

# 等离子枪体内部流场及温升的模拟分析

张义顺, 董晓强, 李德元

(沈阳工业大学 材料科学与工程学院, 沈阳 110023)

摘 要: 采用有限元模拟技术研究了多种等离子枪体内部的水流场和气流场。分析了等离子枪体的机构对水流速的影响以及对紊流形成的影响。并在此基础上, 分析了在不同流场分布状态的条件下, 等离子枪体内部的温度场形态。通过验算枪体关键部位的温升, 发现在不改变冷却水流量的情况下, 仅通过改变水道结构和入水方向, 就可以使枪体的冷却效果得到明显的改善。该研究结果为等离子枪体的设计和结构优化提供了重要的参考数据。

关键词: 等离子枪; 流场; 温度场; 模拟计算

中图分类号: TG439.9 文献标识码: A 文章编号: 0253-360X(2005)09-77-04



张义顺

## 0 序 言

等离子技术在材料切割、焊接、喷涂、堆焊、熔炼和表面处理等领域中获得了广泛的应用<sup>[1]</sup>。等离子束流的产生方法有多种, 但其中以采用压缩电弧来获得等离子束的方法最为常见。这种方法利用特制的等离子枪体所产生的机械压缩、热压缩和电磁压缩效应, 来获得具有高能流密度的等离子束流。束流的温度可高达 20 000~30 000 K; 束流速度可达每秒几千米。

由于等离子束是靠枪体压缩产生的, 所以枪体的结构在确定等离子束流性能方面起到了决定性的作用。设计良好的枪体应当具有高的换能效率、良好的电弧引燃性能和电弧稳定性、优异的自身冷却和密封性、适当的压缩比和紧凑的结构。

国内从 20 世纪 70 年代后期开始在生产中大量采用等离子束加工技术。但是, 在枪体设计和性能分析方面的研究一直发展较慢。目前还基本上处于模仿或经验设计的层次。在相关的理论分析和实践方面与发达国家还有很大的差距。例如, 美国 METCO 公司所制造的等离子喷涂枪体, 其外径仅为 40 mm 左右, 内部已经采用非对称迷宫型结构。而国内同类的枪体还处于 20 世纪 70 年代的水平, 直径达 80 mm 左右, 内部仍为同心筒状设计, 而且枪体的可靠性也很差。美国 Dynamic 公司生产的大功率等离子喷涂设备的功率可达 200 kW, 在高熔点陶瓷类材料喷涂方面具有很大优势, 而国内的同类设

备仅为 80 kW, 且不能长期工作, 仅能在陶瓷喷涂温度的下限温度工作, 可喷涂的涂层材料种类就受到限制。美国 Cobalt 公司生产的等离子堆焊枪, 其枪体直径仅为国内同功率枪体的 2/3 左右, 但性能却更稳定。瑞典 ESAB 公司生产的微束等离子焊接设备可以焊接 0.1 mm 厚度的不锈钢箔, 国内设备一般仅能焊接 0.3 mm 以上的厚度。荷兰 Philips 公司生产的等离子熔化极枪体采用反极性设计, 可以焊接厚度在 20 mm 左右的铝板, 国内目前尚未在生产中应用这种方法。在等离子表面热处理方面, 日本所研究的最新的枪体可将等离子束斑直径控制到 1 mm 以下, 而国内一般都需在 2 mm 以上才能保证枪体稳定工作。这使得能量不集中, 且容易灼伤工件。其它还有很多技术, 如高能量转换效率、枪体的微型化、双弧技术、低稀释率堆焊、熔化极等离子、反极性等离子等方面, 国内都还有很大差距, 有些甚至还根本没有应用。

在作者的研究工作中, 采用了有限元模拟技术对几种等离子枪体内部的流场和温度场进行了计算分析。针对枪体中关键部位进行了温升验算, 并通过改进流道结构等方法对枪体进行了结构优化。其目的是探讨一种通过理论分析优化等离子枪体设计的技术途径。

