

N₂ 对不锈钢 GTAW 焊缝铁素体含量和 组织演变过程的影响

程尚华^{1,2}, 张一琪¹, 邵珠晶¹, 孔康骞¹, 程方杰^{1,3}

(1. 天津大学材料科学与工程学院, 天津 300350;

2. 蓬莱巨涛海洋工程重工有限公司, 蓬莱 265607;

3. 天津市现代连接技术重点实验室, 天津 300350)

摘要: 在不锈钢的焊接中, 控制焊缝金属中的铁素体含量对于防止出现热裂纹、保证焊缝耐蚀性能和力学性能都有着重要的作用。在不锈钢中氮是强烈的奥氏体化元素, 通过在保护气体中加入 N₂ 的方法向焊缝过渡氮元素从而调控焊缝中的铁素体含量是一种简单可行的技术思路。本研究采用实时调整气体配比技术配制不同配比的 Ar-N₂ 混合气作为保护气体, 对 304L 奥氏体不锈钢和 2205 双相不锈钢进行了 GTAW 多层多道焊接试验。分析研究了保护气体中的 N₂ 添加量对奥氏体不锈钢焊缝金属中铁素体含量的影响以及对双相不锈钢焊缝金属中的相比比例和微观组织的演变规律。结果表明, 对 304L 不锈钢, 保护气中加入 0.5%~1.0% 的 N₂ 能够将焊缝中平均铁素体数 FN 有效控制在 3~7 范围内。对 2205 双相不锈钢, 打底焊时保护气中加入 3.0% 的 N₂ 能够有效促进一次奥氏体的形成并抑制二次奥氏体的析出; 填充和盖面焊则应减少保护气中的 N₂ 含量或用纯 Ar 作为保护气才能保证焊缝的整体相比比例在合理范围内。该研究工作对推广动态气体配比技术在不锈钢焊接生产中的应用提供了前期的理论基础。

关键词: 不锈钢; 铁素体数; 相比比例; Ar-N₂ 混合保护气; 组织演变

中图分类号: TG441.2

文献标志码: A

文章编号: 0493-2137(2020)08-0809-05

Effect of N₂ in Shielding Gas on the FN and Microstructural Evolution for the Stainless Steel GTAW Joint

Cheng Shanghua^{1,2}, Zhang Yiqi¹, Shao Zhujing¹, Kong Kangqian¹, Cheng Fangjie^{1,3}

(1. School of Materials Science and Engineering, Tianjin University, Tianjin 300350, China;

2. Penglai Jutal Offshore Engineering Heavy Industries Co., Ltd., Penglai 265607, China;

3. Tianjin Key Laboratory of Advanced Joining Technology, Tianjin 300350, China)

Abstract: In the welding process of stainless steels, the control of ferrite content in the weldment is crucial in preventing the generation of hot cracks and ensuring good mechanical and anti-corrosion performance of the joint. Nitrogen is a strong austenite stabilizer. Adding N₂ to the shielding gas during the welding process is a feasible way to control the ferrite content in the weldment. In this research, different mixtures of Ar-N₂ gas with varying proportions were prepared using a dynamic mixing technique and were used as the shielding gas of 304L stainless steel and 2205 stainless steel multi-pass gas tungsten arc weld (GTAW) joint. The influence of N₂ content in shielding gas on the ferrite number (FN) of austenitic stainless steel and its effect on the phase ratio and microstructural evolution of duplex stainless steel were investigated. The results indicated that in the joint of the 304L stainless steel, adding 0.5%—1.0% N₂ in the shielding gas could control the FN range in the joint to be approximately 3—7. In the root of the 2205 stainless steel, adding 3.0% N₂ in the shielding gas suppressed the formation of secondary austenite in the multi-pass welding process.

收稿日期: 2019-06-23; 修回日期: 2019-10-08.

作者简介: 程尚华 (1983—), 男, 博士, 高级工程师, csh198382@126.com.

通信作者: 程方杰, chfj@tju.edu.cn.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51775372).

Supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 51775372).

