

冷喷涂过程气固两相流数值模拟研究

Computational Simulation for Gas Solid Two Phase Flow in Cold Spray Process

黄国胜, 王洪仁, 李相波

海洋腐蚀与防护国防科技重点实验室, 青岛, 266071

中船重工七二五所青岛分部, 青岛, 266071

摘要: 本文针对冷喷涂实际工况体系, 利用流体力学计算软件 STAR-CCM⁺, 模拟了冷喷涂过程中气固两相流的流动形态和特性。研究表明: 颗粒的出口速度受到载气入口压力、温度的影响, 压力越大、温度越高, 铝粉的出口速度越大; 颗粒的直径也是影响速度的主要因素, 其中, 颗粒的直径越大, 则速度越低, 直径越小, 速度越高, 但是颗粒直径小于 1 μm 时, 由于受板前激波影响, 颗粒的速度将会下降, 甚至出现漂流现象; Laval 喷嘴在固定了膨胀比时, 对于大颗粒的加速, 必须使超音速部分足够长, 才能使颗粒充分加速。

关键词: 涂层, 冷喷涂, 气固两相流, STAR-CCM

Abstract: STAR-CCM⁺ was used to simulate the gas solid two phase flow of cold spraying process in this article. The results indicate that: the particle velocity is influenced by the inlet gas temperature, inlet gas pressure and particle diameter. The particle velocity increased with the gas temperature and the pressure, while decreased with the particle diameter. The length of diverged part is the key fact that determined the exit velocity for large particles, the longer, the higher exit velocity. But there exist heat loss and friction for actual system, so the maxim length must be controlled to the proper value. The distance between the nozzle exit and the substrate must controlled between 15mm to 25mm for the shock waves. Helium can be adopted to achieve higher exit velocity. There also exist a critical diameter for particles to deposit.

Key words: coatings, cold spray, gas solid two phase flow, STAR-CCM

1 简介

冷喷涂 (Cold Spray, 也被称作冷气动力喷涂) 是一种相对新颖的涂层制备和部件快速成型技术, 其原理是利用气体 (常用的有空气或氦气) 将金属粉 (粒径在 1~50 μm 间) 加速到 300~1200m/s, 金属粉由于高速撞击导致的塑性变形而黏附在基体表面导致沉积。冷喷涂最大的优点在于工艺温度相对较低 (一般在常温到 600 $^{\circ}\text{C}$), 形成涂层的过程基本不发生氧化、相变、晶粒变大和热残余应力等现象, 在制备长效腐蚀防护涂层方面具有相当的优势^[1]。各种金属粉体发生沉积时, 其撞击速度都必须大于一定值, 即所谓的临界速度, 高于临界速度, 粉体才会发生有效的沉积, 形成涂层^[2]。

冷喷涂可以看成热喷涂技术得进一步发展，其与热喷涂技术得区别在于动能得进一步提升，温度进一步降低。也正是由于这一特性，使得颗粒的速度成为冷喷涂过程中最受关注的参数，因为颗粒的速度直接决定能否沉积，以及沉积涂层的结合力和孔隙率等性能。由于颗粒的直径无法控制在较小的范围，所以采用试验手段无法准确测量单一颗粒的速度，对于工艺过程的控制和优化，通常都依靠数值模拟手段实现。李文亚、王晓放和毕金城等人利用软件对冷喷涂过程进行了大量的研究，获得了一定的成果，但是都对研究对象进行了简化，针对的都是平面二维简化模型^[3]。本文利用 Star-ccm+ 软件，选取金属管作为研究对象，直接对其进行建模研究，研究冷喷涂过程中气体的流动形态及金属颗粒的加速特性。

