

# 保护气体中氮气比例对高氮钢双面同轴 TIG 焊接工艺性的影响

强 伟<sup>1</sup>, 王克鸿<sup>1</sup>, 侯 瑶<sup>2</sup>

(1. 南京理工大学 材料科学与工程学院, 南京 210094; 2. 中共徐州市委组织部, 徐州 221003)

**摘 要:** 针对高氮低镍奥氏体不锈钢开展了双面同轴 TIG 自熔焊试验, 分析了保护气体成分对电弧电压、电弧形态、钨极形貌、焊缝气孔与含氮量的影响规律. 结果表明, 随着保护气体中氮气比例的提高, 平均弧压以三次函数的速度增大, 波动程度亦随之呈增大趋势; 氮气的加入导致电弧显著收缩, 焊后钨极表面覆盖棕褐色氮化钨薄层, 同时焊接飞溅增大, 电弧出现周期性“尾焰反射”现象, 焊接稳定性随氮气比例提高而变差; 随保护气体中氮气比例的提高, 焊缝气孔数量和最大气孔尺寸同时增加, 焊缝含氮量先增大后趋于稳定; 为了降低焊接不稳定和焊缝气孔的不利影响, 保护气体中氮气的比例应低于 20%.

**关键词:** 高氮钢; 双面同轴焊; 电弧电压; 电弧形态; 含氮量

**中图分类号:** TG 456. 9      **文献标识码:** A      **doi:**10. 12073/j. hjxb. 20160819003

## 0 序 言

高氮低镍奥氏体不锈钢 (high nitrogen low nickel austenitic stainless steel, HNLNS) 是一种性能优异、资源节约、环境友好的新型不锈钢材料 (简称高氮钢), 氮的固溶使其在提高强度的同时仍保持良好的韧性, 同时具有很高的耐蚀性, 应用前景广阔. 因此, 针对其焊接性的研究具有重要的工程应用价值. 国内外学者针对高氮钢 TIG 焊已进行了不少研究. Zhao 等人<sup>[1]</sup>采用氮氩混合气体保护 TIG 焊工艺对高氮钢接头中氮的行为、微观组织和力学性能进行了分析. Bonnefois 等人<sup>[2]</sup>分别采用 TIG 和 A-TIG 两种工艺进行高氮钢焊接试验, 发现 A-TIG 焊接时氮易于由保护气体向熔池过渡.

近年来, 随着工业自动化的快速推进, 对传统焊接技术革新提出了更高的要求, 新的工艺往往需要同时满足优质、高效、节能和经济等多个目标. 上世纪末, Zhang 等人<sup>[3]</sup>在传统的 PAW 与 TIG 焊的基础上, 开发了单电源双面弧焊 (double-sided arc welding, DSAW) 工艺, 并针对不锈钢和铝合金等材料进行工艺试验, 该方法的优势在于能量利用率高、焊接效率高、焊后变形小. 然而, 由于采用单一电源, 导致焊缝成形对参数的变化更为敏感, 工艺窗口相对较窄.

双电源 DSAW 工艺<sup>[4]</sup>不但具备单电源 DSAW 的所有优点, 而且由于双弧参数独立调节, 焊缝成形更容易控制, 有利于实现工程化应用. 目前, 针对双电源 DSAW 工艺的研究也取得了一些进展. 张华军等人<sup>[5]</sup>针对高强钢厚板提出了双面 TIG 打底、双面 MIG 填充的组合工艺. 王伟等人<sup>[6-7]</sup>采用双面同轴 TIG 焊工艺, 对 8 mm 厚铝合金的接头形貌和成形机理进行了分析.

根据现有文献, 尚未见到将双面弧焊工艺应用于高氮钢焊接的报道. 文中采用双电源型双面同轴 TIG 焊 (double-sided coaxial TIG welding, DSCTW) 工艺对高氮钢开展自熔焊试验, 重点研究保护气体中氮气比例对 DSCTW 电弧电压、电弧形态、钨极烧损、焊缝气孔和含氮量的影响规律.

