欧拉-拉格朗日方法跟踪连续相和离散相,以 realizable *k-ε* 湍流模型、一步反应涡耗散模型 (EDM)表述喷涂燃烧焰流特性,通过 KHRT (Kelvin-Helmholtz Rayleigh-Taylor)破碎模型描述航 空煤油液滴破碎过程。基于可靠性理论,评估煤油 液滴直径、氧气/燃料比率及反应物质量流量对粒 子飞行特性(温度、速度)影响的灵敏度。

1 HVOF 喷涂多相耦合瞬时演化模型

#### 1.1 边界条件及网格划分

HVOF 工艺原理如图 1a, 燃料和氧气被送入喷 枪,由同轴稳定器雾化并在燃烧室中点燃,产生超 音速火焰。粉末在氮气保护下沿管壁径向送入,焰 流通过 Laval 喷嘴加速至超音速。粉末被加热至熔 融或半熔融状态,并以高速冲击基体表面,形成涂 层。JP5000 喷枪几何模型及边界如图 1b。整个计算 区域呈中心轴对称,采用1/2模型进行计算。喷枪 管壁及基体设定为标准非滑移壁面,枪体采用水循 环冷却,温度设定为 300 K。基体喷涂前预热温度 为 500 K。喷枪外流场设置为喷涂距离 300 mm、高 度 220 mm 的空气域, 空气域边界设定为压力出口 边界,温度为 300 K,出口压力为 1 atm (1 atm=101 325 Pa)。WC-12Co 粒子由氮气沿平行 枪管径向送入,入射角度为 45°,煤油燃料和 WC-12Co 粒子作为离散相加入, 低温氧气作为连续 相加入。表1列示了 HVOF 热喷涂工艺参数及边界 条件。



boundary conditions for computational domain

表1 工艺参数及边界类型

 Table 1
 Process parameters and boundary types

Operating parameter	Value	Boundary type
Kerosene inlet mass flow rate / (kg / s)	0.006 7	Mass flow inlet
Oxygen inlet mass flow rate / (kg / s)	0.02	Mass flow inlet
Nitrogen mass flow rate / (kg / s)	0.000 325	Mass flow inlet
Kerosene droplet diameter / µm	3	
Kerosene incidence velocity / (m / s)	10	
WC-12Co particle diameter / µm	25	
Particle incidence velocity / (m / s)	10	

几何模型网格划分如图 2 所示。执行网格独立 性测试,使得压力、速度和温度与网格尺寸无关。 整个计算区域包含 87 564 个节点,86 390 个单元。 为了有效捕捉热喷涂过程焰流特性,对燃烧室、拉 瓦尔喷嘴及自由射流区域网格进行了局部细化,以 提高计算精度。



图 2 计算区域网格描述

(a) 燃烧室 (b) Laval 喷嘴 (c) 自由射流区域

Fig. 2 Grid description of calculation area: (a) Combustion chamber; (b) Laval nozzle; (c) Free jet zone.

#### 1.2 气相动力学模型

使用理想气体状态方程,笛卡尔张量形式二维 模型的控制方程表达如下<sup>[13-14]</sup>。

连续性方程

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u) + \frac{\partial (\rho v)}{\partial x}\frac{\rho v}{r} = S_m \qquad (1)$$

式中,ρ是密度;t是湍流环境;x是轴坐标;r是径 坐标;u是轴向速度;v是径向速度;Sm是从离散相 加入到连续相中的质量以及自定义的源项。

动量守恒方程

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u) + \frac{\partial}{\partial r}(\rho u v) + \frac{\partial p}{\partial x} - \frac{\partial \tau_{xr}}{\partial r} = \rho G_x + F_x \quad (2)$$

应力张量由下式给出:

$$\tau_{xr} = -\frac{2}{3}\mu \frac{\partial u}{\partial x} \delta_{xr} + \left[\mu \left(\frac{\partial u}{\partial r} + \frac{\partial v}{\partial x}\right)\right]$$
(3)

式中, p 是静压;  $G_x$ 和  $F_x$ 分别为 x方向上的重力体积力和外部体积力,  $\mu$  为黏度湍流和非湍流相加有

效值,  $\delta_{xr}$  为 x、r 方向的克罗内克符号 (Kronecker Symbol)。

能量运输方程

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho H) + \frac{\partial}{\partial x} [u(\rho H + p)] = \frac{\partial}{\partial r} \left( k_{\text{eff}} \frac{\partial T}{\partial r} + u(\tau_{xr})_{\text{eff}} \right) + S_T$$
(4)

