

DOI: 10.7512/j.issn.1001-2303.2024.04.16

# 封闭式自熔焊工艺参数对薄壁不锈钢管 焊缝成形的影响

王 龙, 毛琪钦, 石佳文, 刘挺松

上海宝冶工程技术有限公司, 上海 200942

**摘 要:** 采用封闭式机头对 $\varnothing 12\text{ mm}\times 2\text{ mm}$ 的不锈钢洁净管进行全机械化的钨极氩弧焊自熔焊, 研究了不同焊接工艺参数对薄壁不锈钢管焊缝成形的影响。通过拉伸、弯曲、无损检测、宏观金相试验验证了薄壁不锈钢管的接头力学性能与组织特征, 针对不同焊接位置制定了焊接工艺参数。结果表明, 基/峰值电流、占空比、钨极高度和保护气流量是影响焊缝成型的主要因素。回转焊接时, 当焊接位置由立向上改变至立向下焊接时, 需加大基/峰值电流, 以避免焊缝出现外表面塌陷和内表面凹陷。焊接接头微观组织为奥氏体+铁素体, 接头抗拉强度接近于母材, 弯曲试验中无裂纹产生, 探伤试验无气孔、裂纹等缺陷产生, 各项性能均满足相关标准要求。

**关键词:** 封闭式自熔焊; 薄壁不锈钢管; 焊接工艺参数; 焊缝成型

中图分类号: TG406 文献标识码: A 文章编号: 1001-2303(2024)04-0111-06

## Effect of Closed Self-fusion Welding Process Parameters on Weld Forming of Thin Thickness Stainless-steel Tube

WANG Long, MAO Qiqin, SHI Jiawen, LIU Tingsong

Shanghai Baoye Engineering Technology Co., Ltd., Shanghai 200942, China

**Abstract:** The fully mechanized gas tungsten arc welding (GTAW) of a closed-head on a thin-walled stainless steel pipe with dimensions of  $\varnothing 12\times 2\text{ mm}$  was systematically studied to investigate the effects of various welding parameters on the weld formation. Tensile, bending, non-destructive testing, and macroscopic metallographic examination methods were employed to verify the mechanical properties and microstructure characteristics of the welded joints in thin-walled stainless steel pipes. Ideal welding parameters were developed for different welding positions. The results indicate that the base/peak current, duty cycle, tungsten electrode height, and shielding gas flow rate are the primary factors affecting weld formation. During orbital welding, when the welding position changes from an upright to a vertical downward position, it is necessary to increase the base/peak current to prevent weld defects such as external surface collapse and internal surface depression. The microstructure of the welded joint consists of austenite and ferrite, with the tensile strength of the joint approaching that of the base material. No cracks were observed in the bending test, and no defects such as pores and cracks were detected in the flaw detection test, meeting all relevant standards and requirements.

**Keywords:** closed self-melting welding; thin-walled stainless steel pipe; welding process parameters; weld formation

**引用格式:** 王龙, 毛琪钦, 石佳文, 等. 封闭式自熔焊工艺参数对薄壁不锈钢管焊缝成形的影响[J]. 电焊机, 2024, 54(4): 111-116.

**Citation:** WANG Long, MAO Qiqin, SHI Jiawen, et al. Effect of Closed Self-fusion Welding Process Parameters on Weld Forming of Thin Thickness Stainless-steel Tube[J]. Electric Welding Machine, 2024, 54(4): 111-116.

## 0 引言

薄壁不锈钢管是指壁厚与外径之比不大于6%

的不锈钢管道, 具有坚固耐用、耐腐蚀性强、环保卫生、强度高寿命长、免维护美观等综合优良特点, 在医疗用水、建筑给水、直饮水管道、净水核电管道等

收稿日期: 2023-09-26 修回日期: 2023-12-10

作者简介: 王 龙(1990—), 男, 硕士, 主要从事建筑钢结构领域低碳钢、不锈钢及复合板材料的焊接工艺研究。E-mail: Mccwanglong@163.com。

