

doi: 10.3969/j.issn.1007-9289.2013.01.013

喷嘴出口直径对冷喷涂射流流场及基板最佳位置影响的数值分析*

殷 硕¹, 王晓放¹, 李文亚²

(1. 大连理工大学 能源与动力学院, 大连 116024; 2. 西北工业大学 材料学院 摩擦焊接陕西省重点实验室, 西安 710072)

摘 要: 冷喷涂过程中, 喷嘴出口后射流流场的波系结构对粒子冲击基板时的速度有很大影响。利用 CFD 软件 Fluent 对不同出口直径的喷嘴后单相自由射流和两相冲击射流流场进行了模拟计算。结果表明, 喷嘴出口直径对冷喷涂射流流场及粒子冲击速度会产生一定的影响; 在喷嘴出口与基板之间存在一个最佳距离使得粒子能够获得较大的冲击速度, 该最佳距离会随喷嘴出口直径的增加而线性增加。

关键词: 冷喷涂; 自由射流; 冲击射流; 数值模拟; 最佳距离

中图分类号: TG174.442; O241 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-9289(2013)01-0074-05

Numerical Investigations on the Effect of Nozzle Outlet Diameter on Jet Flow Field and Optimal Standoff Distance in Cold Spraying

YIN Shuo¹, WANG Xiao-fang¹, LI Wen-ya²

(1. School of Energy and Power Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024; 2. Shanxi Key Laboratory of Friction Welding Technologies, School of Materials Science and Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072)

Abstract: The structure of the flow field outside the nozzle significantly affects the particles' impinging velocity in cold spraying. In this study, the numerical method is used to investigate the single-phase free jet flow and the two-phase impinging jet flow outside the nozzle by using a CFD software fluent. The results show that the diameter of the nozzle outlet has an important effect on the gas flow field and particle impinging velocity. Moreover, there exists an optimal standoff distance between the nozzle outlet and the substrate, which can ensure the sprayed particle to attain the maximum impinging velocity. The optimal standoff distance linearly increases with increasing nozzle outlet diameter.

Key words: cold spraying; free jet; impinging jet; numerical simulation; optimal standoff distance

0 引 言

冷喷涂是依据空气动力学原理开发的一种新型材料表面改性技术^[1]。喷涂粒子被超音速气流加速到较高速度(300~1 200m/s), 在远低于喷涂材料熔点的情况下(<600 °C)撞击基体, 从而发生强烈的塑性变形而形成涂层。与传统

热喷涂过程相比, 冷喷涂可以有效地避免喷涂粒子的氧化作用, 使制备纯净无氧化的金属合金涂层成为可能。由于其在工业生产中具有广泛的应用前景和实用价值, 使得国、内外众多学者投入巨大精力对其进行深入研究。目前, 其研究方向多集中于对冷喷涂涂层形成机理及粒子加速

收稿日期: 2012-09-26; **修回日期:** 2013-01-13; **基金项目:** * 国家自然科学基金(50476075)

作者简介: 殷硕(1984-), 男(汉), 辽宁沈阳人, 博士后; **研究方向:** 冷喷涂粉末粒子沉积

网络出版日期: 2013-01-21 10:51; **网络出版地址:** <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.3905.TG.20130121.1051.005.html>

引文格式: 殷硕, 王晓放, 李文亚. 喷嘴出口直径对冷喷涂射流流场及基板最佳位置影响的数值分析 [J]. 中国表面工程, 2013, 26(1): 74-78.

行为的数值分析、涂层性能分析以及喷嘴出口内外超音速流场流动特性等方面。数值模拟方法在其中起到关键作用,在粒子沉积机理分析领域,李文亚等^[2-3]采用有限元分析法系统的研究了冷喷涂粒子与基体碰撞后的变形行为及沉积机理。在流场分析领域,李文亚等^[4]还曾利用 CFD 软件 Fluent 对喷嘴内部流场和外部流场进行了数值模拟分析,初步探讨了优化喷嘴设计的方法;Tien-Chien Jen^[5]等详细地分析了冲击射流流场内弓形激波对载气及粒子加速过程的影响。Samareh B^[6]等针对基体形状对冷喷涂射流流场的影响进行了三维数值分析。除此之外,关于喷涂参数及喷嘴结构参数对流场流动特性及粒子加速行为的影响研究也是目前的关注重点,相关研究结果为更加深入研究冷喷涂载气及粒子加速过程提供了重要的参考。在之前研究工作的基础上,文中将重点研究喷嘴出口的外部流场计算,采用 CFD 软件 Fluent,针对不同出口直径的喷嘴外部流场单相自由射流和两相冲击射流进行了模拟计算,研究喷嘴直径对冷喷涂射流流场及最佳距离的影响。