## 1 等离子枪体的基本结构

大多数等离子枪体都属于轴线式等离子发生器, 电弧的导通路径基本上一个围绕着弧室轴线的柱状区域, 电弧可能是在置于轴线上的电极之间燃

烧,也可能是在一个置于轴线的电极与通道之间燃烧。为了使电弧稳定并具有更高的能量密度,通常要采用气体、液体或二者联合对电弧进行稳定和压缩<sup>[2]</sup>。

图 1 是一个用于等离子切割的气体稳定型等离子枪体的结构简图。在该枪体中,夹持在电极夹上的钨极为阴极,与作为阳极的喷嘴之间形成电弧。轴向气流通过上部的气管送入,并通过喷嘴上的孔道流出,起到稳定和压缩的作用。由孔道喷出的等离子弧焰可以用于切割。为了提高保护和电弧压缩的效果,还通过水电接头对枪体进行水冷。其它类的等离子枪体结构与之有很多类似之处,都由上枪体、下枪体和中间绝缘体三部分组成。一般来说,等离子枪体的核心部件是喷嘴和钨极。

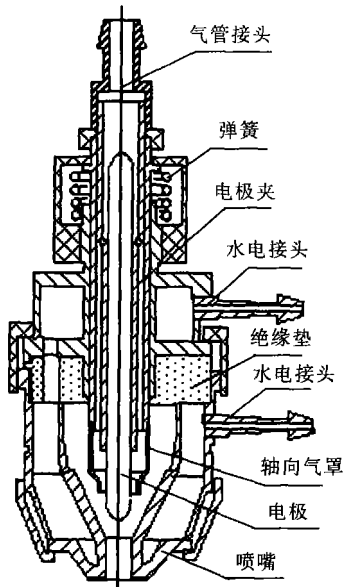


图 1 一种等离子切割枪的结构简图  
Fig 1 Structure of a plasma cutting torch

2 枪体内部流场分析

枪体内部通常都流过两种流体,一种流体是水流,它的主要作用有两方面,一是与枪体喷嘴换热,使喷嘴产生冷壁压缩效率;同时它还要保证对枪体其它部件的冷却。另一种流体是气流,它在电弧周围流过,使电弧冷却收缩,同时,还起到提供电离介质和保护等作用。

关于枪体内部流场问题的求解,采用了 SMPLE 法 (semi implicit method pressure linked equation)。这种方法是 Patankar 和 Spalding<sup>[3]</sup> 于 1972 年提出的,它克服了用连续方程求解压力场的困难。计算

过程中引用了新的变量——校正压力和校正速度,在求得校正后的压力并用之来校正速度时,只考虑与该速度同一方向上相邻两点间压力校正值的影响,而忽略四周压力修正值对速度的间接影响,实践证明达到收敛后这一忽略对最后结果不会产生很大误差。该方法已经在很多工程计算中得到应用,例如航空器机翼的升力和阻力、涡轮喷气及涡轮风扇发动机超音速喷管中的流场、发动机排气系统中气体的压力及温度分布、飞行器风洞试验问题、河道中水流流动问题等的计算。等离子枪体上的流场问题属于流体在弯管中的复杂三维流动问题分析,完全可以采用这种模拟计算方法。由于该问题属于具有不可穿透力界流道中的层流和紊流分析,可用标准的  $\kappa - \epsilon$  湍流模型进行模拟。为使计算比较容易,在计算中采用三个假定: (1) 冷却水看作不可压缩流体; (2) 流动处于定常状态; (3) 流场为对称二维场。

在直角坐标系下,其二维  $\kappa - \epsilon$  模型的湍流基本方程组的通用形式可表示为

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\varphi) + \text{div}(\rho\vec{u}\varphi) = \text{div}(\Gamma\text{grad}\varphi) + S, \tag{1}$$

式中:  $\Gamma$  为扩散系数;  $\rho$  为流体密度;  $S$  为源项;  $\varphi$  通用项;  $\vec{u}$  为平均流速。

连续方程具有的形式为

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\varphi) + \text{div}(\rho\vec{u}\varphi) = 0. \tag{2}$$