2 试验方法

以空气/氮气或氦气作为载气，在工艺温度范围内，空气被认为是理想可压缩气体，其出口马赫数可通过一维等熵流方程求得，假设喷嘴内壁光滑绝热无位移。选取的计算域如图 1 所示。边界层网格的划分如下：按 1.1 倍递增，共 5 格，边界层总厚度 0.5mm，仅对 laval 管部分划分边界层。面网格的划分，对喷嘴渐放部分，Customize Surface Size = 0.1 mm(Relative Minimum Size) —— 0.5 mm(Relative Target Size)。喷嘴出口进行局部加密，范围为 1cm 区域。网格划分情况如图 2 所示，采用 Star-ccm+特有的多面体网格技术，总网格数约 20 万。

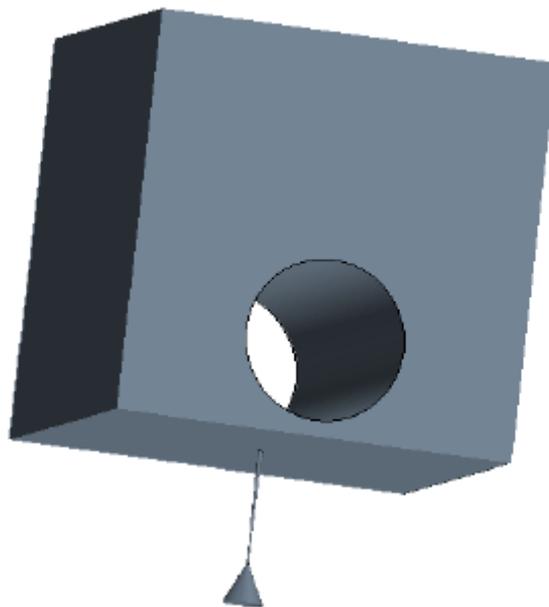


图.1 计算域结构示意图

气体的湍流模型采用标准 k- ϵ 湍流模型，采用 Rhie 和 Chow 提出的一阶迎风格式对控制方程中的对流项进行离散，压力项用标准格式离散，其他各项均采用一阶迎风格式离散。采用耦合求解器和 SIMPLE 算法求解方程压力和速度场的耦合。各残差收敛参数分别为 X 方向的速度为 0.001，连续性方程 0.001，能量 10^{-6} ，k 为 0.001^[5]。计算过程如下，设置入口为 stagnant inlet，出口为 pressure outlet，计算分几次进行，第一段为 0~1000 步，入口总压为 100000 Pa；第二段为 1000~4000 步，入口总压增大为 500000 Pa；第三段为 4000~8000 步，入口总压增大为 1000000 Pa；第四段为 8000~20000 步，入口总压增大到最终需要的压力。

铝颗粒被认为是球形的，稀相（体积比小于 10%），其运动轨迹方程可在求解流体场的基础上利用拉格朗日轨迹方程求得，其方程的具体形式分别如式（1）和（2）^[4]。

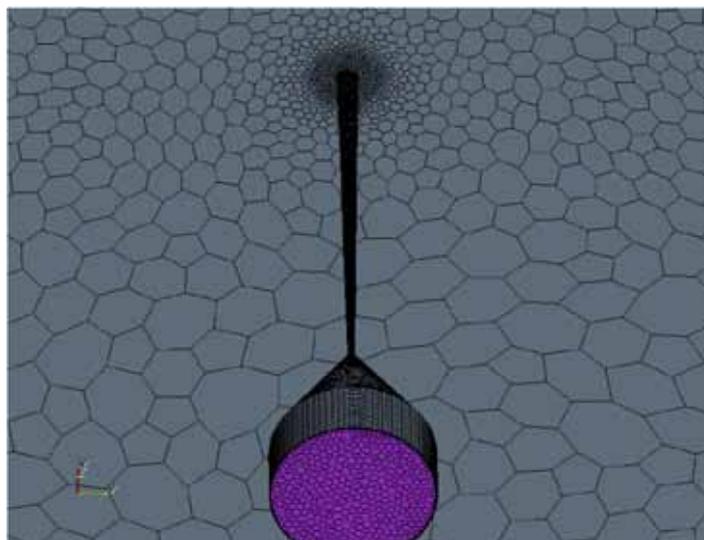


图.2 计算域网格划分情况

$$\frac{du_p}{dt} = F_D(u - u_p) + g_x \left(\frac{r_p - r}{r_p} \right) + F_x \quad (1)$$

$$F_D = \frac{18\mu C_D \text{Re}}{r_p d_p^2} \quad (2)$$

表示分子自由程， D_p 为粉体颗粒直径， F_D 为曳力系数， C_D 代表斯托克斯系数的修正，和雷诺数及流速有关， μ 代表气体密度， ρ_p 代表颗粒密度。通过改变入口温度、压力、工装情况和喷嘴的结构，求解颗粒在流场中的运动特性。