1 计算模型

1.1 计算区域及边界条件

图 1 所示为自由射流及冲击射流计算区域及边界条件示意图,喷嘴直径分别采用 2、4、6、8 和 10 mm 的圆形喷嘴,喷嘴壁长度为 4 mm,计算区域的尺寸基于不影响最终模拟结果的原则来选取,由于喷嘴直径不同,因此计算域的尺寸随直径的增加而逐渐增大,因圆形喷嘴后射流流场具有轴对称性,故计算区域采用了二维轴对称模型以减少计算时间。为了系统的比较喷嘴出口直径对外流场的影响,喷嘴出口均采用相同的参数,并将喷嘴出口参数作为外流场的入口参数,采用压力入口条件,选用理想可压缩空气作为喷涂载气,外流场为 0.101 MPa 的标准大气压,考虑载气在喷嘴出口处为欠膨胀状态,出口压力设定为 0.252 MPa,出口总温度 482 K,由于冷喷涂所选用喷嘴为缩放喷嘴,因此喷嘴出口处的载气速度可以达到超音速,出口速度设定为 617 m/s,大气自由边界采用无反射边界条件,固相颗粒采用铜粒子,理论上不同直径粒子在喷嘴出口处应该具有不同的速度,且速度应小于载气速度,但

为了系统的分析不同直径粒子在喷嘴外的加速行为,初步假定不同直径粒子具有相同的速度,并假设粒子速度与载气速度相同。网格采用四边形结构平面网格,近喷嘴及轴线处采用加密网格以更好的捕捉激波及轴线附近参数变化,网格数量依据不同的模型尺寸介于 30 400~92 100 个之间。在有基板存在的情况下,被喷涂基板采用无滑移固壁条件,基板放置于喷嘴出口外 20 mm 处,其他设定与自由射流一致。

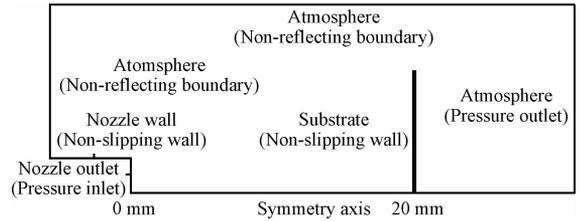


图 1 自由射流及冲击射流计算区域及边界条件示意图
Fig. 1 Schematic diagram of the computational domain

1.2 数值方法

鉴于 S-A 湍流模型常用于大梯度、近壁的气体流动的数值模拟,文中对气相的计算采用了 S-A 湍流模型,湍流运动粘性系数满足输运方程,详细描述参见文献^[7],采用二阶精度的有限体积法对控制方程进行计算。固相计算采用离散相模型(DPM),不考虑固相对气体相的影响。

2 计算结果及讨论

2.1 冷喷涂自由射流数值模拟分析

图 2 所示为不同出口直径喷嘴后自由射流的压力等势图。从图中可明显观察到,不同直径喷嘴后自由射流流场均出现了膨胀波与压缩波(斜激波)交替变化的复杂波系,并且波系的能量随射流范围的扩大而逐渐衰减。对于出口直径为 2 mm 的喷嘴,气流所具有的能量最小,因此,射流范围最小;随着出口直径的增大,气流所具有的能量也随之增大,射流范围也相应扩大,当喷嘴直径增加到 10 mm 时,轴向位置 80 mm 处依然有明显的膨胀波出现。