领域中被广泛采用<sup>[1-3]</sup>。封闭式自熔焊接工艺是在焊接过程中不添加焊丝的情况下,利用电弧产生的焊接热量直接熔化被焊金属母材,使材料实现良好焊缝成形的焊接工艺方法<sup>[4-5]</sup>。相比于普通自熔焊接,封闭式结构通过对焊接工艺参数的前期调整,焊接时在封闭的空间内进行,降低了焊接弧光对人体的伤害,且更容易实现焊接全过程的模拟与自动化。面对洁净薄壁不锈钢管焊接精度高、焊缝成形质量高等特殊要求,采用封闭式自熔焊自动化焊接设备在提高焊接效率和成形质量的同时,降低了焊接污染风险,大大提升人工难以实现的管道的高精度与高洁净度,是当下洁净薄壁不锈钢管焊接领域发展的新趋势<sup>[6-7]</sup>。

为此,本试验采用全封闭式的焊接机头对薄壁小管径不锈钢管进行自熔焊接,研究不同焊接参数对焊缝成形的影响,探究最佳的焊接工艺参数。在薄壁洁净不锈钢管焊接中具有重要的理论研究意义与工程实用价值,可为薄壁洁净不锈钢管焊接提供科学依据。

## 1 试验设备与材料

针对目前洁净管中多为壁厚小于3 mm的小管径不锈钢管的焊接现状,对现有自动化焊接成套设备、配套工装以及适用范围进行了深入分析。结果表明,在薄壁不锈钢管自熔焊接过程中,使用不超过100 A焊接电流是可行的。为适应现场作业的需求,选用便携式的封闭式焊接机头,如图1所示。



图1 封闭式焊接机头在现场的应用

Fig. 1 Application of closed welding head in field

为了进行工艺试验,选用POLYSOUDE生产的PS 164型焊接电源,并配备MW 85型全封闭式焊接

机头以及特殊定制的管卡盘夹。焊机及机头设备如图2所示。



图2 焊机设备与自熔式封闭焊接机头

Fig. 2 Welding equipment and self-fusing sealing head

试验材料为尺寸 $\varnothing 12 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$  X2CrNiMo17-12-2不锈钢管,其主要化学成分与力学性能如表1所示。考虑到不锈钢管的外径尺寸与壁厚,针对性选择焊机设备内的可参考程序与封闭式机头的相关参数,如表2所示。

表1 X2CrNiMo17-12-2不锈钢管的主要力学性能及化学成分(质量分数,%)

Table 1 Main chemical composition and mechanical properties of X2CrNiMo17-12-2 stainless steel (wt. %)

| C     | Si   | Mn   | P        | S     | Cr    |
|-------|------|------|----------|-------|-------|
| 0.023 | 0.36 | 0.56 | 0.035    | 0.001 | 16.65 |
| Ni    | Mo   | N    | 抗拉强度/MPa |       | 伸长率/% |
| 10.22 | 2.01 | 0.01 | 575      |       | 56    |

表2 封闭式机头相关参数

Table 2 Related parameters of closed self-fusion welding head

| 机头型号           | 机头预装卡盘直径                    | 参考值R30 | 每转脉冲数 |
|----------------|-----------------------------|--------|-------|
| MW 85          | $\varnothing 12 \text{ mm}$ | A033   | 364   |
| 因素C(VP=C*VL/D) |                             | 内置程序编号 | 适用材料  |
| 58             |                             | 01A    | 不锈钢   |

## 2 试验准备

### 2.1 试件装配

为了满足试验用封闭式机头卡盘夹对焊接试件高精度对中要求,试验前使用管子坡口机对圆管进行精细加工,确保接头处平整、无飞边毛刺。同时考虑到不锈钢管壁厚较薄,管径整体较小,采用如图3所示的I型坡口设计。装配时,首先将不锈钢管一侧固定在卡盘夹上,并确保封闭机头内的钨极与焊缝中心线对齐,再将另一侧不锈钢管进行对

中,确保组对间隙和对接错边量均小于0.5 mm。最后,通过遥控装置将钨极复位并封闭机头,准备焊接,如图4所示。

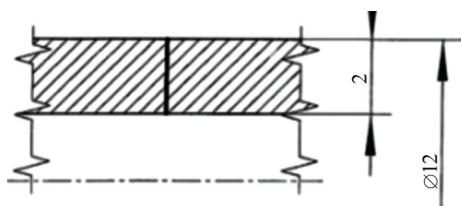


图3 焊接坡口示意

Fig. 3 Schematic diagram of welding groove



图4 封闭式机头装配

Fig. 4 Assembly schematic diagram of self-fusing sealing head

## 2.2 变形控制

由于试验采用的是壁厚为2 mm的薄壁不锈钢管,为确保在焊接过程中试管不发生焊接变形,首先,需要针对管径大小定制或选取符合试管规格的卡盘夹,利用卡盘夹对试管进行必要的刚性固定;其次,坡口端面要进行精细的打磨找平,避免坡口面倾斜而引起前期装配时的变形;最后,由于工艺试验选用的试管长度均为150 mm,试管自身重力对接头处装配影响较小,可以在试管两侧无支撑的情况下进行水平固定位置施焊,而针对管径较大、长度较长的试管进行焊接时,需要对管两侧进行支撑固定,以减少试管自身重力对焊接时产生变形带来的影响。

