

高速电弧喷枪中电弧场的数值模拟

董瑞涛, 索双富

(清华大学 精密仪器与机械学系, 北京 100084)

摘 要: 运用 CFD 软件, 对高速电弧喷枪的流场进行了模拟。通过分析计算结果, 将射流分为电弧区、核心区、卷吸区和湍流区 4 个部分。电弧区内部速度和温度起伏剧烈, 但对其外 3 个区域的流场速度分布影响不大, 对轴线温度影响为 20~40 K。电弧区内部最高温度为 6 800 K, 分布在阴极表面上, 阴极的平均温度为 4 250 K, 从阴极到阳极, 电流密度和电弧温度都逐渐降低, 阳极的平均温度为 538 K。

关键词: 高速电弧喷涂; 数值模拟; 计算流体力学

中图分类号: TG174.442

文献标识码: A

文章编号: 1007-9289(2006)02-0013-03

Numerical Study of the Plasma Region of High Velocity Wire-Arc Spray

DONG Rui-tao, SUO Shuang-fu

(Department of Precise Instrument & Mechanics, Tsinghua University, Beijing, 100084)

Abstract: With the application of Fluent, the jet flow field of a wire-arc spraying gun was simulated and computed, which could be characterized by four regions: plasma region, core region, entrainment region and the fully turbulent region. The results showed that the plasma region had very limited effect on the other regions. It only caused 20~40 degree rising of the temperature on the axis of jet flow. But in the plasma region itself, the velocity and temperature were severely fluctuated, up to 1 600 m/s and 6 800 K respectively. From anode to cathode, the average temperature was gradually reduced from 4250 K to 538 K.

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

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, 它利用气体动力学原理, 将高压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]。具有雾化效果好、涂层致密、及结合强度高等优点。

目前, 对高速电弧喷枪的研究大多集中于工程试验。在理论方面, 2002 年 Kelkar^[2] 针对电弧喷涂中的各个区域分别建立了数学模型; 2002 到 2005 年, 朱子新等^[3-5] 对电弧喷涂中轴线上粒子的行为建立了数学模型, 并给出了计算结果; 2005 年, 项建海等^[6] 建立了拉瓦尔喷嘴的 1/4 模型, 在

忽略粒子和电弧的影响的情况下, 进行了模拟计算, 给出了高速电弧喷涂流场的速度分布。文中在文献^[6]的基础上进一步发展, 建立了高速喷枪的全尺度三维模型, 使用 Fluent 流体计算软件, 在考虑了热电弧的影响后, 给出了流场的计算模拟结果。

1 喷枪物理模型

用特征线法设计, 喉部用圆弧过渡。喷枪使用 3 mm 丝材, 其触点位置位于距离喷嘴出口 5 mm 处。如图 1 所示。考虑到需要研究粒子分布和电弧产生的温度场, 作为粒子发射源和电弧正负极的丝材是不能忽略的, 因此建立了喷嘴的全尺度三维模型。

2 喷枪数学模型

建立的高速电弧喷枪数学模型基于以下假设:

收稿日期: 2006-03-16

作者简介: 董瑞涛(1981-), 男(汉), 陕西乾县人, 硕士研究生。

- (1) 电弧区处于局部热力学平衡(LTE);
- (2) 电弧区是稳定的, 作为电弧正负极的丝材也是稳定的;
- (3) 空气的光学厚度为 0, 忽略电弧对外辐射的能量损失;
- (4) 假设空气是理想气体, 并且其电导率和热容随温度变化而变化^[7];
- (5) 高速射流可假设为定常可压粘性流, 满足如下的 N-S 方程:

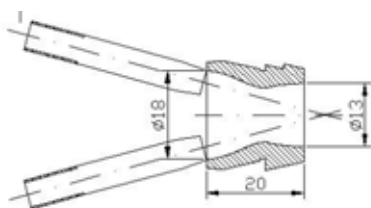


图 1 喷嘴结构图

Fig.1 Nozzle of the wire-arc spray gun

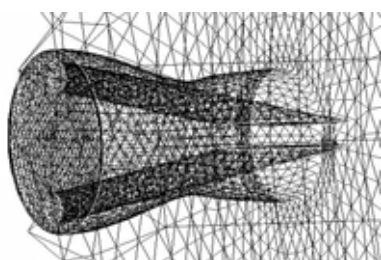


图 2 计算模型局部网格图

Fig.2 Mesh of the nozzle

$$\frac{\partial}{\partial t} \iiint_{\Omega} W dV + \oint_{\partial\Omega} [F - G] dA = \iiint_{\Omega} H dV \quad (1)$$

