

喷嘴出口截面形状对冷喷涂涂层性能影响的数值分析

王晓放¹, 李芳¹, 赵爱娃¹, 吴杰²

(1. 大连理工大学热能与动力工程学院, 辽宁大连 116024; 2. 中国科学院金属研究所, 辽宁沈阳 110016)

摘要: 制备冷喷涂涂层的沉积速度、有效喷涂面积及均匀程度与喷嘴出口截面形状有重要关联。通过对冷喷涂射流流场的数值模拟, 比对了不同喷嘴截面形状的流场特点。结果表明: 矩形喷嘴截面形状有利于大面积均匀涂层生成, 相同条件下, 所制备涂层的性能优于圆型喷嘴, 这与相关试验结果吻合较好。

关键词: 冷喷涂; 喷嘴截面; 数值模拟

中图分类号: TB43; O241

文献标识码: A

文章编号: 1000-3738(2006)12-0084-03

Computational Simulation of the Effect of Nozzle Export Section Shape on Cold Spraying Technology for Material Modification

WANG Xiao-fang¹, LI Fang¹, ZHAO Ai-wa¹, WU Jie²

(1. Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;

2. Institute of Metal Research, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China)

Abstract: The speed of coating growth, the area of effective spraying and the evenness of spraying had important relationship with nozzle export section shape. By the numerical simulation of jet-flow field, comparison of the important feature of different nozzle export section shapes, indicates that nozzle export section with rectangle shape is good for the even coating of big area spraying, and better than that with circle shape. This conclusion coincides well with relative result in laboratory.

Key words: cold spraying; nozzle export section; numerical simulation

0 引言

在工件表面喷涂功能涂层可使其具有耐磨损、耐腐蚀和耐高温等特殊性能, 目前喷涂技术已广泛应用于各种工业领域。“冷喷涂”技术是指在常温(或较低温度)下由超音速气流夹带微小颗粒(1~50 μm)形成高速射流(300~1 200 m/s), 冲击金属或绝缘基体产生涂层的过程^[1]。其中喷嘴是冷喷涂技术中使粉粒获得超音速动能并实现高能量利用率的关键部件之一, 而涂层的质量主要取决于不同截面形状的喷嘴出口冲击射流速度、形成有效喷涂区域等因素^[2,3]。

有关试验已经证实^[4], 如果喷嘴流道型线和出口截面几何形状不合理, 不但形成高速气流的区域减小, 且粒子撞击基板的角度偏斜, 引起涂层质量恶

化^[5]。因此研究喷嘴结构与射流流场性能之间的关系对于提高冷喷涂的涂层质量非常重要。在比较了几种特殊喷嘴截面的基础上, 作者以有工程应用价值的圆形喷嘴和矩形喷嘴为对象, 进行了数值计算分析, 研究在相同气动条件下, 喷嘴出口截面形状对射流流场以及有效涂层面积的影响。

1 计算理论模型

1.1 圆形截面喷嘴

计算分析时选取圆形喷嘴出口的气动条件为计算域的入口条件, 由于圆形喷嘴对应的射流流场具有轴对称性, 采用二维计算, 只考虑上半区域(下边界为对称边界), 计算域大小为 60 mm×320 mm, 其中 Z 方向(轴向)为喷嘴出口的射流方向, XY 平面为喷嘴出口横截面, 见图 1。计算网格为正交网格, 网格数量 28×200。网格在近喷嘴出口处和轴线附近进行加密处理, 以便更准确地捕捉激波和射流轴线附近的参数变化。

收稿日期: 2005-12-09; 修订日期: 2006-02-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50476075)

作者简介: 王晓放(1960—), 女, 辽宁沈阳人, 教授, 硕士。

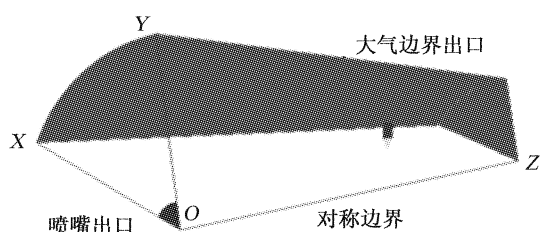


图1 计算区域示意

Fig. 1 Simulation model

取圆喷嘴出口直径 8 mm,出口处气动条件根据试验结果^[6]给定,气相与固相入口速度均为 $v=617$ m/s,为欠膨胀流动,气相压力为 3.0 MPa;自由边界与喷嘴出口背压为大气压,呈自由射流状态;夹带粉粒喷出喷嘴的气相工质为空气,固体颗粒相直径在 1~50 μm 之间选取。