## 3 焊接工艺参数对焊缝成形的影响

封闭式自熔焊接的关键工艺参数包括峰值电流、基值电流、电压、脉冲频率、占空比、焊接转速、焊接位置和气流量等。材料种类、管外径与壁厚、钨极尖端距管表面的距离是影响焊缝成型的主要

因素。焊接转速取决于试管的规格尺寸和机头参数。管径大小直接影响焊接参数的设定,因此需要根据管径进行分段焊接,并根据钨极旋转位置与转速匹配焊接电流。

### (1)起弧位置。

通过焊机内部编程与大量试验,确定小管径水平固定对接时最佳起弧位置为6点位置处,以便引弧后提供足够的焊接热输入熔化金属。焊接过程中,钨极顺时针旋转1+1/4周,保证起弧处熔透且无缺陷。

### (2)钨极高度。

试验表明,钨极与焊缝表面的距离对焊缝质量至关重要。钨极距焊缝表面距离较远会减小电弧的能量密度,从而减少熔透深度,导致焊缝熔深变浅,容易出现管子内侧根部未熔合的情况,而减小钨极与焊缝表面的距离会增加熔透深度,同时氩气可以更好的覆盖焊接区域,提供更好的保护效果,防止氧化和其他污染,但距离过近,也容易引发烧穿等质量问题。因此,经大量实验与机头参数参考,确定钨极距焊缝表面的最佳距离为1.2 mm。

### (3)气体流量。

保护气流量的选择对焊缝成形有较大的影响。前送气和后送气可使保护气充满整个封闭腔,管内充氩可有效防止焊缝表面及内部的氧化,同时保护气还能增加电弧挺度、焊缝宽度,减小自熔焊时表面凹陷深度,改善管子根部焊缝成形和塌陷等问题。最终选择正面10 L/min,背面3 L/min的99.99%纯氩作为气体保护。

### (4)脉冲电流与焊接位置。

不同分段位置的脉冲电流设置对焊缝成形有着较大的影响,分段与焊接位置如图5所示。在S1-S2段(6点至9点),由仰焊位置变至横焊位置时可选用较小的峰值电流与基值电流,以防止焊接电流过大导致焊缝表面塌陷。当顺时针旋转至S2-S3段(9点至12点),由于焊接位置由横焊变为平焊,需要及时增大峰值电流和基值电流,以弥补因焊接位置改变导致的焊接热输入降低。继续旋转至S3-S4段(12点至3点)后,焊接位置由立向上焊转变为立向下焊,此时在旋转速度不变的情况下焊接热输入明显减少,需要大幅提升峰值电流和基值电流,以

避免焊缝根部出现未熔合的问题。最后,旋转至 S4-S1 段(3 点至 6 点)由横焊变至仰焊位置,可适当减小峰值与基值电流,控制整体热输入量与熔池的流动,达到理想的焊缝成形效果。

#### (5) 脉冲频率与占空比。

脉冲频率对焊缝表面的成形效果具有影响。脉冲频率越高,焊缝表面波纹越密实,且随着频率的增大,焊接过程中的热输入趋于稳定,焊缝外表面成形更加美观。占空比决定了峰值电流与基值电流的持续时间,当占空比增大时,峰值电流持续时间也会相应延长,从而在峰值电流数值不变的情况下,焊接热输入也会增大,这有助于提升焊缝的熔透能力。反之,当占空比较小时,基值电流的持