图 2 是对一种等离子喷涂枪喷嘴简化后进行模拟的结果。在该算例中,直接给出入口边上各个结点分配定值流速  $v_x = 0.5 \text{ m/s}$ ,  $v_y = 0$ 。并直接选择出水口处的相对压强为零。

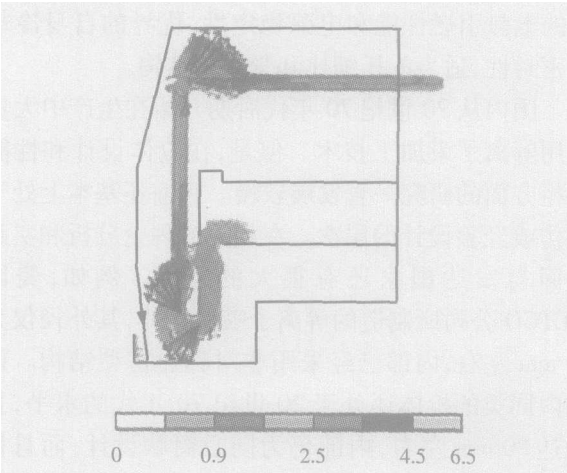


图 2 喷嘴处水流场的速度分布图  
Fig 2 Velocity field of cooling water at nozzle

图中箭头显示流速大小和方向的变化,箭头越长,速度越大,箭头的方向则代表合速度的方向。由

图可见, 在流道的中间段, 水流基本属于层流状态, 在流道弯角处则出现紊流。对于各不同的弯角, 或同一弯角的不同部位, 由于可能处于迎水面和被水面, 或因离开水主流线位置的差异, 其流速存在明显差别, 这必将影响喷嘴的冷却效果和使用寿命。当某个区域中的结点流速接近于零时, 便形成了所谓的 "死水区", 此时冷却效果很差。为了寻找 "死水区", 可以在计算中采用选点分析, 即按一定路径取出多个点的各流速分量, 结果发现 "死水区" 易形成的部位是在冷却水道前端的拐弯处, 尤其是在靠近内弯道的部分。

图 3 是对等离子 -MIG 焊接枪、等离子切割枪和等离子堆焊枪体提出的简化模型。

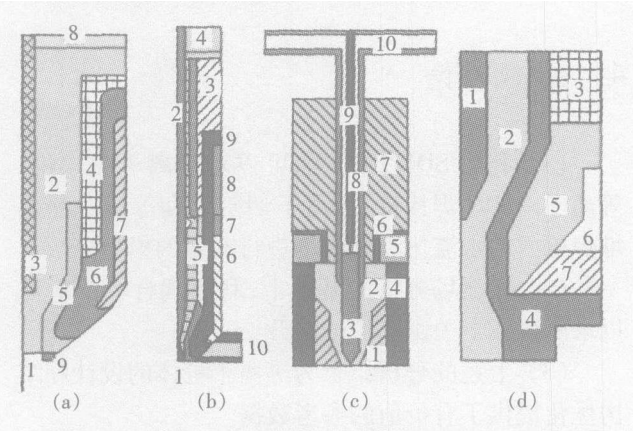


图 3 等离子 -MIG 焊接枪、等离子切割枪及等离子粉末堆焊上枪体、下枪体模型

Fig 3 Simplified numerical models of a plasma MIG welding torch, a plasma cutting torch and upper part and lower part of a plasma surfacing torch