式中,偏应力张量和有效导热系数为

$$\left(\tau_{xr}\right)_{\text{eff}} = \mu_{\text{eff}}\left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial r}\right) - \frac{2}{3}\mu_{\text{eff}}\frac{\partial u}{\partial x}\delta \qquad (5)$$

$$k_{\rm eff} = k_{\gamma} + \frac{c_p \mu_t}{\sigma_t} \tag{6}$$

式中, H为焓值; T为温度;  $S_T$ 为化学反应能量源;  $\mu_{\text{eff}}$ 为黏度湍流和非湍流相加有效值;  $\delta$ 为克罗内克 符号;  $k_p$ 为导热系数;  $c_p$ 为比热容;  $\mu_t$ 为湍流黏度;  $\sigma_t$ 为湍流普朗特数。

组分守恒方程

$$\frac{\partial (pc_s)}{\partial t} + \frac{\partial (pc_s u)}{\partial r} - \frac{\partial}{\partial r} \left[ D_s \frac{\partial (\rho c_s)}{\partial r} \right] = S_t \quad (7)$$

式中, *c*<sub>s</sub>为组分的体积浓度; *D*<sub>s</sub>为组分的扩散系数; *S*<sub>t</sub>为系统内部单位时间内单位体积通过化学反应产 生的该组分的质量。

## 1.3 湍流模型

湍流采用 Realizable k- $\varepsilon$  模型求解,具有以下形 式<sup>[15]</sup>。

湍动能

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho v k) = \frac{\partial}{\partial x} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial r} \right] + N_k + N_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k$$
(8)

湍流耗散率

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\varepsilon) + \frac{\partial}{\partial r}(\rho\upsilon\varepsilon) = \frac{\partial}{\partial r} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial\varepsilon}{\partial r} \right] + \rho C_1 S_\varepsilon - \rho C_2 \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{w\varepsilon}} + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} C_{3\varepsilon} N_b + S_\varepsilon \quad (9)$$

式中, k 为动能;  $N_k$  为平均速度梯度影响产生的湍 流动能;  $N_b$  为浮力影响产生的湍流动能;  $\varepsilon$  为湍流 耗散率;  $Y_M$  为可压缩湍流脉动膨胀对总耗散率的影 响。 $S_k$  为总动能源项;  $S_c$  湍流耗散率源项; w 是分 子运动黏性系数;  $C_1$ =max[0.43,  $\eta / (\eta+5)]$ ,  $\eta=S_k / \varepsilon$ ,  $C_2$ 、 $C_{1\varepsilon}$ 和 $C_{3\varepsilon}$ 是常数, $\sigma_k$ 和 $\sigma_{\varepsilon}$ 分别为湍动能及其耗散率湍流普朗特数, $C_2=1.9$ , $C_{1\varepsilon}=1.44$ , $C_{3\varepsilon}=0.09$ , $\sigma_k=1.0$ , $\sigma_{\varepsilon}=1.2$ 。

湍流黏度

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \tag{10}$$

动态黏度系数

$$C_{\mu} = \frac{1}{A_0 + A_s U \frac{k}{\varepsilon}} \tag{11}$$

式中,U为平均流速; $A_s$ 、 $A_0$ 为模型常数, $A_0$ =4.04,  $A_s = \sqrt{6} \cos \phi$ 。

#### 1.4 燃烧模型

MAGNUSSEN 和 HJERTAGER<sup>[16]</sup>开发的 EDM 模型适用于解决湍流情况下的整体反应。EDM 模型 完全忽略 Arrhenius 公式,通过比较式(12)、(13), 较小者为反应 r 中物质 i 的产生速度  $R_{i,j}^{[17]}$ :

$$R_{i,r} = \overline{v}_{i,r} M_{w,i} A \rho \frac{\varepsilon}{k} \min\left(\frac{Y_R}{\overline{v}_{R,r} M_{\omega,i}}\right) \qquad (12)$$

$$R_{i,r} = \overline{v}_{i,r} M_{w,i} AB \rho \frac{\varepsilon}{k} \left( \frac{\sum_{p} Y_{p}}{\sum_{j}^{N} \overline{v}_{j,r} M_{\omega,j}} \right) \quad (13)$$

