

D406A 超高强度钢激光-TIG 复合填丝焊接气孔特性分析

杨雨禾¹, 雷正龙¹, 黎炳蔚¹, 陈彦宾¹, 吴 军², 张黎旭², 秦占领²
(1. 哈尔滨工业大学 先进焊接与连接国家重点实验室, 哈尔滨 150001; 2. 西安航天动力机械厂, 西安 710025)

摘 要:采用激光-TIG 电弧复合填丝焊接 6.6 mm 厚的 D406A 超高强度钢,发现焊缝内部存在一定量气孔缺陷. 利用扫描电子显微镜(SEM)、X 射线探伤等方法进一步分析了焊缝内气孔形貌、分布特征及其形成机制,发现气孔内壁出现大量的 C、O 元素富集现象,根据线扫描分析与理论计算相结合,推测焊缝中气孔类型主要为 CO 气孔. 在此基础上,进一步探讨了焊接工艺参数对气孔率的影响规律,通过适当增大激光功率、减小送丝速度、增大保护气流量和提高焊接速度可以有效减少气孔,使气孔率降低到 1% 以下,为抑制 D406A 超高强度钢激光-TIG 电弧复合填丝焊接接头气孔提供理论基础.

关键词:超高强钢; 激光-TIG 复合填丝焊; 一氧化碳气孔; 气孔抑制

中图分类号: TG 44 **文献标识码:** A **doi:**10.12073/j.hjxb.20160503002

0 序 言

D406A 超高强度钢,是国内自行研制的钢种,其抗拉强度高,韧性好,主要用于固体火箭发动机壳体^[1-2]. 目前 D406A 钢常用的焊接方法是 TIG 焊和电子束焊:TIG 焊成本较低,但 TIG 焊熔深较浅,需要的焊接层数较多,这不仅使得焊接效率下降、造成较大的焊接热输入,还会使接头产生大量气孔,严重影响其力学性能;电子束焊能取得很好的焊接效果,但其需要在真空环境下进行焊接^[3-4]. 随着对产品使用性能和技术指标要求越来越高,对焊接质量和焊接精度要求越来越高,已有常规 TIG 电弧焊接方法很难满足使用要求.

众所周知,激光-TIG 电弧复合焊以其高稳定性、高效率、高适应性、大熔深、低热输入的特点受到广泛关注,非常适合于中厚板焊接或者薄板高速焊接,因此,利用激光-TIG 电弧复合进行中厚板 D406A 超高强度钢焊接可能是有效途径之一.^[5-6]. 目前,关于激光-TIG 电弧复合焊接的研究,集中在热源相互作用机理、焊缝成形控制、力学性能分析等方面^[7-8].

针对 D406A 的复合焊接研究主要集中于冷裂纹缺陷的抑制,而试验发现该材料虽然气孔倾向较小,但并不能保证气孔率处于可用范围,易对焊缝力学性能产生显著影响,且有关气孔率的控制研究较少,因此,文中针对 D406A 超高强度钢,以 TIG 电弧

和光纤激光作为复合热源,进行超高强度钢激光-TIG 填丝焊接试验,重点研究焊接接头的气孔缺陷形成机制及抑制措施,对提高中厚 D406A 钢壳体的焊接质量具有重要意义.

1 试验方法

试验材料为 D406A 超高强度钢,试件尺寸为 300 mm × 100 mm × 6.6 mm,填充焊丝为 $\phi 1.2$ mm 的 D406A 钢专用焊丝,牌号 H10, D406A 钢及 H10 焊丝的化学成分见表 1. 采用平板对接焊,焊前打磨工件表面,以清除氧化层,丙酮清洗,以清除油污.

试验采用的激光-TIG 复合填丝焊接系统包括:光纤激光器(YLS-10000)激光束波长为 1 070 ~ 1 080 nm,最小光斑直径为 0.36 mm. TIG 焊机(Magic Wave4000)以及 VR4000 送丝机. 坡口为 V 形,夹角 40°,钝边 4 mm,焊接过程中,采用激光在前、TIG 电弧在后、前送丝的方式进行焊接, d_{L-A} 为激光束与 TIG 焊枪距离, d_{L-w} 为激光束与填充焊丝距离,焊枪与焊丝轴线和工件平面的夹角分别为 α 和 β ,如图 1 所示,一般情况下 $\alpha = 45^\circ$, $\beta = 30^\circ$. 文中采用两种气孔检测方法,一种采用 X 射线对焊缝中气孔进行检测,之后将 X 射线底片转换为数码照片,利用 MATLAB 程序对图片进行处理,设定自动阈值,将图片转换为二值图像并进行滤波,便于计算气孔面积;另一种方法与无损检测方法搭配,即使用线切割将焊缝纵向剖开,截取焊道中心部分,可直接观测气孔,并量化气孔率. 每种条件下的气孔率均取其三组计算的平均值.