图 4 是对等离子 -MIG 焊接枪体内部水流场分

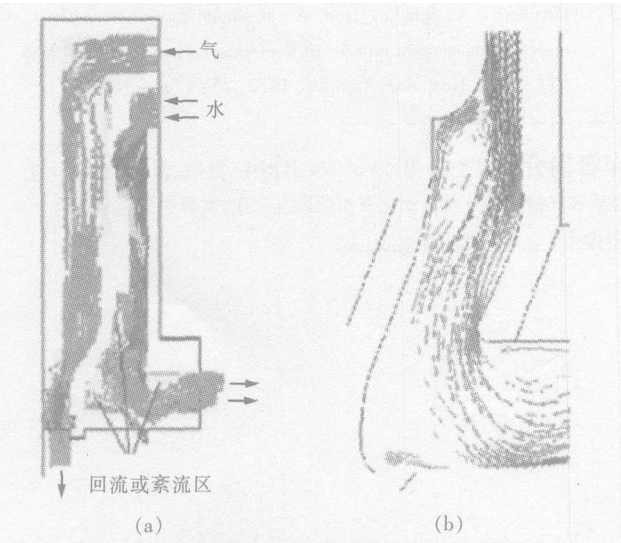


图 4 对等离子 -MIG 焊接枪水流场分析结果

Fig. 4 Simulated results of water velocity field in a plasma MIG welding torch

析所得到的结果。计算结果表明, 在水流道弯角处仍容易出现死水区。由 4b 可见, 当前沿流体遇到固壁的阻碍, 会出现 "折回" 现象; 且入口拐弯处下部流动过快, 导致流体迅速地向下游流动而不及散开, 使部分流体直接回流; 这些都导致了冷却效果的降低。以此为依据, 改变流道参数后, 结果在流量不变的条件, 可以获得更佳的冷却效果。同样, 对其它几种枪体的流场分析也为枪体流道设计提供了很多参考数据。

图 5 是在三维尺度上对枪体内部水流场进行计算的一个模型。这种环状水区域在等离子枪体中是很典型的情况。冷却水是 1 点流道流入, 由 9 点流道流出。除了上述的流场矢量分析外, 还可以按照一定的特征方向进行选点分析。图 5 中分别给出了 A、B、C 三个特征方向。各特征方向上带编号的点表明了它们的位置。通过有限元计算可以分析各点的水流速度。表 1 是各点的冷却水流速的数据。

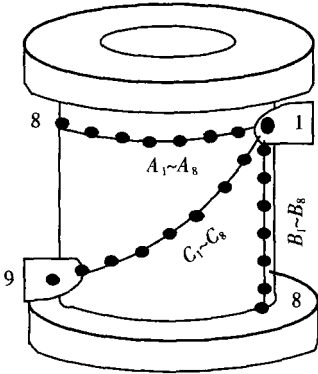


图 5 枪体内部局部水流场模型

Fig 5 Simplified numerical model of local water field in a plasma torch

表 1 在各特征方向上的水流速变化情况 (m/s)

Table 1 Water flow velocities in specific directions (m/s)

位置	1	2	3	4	5	6	7	8	9
A	14.48	12.07	9.30	5.41	4.31	3.21	2.40	0.85	-
B	14.48	8.80	7.78	7.11	5.32	2.67	1.85	0.54	-
C	14.48	7.82	5.92	4.86	4.53	4.66	5.24	6.93	14.48

3 枪体温度场分析

以上述计算所得到的水流场数据作为原始条件, 再加载上电弧热源和其它相关边界条件, 就可以对枪体温度场进行分析。这是一个耦合场求解问题。

改变枪体结构或边界条件 (如电弧能量特征

等)时, 流场和温度场会发生变化。通过温度场分析就可以对枪体的工作状态进行分析。通过局部升温验算, 还可以给枪体设计提供有用的数据。

例如, 图 6 是分析一个等离子粉末堆焊枪上非转移弧阳极斑点位置发生变化时, 枪体温度场的演变情况。由图可见, 阳极斑点向下微小的移动就可能导致高温区(深色区域)比较明显的下移, 使喷嘴处的负担加大。此时, 按照选点温度分析的数据, 就可以为上、下枪体相对位置的设计提供依据。

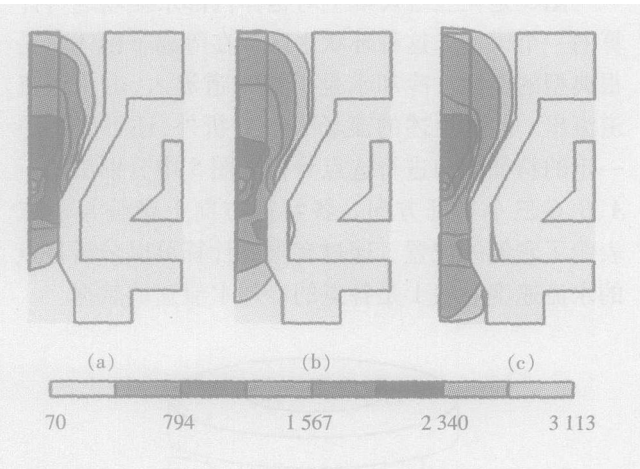


图 6 阳极斑点位置不同时, 等离子堆焊枪上温度场的变化  
Fig 6 Variety of temperature field in a plasma surfacing torch when anode spot located at different positions