式中, $R_{i,r}$ 表示由于反应r产生的物质i的净生产率, i,r为反应r中反应物i的化学计量系数; $M_{\omega,i}$ 为物 种j的分子量; $M_{\omega,i}$ 为物种i的分子量;A=4.0,为 涡流耗散模型中的常数;B=0.5,为涡流耗散模型中 的常数; $Y_P$ 为生成物的质量分数P; $Y_R$ 为特定反应 物的质量分数 $R_o$ 

使用 EDM 模型必须提供单步的化学反应方程 式。原因是多步反应机理基于 Arrhenius 速率,每 个反应速率不同。使用 GORDON 和 MCBRIDE<sup>[18]</sup> 开发的化学平衡程序,得到煤油燃料一步燃烧化学 平衡方程式

$$\begin{split} \mathrm{C_{12}H_{23}} + 17.286\mathrm{O_2} &\to 7.397\mathrm{CO} + 4.603\mathrm{CO_2} + \\ & 7.955\mathrm{H_2O} + 1.613\mathrm{H_2} + 1.204\mathrm{H} + \\ & 2.66\mathrm{OH} + 1.154\mathrm{O} + 3.1\mathrm{O_2} \end{split} \tag{14}$$

#### 1.5 离散相模型

本文中离散相模型包括燃料液滴及喷涂粒子。 利用拉格朗日方法计算离散相的运动轨迹。笛卡尔 坐标系下粒子的运动方程描述为<sup>[19-20]</sup>

$$\frac{\mathrm{d}u_p}{\mathrm{d}t} = F_p\left(u' - u'_p\right) + \frac{g\left(\rho_p - \rho\right)}{\rho_p} + F_x \quad (15)$$

$$F_{p} = \frac{18\mu_{x}}{\rho_{p}d_{p}^{2}} \frac{C_{D} \,\mathrm{Re}}{24}$$
(16)

式中,  $F_p(u'-u'_p)$  为颗粒的单位质量曳力; u'为连 续相速度;  $u'_p$  为颗粒速度;  $\mu_x$  为流体动力黏度;  $\rho$ 为流体密度;  $\rho_p$ 为颗粒密度;  $d_p$ 为颗粒直径; Re 为 相对雷诺数, 定义为

$$Re = \frac{\rho d_p \left| u_p - u \right|}{\mu} \tag{17}$$

假设粒子的温度是均匀的。粒子的能量方程为

$$\pi d_p^2 q = \begin{cases} m_p (C_p)_p \frac{\mathrm{d}T_p}{\mathrm{d}t}, & T_p \neq T_m \\ m_p L_f \frac{\mathrm{d}\chi_p}{\mathrm{d}t}, & T_p = T_m \end{cases}$$
(18)

式中,  $m_p$  为粒子的质量;  $(C_p)_p$  是粒子的比热; q 是 热通量;  $T_p$  是颗粒的温度;  $T_m$  是颗粒的熔化温度;  $L_f$  是熔化潜热;  $\chi_p$  是已熔化的粒子分数。

WC-12Co 粒子的密度和比热分别为  $\rho_p$  = 14 440 kg / m<sup>3</sup>和 Cp = 292 J / (kg • K)<sup>[21]</sup>。粒子的微观形貌如图 3,粉末采用团聚烧结法制备,其几何形状近似为球形,具有良好的流动性。





对于燃料液滴破碎的模拟,本文采用 KHRT 破碎模型求解<sup>[22]</sup>。KHRT 模型适用于韦伯数高的液滴和大规模突变式的破碎,综合利用了由空气动力驱动的 Kelvin-Helmholtz 波效应和由于脱落液滴加速进入气流而产生的 Rayleigh-Taylor 不稳定性。该模型更适合模拟热喷涂过程中燃料液滴的破碎。