经大型流体计算软件 Phoenix 数值模拟,得到距喷嘴出口截面轴向(Z向)40 mm处、径向(Y向)气流速度分布和 XY 平面气流速度等势线(因对称性,取 1 弧度约 57°),见图 2、图 3。可见圆形喷嘴形成流场的缺点:在径向方向,气流核心区宽度很小($-0.05 \sim 0.05$ m);当径向范围超过核心区宽度后,气流速度快速衰减,由此造成粉粒动能骤降,侵润能力不足。因此用圆形喷嘴进行喷涂时,喷涂的有效面积小于喷嘴的实际出口面积,若通过喷嘴与基板的相对移动来对基板进行喷涂,扫过的面积小,喷涂效率低,且涂层均匀度差。

为解决上述圆形喷嘴的不足,改进喷嘴出口几

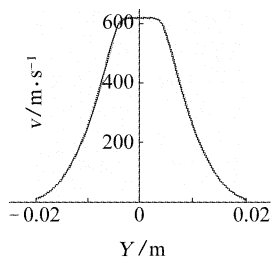


图2 圆喷嘴Y向气流速度分布

Fig. 2 Velocity distribution along the Y-axis

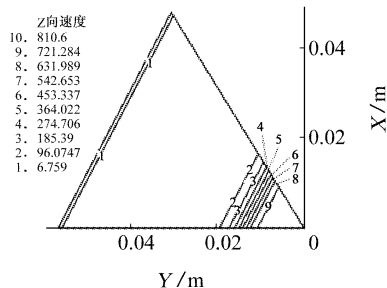


图3 圆喷嘴XY平面气流速度等势线

Fig. 3 Velocity contour on the XY plane

何形状十分必要,可采用轴对称环形喷嘴、多通道梅花形喷嘴和矩形喷嘴等结构。试验证明,喷嘴出口几何形状的改进,可不同程度地提高喷涂效果^[4,7]。但从喷嘴加工的难易程度上比较,选用了矩形截面喷嘴,并对其射流特性及优势进行模拟分析。

1.2 矩形截面喷嘴

采用矩形喷嘴替代圆形喷嘴,其目的是在保证喷涂沉积速度和均匀度的同时,提高有效喷涂面积。选取 2 mm×10 mm 的矩形喷嘴进行自由射流场模拟,三维计算模型见图 4。

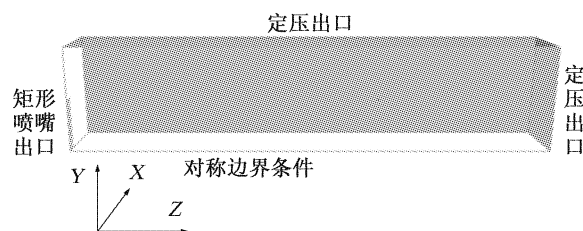


图4 计算模型

Fig. 4 Simulation model

根据轴对称性,取喷嘴的 1/4 面积进行流场数值分析,计算区域坐标系为正交坐标系,X、Y、Z 轴的含义同圆喷嘴。计算网格仍为正交网格,并在近喷嘴处进行加密。入口、出口边界条件及对称边界条件都与圆截面喷嘴分析相同。

由图 5、图 6 可见,矩形喷嘴流场参数分布特点与圆形喷嘴二维平面射流特点相同。虽然各自的喷嘴几何形状、等势线具有典型性,但圆形喷嘴中心速度分布为抛物线形(图 2),而矩形喷嘴中心速度分布为平台形,气流核心区宽度较大($-6.5 \sim 6.5$ mm),这将使得喷嘴横切面上产生更均匀的速度分布。

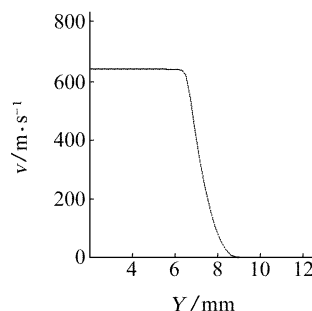


图5 矩形喷嘴中心线速度分布

Fig. 5 Velocity distribution along the central line of the nozzle

事实上,在平面(二维)射流包括从狭长缝隙中外射的射流,当狭缝足够长时,射流的流动特点是它只能在垂直狭缝的方向上产生扩散运动^[3]。长宽比足够大(>5)的矩形喷嘴可以视为狭长的狭缝,其纵向垂直断面(即模型中 XZ 平面方向)处流场可视

