

高速电弧喷枪流场模拟研究

项建海, 索双富

(清华大学 精密仪器及机械学系, 北京 100084)

摘要: 电弧喷枪流场特性是影响电弧喷涂质量的关键因素之一。文中运用 CFD 软件 Fluent, 对高速电弧喷枪头部及枪外射流进行了模拟计算, 通过分析可以看出, 枪外射流可以分为射流核心区、射流卷吸区和射流湍流区。受欠膨胀激波反射和相交的影响, 枪外射流的速度分布具有不均匀性, 其轴线射流速度存在剧烈波动, 同时呈现先递增后衰减的规律。受丝材的影响, 枪外射流速度分布呈现空间不对称性, 其丝材所在平面流场的发散性大于丝材垂直平面的发散性。为了保证涂层质量, 提高沉积率, 喷涂距离控制以及喷嘴封闭气帽形状的合理设计显得非常重要。

关键词: 高速电弧喷枪; 流场特性; 数值模拟; Fluent

中图分类号: TG174.442

文献标识码: A

文章编号: 1007-9289(2005)01-0027-03

Studies of Computational Fluid Dynamics in the Flow Field of a High Velocity Wire Arc Spray Gun

XIANG Jian-hai, SUO Shuang-fu

(Department of precise instrument & mechanics, Tsinghua University, Beijing, 100084)

Abstract: The fluid dynamics in the jet field of a high velocity wire arc spray gun is one of the key factors to coating qualities. With the application of Fluent, the jet flow dynamics of a spray gun is simulated and computed, which concludes that the jet field could be characterized by three regions: the core region, the entrainment region, and the fully turbulent region. Influenced by the intersecting and reflecting of shock waves, the velocity distribution of the jet is non-homogeneous and asymmetric, and the axis velocity is severely fluctuated. Moreover, The flow in the wire plane is more divergent than that in the wires' vertical plane. Therefore, it's an important way to improve spray quality with appropriate spray distance and a special designed cap.

Key words: high-velocity; wire arc spray gun; numerical simulation; fluent

0 引言

高速电弧喷涂是 20 世纪 90 年代研制成功的新型热喷涂技术, 它是利用气体动力学原理, 将高压空气或高温燃气通过特殊设计的拉瓦尔喷嘴加速后, 作为电弧喷涂的高速雾化气流来雾化和加速熔融金属, 并将雾化粒子高速喷射到工件表面形成致密涂层^[1]。高速电弧喷涂具有雾化效果好、涂层致密及结合强度高优点, 成为热喷涂技术研究领域的热点之一。目前大多数研究集中于工程试验, 对理论方面的研究比较少。实际上, 流场特性决定喷涂的整个过程, 只有对流场进行深入的了解才可以更有目的的进行设计, 才能进一步对现有喷涂系统进行优化和控制。

在高速电弧喷涂中, 涉及到的流体主要是雾化

粒子和高速气体混合形成的气固两相流。考虑到雾化粒子的跟随性较好, 对流场的影响小, 不妨采用单相流湍流模型^[2], 利用 FLUENT 流体分析软件来对电弧喷枪的流场进行模拟计算。FLUENT 是目前国际上比较流行的商用 CFD 软件包, 它具有丰富的物理模型、先进的数值方法以及强大的前后处理功能, 在航空航天、汽车设计、石油天然气、涡轮机设计等方面都有着广泛的应用^[3]。文中的工作将 FLUENT 应用于高速电弧喷枪流场的模拟, 可加深理解问题产生的机理、为试验研究提供指导, 节省试验所需的人力、物力和时间, 并对试验结果的整理和规律的得出起到很好的指导作用。

1 喷枪物理模型

研究对象为自行研制的高速电弧喷枪。喷枪喷嘴为拉瓦尔喷嘴, 其收缩段为维托辛斯基曲线, 扩张段采用特征线法设计, 喉部用圆弧过渡。喷枪使

收稿日期: 2004-10-09; 修回日期: 2005-01-04

作者简介: 项建海(1980-), 男(汉), 浙江瑞安人, 硕士研究生。

用 3 mm 丝材,其触点位置位于距离喷枪出口 5 mm 处。喷嘴结构以及流场速度分布、压强大小等将直接影响电弧喷涂雾化粒子的动量、粒度以及飞行轨迹,从而影响涂层孔隙率、结合强度,表面粗糙度等性能参数。为考察喷枪头部流动区域的流体流动特性,将喷枪作部分简化,其 1/4 模型如图 1 所示。