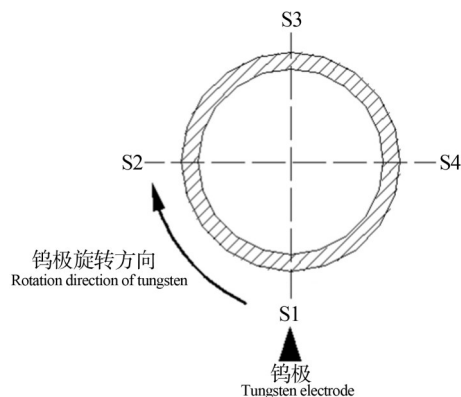


图5 分段与焊接位置示意

Fig. 5 Schematic diagram of section and welding position

续时间增加,更有利于焊缝根部的熔透。因此,试验封闭式自熔焊的焊接工艺参数选择如表3所示。

表3 封闭式自熔焊焊接工艺参数

Table 3 Welding parameters of self-fusing sealing head

| 焊道    | 焊接方法 | 峰/基值电流<br>/A | 峰/基值电压<br>/V | 电流种类<br>与极性 | 脉冲频率<br>/Hz | 占空比<br>/% | 焊接速度<br>/(cm·min <sup>-1</sup> ) | 热输入<br>/(kJ·cm <sup>-1</sup> ) |
|-------|------|--------------|--------------|-------------|-------------|-----------|----------------------------------|--------------------------------|
| S1-S2 | GTAW | 69/18        | 10.8~11.2    | 脉冲电流        | 5           | 50        | 7.5                              | 1~4                            |
| S2-S3 | GTAW | 70/20        | 10.8~11.2    | 脉冲电流        | 5           | 50        | 7.5                              | 1~4                            |
| S3-S4 | GTAW | 80/24        | 10.8~11.2    | 脉冲电流        | 5           | 50        | 7.5                              | 1~4                            |
| S4-S1 | GTAW | 73/20        | 10.8~11.2    | 脉冲电流        | 5           | 50        | 7.5                              | 1~4                            |

## 4 焊接过程检测与控制

在进行全封闭的施焊过程中,焊接过程的检测与控制也起着至关重要的作用。首先,焊机自带的检测系统可以实时监测封闭施焊下各类参数是否按照预设的程序执行,如焊接电流、电压、焊接速度输出是否准确,通过焊接过程中实时监测焊机屏显下各类参数的波动,可大致推断出某一段焊道是否存在明显的焊接缺陷,进而进行实时记录并对特定段进行重新编程与试验,控制降低该段焊接缺陷发生的概率。

其次,在施焊过程中可以根据检测到的参数变化进行及时的调整,以确保焊接过程始终处于最佳状态。例如,当检测到行进至某段焊接电流偏离了设定值时,此时可以通过遥控装置及时调整焊接电流以使其回到设定值附近,从而避免焊接质量下降。另外,遥控系统还可以实现焊接参数的优化调整,以提高焊接效率和质量。

再者,检测和控制系統还会利用传感器、监控

系统、数据采集与分析技术等手段对实时焊接过程中的数据进行收集,并将数据传输给监控系统进行分析和处理,从而保证在全封闭的前提下焊接质量达到要求。

## 5 试验结果分析

### 5.1 焊缝成形效果

∅12 mm×2 mm 不锈钢管焊后的成形效果如图6所示。可以看出,焊缝表面光滑平整,外表面无明显塌陷,管子内部成形良好,未出现根部凹陷及氧化等焊接缺陷,表明整体焊接工艺参数选择合理。

### 5.2 焊接接头微观组织

焊接接头焊缝与熔合区的微观组织如图7所示。可以看出,焊缝区组织主要由为奥氏体+铁素体组成<sup>[8-9]</sup>。由于脉冲电流的影响,焊缝区的组织晶粒细小且均匀,熔合区的晶粒由熔合线向焊缝中心方向生长<sup>[10-12]</sup>,均未发现显微裂纹以及其他异常组织,结果合格。



图 6 焊缝成形效果

Fig. 6 Weld forming effect

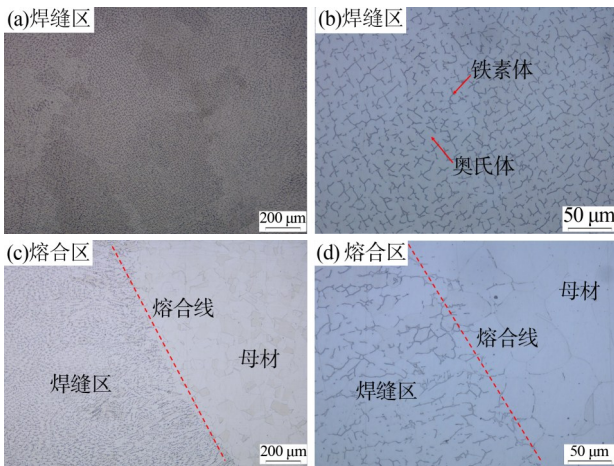


图 7 焊缝及熔合区微观组织

Fig. 7 Microstructure of weld and fusion zone

5.3 焊接接头的力学性能

根据 ISO 15614-1: 2017 对焊接接头试样进行了拉伸与弯曲试验, 拉伸试验数据如表 4 所示。由表 4 可知, 焊接试样的抗拉强度达到了 573 MPa 和 572 MPa, 与母材的抗拉强度 575 MPa 非常接近, 这表明焊接接头的拉伸性能优异, 其抗拉强度完全满足标准要求。