3 结果与讨论

计算过程的典型残差如图 3 所示，从残差判断，收敛较好。其中每次增大入口总压都会产生一次残差的急剧波动。而且仔细观察还可以发现，每次调整 Courant Number 以及湍流方程的松弛因子也都会产生残差的波动。

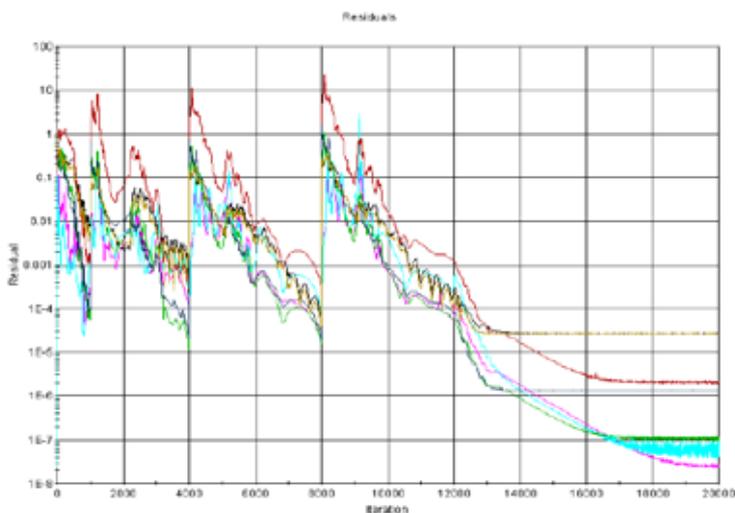


图.3 计算过程残差监测图

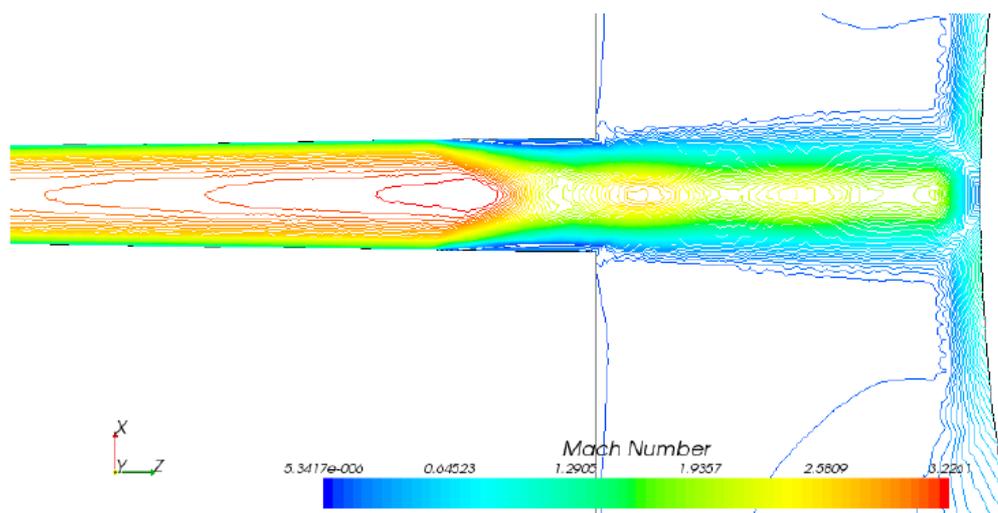


图.4 流场内的马赫数分布情况

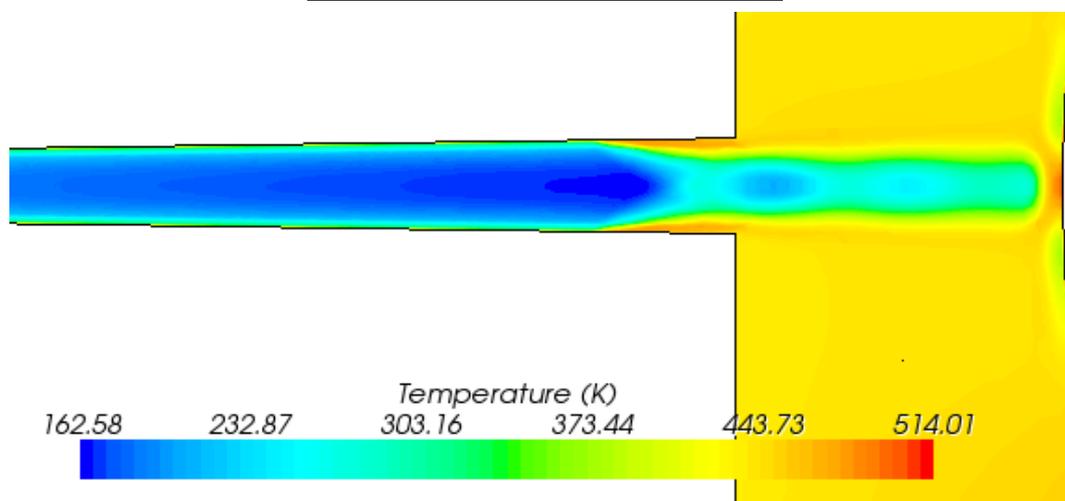