## 1 试验方法

以 I 形坡口高氮钢板为试验材料, 进行对接自熔焊工艺试验, 试板规格为 300 mm × 150 mm × 6.5 mm, 其化学成分为 Fe-21. 08Cr-15. 05Mn-1. 00Ni-0. 20Si-0. 11Mo-0. 76N-0. 11C (质量分数, %).

图 1 为自主设计集成的 DSCTW 试验系统, 主要由两套 YASKAWA 工业机器人、两台 Fronius 数字化逆变焊机、一套图像与参数传感系统、一台协同控制器和一套二元气体配比仪组成. 协同控制器负责协调两侧焊接操作开始与结束, 以确保焊接时两柄焊

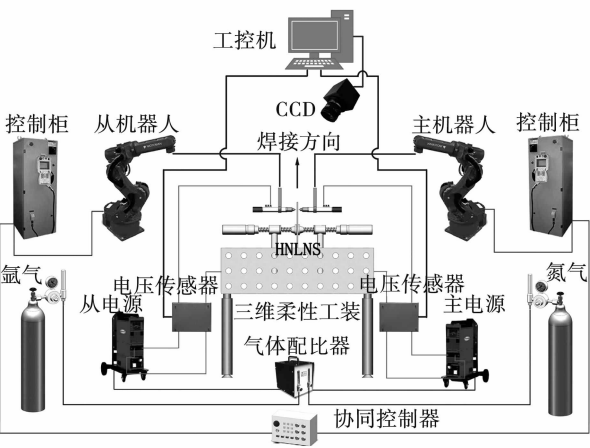


图 1 DSCTW 试验系统  
Fig. 1 Experimental system

枪始终同轴,采用向上立焊的方式进行试验. 采用气体配比器配制不同比例的氮氩混合气,CCD 加滤光片观测电弧形态,氧氮分析仪检测焊缝含氮量. 为了降低焊接热输入,减少凝固裂纹的产生,同时防止双弧均采用脉冲电流可能造成的随机相位差问题,进而影响焊缝成形,故采用主侧脉冲 + 从侧恒流的组合式双面焊工艺,焊接工艺参数见表 1.

2 氮气比例对 DSCTW 工艺性的影响

2.1 电弧电压

为消除焊接时工件变形导致的电弧电压(后文简称弧压)波动,定义主、从两侧的弧压之和为总弧压  $U_t$ ,其变化曲线见图 2. 随着保护气体中氮气比例

表 1 焊接工艺参数  
Table 1 Welding process parameters

| 编号 | 主侧              |                         |              |                          | 从侧电流<br>$I_s/A$ | 总弧压<br>均值 $U/V$ | 焊接速度<br>$v/(m \cdot min^{-1})$ | 氮气比例<br>$\delta(\%)$ | 气体流量<br>$q/(L \cdot min^{-1})$ | 热输入<br>$Q/(kJ \cdot m^{-1})$ |
|----|-----------------|-------------------------|--------------|--------------------------|-----------------|-----------------|--------------------------------|----------------------|--------------------------------|------------------------------|
|    | 脉冲电流<br>$I_p/A$ | 基值电流<br>比例 $\sigma(\%)$ | 频率<br>$f/Hz$ | 占空比<br>$\varepsilon(\%)$ |                 |                 |                                |                      |                                |                              |
| 1  | 222             | 20                      | 5            | 50                       | 133             | 25.0            | 25                             | 0                    | 13                             | 558.6                        |
| 2  | 200             | 20                      | 5            | 50                       | 120             | 27.9            | 25                             | 10                   | 13                             | 562.5                        |
| 3  | 191             | 20                      | 5            | 50                       | 115             | 28.6            | 25                             | 20                   | 13                             | 552.6                        |
| 4  | 183             | 20                      | 5            | 50                       | 110             | 31.8            | 25                             | 40                   | 13                             | 587.7                        |
| 5  | 166             | 20                      | 5            | 50                       | 100             | 34.1            | 25                             | 60                   | 13                             | 572.9                        |
| 6  | 141             | 20                      | 5            | 50                       | 85              | 40.2            | 25                             | 100                  | 13                             | 574.1                        |