# 2 数值计算结果分析

## 2.1 焰流特性分析

喷涂中焰流对粒子的加热和加速至关重要。对 喷涂焰流特性进行瞬时分析,明晰其演化机理,可 为进一步优化喷涂工艺奠定重要基础。计算可得出 喷涂过程不同时刻的焰流云图,以5.2 ms 时为例, 喷涂焰流云图如图 4。为了量化揭示焰流瞬时演化 规律,在喷枪不同位置设置监测点,图中以箭头表 示。白色曲线分别为绘制的监测点不同时刻所对应 的焰流温度、速度、压力及湍流强度瞬时演化规律。 图 4a 表明, 燃料入口附近由于煤油液滴聚集, 呈现 三角形蓝色低温区,煤油蒸发后与氧气在燃烧室中 剧烈燃烧,产生高温气体,峰值温度为3557K。焰 流温度因 Laval 喷嘴的汇聚作用迅速降低,平行枪 管中焰流温度呈现周期性波动,在喷枪出口附近 温度略有上升。监测点焰流温度曲线表明,煤油 蒸发为气体后与氧气发生燃烧反应,产生高温焰 流喷出枪管,该过程经历了 2.5 ms 左右,曲线较 为平稳。高温焰流到达监测点后导致温度迅速上 升。监测点温度受到剧烈的压缩波和膨胀波作用, 呈现无规则波动,直到焰流稳定后温度保持在 2337K左右。

图 4b 表明,焰流速度在燃烧室内分布较均匀, 经过 Laval 喷嘴后速度迅速上升,在平行枪管内焰 流速度呈周期性的减幅波动。在喷枪出口处受大气 背压作用,焰流速度剧烈波动,形成4个明显的马 赫锥。监测点焰流速度在1 ms 左右出现明显上升, 此时喷枪内气体受热膨胀,在 Laval 喷嘴加速下冲 出枪管。焰流速度在2.5 ms 左右再次攀升,此时为 燃烧反应焰流喷出枪管,这与焰流温度变化结果相 吻合。5.2 ms 时焰流速度稳定在2123 m/s。

图 4c 表明, 燃烧室内压强达到峰值且分布均 匀, 为 0.7 MPa, 实际喷涂过程中的燃烧室压强为 7~9 bar (1 bar=100 kPa), 与实践相符。平行枪管 中压强出现周期性波动, 表现为"点状团聚"现 象。监测点压强随着时间推移迅速上升, 4.6 ms 时, 压强达到 0.7 MPa, 随后基本稳定, 压强变化 较小。

图 4d 表明, 粒子入口及空气域中心轴线附近的 湍流强度较高。引起湍流强度过高的原因是多方面 的, 包括粒子与焰流间的摩擦及高温焰流与冷空气 形成的强对流等。监测点设置在 5.2 ms 时湍流强度的峰值点,由于强烈的冷热空气对流,4.6 ms 前监测点湍流强度呈现无规则剧烈波动,4.6 ms 后逐渐稳定。

图4e表明,燃料入口附近存在大量液态C12H23,

中心轴线附近无气态 C<sub>12</sub>H<sub>23</sub>产生, O<sub>2</sub>质量分数保持 在最高水平。随着轴向距离增加, 液态 C<sub>12</sub>H<sub>23</sub>蒸发 为气体并与 O<sub>2</sub>迅速反应,反应产物浓度迅速上升。 燃烧室内反应较完全,仅有少量未参与反应的 C<sub>12</sub>H<sub>23</sub>溢出到枪管中。



(a) Temperature cloud of flame flow and the change curve for monitoring points with time



(b) Velocity cloud of flame flow and the change curve for monitoring points with time



(c) Cloud of pressure and the change curve for monitoring points with time



(d) Cloud of turbulence intensity and the change curve for monitoring points with time







Fig. 4 Characteristics of flame flow and variation for combustion components in supersonic flame spraying