图.5 流场内的温度场分布情况

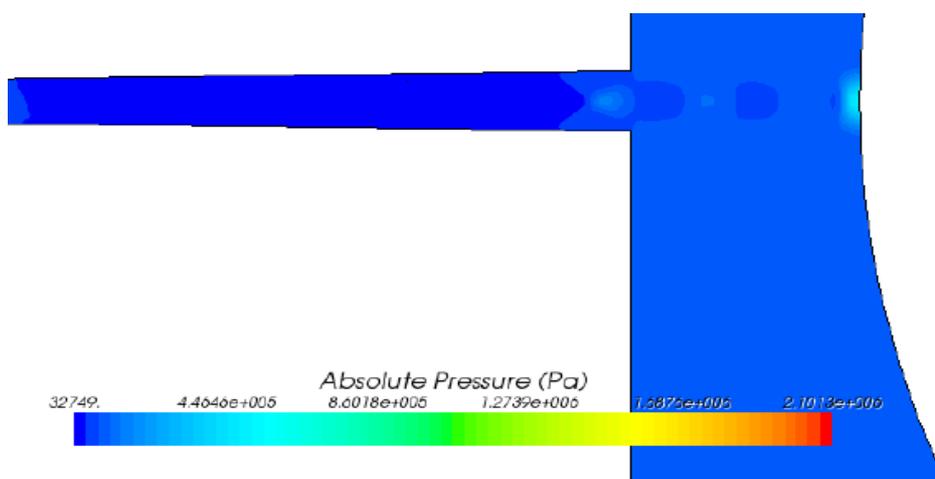


图.6 流场内的压力场分布情况

图 4 - 6 为冷喷涂在典型的工艺条件下流场的流动形态。查气动函数表并根据流场的流动形态，可以看出，气流在扩张段加速直到出口的 $Ma > 1$ ，气流在喷管内没有得到完全膨胀，即 $P / P_e > P^* / P_b^*$ ，因此超声速气流在喷管出口产生膨胀波束。在这个压强比范围内，反压的变化不会影响喷管内的流动，因为外界的扰动是以声速传播的，而喷管出口为超声速流动。其流动通常称为欠膨胀流动状态。