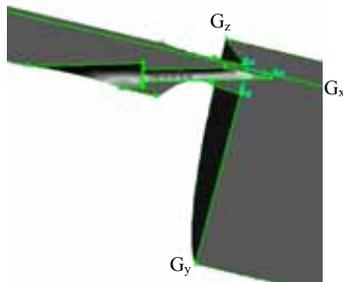


图1 喷枪头部1/4模型图

Fig.1 1/4 model of the gun's head

2 控制方程及数值方法

高速射流可假设为定常可压缩粘性流,满足如下的 N-S 方程:

$$\frac{\partial}{\partial t} \iiint_{\Omega} W dV + \iint_{\partial\Omega} [F - G] dA = \iiint_{\Omega} H dV$$

上式中, Ω 是控制体, $\partial\Omega$ 是控制体边界面, W 是求解变量, F 是无粘通量, G 是粘性通量, H 是源项。矢量 W 、 F 、 G 分别定义为:

$$W = \begin{Bmatrix} \rho \\ \rho u \\ \rho v \\ \rho w \\ \rho E \end{Bmatrix}, \quad F = \begin{Bmatrix} \rho \\ \rho u u + p \vec{i} \\ \rho u v + p \vec{j} \\ \rho u w + p \vec{k} \\ \rho u E + p \vec{u} \end{Bmatrix}, \quad G = \begin{Bmatrix} 0 \\ \tau_{xi} \\ \tau_{yi} \\ \tau_{zi} \\ \tau_{ij} v_j + q \end{Bmatrix}$$

采用二阶精度的有限体积法对控制方程进行空间离散,采用 Coupled 显式求解器求解,并利用 Fluent6 的标准 k- ϵ 湍流模式进行计算

3 基于 Fluent 的流场计算

3.1 网格划分

将上述简化的喷枪头部模型作为计算基本模型,由于喷涂喷枪的实际喷涂距离一般在 150 ~ 200 mm 之间,故在原基本模型的基础上,合理扩大计算域,同时为了考察喷涂截面的流场特性,计算边界应该取到足够大,以使出口边界参数不影响喷涂截面的流场特性。

文中利用网格处理软件 Gambit 对喷枪头部流场区域进行建模,考虑到丝材空间布置对流场的影响,采用三维模型。其整体网格如图 2 所示。

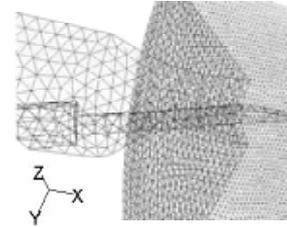


图 2 计算模型网格局部图

Fig.2 Partial grid model of the gun's head

3.2 边界条件类型及初始条件设定

射流的边界条件设置如下: 来流边界: 喷嘴入口面设置为 PRESSURE INLET 类型; 出口边界: 远场出口面的设置为 PRESSURE OUTLET 类型; 壁面边界: 采用无滑移绝热壁条件; 喷流边界: 使用喷流出口参数。

根据喷枪的结构及试验条件可确定算例的计算条件,其中入口边界和初始化主要参数为:

入口静止温度 $T_1=300$ K; 入口静止压强 $P_1=0.65$ MPa; 环境压强 $P_0=0.101$ MPa。

3.3 喷枪头部及枪外射流模拟计算结果分析

图 3 为喷枪射流速度矢量图。高速电弧喷枪射流是一个带有对周围环境气体强烈卷吸作用的湍流发展过程,射流过程可以被分解为 3 个区域: 射流核心区、射流卷吸区和射流湍流区。射流核心区为高速层流区,是电弧喷枪熔滴雾化和加速的核心区域。在射流卷吸区,射流核心区与在速度上有巨大差别的周围环境气流发生强烈的卷吸作用,使射流速度逐渐衰减。射流湍流区是射流湍流完全发展

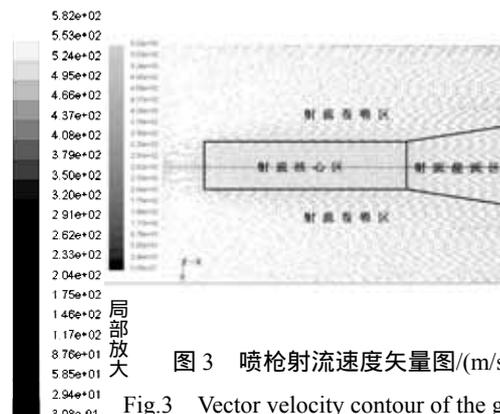


图 3 喷枪射流速度矢量图/(m/s)

Fig.3 Vector velocity contour of the gun's jet

的区域。由于射流与周围环境空气的强烈作用,使得射流边缘形成环状涡流,并被带到下游。射流外部边缘相邻的涡流环相互聚合、缠结,最终完全破裂为大尺度的漩涡。随着周围环境空气的不断卷入,射流核心区的层流被破坏,射流过渡为湍流。此时射流速度将大幅衰减。