表 1 D406A 钢及 H10 焊丝的化学成分(质量分数,%)
Table 1 Chemical compositions of D406A steel and H10 wire

材料	C	Mn	Si	Cr	Mo	V	Ni	S	P
D406A	0.28~0.33	0.7~1.0	1.40~1.7	1.0~1.3	0.40~0.55	0.08~0.15	0.25	≤0.015	≤0.010
H10	0.08~0.12	0.9~1.1	1.1~1.3	1.4~1.6	0.4~0.6	0.05~0.15	1.8~2.0	0.005	0.006

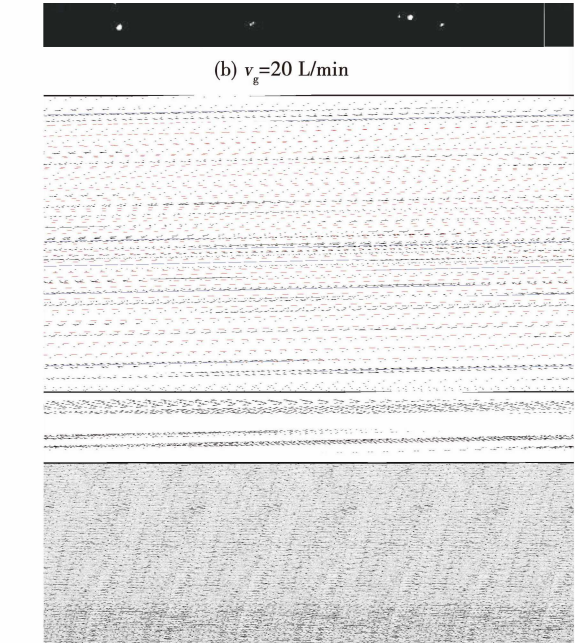


图 1 激光-TIG 复合填丝焊接装置及坡口示意图(mm)
Fig. 1 Experiment device of hybrid welding and sketch map of groove

2 试验结果与讨论

2.1 气孔类型分析

采用激光-TIG 电弧复合填丝焊接方法进行 D406A 超高强钢焊接时,可以获得成形良好的焊缝(d_{L-A} 为 2 mm, d_{L-w} 为 3 mm,激光功率 3 800 W,电弧电流 140 A,焊接速度 1.0 m/min,送丝速度为 1.8 m/min,采用 Ar + 10% CO₂ 作为保护气体,流量 15 L/min),但经 X 光射线检测发现焊缝中均存在显著的气孔缺陷,气孔分布于整个焊缝,且靠近熔合线处气孔密度最大,气孔尺寸较小,形状主要为边缘光滑的圆形或椭圆形,呈现冶金气孔的特征. 选取若干气孔进行观察,如图 2 所示,发现其内壁并不光滑,气孔底部有团状生成物,其上分布着较多的细小裂纹,这些裂纹可能是由于这种团状生成物与气孔壁基体的热膨胀系数相差较大,因而在冷却过程中使生成物受到较大的应力而开裂,如图 2a 所示. 结合图 2b 的背散射电子成像,发现气孔内壁相较于焊缝呈现较深的颜色,表明其中分布着原子质量较小的轻质元素.

