

多功能超音速火焰喷涂粒子特性的数值模拟

刘雪峰, 刘春和, 张仕念, 彭道勇
(二炮装备研究院, 北京 100085)

[摘要] 通过建立多功能超音速火焰喷涂火焰流场的数值模型, 对超音速火焰喷涂粒子的速度特性和温度特性进行数值模拟, 其结果揭示了多功能超音速火焰喷涂粒子的速度和温度的变化规律。根据数值模拟结果分析了粉末粒度对火焰流速度和温度的影响, 用不同粒度参数重复模拟计算, 这对喷涂粉末的加速和加热性能具有重要意义。

[关键词] 计算机应用; 粒子速度; 粒子温度; 数值模拟; 超音速; 火焰喷涂

[中图分类号] TG174; TQ639.2

[文献标识码] A

[文章编号] 1001-3660(2007)03-0025-03

The Numerical Analysis of Particle Character in High Velocity Oxygen/Air Fuel Spray

LIU Xue-feng, LIU Chun-he, ZHANG Shi-nian, PENG Dao-yong

(Equipment Research Institute of No. 2 Artillery, Beijing 100085, China)

[Abstract] Through setting up high velocity oxygen/air fuel spray the numerical model of field sheds, carrying on the numerical simulation to high velocity fuel spray velocity characteristic and temperature characteristic of particle, its result has announced high velocity oxygen/air fuel spray particle change laws of velocity and temperature. Result of numerical simulation analyses powder grain size influence to velocity and temperature of flame, repeat with different grain size parameter simulation calculate, it has important meaning to accelerate and heat performance of spraying powder.

[Key words] Computer application; Particle velocity; Particle temperature; Numerical simulation; High velocity; Fuel spray

0 引言

超音速火焰喷涂是热喷涂领域自20世纪90年代以来发展起来的一项极有前景的新技术。用数值模拟的方法分析多功能超音速火焰喷涂的粒子特性已成为一种趋势。2000年在加拿大召开的国际热喷涂会议上, 有近10篇论文是关于超音速火焰喷涂数值模拟的^[1]。通过数值模拟喷涂粒子的速度特性和温度特性已被实验证明具有较高的准确性, 有很高的实用价值。

目前超音速火焰喷涂粒子特性的数值模拟一般未考虑固体微粒的作用, 本文研究的是喷涂粒子的粒径对喷涂粒子的速度和温度影响的动态分析, 根据一定的假设条件, 建立粒子动力学和粒子传热模型, 确定边界条件, 通过计算机进行动态模拟。

1 数值模型的建立

1.1 假设条件

1) 颗粒是分级的不可压缩的球体; 每级颗粒质量是守恒的, 即颗粒间彼此不互相碰撞, 不发生裂解和化学反应^[2]。

2) 颗粒本身所占据的体积可以忽略不计。

3) 颗粒内部温度分布均匀, 颗粒的热运动不影响系统压力。

4) 系统的质量和能量是守恒的。

5) 考虑冷却对火焰温度的影响。

1.2 粒子动力学模型

焰流中, 喷涂粒子受到多种力的作用, 主要有拖动力, 此外, 还有粒子加速运动时和焰流不均匀性作用于粒子上的附加力及重力。喷涂粒子在焰流中飞行时, 燃气会在粒子表面形成一粘性附面层, 在粒子表面的不同位置, 压强的分布是不相同的, 粒子由于压强差而受到压差阻力, 另外, 粒子表面还要受到摩擦剪应力的作用, 两种力的合力称拖动力, 可用下式表示。

$$F_d = \frac{1}{2} C_D \rho_g |V_g - V_p| (V_g - V_p) S \quad (1)$$

式中, F_d 为拖动力, C_D 为拖动系数, ρ_g 为燃气密度, V_g 为燃气速度, V_p 为颗粒速度, S 为迎风面面积。

拖动系数很大程度上取决于粒子与燃气之间的相对速度, 影响 C_D 的因素很多, 燃气湍流、粒子与焰流温度不同引起的温度效应、粒子的球形度等, 精确计算 C_D 是相当困难的, 通常情况下, 按雷诺数的不同可由下列式确定^[3]。

$$C_D = \frac{24}{Re} \quad Re < 0.2 \quad (2)$$

$$C_D = \frac{24}{Re} \left(1 + \frac{3}{16} Re \right) \quad 0.2 \leq Re < 2 \quad (3)$$

