

焊接工艺对 2205 双相不锈钢接头组织与性能的影响

Effect of Welding Process Parameters on Structure and Property of 2205 Duplex Stainless Steel Weld Joint

韩志诚¹, 王少刚¹, 胡经洪², 徐风林¹

(1 南京航空航天大学 材料科学与技术学院,

南京 210016; 2 张家港江南压力容器有限公司, 江苏 张家港 215600)

HAN Zhi-cheng¹, WANG Shao-gang¹, HU Jing-hong², XU Feng-lin¹

(1 College of Material Science and Technology, Nanjing University of

Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China; 2 Zhangjiagang Jiangnan

Boilers and Pressure Vessels Limited Company, Zhangjiagang 215600, Jiangsu, China)

摘要: 针对 2205 双相不锈钢的性能特点, 焊接时通过优化焊接工艺以有效控制焊接热循环, 使接头中能获得预期的显微组织和相比例。对获得接头进行力学性能测试, 利用扫描电镜和光学显微镜观察分析其显微组织结构。结果表明: 采用混合气体(氩气+ 2.5% 氮气, 体积分数)保护的钨极氩弧焊能使获得接头具有较高的强度, 接头焊接区保持了与母材相同的组织结构和较为接近的相比例。

关键词: 双相不锈钢; 焊接工艺; 组织; 性能

中图分类号: TG457 文献标识码: A 文章编号: 1001-4381(2008)08-0048-04

Abstract: When welding thermal cycle was controlled effectively by optimizing welding technology, the ideal microstructure and phase proportion can be obtained in the weld joint. According to the characteristics of 2205 duplex stainless steel, the mechanical properties of the weld joint were tested with tensile machine, and the joint microstructure was analyzed by using scanning electron microscope and optical microscope. The results showed that the higher strength can be obtained with the welded joint by using mixed gas (argon + 2.5% nitrogen, volume fraction) tungsten arc welding. The analysis of microstructure illustrates that the weld joint had almost the same phase structure and similar phase proportion as that of base material.

Key words: duplex stainless steel; welding technology; structure; property

2205 是用途最为广泛的双相不锈钢之一, 因为其优良的力学性能和耐腐蚀性能, 在石油天然气输送、海洋工程、化学工业、发电行业等具有广阔的应用前景。由于焊接作为一种重要的材料加工手段, 对双相不锈钢的发展以及应用有着举足轻重的作用。依据目前的研究进展, 双相不锈钢在焊接中的主要问题不在焊缝, 而是在热影响区, 即对热影响区双相比例的控制^[1]。因为在焊接热循环作用下, 热影响区处于快冷非平衡态, 冷却后可能保留更多的铁素体, 导致增大接头的腐蚀倾向和氢致裂纹的敏感性。因此, 采用合适的焊接方法, 通过有效地控制焊接热循环, 促进焊接过程中两相的平衡, 从而提高接头的力学性能以及耐腐蚀性能, 具有重大的理论

意义。基于此, 本工作针对 2205 双相不锈钢的性能特点, 采用不同焊接工艺进行焊接, 并对获得接头的组织和性能进行研究, 以期能为双相不锈钢在实际中的应用提供技术支持。

1 实验材料和焊接工艺

1.1 实验材料

本实验所用原材料均来自于瑞典三特维克和阿维斯坦公司, 母材为 SAF2205 (ASTM 240-00, UNS31803)、所采用的焊条为 E2209、焊丝为 ER2209, 其化学成分见表 1。2205 双相不锈钢在常温下的力学性能: 屈服强度 $\sigma_s > 550\text{MPa}$, 抗拉强度 $\sigma_b >$

750MPa, 维氏硬度 HV> 220。本实验选用母材的力学性能如下: 抗拉强度 $\sigma_b=860\text{MPa}$, HV= 280。

表 1 2205 双相不锈钢和填充焊丝的化学成分(质量分数/ %)

Table 1 Chemical composition of 2205 duplex stainless steel and filler metal(mass fraction/ %)

| | C | Mn | P | S | Si | Cr | Ni | Mo | N | Cu |
|---------------|-------|------|-------|-------|------|-------|-------|------|-------|-------|
| Base material | 0.016 | 0.82 | 0.024 | 0.001 | 0.36 | 22.48 | 5.46 | 3.12 | 0.16 | — |
| ER2209 | 0.013 | 1.54 | 0.018 | 0.007 | 0.49 | 22.92 | 8.61 | 3.18 | 0.17 | 0.012 |
| E2209 | 0.026 | 0.90 | 0.025 | 0.002 | 0.90 | 22.10 | 10.00 | 2.84 | 0.180 | 0.08 |