的提高, $U_t$ 逐渐增大. 由于氮气为双原子分子,在高温电弧下极易分解为 N 原子(式(1)),部分 N 原子失去电子电离生成  $N^{n+}$ (式(2)),二者均为吸热反应,对电弧有冷却作用. 根据最小电压原理,电弧有保持最小能量消耗的特性,因此受到外界冷却时弧柱将收缩,导致电流密度和电场强度增大,弧压升高.

$$N_2 = 2[N] \tag{1}$$

$$[N] - ne = N^{n+} \tag{2}$$

弧压升高势必引起热输入增大,因此在其它条件不变的情况下,采用 Ar + N<sub>2</sub> 保护气体时,焊接电流应比纯氩保护时小,且电流应随保护气体中氮气比例的提高逐渐降低,否则极易产生焊漏或过烧等问题,表 1 的参数设计遵循这一原则. 图 3 显示了保护气体为纯氩(参数 1)和 90% Ar + 10% N<sub>2</sub>(参数 2)的焊接接头形貌. 由表 1 可知,参数 1 与参数 2 的热输入非常相近,由图 3 可见,在两种参数下,两侧焊缝的熔宽无太大差异,但参数 2 的熔合线交汇区明显宽于参数 1,即参数 2 的熔深大于参数 1. 这说明,当保护气体中加入氮气后,电弧的熔透能力增强,原因同样是氮气解离导致电弧收缩、能量密度增加.

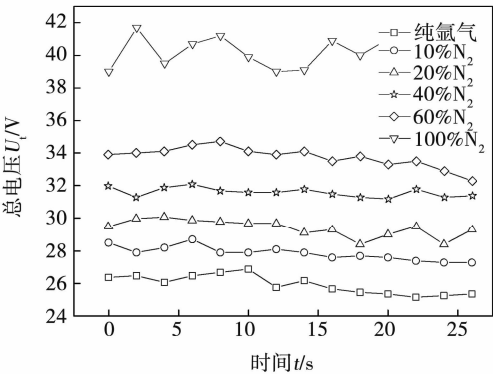


图 2 焊接过程的弧压变化  
Fig. 2 Changes of arc voltage in welding process

从图 2 还可看出,弧压的波动程度亦随保护气体成分的变化而变化,计算弧压的均值与标准差,并采用三次函数对平均弧压进行拟合,结果见图 4,其中误差棒的长度代表弧压的标准差,获得函数如式(3),修正可决系数为 0.999 6. 因此,随着保护气体中氮气比例的提高,平均弧压  $U_a$  以三次函数的速

度增大,弧压波动程度也随之呈增大的态势.

$$U_a = 1.66 \times 10^{-5} \delta^3 - 0.01 \delta^2 + 0.21 \delta + 26.00 \quad (3)$$

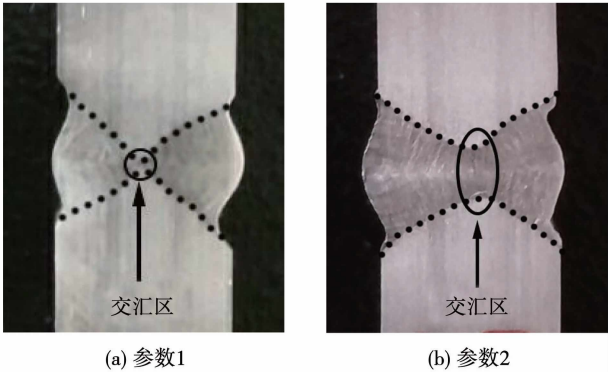


图 3 典型接头形貌  
Fig. 3 Typical weld profiles

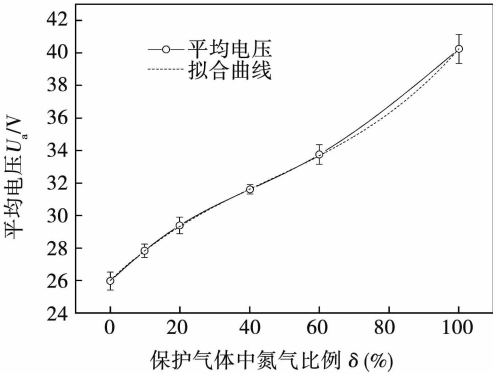


图 4 保护气体中氮气比例对平均弧压与弧压波动程度的影响  
Fig. 4 Influence of  $N_2$  ratio in shielding gas on average voltage and arc voltage fluctuation