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:

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

电弧区中, 动量源项为:

$$H_M = \vec{j} \times \vec{B} \quad (2)$$

其中 $\vec{j}$ 为电流密度 $\vec{B}$ 为感应磁场强度。

能量源项为:

$$H_E = \frac{1}{\sigma} \vec{j} + \frac{5}{2} \frac{k_B}{C_p e} \left(\vec{j} \cdot \nabla h \right) \quad (3)$$

其中第一项为焦耳热, 第二项为离子漂移引起的能量变化, 共同构成了能量方程的源项^[8]。 σ 为空气电导率, k_B 为玻尔兹曼常数, e 为基本电荷电量。

3 主要计算参数和边界条件设定

模拟计算的主要参数设定为: ① 入口静止温度为 300 K; ② 入口静止压强为 0.65 MPa; ③ 环境温度 300 K, 环境压强 0.101 MPa; ④ 喷涂电流 200 A; ⑤ 因为主要研究目的是电弧对流场的影响, 所以暂不考虑丝材温度, 设定壁面温度均为 300 K。

射流的边界条件设置如下: ① 来流边界: 等压入口条件; ② 喷嘴内部壁面和丝材表面: 绝热壁面条件; ③ 计算区域边界: 无滑移绝热壁面条件; ④ 气流出口: 等压出口条件。

4 射流模拟计算结果分析

4.1 有电弧时的速度场和温度场

加入电弧后, 射流过程可以在上面 3 个区域的基础上再加上电弧区, 一共构成 4 个区域, 如图 3, 图 4。在电弧区内, 气流温度最高可以到达 6 800 K, 速度最高可以到 1 600 m/s。气体流出电弧区后, 速度迅速下降, 流场的速度分布和没有电弧时的计算结果相差不大, 仍然为近似周期分布; 温度和没有电弧时相比则略有上升, 使得射流核心区径向范围增加。

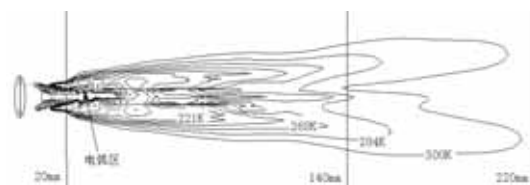


图 3 流场温度分布图

Fig.3 Temperature contour of the jet flow

图 5、图 6 是喷涂射流中轴线上的速度和温度分布, 可以看到, 没有电弧时, 轴线气流速度在射流核心区周期性波动, 并逐渐趋于平稳,

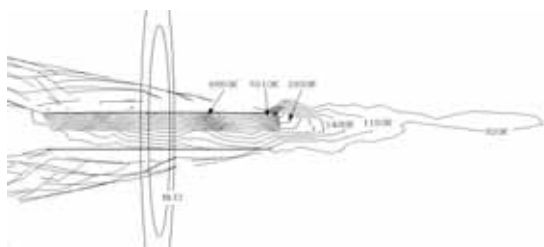


图4 电弧区域局部放大后的温度分布

Fig.4 Temperature contour of the plasma region

最后在弧区内迅速上升,达到 1 100 m/s,出了电弧区后又射流湍流区内单调递减;有电弧时,气流速度在电迅速下降,经历波动后单调递减。同样,轴线气流温度也在电弧区内迅速上升,达到 2 800 K,并在电弧区外迅速降到环境温度以下,然后慢慢趋近于环境温度;电弧区外,轴线气体温度最初比没有电弧时高 40 K,在射流远场差距变小,减小到 20 K。