1.2 焊接工艺

将母材试样分别加工成尺寸为 300mm×150mm×6mm, 300mm×150mm×8mm 两种规格。采用山大奥太有限公司生产的 IXT-400ST G 型逆变式手弧/氩弧焊机(III)进行接头试样的焊接, 其中厚度为 8mm 的试样采用手工电弧焊(Shielded Metal Arc Welding, SMAW), 厚度为 6mm 的试样采用钨极气体保护焊(Gas Tungsten Arc Welding, GTAW)。焊接前先用丙酮对焊接区进行严格清洗, 焊接后接头不进行热处理。为了保证焊透, 并考虑到焊接热循环的影响, 采用多层多道焊, 这样进行每层焊接的同时又对上一层焊道起到热处理的作用, 可在一定程度上促进接头热影响区中的铁素体向奥氏体转变。为避免脆性相的析

出, 层间温度应控制在 150℃以下, 以减少焊接时在脆性温度区间停留的时间。具体焊接工艺参数和坡口形式分别见图 1 和表 2。由表 2 可知, 在采用的焊接工艺参数中, GTAW 和 GTAW* 所采用的焊接热输入量相差很小, 这样可降低两种不同焊接方法因热输入量不同所带来的影响。

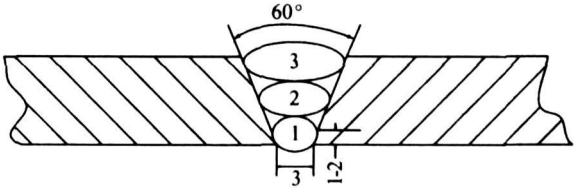


图 1 坡口形式及焊接层次示意图

Fig. 1 Diagram of welding bevel and welding procedure

表 2 接头焊接工艺参数

Table 2 Welding technology parameters of the joint

| Welding technology | Protective gas | Layer I | | | Layer II | | | Layer III | | |
|--------------------|-------------------------|--------------------|--------------------|---------------------------------------|--------------------|--------------------|---------------------------------------|--------------------|--------------------|---------------------------------------|
| | | Welding voltage/ V | Welding current/ A | Welding speed / (mm·s ⁻¹) | Welding voltage/ V | Welding current/ A | Welding speed / (mm·s ⁻¹) | Welding voltage/ V | Welding current/ A | Welding speed / (mm·s ⁻¹) |
| SMAW | — | 19-23 | 96-103 | 1.43 | 22-28 | 145-150 | 3.25 | 22-28 | 145-150 | 3.50 |
| GTAW* | Ar | 12-13 | 90 | 1.17 | 13-14 | 120 | 1.29 | 13-14 | 120 | 1.24 |
| GTAW | Ar+ 2.5% N ₂ | 10-11 | 99 | 1.09 | 11-12 | 124 | 1.22 | 11-13 | 130 | 1.19 |

2 结果及分析

2.1 力学性能测试及分析

2.1.1 拉伸实验

按照 TB4708- 2000 标准从接头部位截取试样进行拉伸实验。每种焊接工艺分别取五个试样进行拉伸实验, 三种不同工艺(GTAW, GTAW*, SMAW) 获得接头的抗拉强度平均值分别为 838.4, 884.7, 824.7MPa。接头拉伸断裂位置依次为热影响区、母材、焊缝。

分析可知, 双相不锈钢具有优异的力学性能源于其具有特殊的化学成分以及合理的双相比例, 尤其是氮元素的加入, 更是起到了举足轻重的作用。与奥氏

体不锈钢相比, 双相不锈钢具有导热性好, 热膨胀系数小等特点, 因此不会产生很大的残余应力, 具有更高的抵抗热裂纹能力。接头残余应力受焊接线能量变化的影响不大, 同时多层焊的残余应力会不同程度的降低。文献[2] 指出, 当铁素体体积分数小于 50% 时, 焊缝金属对氢致裂纹不敏感, 当铁素体含量大于 50% 后, 随着铁素体含量的增加, 氢致裂纹的敏感性将显著增加。当氮的质量分数超过 0.2% 时, 由于氮的间隙固溶强化使得奥氏体的强度大于铁素体^[3]。文献[4] 认为, 氮以间隙固溶的形式弥散分布在奥氏体内, 可在一定程度上弥补不锈钢因碳含量低而造成的接头低强度, 氮含量增加 0.1%, 材料的屈服强度可提高 10MPa。所以, 保护气体中氮的加入, 可促进两相的平衡, 有利于