$$C_D = \frac{24}{Re} (1 + 0.11 Re^{0.81}) \quad 2 \leq Re < 21 \quad (4)$$

[收稿日期] 2007-02-11

[作者简介] 刘雪峰(1978-), 男, 浙江龙游人, 助理研究员, 硕士, 研究方向为武器装备寿命工程。

$$C_D = \frac{24}{Re} (1 + 0.189 Re^{0.632}) \quad 21 \leq Re < 200 \quad (5)$$

$$Re = \frac{\rho_g d_p (V_g - V_d)}{\eta_g} \quad (6)$$

式中, d_p 为粒子直径, η_g 为燃气密度, Re 为雷诺数。

根据牛顿第二定律, $F = ma$, m 为粒子的质量, a 为粒子的加速度。假设粒子为球形, 则粒子的速度可用下式表示:

$$\begin{aligned} \frac{dV_p}{dt} = \frac{F}{m} &= \frac{4\pi \left(\frac{d}{2}\right)^2 C_D \rho_g (V_g - V_d) |V_g - V_d|}{8 \times \frac{4}{3} \pi \left(\frac{d}{2}\right)^3 \rho_d} \\ &= \frac{3\rho_g C_D (V_g - V_d) |V_g - V_d|}{4d\rho_d} \end{aligned} \quad (7)$$

式中, d 为粒子直径。由上式可以看出, 一方面, 粒子的加速度与粒子的直径成反比, 直径越大的粒子, 其加速度越小, 直径越小的粒子, 其加速度越大; 另一方面, 粒子的加速度与气流粒子间的相对速度成正比, 当气流速度大于粒子速度时, 气流对粒子起加速作用, 当气流速度小于粒子速度时, 气流对粒子起减速作用。

1.3 粒子飞行传热模型

粒子沉积前的温度对涂层的性能有重要的作用。温度对粒子与基体及粒子与粒子之间的结合有较大的影响, 当粒子温度过低时, 粒子(或复合粉末中的基体相)可能产生不充分的变形, 粒子与基体及粒子之间结合不好, 造成涂层结合强度的下降和孔隙率的升高。粒子温度过高时, 可能导致低熔点易挥发材料的损失和粉末结构性能的改变, 从而影响涂层的性能。

熔滴的热量传递可以通过能量方程来计算, 假设固态与液态粒子的密度相等, 且保持不变:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + (\vec{V} \cdot \vec{\nabla})h = \frac{1}{\rho} \vec{\nabla} \cdot (k \vec{\nabla} T) \quad (8)$$

式中, \vec{V} 为速度矢量, h 为焓, T 为温度, ρ 为密度, k 为传热系数。由于能量方程有两个应变变量(温度 T 和焓 h), 我们通常将这两个应变变量转换成一个应变变量焓 h , 公式变为:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + (\vec{V} \cdot \vec{\nabla})h = \frac{1}{\rho} \vec{\nabla} \cdot (\beta \vec{\nabla} h) + \frac{1}{\rho} \nabla^2 \phi \quad (9)$$

$$\text{在固态时: } h \leq 0; \beta = \frac{k_s}{C_s}, \phi = 0 \quad (10a)$$

$$\text{在固液两态共存时: } 0 < h < H; \beta = 0, \phi = 0 \quad (10b)$$

$$\text{在液态时: } h \geq H; \beta = \frac{k_l}{C_l}, \phi = -\frac{H_f k_l}{C_l} \quad (10c)$$

式中, C 为比热, H_f 为溶解潜热, ϕ 为一种新参量。现在能量方程中只有一个独立变量焓 h , 温度与焓的关系可由下式给出:

$$T = T_m + \frac{1}{k} (h\beta + \phi) \quad (11)$$

式中, T_m 为微粒的熔点。基底的热量传递方式都是通过热传导, 基本方程为:

$$\rho_w C_w \frac{\partial T_w}{\partial t} = \vec{\nabla} \cdot (k_w \vec{\nabla} T_w) \quad (12)$$

假设熔滴的自由表面是绝热的: 估计由熔滴表面向基体传递的热量是熔滴表面向空气传递的热量的三倍以上。熔滴与基体的热接触距离(R_c)由下式计算:

$$R_c = \frac{(T - T_w)_{\text{基体}}}{q} \quad (13)$$

式中, q 为熔滴与基体之间的热流量。 R_c 的值是提供一种输入模型, 虽然式中的 R_c 会随着时间的和界面位置变化, 但在仿真中我们通常把它看作是恒量^[4]。

2 粒子状态数值模拟

2.1 初始条件的建立

喷涂工艺条件及燃烧气体和喷涂粉末的初始值见表1。

表1 喷涂工艺条件及喷涂粉末参数

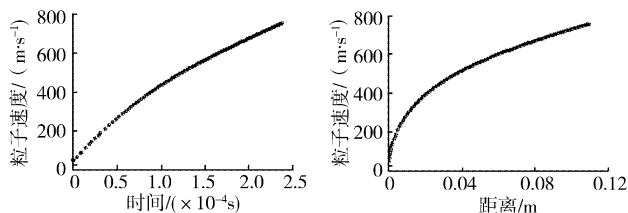
Table 1 Technical condition in spraying and parameter in pulverization