图 3 为不同出口直径喷嘴后自由射流沿 X 轴的速度变化曲线。从图中可以看出,气流经不同出口直径的喷嘴加速后,沿 X 轴的速度均呈现出较为明显的波动状态,且这种波动的振幅随着轴向距离的增加而不断减弱。当喷嘴直径为 2 mm

时,波动周期最短,在轴向距离达到 30 mm 时已经经历了 4 次加速和减速过程。随着喷嘴出口直径的增加,速度波动的周期逐渐延长,当喷嘴直径达到 10 mm 时,在 70 mm 时仅经历了两次加速和减速过程。值得注意的是,五种喷嘴后射流的最大速度均处在 840 m/s 附近,且位置随直径的增大而向后移动,而最小速度则有较大差异,在相同的速度波动周期内,小直径喷嘴后的气体的最小速度明显小于大直径喷嘴。

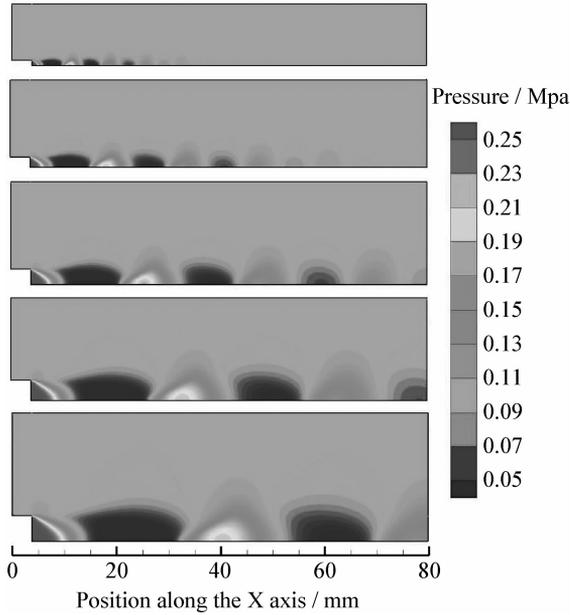


图 2 不同出口直径喷嘴后自由射流压强等势图

Fig. 2 Pressure contours of free jet outside the nozzle

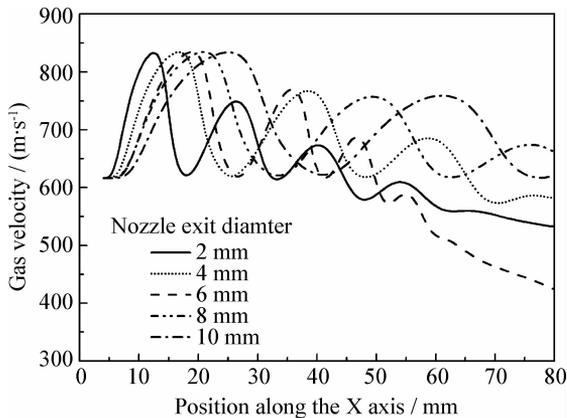


图 3 不同出口直径喷嘴后自由射流沿 X 轴向速度的变化

Fig. 3 Change of gas velocities with X-axial location

2.2 冷喷涂冲击射流数值模拟分析

在冷喷涂中,基板的存在通常对射流流场产生很大的影响。因此,对冲击射流的模拟可以更

准确的反映出冷喷涂过程中真实的流场分布情况。图 4 所示为基板距离喷嘴出口 20 mm 时,不同出口直径冲击射流的压力等势图,从图中可以观察到,基板前产生了明显的弓形激波,对于出口直径为 2 mm 的喷嘴,由于波系交替变化的周期较短,流场由多组膨胀波与压缩波组成,随着出口直径的增加,波系交替变化的周期也逐渐变长,当增加至 10 mm 时,波系仅由一组膨胀波与弓形激波组成。除此之外,5 种流场并无其他明显规律可循。