2205 双相不锈钢接头获得满意的抗拉强度。但是, 由于接头受到多次热循环的影响, 易造成铁素体晶粒粗大, 在一定程度上降低了接头的抗拉强度。所以本工作中 GTAW 接头断裂在热影响区, 而对于 GTAW^{*} 接头和 SMAW 接头因其热影响区内的铁素体含量较高反而具有较高的抗拉强度, 但对于 SMAW 接头焊缝金属区在焊接过程中得不到保护易形成焊接缺陷, 这样接头在拉伸实验中可能断在不同的位置。

2.1.2 显微硬度测定

采用 HVS-50 型数显维氏硬度计测量接头的显微硬度, 测量条件: 负荷为 100g, 加载时间为 16s。测量方法为从母材(Parent Material, PM)-热影响区(Heat-affect Zone, HAZ)-焊缝金属(Weld Metal, WM)均依次进行测量, 每个点均测量三次, 然后取其平均值, 测量结果如图 2 所示。从图 2 可知, 氮的硬化作用在 2205 双相不锈钢接头中起着重要作用, 氮起到了碳的一部分作用, 既不因双相不锈钢的低碳而造成接头软化, 又不像碳那样会导致晶间氮化物析出, 降低接头的耐腐蚀性能。本实验过程中, 利用能谱分析测得 GTAW 焊接接头中氮的质量分数约为 1.83%, 这应该是利用混合气体保护焊接接头硬度大幅度上升的主要原因。保护气体中含有一定量的氮气, 增加了保护气体中氮的分压, 抑制了接头中氮元素的析出, 不仅如此, 熔池还能从电弧解离的氮气中吸收一部分氮元素, 通过此方式可以获得 0.1% 或者更多的氮含量^[5]。综合拉伸实验结果, GTAW 接头的抗拉强度低于 GTAW^{*} 接头, 但其硬度却高于后者, 氮元素对接头的

硬化具有较强的作用。

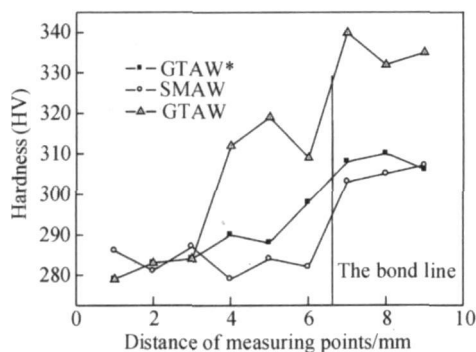


图 2 2205 双相不锈钢接头硬度曲线

Fig 2 Hardness curves of 2205 duplex stainless steel joint

2.2 接头微观结构分析

2.2.1 拉伸断口扫描电镜分析

拉伸断口扫描电镜(SEM)分析表明, 当采用混和气体保护焊时, 接头拉伸断口呈现明显的韧性断裂, 如图 3 所示。图 3 中的韧窝为典型的等轴韧窝, 其中图 3a 中韧窝的纤维区较大, 而放射区则较小, 这说明采用混合气体保护获得的接头具有较高的塑性。这是因为韧窝的大小、深浅和数量, 决定于材料断裂时微孔的核心数量(夹杂物或第二相质点)和材料本身的塑性。若微孔的核心数量多或材料的塑性较低, 则韧窝的尺寸小、数量多且较浅。通常, 韧窝越大越深, 材料的塑性越好。由此可见, 采用混合气体保护获得接头的塑性甚至还要略好于母材, 如图 3b 中所示为母材拉伸断口, 这与接头拉伸试样的断裂位置相符合。