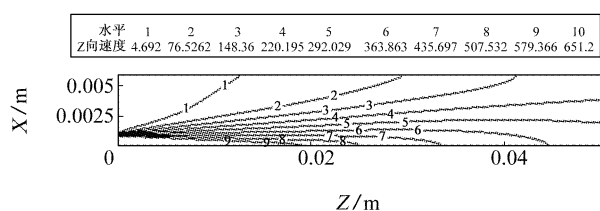


图6 矩形喷嘴射流流场 XZ 平面速度等势线

Fig.6 Velocity contour on XZ-plane of the rectangular nozzle jet flow

为二维射流^[7]。

由图 7 可见,由于喷嘴的长宽比较大,射流在宽度方向(Y 方向)的扩散运动较小,由此使得有效喷涂面积即 9-9 等势线围拢的流动核心区占主导地位,这就是矩形喷嘴的优点。

由图 8 的 XY 平面速度等势线可以更明显地观察到上述特点。

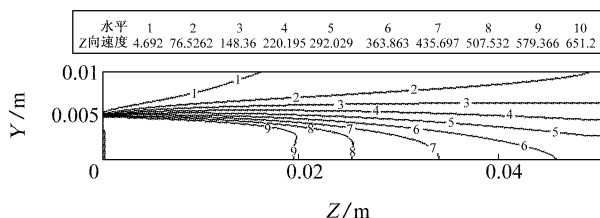


图7 矩形喷嘴射流 YZ 平面速度等势线

Fig.7 Velocity contour on YZ-plane of the rectangular nozzle jet flow

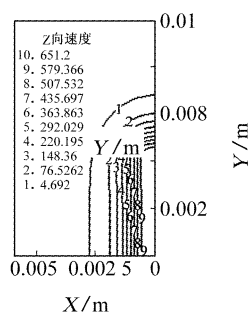


图8 XY 平面速度等势线

Fig.8 Velocity contour on XY-plane

2 试验验证

将以上计算结果与文献[4]的试验数据相比,规律一致,吻合很好。

另作者在中国科学院金属研究所采用矩形截面喷嘴用冷喷涂方法制备了冷却器铜管、钢管外表面钛涂层,涂层使用效果优良^[1](图略——编者)。

3 结 论

圆形喷嘴虽加工简便,但在喷嘴直径方向上速度分布为抛物线形,气流核心区域即高速气流区域小,且流场不均匀,使得有效喷涂面积小,涂层均匀程度较差。而矩形喷嘴在喷嘴长度(Y 向)方向速度分布为平台形,流场核心区域较大,在宽度方向速度的扩散很小,具有更大的有效喷涂面积和更均匀的涂层沉积,其流场特性优于圆形喷嘴,所制备涂层的性能更佳。

参考文献:

- [1] 王晓放,黄钟岳. 新型材料改性方法常温超音速冷喷涂制备功能涂层[J]. 机械工程材料,2002,26(5):30—35.
- [2] 赵爱娃,王晓放. 冷喷涂制备功能涂层工艺中的两相射流数值研究[J]. 大连理工大学学报,2006,46(2):190—193.
- [3] 易 灿,李根生. 喷嘴结构对高压射流特性影响研究[J]. 石油钻采工艺,2005,27(1):16—19.
- [4] Blose R E, Roemer T J. Automated cold spray system; Description of Equipment and Performance Data[A]. Thermal Spray 2003 (Ed)[C]. Material Park, USA: ASM International,2003.
- [5] 丁 丽,王晓放. 冷喷涂材料改性技术中粒子与基板结合过程的研究[J]. 机械工程材料,2004,28(10):26—28.
- [6] 王晓放,黄钟岳,王德真,等. 冷喷涂材料改性气粉射流流动计算与分析[J]. 大连理工大学学报,2000,40(5):562—565.
- [7] Yin Nen Jeng, Uon Jan Payne. An Adaptive TVD Limiter[J]. Journal of Computational Physics,1995,118:229—241.

(上接第 22 页)

- [8] 黄维刚. 等离子喷涂 $ZrO_2/2NiCoCrAlY$ 梯度热障涂层的抗热震性及失效机理[J]. 材料热处理学报,2001,22(4):21—23.
- [9] 郭洪波,宫声凯,徐惠彬. 梯度热障涂层的设计[J]. 航空学报,2002,23(5):467—472.
- [10] 孙国平,杨向明. 改善铸铝基体性能的热喷涂技术[J]. 铁道机车车辆工人,1997,(5):28—29.
- [11] Ynch C T. Hand book of materials science[J]. Boca Raton, FL: CRC Press,1997.

- [12] 斯温 M V. 陶瓷结构与性能,第 11 卷[M]. 郭景坤译. 北京: 科学出版社,1986.
- [13] 邓世均. 高性能陶瓷涂层[J]. 北京: 化学工业出版社,2004.
- [14] ZHENG Q X, ZHENG X L, WANG F H. On the expressions of fatigue life of ceramics with given survivability[J]. Engineering Fracture Mechanics,1996,53(1):49—55.
- [15] 吴炳乾. 稀土冶金学[J]. 长沙: 中南工业大学出版社,1997.