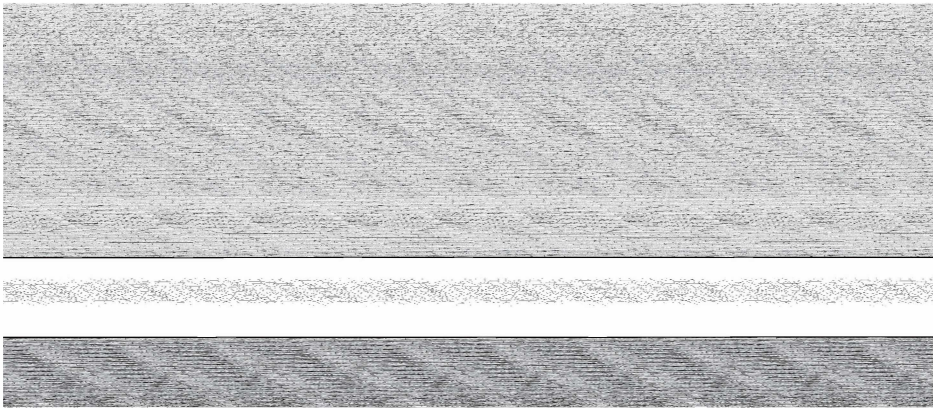


图 2 气孔 SEM 形貌
Fig. 2 Pore morphology of SEM

在气孔底部选择一定区域进行 EDS 面扫描以分析其平均元素组成,并与焊缝基体平均元素组成进行对比,发现焊缝基体 C,O 元素质量分数分别为 1.73% ,1.34% ,气孔底部 C,O 元素质量分数分别为 17.69% ,18.9% ,相比于焊缝基体,气孔底部有明显的 C,O 元素富集,而且在其它气孔中也存在此种 C,O 元素聚集现象. 采用线扫描的方式对气孔的内壁分析,以进一步探究 C,O 元素在气孔内壁的

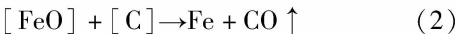
富集情况,结果如图 3 所示. 可知在气孔的圆形区域均存在明显的 C,O 元素富集,而铁含量略有下降,与周围的焊缝组织存在明显区别,Cr,Mn,Si 元素含量变化较小.
由气孔内部 C,O 元素富集现象推测 D406A 超高强度钢激光-TIG 复合填丝焊产生的气孔为 CO 气孔,钢焊缝中 CO 气孔缺陷主要可由以下化学反应方程式引起,其中 O 元素的来源可能是焊丝及母

材表面氧化物、保护气紊流造成少量空气混入、保护气体中活性成分电离并进入焊缝等.

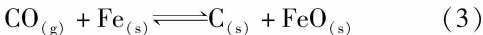


图 3 沿气孔直径的线扫描结果

Fig. 3 Line scan results along the pore diameter



一般认为 CO 气体会随着气孔的开放而逸出,因而不会在气孔壁上留下痕迹. 但是当焊缝冷却凝固时,考虑到有如下反应,即



该反应正向进行时需要有 $\Delta G\theta(T) < 0$, 即 $\Delta H\theta - T\Delta S\theta < 0$, 而反应式的 $\Delta H\theta = -161.45 \text{ kJ/mol}$; $\Delta S\theta = -158.35 \text{ J/(K}\cdot\text{mol}^{-1})$, 可得 $T < \frac{161.45}{158.35} \times 1\,000 = 1\,019.58 \text{ K} = 746.431 \text{ }^\circ\text{C}$, 此温度低于钢的凝固温度. 由此,可以证实在焊缝金属凝固后温度降低到 $750 \text{ }^\circ\text{C}$ 左右后,气孔中的 CO 与气孔内壁的铁反应,生成了 FeO 和 C 的混合物附着于其上,这也解释了气孔内壁 C、O 元素富集的原因,也进一步证实了焊缝中的气孔为 CO 气孔.

2.2 焊接工艺参数对气孔率的影响

试验过程中为达到良好的激光电弧耦合效果,获得焊接过程稳定、飞溅较小、焊缝成形较好的试验结果,结合前期的试验分析,均设置 d_{L-A} 为 3 mm, d_{L-w} 为 2 mm,此时复合焊接效果较稳定.

2.2.1 激光功率的影响

激光功率对于焊缝横截面气孔率的影响是显著

的,激光功率增大时,焊缝中气孔率减小,如图 4 所示. 这是因为随着激光功率的增加,焊接热输入增大,熔池面积更大,气泡的逸出表面也更大,焊缝熔池的凝固速度随之变慢,熔池中的气泡上浮时间更长,从而使得更多的气体逸出. 同时,较大的激光功率使得喷发的金属蒸气更剧烈,一方面有可能形成对熔池的保护作用,阻止外界气体进入熔池;另一方面在喷发过程中可能带出 CO 气体,使其迅速排出. 这两者结合使得液态金属内的气泡有更多的机会逸出焊接熔池,从而使得焊缝中的气孔减少,当激光功率达到 3.9 kW 以上时,气孔率可降低至 1% 以下.