#### 2.2 粒子特性分析

粒子飞行特性直接决定了粒子与基体的结合状态。5.2 ms 时,不同粒径粒子的飞行特性如图5所示。粒子温度、速度随着粒径的增大而减小。随着粒径减小,粒子飞行轨迹更集中,更靠近中心轴线。 15 μm和25 μm粒径的粒子飞行轨迹没有明显发散,飞行轨迹靠近中心轴线有利于粒子的加热、加速。 在枪管内粒子温度、速度较低,尽管枪管内焰流温度、速度较高,但粒子在枪管内停留时间较短,加热、加速效率有限。粒子温度和速度在空气域中迅速提升,这是由于喷枪出口处的马赫锥对粒子加热、加速起到了至关重要的作用,同时较高的湍流强度也加剧了粒子与焰流间的相互作用。WC-12Co粒子的熔化温度为1640 K,粒子以熔融状态撞击基体可以产生更大的熔化变形,这对形成高质量的涂层至 关重要。所选3种粒径粒子,仅粒径为35 μm粒子 撞击基体时的平均温度低于熔化温度。粒径为 25 μm 粒子撞击基体时的平均温度最接近熔化温 度。粒径为 15 μm 粒子的整体飞行温度过高,过高 的温度会造成粒子的氧化和烧蚀,WC 脱碳形成 W<sub>2</sub>C 和其他复杂的非晶相会增大涂层的磨损率。在 保证合适撞击温度的前提下,粒子撞击速度应尽可 能高,更高的撞击速度可以使粒子在撞击基体瞬间 产生更大的变形,提高涂层与基体的结合强度,降 低涂层的孔隙率。

#### 2.3 煤油液滴特性分析

HVOF 热喷涂有从气体燃料向液体燃料转变的 趋势。这一发展的明显好处是可以使用煤油等低成 本燃料。液体燃料燃烧过程十分复杂,燃料液滴的 破碎、气化会影响燃烧过程。因此,有必要研究 燃料液滴的飞行特性。不同时刻液滴直径分布如 图 6。0.5 ms 时,燃烧室内存在冷热空气对流,受



(a) Cloud of particle temperature

互相碰撞发生聚合,形成较大直径液滴。液滴聚 合无疑阻碍了蒸发作用,不利于燃料的燃烧。液 滴破碎主要发生在燃料表层,在*x*=45 mm 位置, 液滴全部蒸发至消失。





图 5 5.2 ms 时粒子飞行特性

Fig. 5 Flight characteristics of particle at 5.2 ms





Fig. 6 Diameter distribution of kerosene droplet at different times

图 7 为不同时刻煤油蒸发组分释放率,蒸发作 用发生区域与液滴破碎区域基本一致。煤油的蒸发



温度约为470 K,5.2 ms时,中心区域液滴受燃烧 室高压影响形成较为集中的悬浮液,阻碍了液滴吸 收热量,液滴蒸发作用仅发生在悬浮液的表层。沿 轴向距离远离入口一侧液滴数量减少,煤油蒸发组 分释放率降低。

## 3 喷涂参数灵敏度分析

以煤油为燃料的 HVOF 喷涂过程中,燃料液滴 直径、反应物质量流量和氧气/燃料比率将直接决 定粒子的飞行特性(温度、速度),涂层的致密度和 结合强度与粒子温度和速度密切相关。有效评估煤 油液滴直径、氧气/燃料比率及反应物质量流量等 工艺参数对粒子飞行特性影响的灵敏度,对于获取 高质量涂层具有重要意义。

#### 3.1 工艺参数响应面模型建立

采用 BBD (Box-Behnken Design) 法对粒子飞 行特性(温度、速度)进行分析。选取煤油液滴直 径(D)、氧气/燃料比率(P)、反应物质量流量(Q) 为设计因素,对每个自变量的高、中、低水平进行 设计,以粒子温度(PT)和粒子速度(PV)作为响 应值。合理选取 BBD 试验设计 3 个影响因素数值, 因素编码水平见表 2。随机方案共 15 组,方案设计 如表 3。

Table 3	Codin	
Table 2	Coain	g and level of influencing factors

Frater	V	Level		
Factor	variable	_1	0	1
Fuel droplet diameter / µm	D	2	3	4
Oxygen / Fuel mass ratio	Р	3.2	3.8	4.4
Reactant mass flow rate / (kg / s)	0	0.022 8	0.028 5	0.034 2

表 3 随机方案及计算结果

 Table 3
 Random scheme and calculation results

Order No.	Fuel droplet diameter / µm	Oxygen / Fuel mass ratio	Reactant mass flow rate / (m / s)	Particletem perature / K	Particle velocity / (m / s)
1	3	4.4	0.022 8	1 558	346
2	4	4.4	0.028 5	1 578	311
3	3	3.2	0.034 2	1 779	350
4	2	4.4	0.028 5	1 520	455
5	3	3.8	0.028 5	1 583	413
6	2	3.8	0.034 2	1 604	493
7	3	3.8	0.028 5	1 583	413
8	3	4.4	0.034 2	1 554	414
9	4	3.8	0.034 2	1 678	349
10	3	3.2	0.022 8	1 795	375
11	3	3.8	0.028 5	1 583	413
12	4	3.2	0.028 5	1 822	341
13	2	3.2	0.028 5	1 722	484
14	4	3.8	0.022 8	1 770	291
15	2	3.8	0.022 8	1 624	436