2.2 电弧形态

图 5 为不同保护气体成分下 DSCTW 的电弧形态. 对比发现,焊接保护气体中加入氮气后,电弧显著收缩. 图中  $d$  为电弧端部直径,其随着氮气比例的提高而减小,同时焊接飞溅逐渐增大,电弧稳定性变差. 采用纯氩保护时焊接过程几乎无飞溅,主侧电弧周期性扩张、收缩,从侧电弧形态保持不变(图 5a),这是主侧脉冲+从侧恒流的焊接方式决定的. 氮气加入后,大量飞溅开始产生,并伴随强烈的金属烟尘,且随氮气比例的提升愈演愈烈.

氮在液态钢中的溶解度较低,当高氮钢处于熔化状态时,不仅会有外部电弧气氛中的氮气以固溶氮的形式熔入,而且也会有熔池内部的固溶氮以氮气的形式逸出,氮气逸出时需克服熔池的表面张力,冲破液态金属的包围,该过程往往比较激烈,会伴随不同程度的“爆炸”现象. 此外,氮气逸出时会扰乱保护气体的流向,甚至导致电弧变形,引起熔池受力

不均. 因此,随氮气的加入,焊接过程飞溅增加、稳定性变差.

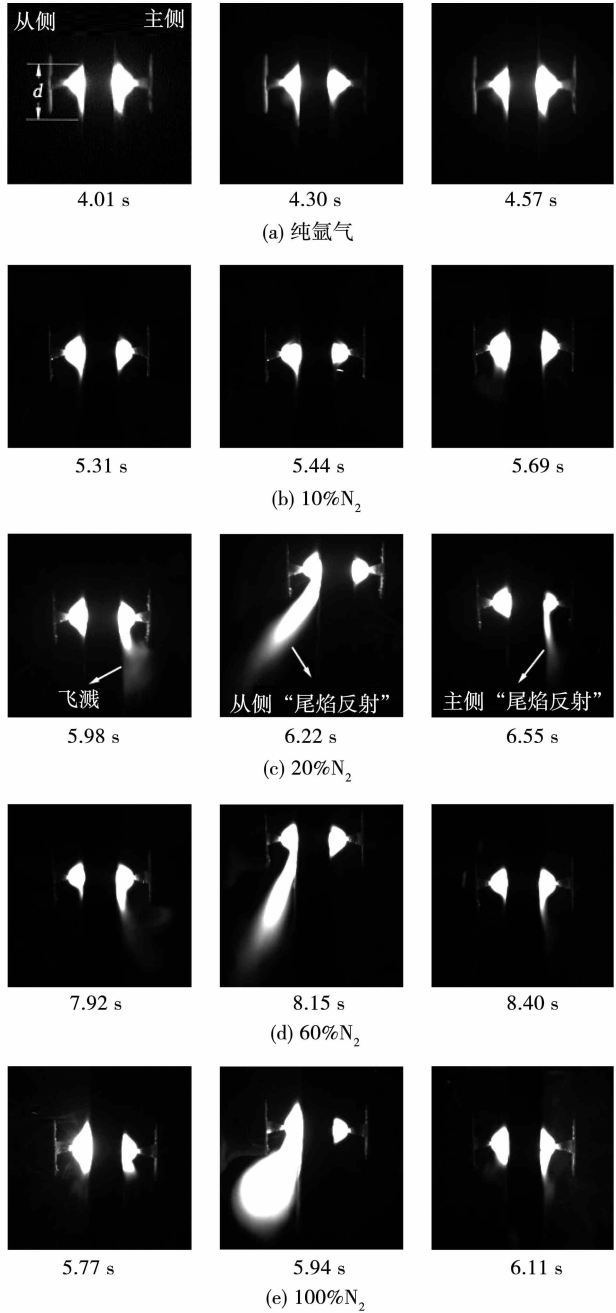


图 5 不同保护气体下的电弧形态(主侧、从侧设置同第一幅图)  
Fig. 5 Arc shape with different shielding gases (Setting of master and slave side is identical with the first graph)