空气流量	$M_R = 40 \text{ m}^3/\text{h}$	燃料(煤油)流量	$M_k = 3.5 \text{ g/s}$
粉末材料	Ni	粉末流量	$M_p = 30 \text{ g/s}$
初始温度	$T_p = 300 \text{ K}$	初始速度	$U_p = 20 \text{ m/s}$

2.2 不同粒度粒子速度的动态分析

图1a、图2a、图3a给出了不同粒径粒子以一定速度注入焰流随时间的变化曲线。从图中可以看出, 粒子的整个运动过程都因受到拖动力的作用而加速。粒子从入枪至出枪的时间在毫秒级范围, 这与文献[3]的论述相吻合。图1b、图2b、图3b给出了粒子速度随距离的变化曲线, 由图可知, 粒子的加速过程一直持续到出枪, 从曲线的趋势可以看出, 粒子在出枪以后还将存在一段距离的加速过程, 粒子的出枪速度在 $350 \sim 800 \text{ m/s}$ 之间。对于微米级粒子, 粒子的出枪速度随着粒径的增大而减小。

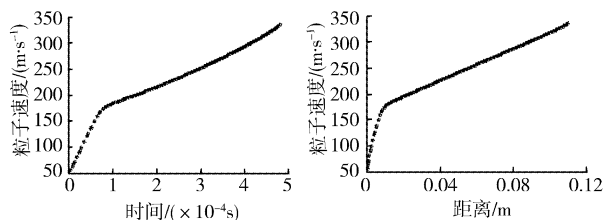
在相同燃烧状态参数下, 粒子受到初始拖动力的影响, 小粒径粒子由于质量小, 容易加速, 但另一方面, 由于拖动力又与粒子的瞬时速度之间存在关系, 拖动力随着粒子速度的增加而减小, 小径粒子的速度在最初时间的变化很快, 而大径粒子对拖动力的反应比较迟滞, 因此在整个加速过程中, 随着粒径的增大, 粒子速度曲线趋于平缓。



a 粒子速度随时间变化曲线 b 粒子速度随距离变化曲线

图1 粒子直径为 $10 \mu\text{m}$

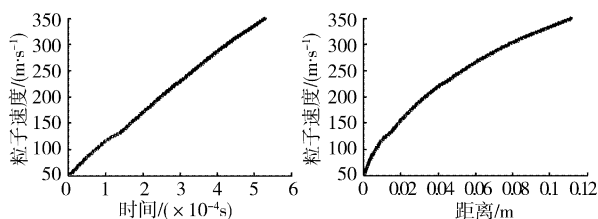
Figure 1 The diameter of particle is 10 micron



a 粒子速度随时间变化曲线 b 粒子速度随距离变化曲线

图2 粒子直径为 $20 \mu\text{m}$

Figure 2 The diameter of particle is 20 micron



a 粒子速度随时间变化曲线 b 粒子速度随距离变化曲线

图3 粒子直径为40 μm

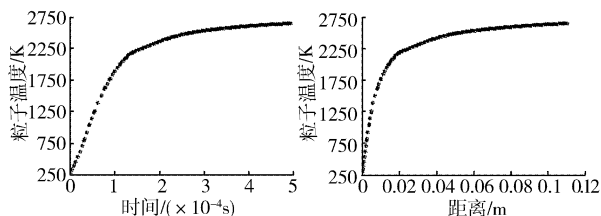
Figure 3 The diameter of particle is 40 micron

2.3 不同粒度粒子温度的动态分析

图4a、图5a、图6a给出了燃气中粒子加热曲线。该图反应了低温粒子在高温燃气状态中的加温过程。粒子温度随时间变化的曲线表明,喷涂粒子在0.1ms以前的温度增速很快,使得低温粒子瞬间达到一定温度。直至出枪,粒子的瞬间温升足以使低熔点粒子软化或者熔化。由前面的假设可知,粒子不会发生相变,因此,整个过程粒子只从高温焰流中获取热量,但不发生形态的变化。

图4b、图5b、图6b给出了粒子的温度随距离变化的曲线。该曲线表明,粒子的温度加速度也是逐渐减小的过程。这是因为,在整个过程中,喷枪枪壁受到的冷却和喷枪焰流传播过程中的温度衰减决定了焰流通过喷嘴以后与粒子之间的温度传导逐渐减弱。