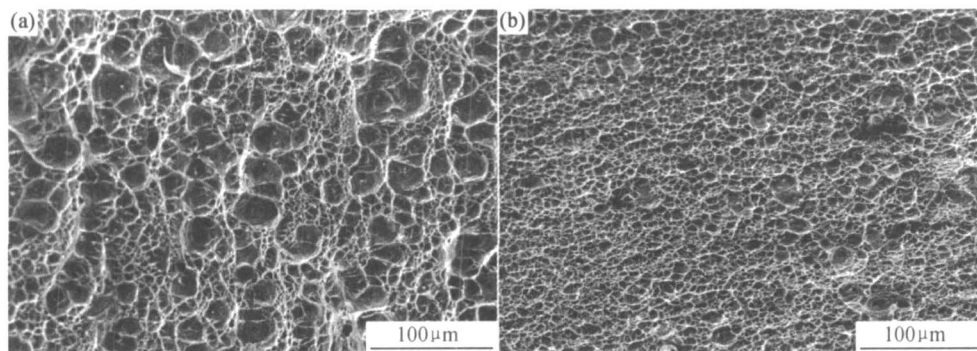


图 3 拉伸断口扫描电镜照片 (a) GTAW 焊接接头; (b) 母材

Fig. 3 SEM fracture structure of welded joint (a) GTAW welded joint; (b) base material

2.2.2 金相组织观察

图 4 为不同焊接工艺条件下获得接头的显微组织照片(10% 铬酸水溶液电解腐蚀, 腐蚀时间为 10~20s, 电压为 7.5V)。图 4a 为母材金相组织图, 在铁素体基体上均匀分布着相间的条块状奥氏体组织, 这是

2205 双相不锈钢具有优良力学性能和耐腐蚀性能的关键所在, 同时也是对 2205 双相不锈钢焊接性研究所追求的目标之一。从图 4b, c, d 中可看出, 采用三种不同焊接工艺获得接头的热影响区显微组织, GTAW 与母材最为接近, 奥氏体组织在铁素体基体中的分布较

为均匀,尤其是在焊缝处,无论是奥氏体的分布,还是奥氏体条块的大小、数量都与母材相差无几,这与

GTAW 接头力学性能测试结果接近母材或略好于母材是相吻合的。

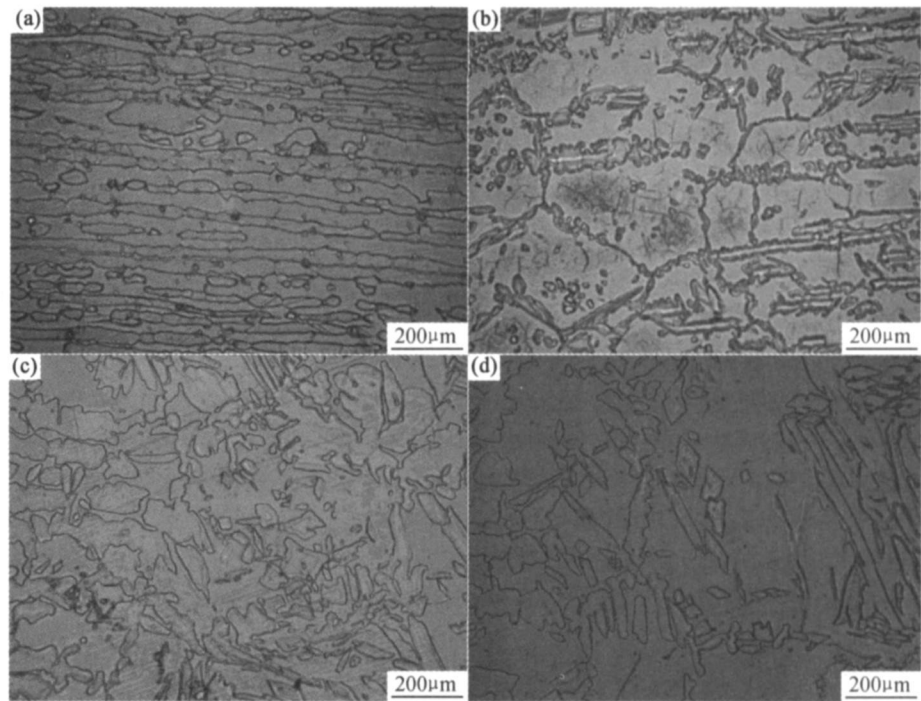


图 4 接头金相组织 (a) 母材; (b) SMAW (HAZ); (c) GTAW (HAZ); (d) GTAW* (HAZ)
Fig. 4 Microstructure of welded joint (a) base material; (b) SMAW heat-affected zone;
(c) GTAW heat-affected zone; (d) GTAW* heat-affected zone