观察图 5c ~ 5e 发现,电弧尾部(尾焰)周期性的以一定角度背离熔池喷射而出,类似于光学中的反射现象,便于表述,称之为“尾焰反射”现象. 保护气体中氮气为 10% 时,飞溅较少,电弧尚未出现“尾焰反射”(图 5b);纯氮气保护时,飞溅与烟尘达到最大,“尾焰反射”现象最为严重(图 5e). 另外还发

现,主侧电弧“尾焰”与工件表面的夹角较小,且“尾焰”尺寸也不大,而从侧恰好相反。

分析认为,立焊熔池因重力作用向下流淌,导致熔池前端液态金属层变薄,熔池底部的未熔金属更加直接的接收电弧的热量,而且双面同轴焊的电弧热量积累速度更快,因此,当热输入达到一定程度时工件会产生类似于高能束流焊接的“小孔”现象,由焊缝弧坑中心残留的孔洞可以证实(图 6)。“小孔”形成后,两侧的电弧均会穿孔而过,对另一侧的电弧形态产生影响。由于工件主侧采用脉冲电流,因而会产生周期性变化的电磁力。当主侧电流达到峰值时,主侧电弧的电磁力最大,远大于从侧,反之,当电流处于基值(峰值电流的 20%)时,主侧电弧的电磁力很小,远小于从侧。因此,在电流达到峰值时,熔池受到的合力方向指向从侧,主侧电弧通过“小孔”冲击从侧电弧,从侧电弧变形,出现“尾焰反射”现象。当电流降至基值时,熔池受到的合力方向指向主侧,从侧电弧通过“小孔”冲击主侧,致使主侧电弧出现“尾焰反射”。脉冲电流一定程度上可提高电弧的电磁力,因此从侧电弧的“尾焰反射”现象比主侧更加明显。

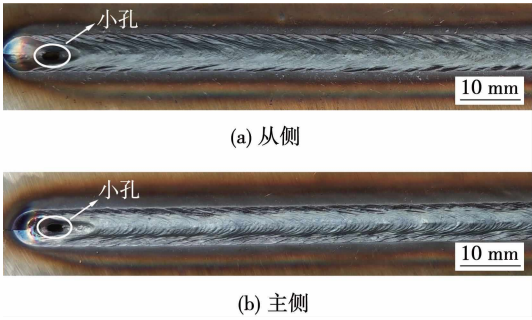


图 6 焊缝外观与弧坑“小孔”

Fig. 6 Weld appearance and keyhole in arc crater

2.3 钨极形貌

图 7 为采用不同保护气体焊后的钨极形貌对比。可见,氮气加入后,钨极尖端的锥面产生明显烧损,原因是高温电弧下氮气与金属钨发生了化学反应(式(4)),生成了细小的棕褐色氮化钨  $\beta-W_2N$  颗粒,覆盖在钨极表面。对比发现,氮气比例对钨极的烧损程度影响较小,原因是亚稳相  $\beta-W_2N$  热稳定性较差,600℃时又分解为钨与氮气<sup>[8]</sup>。