图 7a、b 反映了一个等离子枪喷嘴上的进水方向发生变化时, 温度场形态的演变(图中深色代表高温区域的位置)。以喷嘴上 G 点(此处是喷嘴密封圈的位置)为例, 当按照图 7a 的方式, 采用从前枪体进水、后枪体出水的冷却模式时, 该点的温度在 210℃左右, 已经超过了一般耐热硅橡胶密封材料的上限工作温度, 很容易烧化密封圈。如果改变水流的方向, 改从后枪体进水, 前枪体出水, 从图 7b 中可以看到, 此时高温区移向喷嘴前端。G 点的温度仅在 50℃左右, 可以防止绝缘垫圈的熔化。

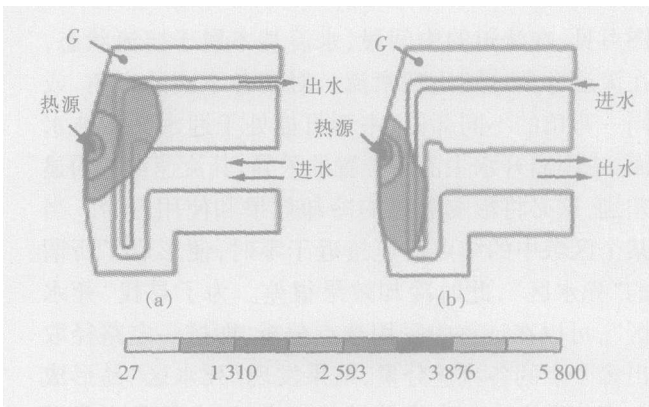


图 7 等离子喷涂枪进水方向发生变化时, 温度场形态的变化  
Fig 7 Variety of temperature field at nozzle of a plasma spraying torch when cooling water flowed through it in different directions

4 结 论

- (1) 利用 SMPLE 方法可以对等离子喷涂枪、等离子-MIG 焊接枪、等离子切割枪和等离子粉末堆焊枪内部水流场和气流场进行有效的模拟分析。
- (2) 在流场分析的基础上, 利用耦合场分析可以求解枪体上关键部位的升温。
- (3) 上述的分析结果为等离子枪体的设计和结构优化提供了有价值的参考数据。

参考文献:

[ 1 ] 李德元, 赵文珍, 董晓强. 等离子技术在材料加工中的应用 [ M ]. 北京: 机械工业出版社, 2005.  
[ 2 ] 格罗斯 B. 等离子体技术 [ M ]. 北京: 科学出版社, 1980.  
[ 3 ] Patankar S V, Spalding D B. A calculation procedure for heat mass and momentum transfer in three dimensional parabolic flows [ J ]. Int J Heat Mass Transfer 1972 15: 1787 - 1806

作者简介: 张义顺, 男, 1963 年 4 月出生, 教授, 博士研究生。主要从事焊接设备及其自动化方面的研究工作, 发表论文 20 余篇。  
Email zhangyishun@sohu.com

the vibratory stress relief (VSR) processing the tensile compress cyclic loading was applied. The experimental results showed that the dynamic strain has feature of cyclic creep. Cyclic loading affected the creep and creep speed. The bigger the loading, the bigger the creep and the creep speed, and the longer time that the strain became stable. The residual stresses at weld toe were measured using X-ray diffraction method after different cyclic stress amplitude. According to the experimental results, the cyclic creep mechanism during VSR processing was presented.