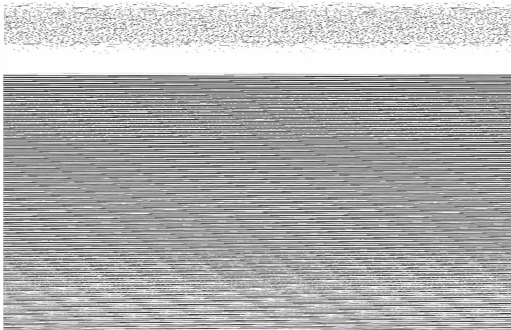


图 4 激光功率对气孔率的影响 ($I = 140 \text{ A}$, $v_f = 1.8 \text{ m/min}$, $v_w = 1.0 \text{ m/min}$)

Fig. 4 Effects of laser power on porosity

2.2.2 送丝速度的影响

焊丝中的含碳量较低,且含有较多具有脱氧作用的硅、锰等成分可能有利于抑制焊缝中 CO 气孔的生成,但添加焊丝后熔敷金属填充量增多,焊丝会消耗更多的热源能量,降低熔池温度,熔池的凝固速度加快,不利于气孔的逸出. 图 5 显示的是送丝速度对气孔率的影响,可以看出,当送丝速度接近于 0 时,此时相当于不填丝的激光-TIG 复合焊接,焊接过程稳定,质量好,气孔很少,此后,随着送丝速度增加,当其较小时,焊缝中气孔率逐渐增加,这是因为添加焊丝很少时,其对气孔的抑制作用小于对熔池的冷却作用;当送丝速度继续增加,可以获得最佳参数,此时添加焊丝抑制气孔的作用大于冷却熔池的作用,气孔率达到最小值,当送丝速度为 2.5 m/min 时,气孔率降低至最小值为 0.17%. 当送丝速度超过此值较多时,不仅成形较差,且气孔率明显上升,此时焊丝的脱氧作用有限,而熔池的凝固速度明显加快,熔池的高温停留时间很短,气孔逸出困难,从而聚集在焊缝中.

2.2.3 保护气体流量的影响

保护气体的主要作用是在焊接过程中保护熔池

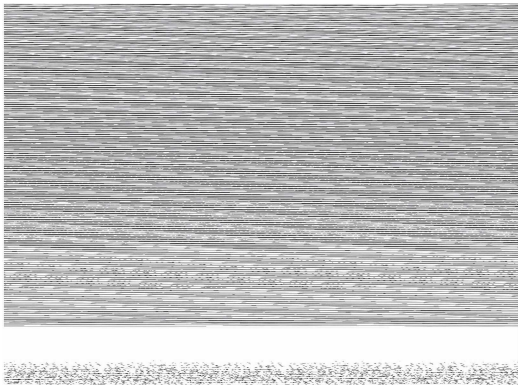


图 5 送丝速度对气孔率的影响 ($P=4.0\text{ kW}$, $I=140\text{ A}$, $v_w=1.0\text{ m/min}$)
Fig. 5 Effects of wire feed speed on porosity

免受外界空气的侵扰和形成电弧等离子体. 图 6 为 MATLAB 二值化处理后焊缝 X 光底片, 显示了保护气体流量对打底焊中气孔率影响. 当保护气体流量为 10 L/min 时, 焊缝中气孔率较大, 这可能是因为保护气体对于熔池保护不够, 从而导致氧气侵入熔池发生反应. 而当保护气体流量升高到 20 L/min 时, 焊缝中气孔数量明显下降, 除保护效果增强外, 可能是较大的保护气体流量对熔池有一定搅拌作用, 从而加快气泡逸出的速度^[9]. 但是保护气体流量不应升高太高, 当保护气体流量为 30 L/min 时就会出现由于保护气体吹力过大而引起焊缝成形不稳定.

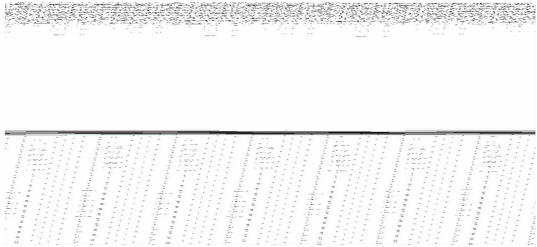


图 6 保护气体流量对气孔率的影响 ($P=4.0\text{ kW}$, $I=140\text{ A}$, $v_w=1.0\text{ m/min}$)
Fig. 6 Effects of shielding gas flux on porosity