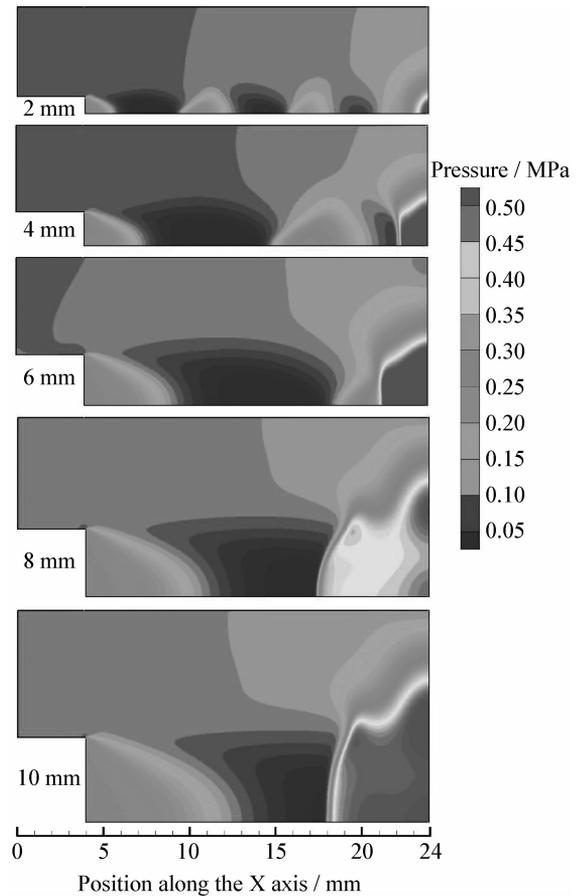


图 4 基板距离喷嘴出口 20 mm 时,不同出口直径喷嘴后冲击射流压强等势图

Fig. 4 Pressure contours of impinging jet at different outlet diameters with the substrate at a standoff distance of 20 mm

单纯对气体流场的分析并不能全面的反应冷喷涂的喷涂过程,决定喷涂效果的最重要的因素是粒子入射基板时的速度,因此,对粒子冲击速度的计算是十分必要的。图 5 给出了当基板位于喷嘴出口后 20 mm 处时,采用不同出口直径获得的直径 10 μm 的铜粒子对基板的冲击速度,

从中不难发现,粒子的冲击速度随着出口直径的增加呈现出不规则的变化,其最大值出现在出口直径为 2 mm 时,最小值出现在出口直径为 8 mm 时。冲击射流的流场结构与粒子的冲击速度的这种不规律变化,一方面说明了喷嘴直径对流场及粒子冲击速度确实有很大影响,同时也暗示了基板放置的位置也会对射流过程产生一定的影响。图 6 给出了当喷嘴出口直径为 4 mm 时,基板与喷嘴出口间距离对不同直径的铜粒子冲击速度的影响。

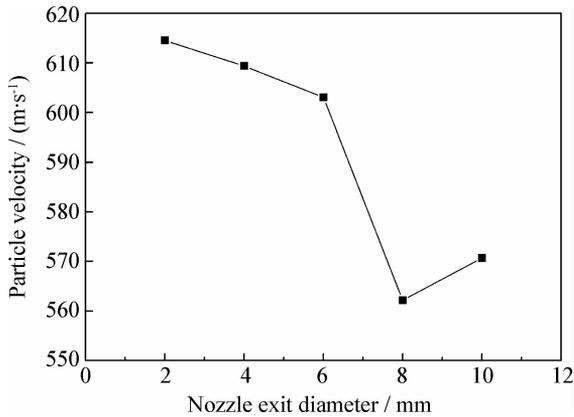


图 5 基板距离喷嘴出口 20 mm 时,10 μm 铜粒子的冲击速度随喷嘴出口直径的变化曲线

Fig. 5 Change of the impinging velocity of Cu particle in a diameter of 10 μm for the outlet diameter at the standoff distance of 20 mm particle

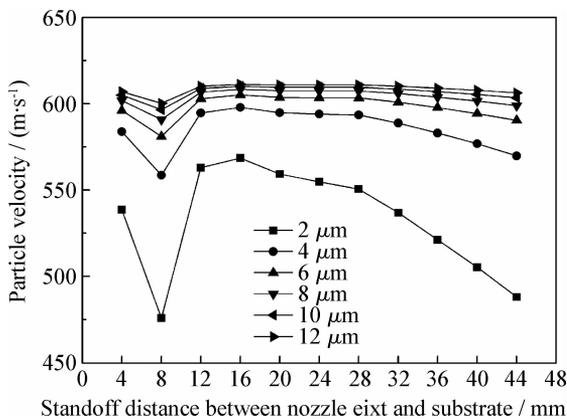


图 6 喷涂距离对不同直径铜粒子冲击速度的影响

Fig. 6 Effect of standoff distance on the particle impinging velocity by using copper particles with different diameters