**Key words** vibratory stress relief welding stainless steel creep cyclic loading

#### Effect of pulsed parameters on dynamic simulating waveform of

**pulsed submerged arc welding process** GUO Haiyun<sup>1</sup>, LI Huan<sup>2</sup>, LIU Qiong<sup>2</sup>, WANG Jiongxiang<sup>3</sup>, LIU Xiquan<sup>3</sup>, ZHAO Weizhen<sup>3</sup>, FU Yuchen<sup>3</sup> (1. Department of Mechanical Engineering, Tianjin Chinese German Professional Technology Institute, Tianjin 300191, China; 2. School of Materials Science and Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China; 3. Department of Manufacturing Technology, Shanghai Boiler Works Company Ltd., Shanghai 200245, China). p61–64

**Abstract** Since there are many adjustable parameters in alternate speed wire feeding pulsed submerged arc welding process, selection of pulsed parameters on the basis of the simulating model was investigated in this paper. The impact of pulsed frequency, duty factor, peak current and base current were discussed, providing a convenient and intuitionistic means for the selection of optimum parameters in practical experiments and foundation for the application of the pulsed submerged arc welding method.

**Key words** pulsed parameters alternate wire feed system pulsed submerged arc welding simulating waveform

#### Research on coated solid wire for metal argon gas welding

ZHANG Jinghai, ZHAO Furchea, DING Yongzhong (Luoyang Ship Materials Institute, Henan Luoyang 471039, China). p65–68

**Abstract** The characteristics and feasibility of metal argon gas welding with coated solid wire were researched. A nanometer composite coating was developed, which gave the wire a sound weldability during metal argon gas welding. The welding tests showed that the deposited metal with the coated solid wire had higher mechanical properties and cold cracking resistance because of its lower oxygen and diffusible hydrogen content compared to that of TIG welded. It could be concluded that metal argon gas welding with coated solid wire could be a potential method to weld high strength steels with high efficiency and quality.

**Key words** coated solid wire metal argon gas welding welding arc drop transfer

**Stationary numerical simulation on coupling interaction between TIG welding arc and pool** LU Fenggui, TANG Xinhua, LI Shaoqing, YAO Shua, LOU Songnian (School of Materials Science and Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China). p69–72, 76

**Abstract** A moving free interface is formed by interaction between welding arc and weld pool. How to deal with the interface is the key to realize coupling interaction between welding arc and pool. Based on 3D united mathematical model, interaction between TIG welding arc and pool was numerically simulated in this paper. And the theory of interaction between arc and pool was revealed. The result showed that shape of the calculated weld pool was in agreement with that of the experiment.

**Key words** free interface coupling interaction welding arc and pool numerical simulation

#### Fitting analysis on welding temperature field of fully welded valve

PANG Fangjie<sup>1</sup>, XU Jijun<sup>1</sup>, CHEN Ligong<sup>1</sup>, ZHANG Min<sup>2</sup> (1. School of Materials Science and Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China; 2. Shanghai Neles Jamesbury Ltd., Shanghai 200092, China). p73–76

**Abstract** Welding temperature field was analyzed by using nonlinear curve fit method based on experiments. The fitting temperature time equation was obtained from actual data with an improved mathematical model. From different fitting equations under different conditions, regression coefficients were also analyzed. Considering the actual need, the location range of the sealing lip was acquired.

**Key words** fully welded valve welding temperature field nonlinear curve fit

#### Numerical simulation of fluid field and temperature field in plasma torch

ZHANG Yishua, DONG Xiaoliang, LI Dequan (School of Materials Science and Technology, Shenyang University of Technology, Shenyang 110023, China). p77–80

**Abstract** The fluid field and temperature field in plasma torch were simulated by using the finite element analysis. The influence of the torch structure on the velocity of water flow and the turbulence formation was analyzed. On the basis of the analyzed results, the temperature field under different fluid field conditions were calculated. By checking computations of the temperature rise at some key location in the torch, it has been found that the cooling effect of the plasma torch can be obviously improved by changing the water flowing route and water entering direction, and which need not increase the flow volume of the cooling water. The calculated data provided a foundation for the torch design and improvement.

**Key words** plasma torch fluid field temperature field simulation