2.2.4 焊接速度的影响

当焊接速度从 0.4 m/min 增大到 1.8 m/min 时 (超过 1.8 m/min 后焊缝成形较差), 焊缝中气孔率先增大后减小, 如图 7 所示. 当焊接速度较大时, CO 气体的生成成为影响气孔率的主要因素, CO 气孔为反应型气孔, 当空气中的氧气或者工件上的氧化物进入熔池之后, 与熔池中的 C 元素接触并进行反应产生 CO 需要一定的时间, 当焊接速度较快时, 反应时间变短, 反应生成的 CO 量也相对较少. 此外, 当金

属降温时, 反应生成的 CO 要从熔融金属中析出形成气泡, 而根据式 (4)^[10], 气泡中的 CO 含量会因为焊接速度的上升而下降, 因而当焊接速度较高时, 焊缝中的气孔率较低. 当焊接速度较低时, CO 已经生成且有足够的时间从熔融金属中析出, 此时熔池的存在时间就成了影响 CO 气孔从熔池中逸出的主要因素, 故焊接速度较低的时候焊缝中气孔率相对较低. 在焊接速度为 1 m/min 时气孔率取得极大值也是以上两种气孔产生影响因素共同作用的结果.

$$\frac{\partial C_g}{\partial t} + \left(\frac{R}{r}\right)^2 \cdot \frac{dR}{dt} \cdot \frac{\partial C_g}{\partial r} = D \cdot \frac{\partial^2 C_g}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \cdot D \cdot \frac{\partial C_g}{\partial r} \quad (4)$$

式中: t 为时间; R 为气泡半径; D 为气体在熔融金属中的扩散率; r 为球极坐标; C_g 为气体浓度. 同时, 随着焊接速度的降低, 气孔产生的位置更趋向于熔合线, 这可能是由于熔合线附近是固液相交界面, 气体形核能更低, 已经形成的气泡也更容易附着于其上, 随着时间的推移, 在熔合线附近的气泡被保留下来形成了气孔.

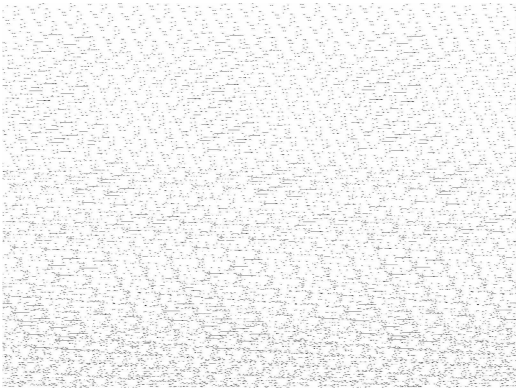


图 7 焊接速度对于气孔率的影响
Fig. 7 Effects of welding speed on porosity

3 结 论

- (1) 气孔是 D406A 超高强钢激光-TIG 复合填丝焊接的主要缺陷之一. 结合扫描电子显微镜 (SEM)、X 射线能谱仪 (EDS) 等方法, 发现气孔底部有明显的 C、O 元素富集, 其 C、O 元素质量分数分别为 17.69% 、 18.9% , 根据线扫描分析与理论计算相结合, 分析其气孔为 CO 气孔.
- (2) 激光-TIG 复合填丝焊接过程中, 适当增大激光功率、减小送丝速度、增大保护气体流量和焊接速度可改变熔池热循环及流动特性, 减少气孔的产生及促进气孔溢出, 在确保成形良好的情况下, 气孔率可达到 1% 以下, 可用来实现焊缝中 CO 气孔的抑制.
- (3) 在考虑到焊缝成形的基础上, 选定了最佳

参数范围为 d_{L-A} 为 3 mm, d_{L-w} 为 2 mm, 激光功率 4 200 ~ 4 600 W, 电弧电流 120 ~ 140 A, 焊接速度 1.4 ~ 1.8 m/min, 送丝速度 1.8 ~ 2.6 m/min 采用 Ar + 10% CO₂ 作为保护气体, 流量 20 ~ 25 L/min.

参考文献:

[1] 陈孝龙. D406A 钢焊接工艺研究[J]. 航天制造技术, 2004 (4): 12 - 15.
Chen Xiaolong. Study on welding process of D406A steel[J]. Aerospace Manufacturing Technology, 2004(4): 12 - 15.

[2] Tomita Y. Development of fracture toughness of ultrahigh strength, medium carbon, low alloy Steels for aerospace applications[J]. International Materials Reviews, 2000, 45(1): 27 - 37.