对比 GTAW 和 GTAW* 两种工艺, GTAW 接头的显微组织明显好于 GTAW*, 这主要得益于保护气体中氮气的加入。氮元素和镍元素一样都是强烈的奥氏体形成元素, 但是氮元素的奥氏体形成能力比镍元素要高得多, 相关资料表明可达镍元素的 20 倍^[6]。另外, 氮从气相扩散到液体金属表面, 包括氮分子分解成氮原子和氮从液固界面扩散到液体金属内部两个过程, 混和气体中的氮均匀地覆盖在熔池表面, 这样既可避免采用高镍焊丝因成分偏析而造成的奥氏体分布不均匀性, 又可避免来自母材的稀释较小, 造成铁素体含量较低, 焊缝强度下降。

2.2.3 接头中双相比比例分析

2205 双相不锈钢具有优异的综合力学性能, 比奥氏体及铁素体有更好的耐腐蚀性, 尤其耐氯离子腐蚀, 最主要的原因在于其特殊的相结构和相比比例, 所以焊接接头中的相比比例是衡量焊接质量最主要的指标之一。理想的双相不锈钢组织应为铁素体和奥氏体各占 50%, 实际上每种材料的相含量在 30% ~ 60% 之间都属于正常。文献[7]提到, 采用标准图谱对比法测定双相比比例, 其缺点是误差大(±2.5%), 测定含量范围小(35% ~ 75%)。因此, 为了精确测定接头组织中的相含量, 本工作采用网格记点法测定接头中各相的含量。

通过对测量数据进行处理和误差计算, 以此作为最终的相比比例, 结果如图 5 所示。从图 5 可以看出, GTAW 热影响区和焊缝金属中奥氏体体积分数分别为 44.5%, 46%, 而 GTAW* 接头分别为 41% (HAZ) 和 44% (WM), GTAW 接头具有与母材(奥氏体体积分数为 46.5%)接近的奥氏体含量。焊缝的奥氏体相与母材中的相比仅差 0.5%, 即使是在相对比较难控制的热影响区, 奥氏体的含量也可达 44.5%。接头中保持合适的相结构比例, 是接头保持较高性能的主要

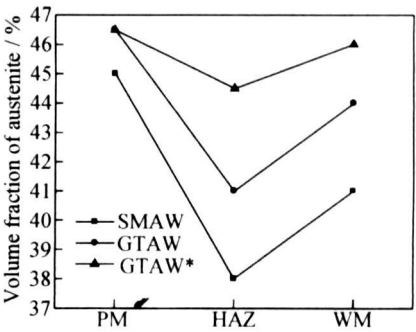


图 5 焊接接头相比比例曲线
Fig. 5 Phase proportion distribution of welded joint

- Coatings Technology, 2001, 139(2-3): 192-199.
- [2] 任虎平, 杨贵荣, 宋文明, 等. 铜及铜合金表面改性技术的研究进展[J]. 铸造, 2005, 54(3): 213-216.
- [3] HYUN-KI KANG. Microstructure and electrical conductivity of high volume Al_2O_3 -reinforced copper matrix composites produced by plasma spray [J]. Surface and Coatings Technology, 2005, 190(2-3): 448-452.
- [4] YANG Gui-rong, SONG Wen-ming, LU Jin-jun, et al. Microstructure of surface composite Al_2O_3 /Ni on copper substrate produced by vacuum infiltration casting [J]. Material Science and Engineering A, 2006, 418(1-2): 223-228.
- [5] SUBRANMANIAN C, CAVALLARO G, WINKELMAN G. Wear maps for titanium nitride coatings deposited on copper and brass with electroless nickel interlayers [J]. Wear, 2000, 241(2): 228-233.
- [6] 甘正浩, 毛志远, 沈复初, 等. 铜的气体表面渗硅新工艺研究[J]. 材料科学与工程, 1996, 14(4): 38-42.
- [7] 甘正浩, 毛志远, 沈复初, 等. 铜的表面含硅渗层的结构与性能[J]. 材料科学与工程, 1997, 15(1): 50-53.
- [8] 孙远敬, 岳立新, 张雅玲. 纯铜多元共渗及热处理工艺的研究[J]. 煤矿机械, 2006, 27(6): 1021-1022.
- [9] 石子源, 王学芝, 王德庆. 纯铜 Al_2O_3 表面弥散强化的研究[J]. 金属热处理学报, 1997, 18(4): 32-36.