表 4 不锈钢管拉伸试验数据

Table 4 Tensile test data of stainless-steel tube

| 编号 | 试样尺寸<br>/mm | 抗拉力<br>/kN | 抗拉强度<br>/MPa | 断裂位置 |
|----|-------------|------------|--------------|------|
| L1 | 11.92×2.23  | 38.89      | 573          | 焊缝   |
|    | 11.95×2.20  | 38.51      | 572          | 焊缝   |

弯曲试验数据如表 5 所示。由表可知, 采用弯心直径  $D=4a$  ( $a$  为试样厚度) 的弯轴对两个面弯和两个背弯试样做 180° 弯曲试验, 弯曲后试样表面无裂纹出现, 表明焊接接头的弯曲性能完全符合相关标准要求。

5.4 无损检测试验

根据相关标准对不锈钢管进行了射线检测与

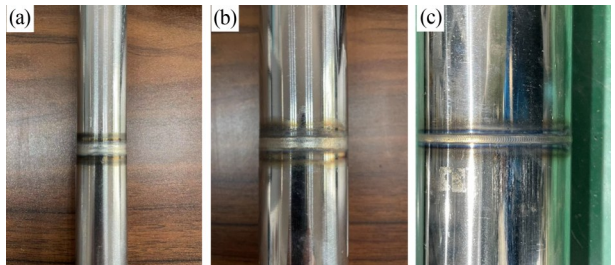
表 5 不锈钢管弯曲试验数据

Table 6 Bending test data of stainless-steel tube

| 试样<br>编号 | 试样<br>类型 | 试样厚度<br>/mm | 弯心直径<br>/mm | 弯曲角度<br>/(°) | 试验<br>结果 |
|----------|----------|-------------|-------------|--------------|----------|
| W1       | 面弯       | 2           | 4a          | 180          | 无裂纹      |
|          | 面弯       | 2           | 4a          | 180          | 无裂纹      |
|          | 背弯       | 2           | 4a          | 180          | 无裂纹      |
|          | 背弯       | 2           | 4a          | 180          | 无裂纹      |

渗透检测, 进而更好的验证工艺的可靠性与稳定性, 试验结果均合格, 未出现气孔、裂纹、未熔合以及未焊透等焊接缺陷。

通过以上试验研究, 初步形成了薄壁不锈钢管的封闭式自熔焊工艺技术, 为验证该工艺是否能合理有效地应用到其他规格的薄壁不锈钢管中, 还对  $\varnothing 27\text{ mm}\times 2\text{ mm}$ 、 $\varnothing 48\text{ mm}\times 2\text{ mm}$ 、 $\varnothing 89\text{ mm}\times 2.5\text{ mm}$  三种不同管径及壁厚的试管进行了焊接工艺试验, 焊缝成形效果如图 8 所示, 管子焊缝成形良好, 也证实了本焊接工艺的合理性及在不同管径及壁厚的不锈钢管焊接中的适用性, 为医疗用水管道、净水核电管道的焊接提供了一定的焊接工艺技术支撑, 后续也将继续针对不同材质、不同规格的试管进行焊接工艺研究。



(a)  $\varnothing 27\text{ mm}\times 2\text{ mm}$  (b)  $\varnothing 48\text{ mm}\times 2\text{ mm}$  (c)  $\varnothing 89\text{ mm}\times 2.5\text{ mm}$

图 8 三种不同规格试管焊缝成形

Fig. 8 Three different sizes tube weld forming

6 结论

通过采用封闭式的机头对薄壁不锈钢洁净管进行全机械化的钨极氩弧焊自熔焊, 讨论了各焊接工艺参数对焊缝成形的影响, 通过无损检测、力学性能检测与微观组织检测, 得到了薄壁不锈钢洁净管焊接的最佳工艺组合参数并得出以下结论:

(1) 采用封闭式自熔焊的焊接方法对薄壁不锈钢管焊接时基/峰值电流、占空比、钨极高度和保护

气流量是影响焊缝成型的主要因素。

(2)回转焊接时,焊接位置由立向上改变至立向下焊接时,基/峰值电流需加大,以保证焊缝不会出现外表面塌陷,内表面凹陷的焊接缺陷。

(3)焊接接头微观组织为奥氏体+铁素体组成,接头抗拉强度接近于母材,弯曲试验中无裂纹产生,探伤试验无气孔、裂纹等缺陷产生,各项性能均满足相关标准要求。

#### 参考文献:

- [1] 钱卫春. 薄壁不锈钢管全自动氩弧焊技术[J]. 化工建设工程, 2000, 22(6):18-19.  
QIAN W C. Fully automatic argon arc welding technology for thin-walled stainless steel pipes [J]. Chemical Engineering Construction, 2000, 22(6):18-19.
- [2] 郭树伟. S.S304薄壁不锈钢管背面充氮保护钨极氩弧焊工艺[J]. 焊接技术, 2001(z1):98.  
GUO S W. Tungsten argon arc welding process with nitrogen filling protection on the back of S. S304 thin-walled stainless steel pipe [J]. Welding Technology, 2001(z1):98.
- [3] 池爱君. 薄壁不锈钢管在室内燃气工程的应用[J]. 煤气与热力, 2009(8): 25-27.  
CHI A J. Application of Thin-wall Stainless Steel Pipe in Indoor Gas Engineering[J]. Gas & Heat, 2009(8): 25-27.
- [4] 刘波, 林盾. 采用不同锰含量冷作 0Cr18Ni10Ti 薄壁不锈钢管钨极氩弧环焊试验[J]. 焊接, 2016(9): 51-53+58.  
LIU B, LIN D. Girth welding of cold worked 0Cr18Ni10Ti thin wall stainless steel tube of different manganese content[J]. Welding & Joining, 2016(9): 51-53+58.
- [5] 吕旭伟, 朱德才, 谭文良, 等. 核电厂管道封闭式自熔焊的工艺研究[J]. 电焊机, 2020, 50(8):67-70.  
LV X W, ZHU D C, TAN W L, et al. Study on procedure of closed self-melting welding of pipelines in nuclear[J]. Electric Welding Machine, 2020, 50(8):67-70.
- [6] 倪良琴. 浅谈自动焊接机在机械焊接中的应用[J]. 黑龙江科技信息, 2014(33): 97.  
NI L Q. Discussion on the Application of Automatic Welding Machine in Mechanical Welding[J]. Heilongjiang Science and Technology Information, 2014(33):97.
- [7] 李宪臣, 蒋应田. 细径薄壁不锈钢管的氩弧焊接工艺[J]. 电焊机, 2006, 36(6):23.  
LI X C, JIANG Y T. Technology of TIG in small drive thin wall stainless steel tube [J]. Electric Welding Machine, 2006, 36(6):23.
- [8] 王步美, 陈挺, 徐涛, 等. 焊接工艺对奥氏体不锈钢焊接接头应变强化性能的影响[J]. 机械工程材料, 2013, 37(2):29-33.  
WANG B M, CHEN T, XU T, et al. Influence of Welding Technology on Strain Strengthening Properties of Austenitic Stainless Steel Welded Joints [J]. Materials For Mechanical Engineering, 2013, 37(2):29-33.
- [9] 栗卓新, 李国栋, 魏琪, 等. 不锈钢焊接冶金的研究进展[J]. 中国机械工程, 2005, 16(2):184-187.  
LI Z X, LI G D, WEI Q, et al. Latest Progresses of Stainless Steel Welding [J]. China Mechanical Engineering, 2005, 16(2):184-187.
- [10] 利波尔德, 科特茨基. 不锈钢焊接冶金学及焊接性[M]. 陈剑虹, 译. 北京:机械工业出版社, 2008.
- [11] 于启湛, 丁成钢, 史春元. 不锈钢的焊接[M]. 北京:机械工业出版社, 2009.
- [12] 姬晶. 奥氏体不锈钢焊接性分析[J]. 煤矿机械, 2008(07):85-86.  
JI J. Austenite Stainless Steel Weldability Brief Analysis [J]. Coal Mine Machinery, 2008(07):85-86.

编辑部网址: <http://www.71dhj.com>