2.4 焊缝气孔

气孔是高氮钢熔焊时的常见缺陷之一,可通过 X 射线探伤进行检测。图 8 显示了 HNLNS 焊缝的射线检测结果,可见,焊缝存在大量的链状密集型气

孔。随保护气体中氮气比例的提升,焊缝气孔数量增加,最大气孔的截面积(以像素表示)同时增大(图 9)。

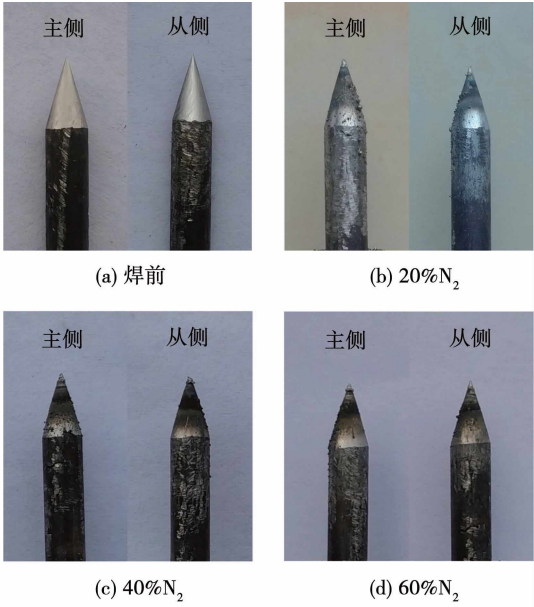


图 7 不同保护气体焊后的钨极形貌

Fig. 7 Tungsten electrode morphology with different shielding gases

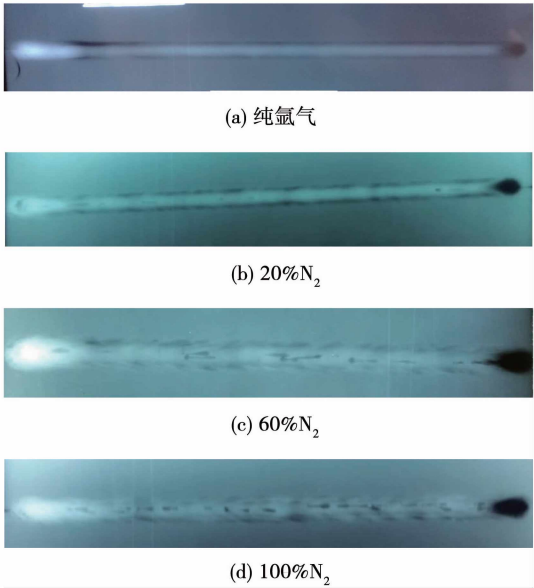


图 8 焊缝 X 射线检测底片

Fig. 8 Photos of X-ray inspection

原因是氮在钢液中的溶解度有限,常压下加氮气极易引起熔池中固溶氮过饱和,从而导致多余 N 原子结合为氮气逸出,熔池凝固速度很快,因此部分氮气来不及逸出而形成气孔驻留于焊缝中。随着保护气中氮气比例的提高,来不及逸出的氮气分子增多,氮气孔数量和面积也相应增加。

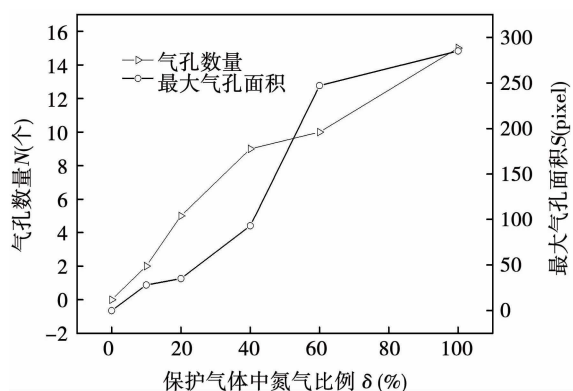


图9 气孔数量与最大气孔面积随  $N_2$  比例的变化

Fig. 9 Effect of shielding gas composition on the number of pore and maximum pore area

## 2.5 焊缝含氮量

图 10 显示了焊缝含氮量与保护气体中氮气比例的关系。随着氮气比例的提高,焊缝中含氮量先快速增大后趋于平稳。纯氩保护时焊缝含氮量为 0.75%。当氮气比例升至 20% 后,含氮量增幅减小,以后逐渐趋于稳定。根据扩散的概念,物质会自发由高浓度区域向低浓度区域迁移,直至均匀分布。当采用纯氩焊接时,熔池中的固溶氮浓度远高于电弧区,因此固溶氮以氮气形式由熔池向电弧区过渡,导致焊缝含氮量低于母材。保护气体中加入氮气后,当电弧区的氮浓度大于熔池时,氮以向熔池内部熔入为主,且熔入量随着电弧区氮浓度的提高而增大。当熔池中的固溶氮达到当前温度下的溶解度极限时,熔入与逸出过程达到平衡,焊缝含氮量趋于稳定。