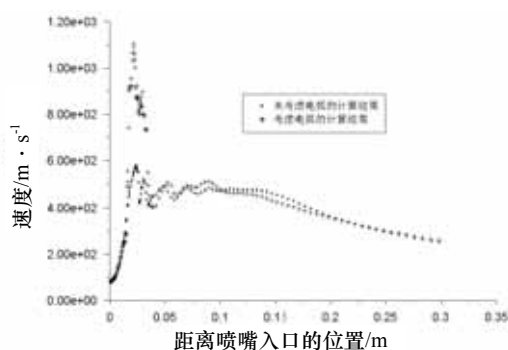


图5 轴线上的速度分布曲线

Fig.5 Velocity on the axis of jet flow

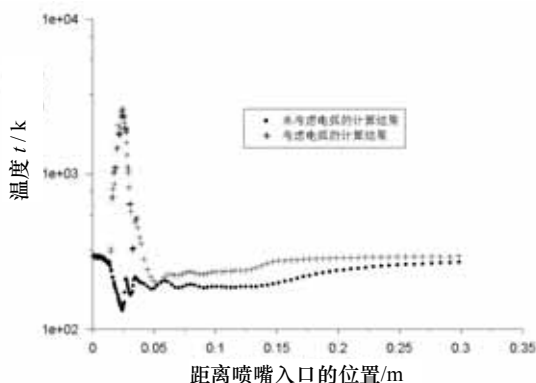


图6 轴线上的温度分布曲线

Fig.6 Temperature on the axis of jet flow

4.2 对电弧区域的细部分析

已知电弧区的能量守恒方程(公式 3)中,源项由两部分组成,分别是电流引起的焦耳热和离子漂移引起的能量变化。由方程可知焦耳热和电流密度的平方成正比,它是总热源中的最重要的组成部分。而由空气的性质可以知道,控制体的温度越高,空气离化越多,电导率越大,导致电流密度也就越大,就产生了更多的焦耳热,从而使控制体温度进一步提高。离子漂移产生的能量变化则正好相反:离子总是从高温处向低温处漂移,同时带走了能量。因此在高温处产生的热源为负。离子漂移热源项虽然在数量级上比焦耳热小 2 个数量级,但它在迭代计算中能够使局部控制体温度不会过高,避免了计算发散。

电弧区的电流密度分布如图 7 所示,因为电弧电流是由阴极发射的电子离化空气后,空气离子在电势场中移动形成的,因此阴极电流密度、产热量和温度都总是远远高于阳极。经过积分计算,可以得到阴极的平均电流密度为 2.51×10^7 A/m²,平均温度为 4 250 K;阳极的平均电流密度为 9.35×10^5 A/m²,平均温度为 538 K,可见两极温差非常大。在实际工程中,阴极和阳极丝材并非静止不动,所以这个计算结果对丝材进给速度的研究给出了理论参考。

对全部电弧区域积分,得到电弧的功率为 5 111 W。高速电弧喷枪装置总电功率为 $35\text{V} \times 200\text{A} = 7000\text{W}$,考虑到并非所有电能都用于电弧产热,200 A 电流在丝材中产生的焦耳热约为 2 000 W,因此可知积分结果合理。

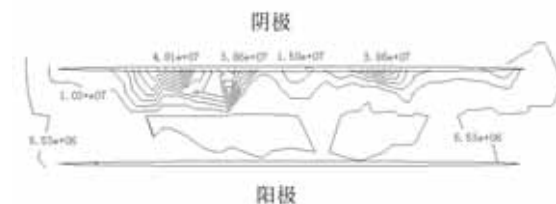
图7 电弧区电流密度(单位: A/m²)

Fig.7 Current density contour of the plasma region

5 结 论

通过 Fluent 对高速电弧喷枪射流的数值计算可以看出:①电弧对电弧区域外的流场速度分布和

(下转第 20 页)

(上接第 15 页)

影响不大;② 在电弧区域外,电弧只对射流轴线周围的温度分布有影响,比没有电弧时高 20~40 K;③ 电弧区域内部气体速度和温度变化剧烈,最高能到 1 600 m/s 和 6 800 K;④ 计算得到阴极平均温度 4 250 K,阳极平均温度 538 K,阴阳两极温度相差巨大;⑤ 在喷涂电流 200 A 的喷枪中,电弧的热功率约为 5 111 W。

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] Milind Kelkar, Joachim Heberlein. Wire-arc spray modeling [J]. Plasma Chemistry and Plasma Processing, 2002, 22(1): 1-25.
- [3] 朱子新,等. 高速电弧喷涂雾化气流速度的数学模型 [J]. 中国表面工程, 2002,15(1): 24-25.
- [4] 朱子新,等. 高速电弧喷涂熔滴速度的数值模拟及试验 [J]. 焊接学报, 2002, 23(1): 5-8.
- [5] 朱子新,等. 高速电弧喷涂雾化熔滴传热过程数值分析 I. 数学模型及传热参数变化规律 [J]. 焊接学报, 2005, 25(1): 1-5.
- [6] 项建海,等. 高速电弧喷枪流场模拟研究 [J]. 中国表面工程, 2005,18(1):27-29.
- [7] 过增元,等. 电弧和热等离子体 [M]. 科学出版社, 1986. 57-58.
- [8] Hsu K C. Study of the free-burning high-intensity argon arc [J]. Appl. Phys, 1983,54(3): 1293-1301.

作者地址: 北京清华大学 精密仪器与机械系
100084

Tel: (010) 62776385

E-mail: dongruitao99@mails.tsinghua.edu.cn