- [10] 张毅, 田保红, 陈小红, 等. 纯铜稀土催渗铝及其内氧化[J]. 铸造技术, 2006, 27(3): 255-257.
- [11] BATENI M R, ASHRAFIZADEH F, SZPUNAR J A, et al. Improving the tribological behavior of copper through novel Ti-Cu intermetallic coatings [J]. Wear, 2002, 253(5-6): 626-639.
- [12] 张跃飞, 陈飞, 苏永安, 等. 纯铜加弧光离子渗钛的研究[J]. 金属热处理, 2002, 27(4): 27-28.
- [13] 袁庆龙, 张跃飞, 苏永安, 等. 纯铜等离子渗钛层的高温氧化[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2005, 25(2): 103-105.
- [14] ZANOTTI C, GIULIANI P, MAGLIA F. Combustion synthesis of Co-Al and Ni-Al systems under reduced gravity [J]. Intermetallics, 2006, 14(2): 213-219.
- [15] 卢燕平, 于福州. 渗镀[M]. 北京: 机械工业出版社, 1985. 32-33.

基金项目: 江苏省自然科学基金资助项目(BK2001013)

收稿日期: 2007-07-05; 修订日期: 2007-10-08

作者简介: 王红星(1971—), 男, 博士研究生, 主要从事金属材料表面改性 with 功能材料制备, 联系地址: 南京市江宁区东南大学材料科学与工程学院(211189)。E-mail: wangzhao2000922@163.com

(上接第 51 页)

原因。

3 结论

(1) 采用纯氩保护钨极氩弧焊及混合气体(氩气+2.5%氮气)保护钨极氩弧焊焊接工艺, 焊接时采用合理的焊接热输入, 均能使 2205 双相不锈钢接头获得奥氏体和铁素体双相组织。接头力学性能测试表明, 两种不同焊接工艺获得接头的抗拉强度均接近于母材组织; 断口扫描电镜分析可知, 混合气体保护焊获得接头呈明显韧性断裂特征。

(2) 采用混和气体保护氩弧焊(氩气+2.5%氮气)接头能保持较好的相比比例, 焊缝金属中的奥氏体相与母材中的相比仅差 0.5%, 即使是在相对比较难控制的热影响区, 奥氏体的含量也可达 44.5%, 奥氏体较为均匀地分布在铁素体基体中, 晶粒的大小也与母材相差无几, 接头性能因此提高。

参考文献

- [1] 邢卓. 双相不锈钢 2205 的焊接[J]. 管道技术与设备, 2006, (1):

28-30.

- [2] 柯黎明. 焊缝金属铁素体含量对氢致裂纹敏感性的影响[J]. 焊接学报, 1993, 14(3): 181-185.
- [3] 张建勋, 李卫为, 李庆琰. 2205 双相不锈钢焊接性研究综述[J]. 焊管, 2005, 28(5): 6-9.
- [4] U KAMACHI MUDALI, BALDER RAJ. High Nitrogen Steels and Stainless Steels [M]. LI Jing translation. Beijing: Chemical Industry Press, 2006. 9-14.
- [5] 埃里希·福克哈德. 不锈钢焊接冶金[M]. 栗卓新, 朱学军译. 北京: 化学工业出版社, 2004. 20-25.
- [6] LIOU HORNG-YIH, HSIEH RONG-IUAN, TSAI WEN-TA. Microstructure and stress corrosion cracking in simulated heat-affected zones of duplex stainless steels [J]. Corrosion Science, 2002, 44(3): 2841-2856.
- [7] 刘特森. 双相不锈钢中相含量的精确测定[J]. 理化检验-物理分册, 2003, 39(8): 414-419.

收稿日期: 2008-03-13; 修订日期: 2008-06-28

作者简介: 韩志诚(1981—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向: 双相不锈钢的焊接性及焊接工艺, 联系地址: 南京市江宁区 150 信箱 545 分箱(211100)。E-mail: zhicheng0413@126.com