从图中可明显观察到,当基板与喷嘴之间距离达到 8 mm 时,粒子的冲击速度最小,当距离增加至 16 mm 时,粒子的冲击速度均达到了最大

值,此后粒子的速度随距离的增加而逐渐减小。这种变化说明了基板与喷嘴间的距离对粒子的冲击速度确实有很大影响,而当基板放置于恰当位置时,粒子的冲击速度可以达到最大,此时喷嘴与基板间的距离即为最佳距离。Pattison 等也通过试验方法证实最佳距离的存在^[8]。

2.3 喷嘴出口直径对基板放置最佳距离的影响

在之前的研究中,自由射流第一周期速度最低点为基板放置的最佳位置,在此放置基板可以确保粒子获得最大的加速性能^[9],依据该判断准则,研究不同出口直径所对应的最佳距离。图 7 为通过数值模拟结果获得文中给定条件下最佳距离随喷嘴出口直径的变化曲线。由图可见,基板与喷嘴出口之间的最佳距离随着喷嘴出口直径的增大而增大,并且变化趋势呈现出线性。这是由于当喷嘴出口直径增加时,气流所具有的能量也随之增加,波系的变化周期变长,因此基板最佳距离也随之增大。该曲线的绘制有助于实际喷涂过程中对基板放置位置的选择,为冷喷涂实验研究和工程上的应用提供便利。

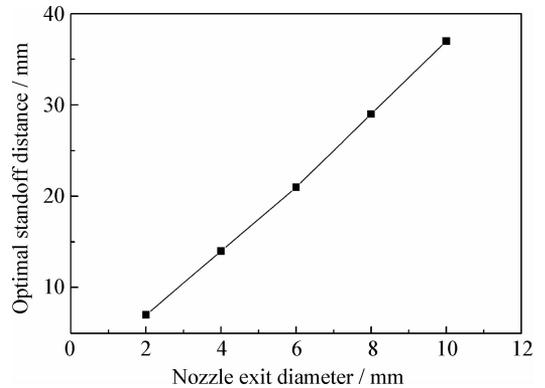


图 7 喷嘴与基板间最佳距离随喷嘴出口直径的变化曲线

Fig. 7 Change of optimal distance between the nozzle out and the substrate for different outlet diameters

为了进一步证实该曲线的准确性,图 8 给出了不同出口直径对应基板最佳距离时的冲击射流压强等势图。图中五种喷嘴后的射流流场结构基本一致,流场由两组膨胀波及一组压缩波组成,这种波结构可以使粒子得到充分的加速。图 9 所示为不同出口直径对应的基板放置最佳位置与对应 20 mm 距离时粒子冲击速度比较图。图中最佳距离对应的粒子速度均大于 20 mm 距离对应的粒子速度,该结果进一步证明了最佳距离判断准则的正确性。

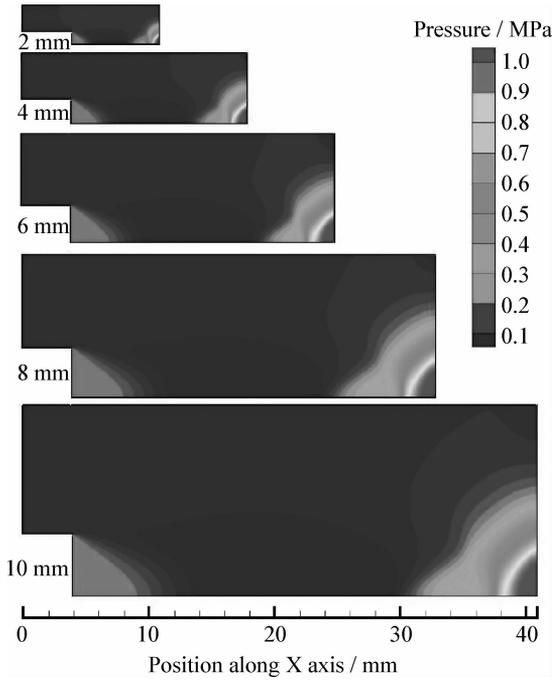


图8 不同出口直径对应基板最佳距离时的冲击射流压力等势图

Fig. 8 Pressure contours of impinging jet at optimal standoff distance with different outlet diameters