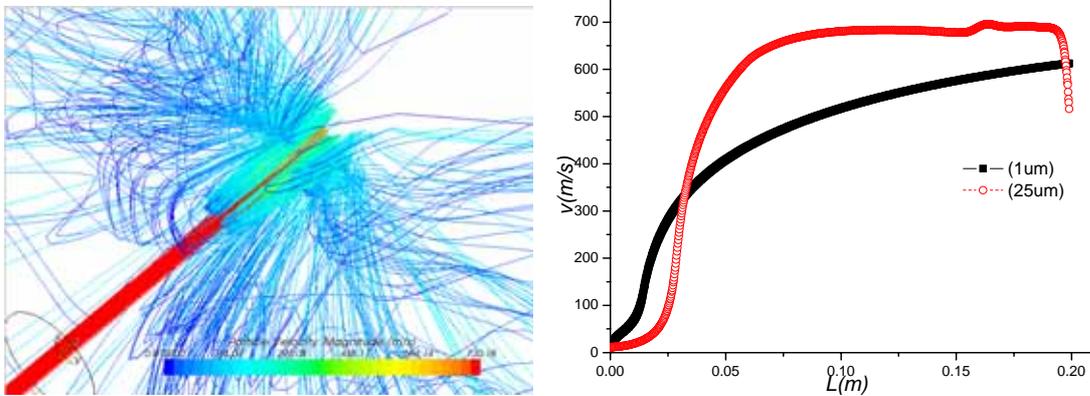


图.7 不同颗粒的加速行为

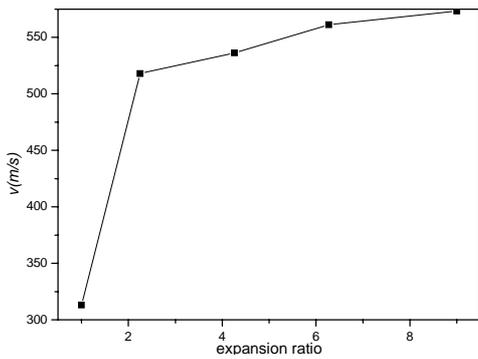


图.8 喷嘴膨胀比对出口速度的影响

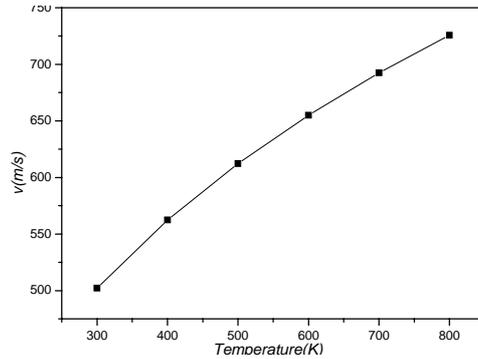


图.9 载气入口温度对颗粒速度的影响

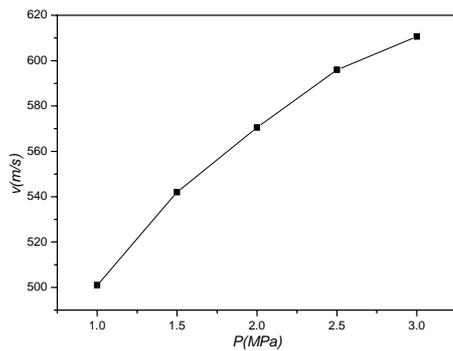


图.10 入口压力对速度的影响

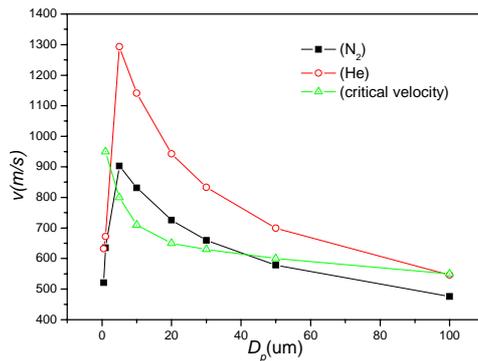


图.11 不同载气时颗粒加速特性

软件是根据流场的速度分布，最后计算颗粒的加速行为的，图 7 为种颗粒在气流场中的加速行为，可以看出，微小颗粒 ($<1\mu m$) 在达到工件前，会由于气流的作用而减速，而 $25\mu m$ 的颗粒则不会出现这种情况。图 8 - 10 则是各种工艺参数对颗粒速度的影响，其中温度越高，压力越大，则出口的颗粒速度也越大，当喷嘴的膨胀比大于 1 时，膨胀比对颗粒的加速行为影响并不是非常明显，这是由于膨胀比大时，渐放段的气流密度相应要小，虽然速度高，但是对颗粒的拽力较小，使得颗粒

的速度并不能随着膨胀比的增加而相应的大幅度增加。图 11 可以看出，颗粒直径小于一定值时^[6]，能加速到的速度小于临界速度，无法沉积，而当大于一定值时，颗粒也难达到临界速度，则必须采用氦气，而利用空气时，则必须重新设计喷嘴结构，使喷嘴的超音速部分足够长，实现颗粒最大效率的加速，但是由于实际体系中，存在摩擦和热交换，所以也不一定越长越好。同时也可以看出，采用相同的喷嘴和工艺参数，铝颗粒的直径必须控制在一定的范围以内，通常与采用的工作气体有关，采用氮气基本上需在 5 μm 以上，而采用氦气则可以达到更小，但是这都是在没有考虑粒子尺寸的降低会改变力学性能这一因素，同样颗粒能发生有效沉积的直径也存在一定的上限。

4 结论

利用 STAR-CCM* 的多面体网格技术，可以较为快捷的离散物理计算域，并获得质量较高的网格。同时，计算结果也可以较为准确的接近实际物理体系。因此，STAR-CCM* 可以用于模拟冷喷涂过程中的气固两相流。

由以上计算结果也可以看出，颗粒的出口速度受到载气入口压力、温度的影响，压力越大、温度越高，铝粉的出口速度越大；颗粒的直径也是影响速度的主要因素，其中，颗粒的直径越大，则速度越低，直径越小，速度越高，但是颗粒直径小于 1 μm 时，由于受板前激波影响，颗粒的速度将会下降，甚至出现漂流现象；Laval 喷嘴在固定了膨胀比时，对于大颗粒的加速，必须使超音速部分足够长，才能使颗粒充分加速。