对表 3 数据进行多元回归拟合,得到响应值的 二次多项式回归方程:

$$PT = 5127 - 87.7D - 1034P - 78509Q + 37.50D^{2} +$$

$$111.1P^{2} + 1492767Q^{2} - 3158D \times Q \quad (19)$$

$$PV = -45 - 72.00D + 189P + 19467Q -$$

$$51.0P^2 - 733\,954Q^2 + 6\,798P \times Q \tag{20}$$

式中,D为煤油液滴直径,P为氧气燃料比率,Q为

反应物质量流量,PT为粒子温度,PV为粒子速度。

以粒子温度为例,通过方差和残差对模型显著性 展开分析。方差分析通过比较不同因素水平响应变量 平均值来评估一个或多个因素的重要性。通过方差分 析检验了完全二次项(线性项、二次项和交互项)的 重要性,如图8所示,Pareto表明,在回归方程(19) 中,D、P、Q的二次项均具有统计学意义。





采用方差分析法对响应面模型线性项、交互项 作用、二次项显著性进行分析,以检验模型合理性。 表 4 为粒子温度方差分析结果,其中 P 为显著性水 平, P < 0.05 可认为是显著因子, P < 0.001 认为是 极显著因子。线性项 (D, P, Q)、平方项  $(D \times D, P \times P, Q \times Q)$  的 P 值均小于 0.05,证明上述项对 Pt影响显著。 $R^2$ 为 98.57%,表明计算结果与模型拟 合精度高达 98.57%。 $R_{ad}^2$ =97.15%与  $R_{Pred}^2$ =87.87%数 值大且接近,表明该模型具有较强的预测能力,即 粒子温度响应面模型具有较高预测精度。

:	表 4	粒于温度响应值的方差分析

Table 4         Variance analysis of response value for particle temperature							
Source	Freedom	Seq SS	Distribution / %	Adj SS	Adj MS	F value	P value
Model	7	141 593	98.57	141 593	20 228	69.15	0.000
Linear	3	123 096	85.70	123 097	41 032	140.28	0.000
D	1	17 861	12.43	17 861	17 861	61.06	0.000
Р	1	103 058	71.75	103 058	103 058	352.34	0.000
$\mathcal{Q}$	1	2 178	1.52	2 178	2 178	7.45	0.029
Square	3	17 200	11.97	17 200	5 733	19.60	0.001
$D \times D$	1	3 629	2.53	5 192	5 192	17.75	0.004
$P \times P$	1	4 886	3.40	5 908	5 908	20.20	0.003
$Q \times Q$	1	8 685	6.05	8 685	8 685	29.69	0.001
Interaction	1	1 296	0.90	1 296	1 296	4.43	0.073
$D \times Q$	1	1 296	0.90	1 296	1 296	4.43	0.073
Error	7	2 048	1.43	2 048	293		
Lack of fit	5	2 048	1.43	2 048	410	*	*
Pure error	2	0	0.00	0	0		
Total	14	143 640	100.00				
	$R^2 = 98.57\%$		$R_{adj}^2 = 97.15\%$	$R_{\rm Pred}^2 = 87.87\%$			

对粒子温度响应面残差分析以验证模型有效 性,残差是指观测值与回归模型拟合值之间的差值 大小,残差越小,表明模型精度越高。粒子温度响 应面残差分布如图 9。图 9a 为残差与概率分布,可 检测到非正态性。置信水平为 95%时,试验残差数 据呈直线分布,表明残差呈正态分布。图 9b 为残差 与拟合值分布, 残差呈非规律性随机分布。图 9c 为频率与残差分布, 残差值以 0 为轴线, 左右两侧 频率一致, 表明残差正态分布没有出现任何异常值。 图 9d 为观测值顺序与残差, 可检测残差相关性。残 差值均匀分布在 0 轴两侧且接近于 0。残差图表明 所建立模型的可靠性, 与方差分析一致。