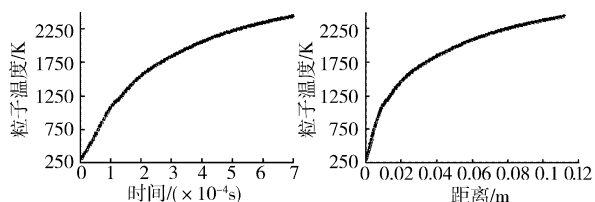
同时,通过对不同粒径粒子温度的变化过程的研究,可以发现小径粒子的温升加速度高于大径粒子。这是由于大径粒子存在内部热量传递的过程。粒子表面吸收热量以后,逐渐向内核传导,使得自身达到新的平衡,这个吸热过程降低了大径粒子的温升加速度。因此,这也是超音速火焰喷涂过程中对粒子要求的一个重要因素。



a 粒子温度随时间变化曲线 b 粒子温度随距离变化曲线

图4 粒子直径为5 μm

Figure 4 The diameter of particle is 5 micron



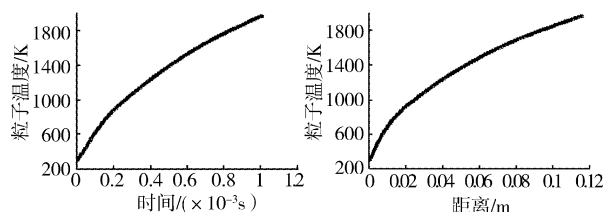
a 粒子温度随时间变化曲线 b 粒子温度随距离变化曲线

图5 粒子直径为10 μm

Figure 5 The diameter of particle is 10 micron

3 结论

在超音速火焰喷涂过程中,喷枪中喷涂粒子的状态对喷涂



a 粒子温度随时间变化曲线 b 粒子温度随距离变化曲线

图6 粒子直径为20 μm

Figure 6 The diameter of particle is 20 micro

的质量有着决定性的影响。对于相同的喷涂状态,喷涂粒子的温度、速度与粒子的直径存在明显的关系,即随着粒子直径的增加,粒子速度和温度的加速度都将减小。粒子在加速出枪以后,还将存在适当距离的加速加温过程。粒子的出口速度和温度与实际测定的比较接近,从而为多功能超音速火焰喷涂的实际粒子存在状态提供了有力的证据,对优化涂层质量有着重要意义。

[参考文献]

- [1] 王志健. 空气超音速火焰喷枪设计研究[D]. 北京:北京装甲兵工程学院,2001.2-4
- [2] 田欣利. 空气超音速火焰喷枪速度场和温度场的数值仿真[J]. 兵工学报,2002,23(4):93-96
- [3] 查柏林. HVO/AF多功能超音速火焰喷涂技术研究[D]. 西安:西安第二炮兵工程学院,2003.69-79
- [4] Pasandeh-Fard M, Mostaghimi J, Chandra S. Modeling sequential impact of two molten droplets on a solid surface[C]. Canada: Proc. of the 16th ITSC, 2000.

(上接第16页)

2 结论

1) 通过2种不同红外隐身涂层的红外热像图对比看出,采用同色迷彩不同梯度辐射率设计方法制备的红外隐身涂料,在具有可见光隐身的同时,红外斑块与迷彩图案完全分离,进一步提高了红外隐身涂料的伪装性能。

2) 本项研究的关键在于如何运用红外高透射比着色颜料,通过控制涂层厚度,降低红外高反射填料用量,缩小与同色不同辐射率涂层的色差。

3) 根据武器装备不同的形体大小来开展红外隐身涂层的图案分布进行优化设计。如被涂目标形体大,则应考虑设计为大迷彩图案和小红外斑块;如被涂目标形体小,则应考虑设计为小迷彩图案和大红外斑块,这2种不同设计形式都能实现可见光和红外热图像的分离,对降低目标的发现概率具有显著的意义。

[参考文献]

- [1] 於定华,叶熙源,余大斌,等. ITO作填料的涂层光谱特性研究[J]. 功能材料,1993,30(6):660-662
- [2] 费逸伟,黄云杰,唐卫红,等. 颜料对低发射率涂料红外辐射特性的影响[J]. 材料科学与工程,2002,20(3):449-452
- [3] 中化化工标准化研究所等. 化学工业标准汇编涂料与颜料(下)[M]. 北京:中国标准出版社,2001.499-589
- [4] 郦江涛,姜卫陵,赵云峰,等. 红外隐身涂料的研究进展[J]. 导弹与航天运载技术,2002,(5):69-73
- [5] 罗志勇. 红外涂层发射率的理论研究[J]. 红外技术,2000,22(5):23-27