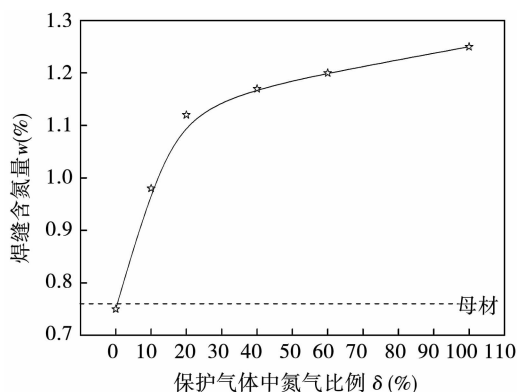


图 10 焊缝含氮量随保护气体中氮气比例的变化

Fig. 10 Nitrogen content in weld with different shielding gases

根据前文讨论,保护气体中添加氮气有助于保持和提高焊缝的含氮量,以降低高氮钢接头的性能损失。然而,随着保护气体中氮气比例的提升,焊接稳定性变差,焊缝气孔增多,均对焊接质量产生不利

的影响。因此,为了降低焊缝的氮损失,同时尽可能降低电弧不稳定和焊缝气孔等不利因素的影响,保护气体中氮气的比例应低于 20%。

## 3 结 论

(1) 随保护气体中氮气比例的提高,DSCTW 平均弧压以三次函数的速度增大,同时弧压的波动程度也有所增加。

(2) 保护气体中加入氮气导致电弧收缩,熔透能力增强。然而,飞溅增大,焊接稳定性变差,电弧出现周期性“尾焰反射”现象。

(3) 氮气导致钨极表面焊后出现烧损,但烧损程度与氮气比例关系不大。

(4) 保护气体中氮气比例越高,焊缝气孔数量越多,最大气孔的尺寸越大。

(5) 随保护气体中氮气比例的提高,焊缝含氮量先快速增大后趋于平稳,保护气体中氮气比例应低于 20%。

## 参考文献:

- [1] Zhao L, Tian Z, Peng Y. Porosity and nitrogen content of weld metal in laser welding of high nitrogen austenitic stainless steel [J]. ISIJ International, 2007, 47(12): 1772–1775.
- [2] Bonnefois B, Coudreuse L, Charles J. A-TIG welding of high nitrogen alloyed stainless steels: a metallurgically high-performance welding process[J]. Welding International, 2004, 18(3): 208–212.
- [3] Zhang Y M, Zhang S B. Double-sided arc welding increases weld joint penetration[J]. Welding Journal, 1998, 77(6): 57–61.
- [4] 叶树棠, 徐志峰, 陈跃凤, 等. 铝及铝合金双面氩弧立焊[J]. 焊接, 1980(6): 35–37.  
Ye Shutang, Xu Zhifeng, Chen Yuefeng, et al. Double-sided TIG welding of aluminum and aluminum alloy[J]. Welding & Joining, 1980(6): 35–37.
- [5] 张华军, 张广军, 王俊恒, 等. 低合金高强钢双面双弧焊热循环对组织性能的影响[J]. 焊接学报, 2007, 28(10): 81–84.  
Zhang Huajun, Zhang Guangjun, Wang Junheng, et al. Effect of thermal cycles of DSAW on microstructure in low alloy high strength steel[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2007, 28(10): 81–84.
- [6] 强 伟, 王克鸿, 林祥礼. 铝合金双面双弧同步立焊工艺特征与接头组织性能分析[J]. 机械工程学报, 2015, 51(24): 82–89.  
Qiang Wei, Wang Kehong, Lin Xiangli. Analysis on characteristics of double-sided synchronization vertical welding for aluminum alloy and structure property of joint[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015, 51(24): 82–89.
- [7] 强 伟, 王克鸿, 林祥礼. 铝合金双面同步平-仰焊接头成形机理与力学性能[J]. 焊接学报, 2016, 37(7): 125–128.  
Qiang Wei, Wang Kehong, Lin Xiangli. Shaping mechanism and mechanical properties of aluminum alloy by double-sided synchronization downhand-overhead welding[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2016, 37(7): 125–128.
- [8] 沈龙海, 类伟巍, 崔啓良. 金属氮化物纳米材料的制备、物性及高压相变[M]. 北京: 北京交通大学出版社, 2014.

**作者简介:** 强 伟,男,1988 年出生,博士研究生。主要从事双面同轴焊工艺与机理方面的研究工作。发表论文 3 篇。Email: qw7011@163.com