图 4、图 5 分别是喷枪射流 X-Y 平面(丝材所在平面)和 X-Z 平面(丝材垂直平面)速度分布图,图 6 是射流轴线速度分布图。从中可以看出,枪外流场的速度分布是不均匀的。射流速度最大值为 580 m/s,该值出现在离拉瓦尔喷嘴出口 0.5 d 的位置(d 为喷嘴喉部直径)。由于激波反射、相交及激波栅格的影响,在离喷嘴出口到 10 d 之间射流速度剧烈波动,呈现近似周期变化,流场速度大小在 400 ~ 500 m/s 之间波动。在离喷嘴出口 10 d 之后,流场速度迅速衰减,在 15 d 处速度降为 200 m/s 左右。

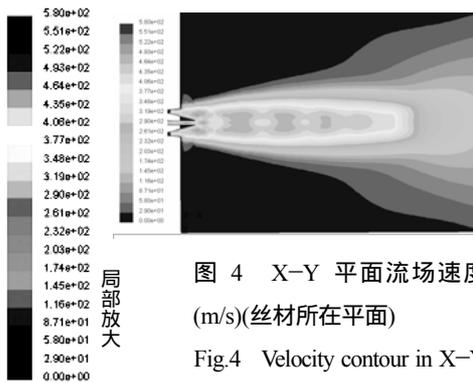


图 4 X-Y 平面流场速度分布图 (m/s)(丝材所在平面)

Fig.4 Velocity contour in X-Y plane of the gun's jet (The plane where wires lie)

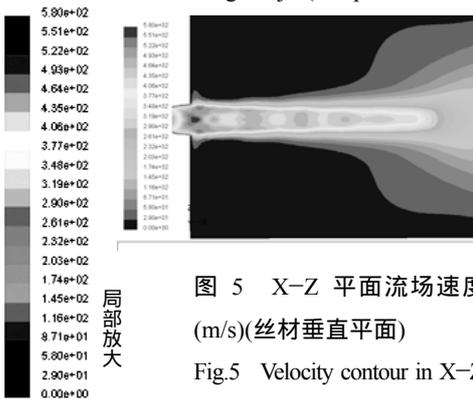


图 5 X-Z 平面流场速度分布图 (m/s)(丝材垂直平面)

Fig.5 Velocity contour in X-Z plane of the gun's jet(The plane vertical to the wire)

此外,从图 4、图 5 中可以看出,丝材的存在使流场在丝材平面上的扩散性大大增加,这不仅将增加流场与周围静止流场的卷吸作用,使流场速度加速衰减,同时也将时部分雾化熔滴扩散到周围环境中,降低了沉积率。因此在喷枪设计时,可以采用特殊几何形状的封闭气帽,如图 7 所示,从而减

少流场在丝材平面的扩散。

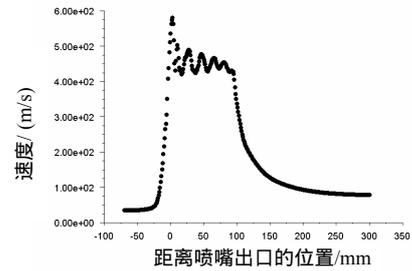


图 6 喷枪流场轴线速度分布

Fig.6 Velocity distribution along the axis of gun's jet



图 7 椭圆型封闭气帽

Fig.7 Shroud cap model with elliptical exit

4 结 语

通过 Fluent 对高速电弧喷枪头部及枪外流场的数值计算可以看出,枪外流场具有明显的不均匀性、空间不对称性,其轴线射流速度存在剧烈波动,同时呈现先递增后衰减的规律。同时,由于丝材存在对流场的影响,丝材所在平面的流场较垂直平面上流场具有更大的扩散性。

参考文献 :

- [1] 徐滨士,刘世参,等. 表面工程 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2000.102-105.
- [2] 古丽亚. 电弧喷枪流场研究与数值模拟分析 [D]. 北京: 清华大学精仪系, 2003, 37-38.
- [3] 李勇,刘志友,等. 介绍计算流体力学通用软件—Fluent [J]. 水动力学研究与进展 ,(A 辑)2001 ,16(2): 254-258.
- [4] 陶文铨. 数值传热学 [M]. 西安 :西安交通大学出版社, 2001.
- [5] Milind Kelkar, Joachim Heberlein. Wire-Arc Spray Modeling [J]. Plasma Chemistry and Plasma Processing, 2002,22(1): 1-25.

作者地址: 北清华大学精密仪器与机械系 100084
 Tel: (010) 62796125
 E-mail: jianhai98@mails.tsinghua.edu.cn