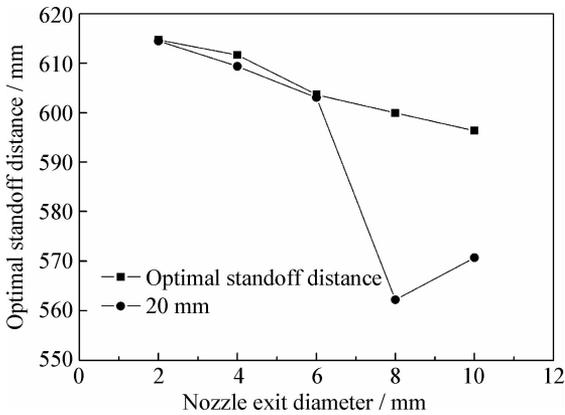


图9 不同出口直径对应基板最佳距离与对应 20 mm 距离时粒子冲击速度比较

Fig. 9 Comparison of the particle impinging velocity with the optimal standoff distance and the standoff distance of 20mm at different outlet diameters

3 结论

(1) 喷嘴出口直径对自由射流的流场分布会

产生一定的影响,小直径喷嘴后流场膨胀波与压缩波交替变化的周期及 X 轴向速度波动周期短,射流范围小;大直径喷嘴后流场膨胀波与压缩波交替变化的周期及 X 轴向速度波动周期长,射流范围大。

(2) 喷嘴出口与基板之间存在最佳距离,可以确保粒子获得最大的加速性能,该最佳距离会随喷嘴出口直径的增加呈线性增长。

参考文献

- [1] Alkimov A P, Kosarev V F, Papyrin A N. A method of cold gas dynamic deposition [J]. Dokl Akad Nauk SSSR, 1990, 315(5): 1062-5.
- [2] 李文亚. 冷喷涂粒子碰撞行为三维有限元热力耦合分析 [J]. 中国表面工程, 2009, 22(3): 31-37.
- [3] 王非凡, 李文亚, 余敏. 基于稳定最大应变的冷喷涂粒子临界速度预测 [J]. 中国表面工程, 2012, 25(6): 96-100.
- [4] Li W Y, Liao H L, Wang H T, et al. Optimal design of a convergent-barrel cold spray nozzle by numerical method [J]. Applied Surface Science, 2006, 253(2): 708-713.
- [5] Jen T C, Li L J, Cui W Z, et al. Numerical investigations on cold gas dynamic spray process with nano- and microsize particles [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2005, 48(21/22): 4384-96.
- [6] Samareh B, Dolatabadi A. A three-dimensional analysis of the cold spray process: The effects of substrate location and shape [J]. Journal of Thermal Spray Technology, 2007, 16 (5/6): 634-642.
- [7] Kashitani M, Miyazato Y, Masuda M, et al. Numerical and experimental investigations of supersonic jets from soot blower nozzle [J]. JSME International Journal Series B, 1998, 41(2): 375-380.
- [8] Pattison J, Celotto S, Khan A, et al. Standoff distance and bow shock phenomena in the cold spray process [J]. Surface and Coatings Technology, 2008, 202(8): 1443-54.
- [9] Wang X F, Yin S, Xu B P. Effect of cold spray particle conditions and optimal standoff distance on impact velocity [J]. Journal of Dalian University of Technology, 2011, 51 (4): 498-504.

作者地址: 辽宁省大连市高新园区凌工路 2 号 116024
大连理工大学能源与动力学院 317A 室

Tel: (0411) 8470 7905

E-mail: yinshuo0511@yahoo. cn