5 参考文献

1. R.C. Dykhuizen, M.F. Smith, D.L. Gilmore, R.A. Neiser, X.Jiang, and S. Sampath, Impact of High Velocity Cold Spray Particles, J. Therm. Spray Technol., Vol 8 (No. 4), Dec 1999, p 559-564
2. R.C. McCune, A.N. Papyrin, J.N. Hall, W.L. Riggs, and P.H.Zajchowski, An Exploration of the Cold Gas-Dynamic Spray Method for Several Materials Systems, Advances in Thermal Spray Technology.1995, p 1-6
3. A.P. Alkimov, V.F. Kosarev, and A.N. Papyrin, A Method of Cold Gas-Dynamic Deposition, Sov. Phys. Dokl., Vol 35(No. 12), 1990, p 1047-1049 (transl. American Institute of Physics, 1991)
4. A.P. Alkimov, A.N. Papyrin, V.F. Kosarev, N.I. Nesterovich, and M.M. Shushpanov, "Gas Dynamic Spraying Method for Applying a Coating," U.S. Patent No. 5,302,414, 12 Apr 1994, Re-examination Certificate, 25 Feb 1997
5. Tien-Chien Jen, Longjian Li, Wenzhi Cui, Numerical investigations on cold gas dynamic spray process with nano- and microsize particles, International Journal of Heat and Mass Transfer 48 (2005), P4384-4396.

作者：黄国胜，工程师，腐蚀与防护专业，表面金属涂层方向，email：huanggs@sunrui.net.

致谢：感谢 CDAJ 公司提供的试用软件及允许论文发表，同时感谢崔亮工程师对本文所作的工作。