图 9 粒子温度响应面残差分布

Fig. 9 Residual distribution of response surface for particle temperature

## 3.2 工艺参数影响评估

WC-12Co的液相线为 1 640 K, 粒子撞击基体的 温度越接近液相线, 越有利于粒子的扁平化行为, 粒 子撞击速度越高, 越有利于提高与基体的结合强度。 图 10a 表明, 随着 P 增大、D 减小, PT 显著下降。图 10b 表明, 随着 D 与 Q 增大, PT 显著升高, 当 D 保 持恒定,随着Q增大,PT先减小后增大。图10c表明, PT 随着P增大而减小。P恒定时,随着Q增大,PT 先减小后增大。图10d表明,PV随着D增大而减小。 保持D恒定,随着P增大,PV先增大后减小。图10e 表明,随着D增大、Q减小,PV显著下降。图10f 表明,随着P增大、Q减小,PV显著下降。





Fig. 10 Effect of interaction items on particle characteristics

图 11 为响应面与 Monte-Carlo 结合计算工艺参 数影响粒子特性的灵敏度。图 11a 表明, *D* 与 *PT* 呈正相关, *P*、*Q* 与 *PT* 呈负相关, *P* 对 *PT* 影响程 度最大,为-0.881 39。图 11b 表明, *D*、*P* 与 *PV* 呈 负相关, *Q* 与 *PV* 呈正相关, *D* 对 *PV* 影响程度最大, 为-0.938 69。



## 4 结论

基于 JP5000 喷枪建立 HVOF 热喷涂过程瞬时 演化数值模型,综合分析煤油液滴直径、氧气/燃 料比率及反应物质量流量对喷涂粒子飞行行为的影 响。获得主要结论如下:

(1)HVOF 热喷涂过程具有明显的高度非线性、 瞬时性演化特征,点火到燃烧过程焰流呈现为无规 则杂乱的湍流行为,随着燃烧进行焰流特性呈现出 明显的规律性。

(2)随着粒径减小,粒子飞行轨迹更集中。粒子飞行轨迹靠近中心轴线有利于对粒子的加热、加速。受燃烧室内高压作用,煤油液滴会相互聚合形成大直径液滴,并以悬浮液形式聚集在燃料入口附近。悬浮液滴表面会发生破碎气化,蒸发作用发生的区域与液滴破碎区域一致。

(3)灵敏度计算揭示了反应物质量流量、氧 气/燃料比率、燃料液滴直径对粒子温度、速度的 影响。数值模型与灵敏度分析相结合可作为优化热 喷涂工艺最经济有效的手段。

## 参考文献

- MITTAL G, PAUL S. Suspension and solution precursor plasma and HVOF spray: A review[J]. Journal of Thermal Spray Technology, 2022, 31(5): 1443-1475.
- [2] 查柏林, 贾旭东, 王金金, 等. HVOF 喷涂 WC-12Co 粒子沉积行为分析[J]. 表面技术, 2020, 49(11): 101-110.
  ZHA Bailin, JIA Xudong, WANG Jinjin, et al. Analysis on deposition behaviour of WC-12Co particles sprayed by HVOF[J]. Surface Technology, 2020, 49(11): 101-110. (in Chinese)
- [3] PICAS J, PUNSET M, BAILE M T, et al. Effect of oxygen / fuel ratio on the in-flight particle parameters and properties of HVOF WC-CoCr coatings[J]. Surface and

Coatings Technology, 2011, 205 (Supp-S2): S364-S368.

- [4] MARPLE B R, LIMA R S. Process temperature / velocity-hardness-wear relationships for high-velocity oxyfuel sprayed nanostructured and conventional cermet coatings[J]. Journal of Thermal Spray Technology, 2005, 14(1): 67-76.
- [5] LU J, ZHU S, LIU Y, et al. Effects of spraying parameters on the velocity of HVOF-sprayed particles based on the PIV method[J]. Journal of Thermal Spray Technology, 2022, 31(7): 2147-2156.
- [6] TABBARA H, GU S. Computational simulation of liquid-fuelled HVOF thermal spraying[J]. Surface and Coatings Technology, 2009, 204(5): 676-684.
- [7] 陆冠雄,孙策,郝利军,等.超音速火焰喷涂焰流特性和粒子沉积行为[J].天津大学学报(自然科学与工程技术版),2015,48(3):275-283.