[3] 张 鹏, 张 文, 王生斌. 固体火箭发动机用 D406A 钢前连接件的加工工艺研究[J]. 航天制造技术, 2011(4): 12 - 14, 27.
Zhang Peng, Zhang Wen, Wang Shengbin. Machining process study on D406 steel front joint piece applied in solid rocket motor [J]. Aerospace Manufacturing Technology, 2011(4): 12 - 14, 27.

[4] 彭昌永. 超高强钢壳体的电子束及手工钨极氩弧焊接技术研究[D]. 成都: 四川大学, 2003.

[5] 张林杰, 张建勋, 曹伟杰, 等. 工艺参数对 304 不锈钢脉冲 Nd:YAG 激光/TIG 电弧复合焊焊缝成形的影响[J]. 焊接学报, 2011, 32(1): 33 - 36.
Zhang Linjie, Zhang Jianxun, Cao Weijie, *et al.* Effect of process parameters on weld formation of 304 stainless steel by

pulsed Nd: YAG laser/TIG arc hybrid welding[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2011, 32(1): 33 - 36.

[6] 冉国伟, 宋永伦, 闫思博, 等. 2219 铝合金复合热源焊接工艺及接头性能[J]. 焊接学报, 2011, 32(9): 25 - 29.
Ran Guowei, Song Yonglun, Yan Sibo, *et al.* Welding process and joint performance of 2219 aluminum alloy with compound heat source[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2011, 32(9): 25 - 29.

[7] 陈彦宾, 陈 杰, 李俐群, 等. 激光与电弧相互作用时的电弧形态及焊缝特征[J]. 焊接学报, 2003, 24(1): 18 - 19.
Chen Yanbing, Chen Jie, Li Liquan, *et al.* Arc shape and characteristics of welds in the interaction of laser and arc[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2003, 24(1): 18 - 19.

[8] 马 然, 董珣喆, 吴世凯, 等. 薄板钛合金光纤激光-TIG 电弧复合焊接工艺研究[C]//第 15 届全国特种加工学术会议, 2013.

[9] 莫仲海. 30CrMnSiA 钢激光焊接气孔成因及控制[D]. 绵阳: 中国工程物理研究院, 2008.

[10] Mazar Atabaki M, Ma J, Liu W, *et al.* Pore formation and its mitigation during hybrid laser/arc welding of advanced high strength steel[J]. Materials & Design, 2015, 67: 509 - 521.

作者简介: 杨雨禾,男,1992 年出生,硕士. 主要从事激光焊接方面的研究. Email: yyh_hit@163.com

通讯作者: 雷正龙,男,博士,副教授. Email: leizhenglong@hit.edu.cn

[上接第 80 页]

[3] 芦凤桂, 姚 舜, 钱伟方. 钨极氩弧焊焊接电弧数值分析[J]. 上海交通大学学报, 2003, 37(12): 1862 - 1865.
Lu Fenggui, Yao Shun, Qian Weifang. Numerical analysis on tungsten inert gas welding arc[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2003, 37(12): 1862 - 1865.

[4] 芦凤桂, 姚 舜, 楼松年, 等. 熔池表面变形对电弧行为特征的影响[J]. 焊接学报, 2004, 25(2): 57 - 60.
Lu Fenggui, Yao Shun, Lou Songnian, *et al.* Effects of weld pool surface deformation on behavior characters of welding arc[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2004, 25(2): 57 - 60.

[5] Lu F, Tang X, Yu H, *et al.* Numerical simulation on interaction between TIG welding arc and weld pool[J]. Computational Materials Science, 2006, 35(4): 458 - 465.

[6] Ushio M, Matsuda F. Mathematical modelling of heat transfer of

welding arc (part 1) (welding physics, processes and instruments)[J]. Transactions of Jwri, 1982, 11(1): 7 - 15.

[7] Fan D, Ushio M, Matsuda F. Numerical computation of arc pressure distribution (welding physics, process & instrument)[J]. Transactions of Jwri, 1986, 15(1): 1 - 5.

[8] 郭朝博, 石 玗, 黄健康, 等. 基于 Fluent 的 TIG 焊电弧数值模拟[J]. 电焊机, 2011, 41(3): 11 - 14.
Guo Chaobo, Shi Yu, Huang Jiankang, *et al.* Numerical simulation of TIG welding arc based on fluent[J]. Electric Welding Machine, 2011, 41(3): 11 - 14.

作者简介: 张晓鸿,男,1991 年出生,硕士研究生. 主要研究方向为焊接结构及应力计算. Email: inovme@163.com

通讯作者: 陈静青,女,博士,硕士研究生导师. Email: manbu880@163.com