LU Guanxiong, SUN Ce, HAO Lijun, at al. Gas flow characteristics and particle impact behavior in high velocity oxygen/air fuel process[J]. Journal of Tianjin University(Natural Science and Engineering Technology Edition), 2015, 48(3): 275-283. (in Chinese)

- [8] MAHRUKH M, KUMAR A, NABAVI S A, et al. Numerical analysis of the effects of using effervescent atomization on solution precursor thermal spraying process[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2017, 56(48): 14231-14244.
- [9] PAN J, HU S, YANG L, et al. Numerical analysis of flame and particle behavior in an HVOF thermal spray process[J]. Materials and Design, 2016, 96: 370-376.
- [10] LI C, GAO X, ZHANG D, et al. Numerical investigation on the flame characteristics and particle behaviors in a HVOF spray process using kerosene as fuel[J]. Journal of Thermal Spray Technology, 2021, 30(5-6): 725-738.
- [11] 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, at al. Particle flight behavior in hypersonic flame spraying[J]. Chinese Journal of Engineering, 2022, 44(2): 217-227. (in Chinese)
- [12] YU J, LIU X, YU Y, et al. Effect of HVOF spraying process on particle behavior of Fe-based amorphous alloy coatings[J]. Journal of Thermal Spray Technology, 2022, 31(8): 2448-2462.
- [13] ZHOU Z, CHEN Y, HU Z, et al. Numerical investigation of particles in warm-particle peening-assisted highvelocity oxygen fuel (WPPA-HVOF) spraying[J]. Journal of Thermal Spray Technology, 2020, 29(7): 1682-1694.
- [14] 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[J]. 兵工学报, 2006(2): 310-314. WANG Hangong, YUAN Xiaojing, HOU Genliang, at al. Dynamic simulation of Ni particle behaviors in supersonic oxygen / air fuel spray process[J]. Acta Armamentarii, 2006(2): 310-314. (in Chinese)

- [15] KAMALI R, BINESH A R. The importance of sensitive parameters effect on the combustion in a high velocity oxygen-fuel spray system[J]. International Communications in Heat & Mass Transfer, 2009, 36(9): 978-983.
- [16] MAGNUSSEN B F, HJERTAGER B H. On mathematical modeling of turbulent combustion with special emphasis on soot formation and combustion[J]. Symposium on Combustion, 1977, 16(1): 719-729.
- [17] KAMNIS S, GU S. Numerical modelling of propane combustion in a high velocity oxygen-fuel thermal spray gun[J]. Chemical Engineering & Processing Process Intensification, 2006, 45(4): 246-253.
- [18] GORDON S, MCBRIDE B J. Computer program for calculation of complex chemical equilibrium compositions and applications. part 1: Analysis[J]. NASA Reference Publications, 1994. DOI: 10.1016/S0263-2373(01)00051-2.
- [19] HAN X, LI C, GAO X, et al. Numerical study on the behavior of titanium particles in the process of warm spraying[J]. Welding in the World, 2022, 66(7): 1305-1314.
- [20] LI C, GAO X, YANG Y, et al. Sensitivity analysis of process parameters of warm spraying process based on response surface method[J]. Journal of Thermal Spray Technology, 2022, 31(3): 585-597.
- [21] 曹晓恬,查柏林,周伟,等.基于 SPH 的超音速火焰 喷涂 WC-12Co 粒子速度对其沉积行为的影响[J].表面 技术,2022,51(6):407-415.
  CAO Xiaotian, ZHA Bailin, ZHOU Wei, et al. Velocity of particles on deposition behavior of WC-12Co particles sprayed by HVOF based on SPH method[J]. Surface Technology, 2022, 51(6):407-415. (in Chinese)
- [22] JABBARI F, JADIDI M, WUTHRICH R, et al. A numerical study of suspension injection in plasmaspraying process[J]. Journal of Thermal Spray Technology, 2013, 23(1-2): 3-13.

李昌(通信作者),男,1980年出生,博士,教授。主要研究方向为机 械可靠性工程、多能场复合激光先进制造、焊接可靠性、超音速喷涂、 航空轴承使役损伤机理及可靠性试验方法。

E-mail: lichang2323-23@163.com

作者简介:赵晓玉,男,1997年出生,硕士研究生。主要研究方向为 超音速火焰喷涂工艺方法与涂层制备。

E-mail: x.y.zhao\_9@qq.com