The N_2 content in the shielding gas of the filler and cover passes should be reduced or pure Ar should be used to achieve a phase balance. The results of this research provide a theoretical basis for the application of dynamic gas mixing technique in the industry.

Keywords: stainless steel; ferrite number (FN); phase ratio; Ar- N_2 mixed shielding gas; microstructural evolution

奥氏体不锈钢和双相不锈钢是目前工程上应用最广泛的两类典型的不锈钢材料. 在不锈钢的焊接中, 控制相比对于保证焊缝的耐蚀性能和力学性能有着重要作用. 氮是强奥氏体化元素, 通过加入氮元素(保护气体中加 N_2 或药粉中加氮化物)来调整和提高焊缝中奥氏体含量是工程上常用的一种手段^[1]. 但是, 需要对其含量进行小心控制, 氮元素过多容易导致热裂和出现氮气孔^[2-4]. Shankar 等^[5]研究了 N_2 的加入对于 316L 奥氏体不锈钢组织及熔合区热裂纹行为的影响规律. 结果表明: N_2 的加入能够形成全奥氏体的焊缝组织, 但是由于全奥氏体凝固模式下磷、硫等元素会发生严重偏析从而会导致热裂纹的形成. 龚利华等^[6]在保护气中加入 N_2 对双相不锈钢焊接接头腐蚀行为的影响规律进行了研究. 结果表明: 在保护气中加入 2.0% 的 N_2 对能够有效促进钝化膜的形成, 降低接头的点蚀敏感性.

焊接保护气体中添加 N_2 的传统方法是使用预先混好的固定比例的瓶装气. 这种方法不能根据母材和焊材以及现场焊接状态等实际情况灵活调整 N_2 的添加比例, 难以实现在整个焊接过程中既保证铁素体含量不超标, 同时凝固模式还不发生改变这一目的. 本研究利用自制的 Ar- N_2 配比器在焊接现场实现

了保护气中 N_2 比例的动态控制, 进行了不同 N_2 含量下的 304L 不锈钢和 2205 不锈钢的多层多道焊试验, 分析了实时调整气体比例对控制不锈钢焊缝微观组织的可行性.

1 试验材料与方法

1.1 奥氏体不锈钢多层多道焊试验

使用的奥氏体不锈钢母材为外径 508 mm、壁厚 22 mm 的 304L 不锈钢管. 选用 $60^\circ V$ 型坡口, 根部间隙 2.0 mm, 焊道分布如图 1 所示. 焊材直径分别为 2.4 mm 和 3.2 mm 的 T-308L 焊丝. 母材和焊材的成分见表 1.

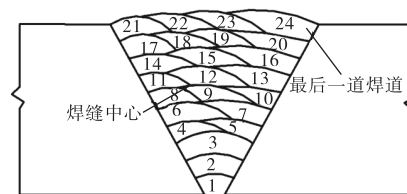


图 1 304L 不锈钢多层多道焊焊道分布

Fig.1 Weldment distribution of the 304L stainless steel multi-pass joint

表 1 304L 母材及熔敷金属化学成分

Tab.1 Chemical composition of the 304L base metal and deposited metal

%

成分	w_C	w_{Si}	w_{Mn}	w_{Ni}	w_{Cr}	w_P	w_S	w_{Mo}	w_N	w_{Fe}
304 L	0.014	0.390	1.530	8.000	18.090	0.039	0.001	0.002	0.005	余量
T-308 L	0.010	0.360	1.990	10.910	19.550	0.023	0.005	0.020	0.035	余量

试验采用自行研制的动态气体配比器提供焊接保护气体. 该配比器取消了传统配比器中的混气罐, 可以实时调整气体的配比. 本试验使用 4 种不同 N_2 含量的混合气作为焊接保护气: ①99.998% 的氩气(纯 Ar); ②添加 0.5% 的 N_2 (Ar-0.5% N_2); ③添加 1.0% 的 N_2 (Ar-1.0% N_2); ④添加 1.5% 的 N_2 (Ar-1.5% N_2).

表 2 304L 不锈钢多层多道焊接试验参数

Tab.2 Welding parameters of the 304L stainless steel multi-pass joint

焊接位置	焊接电流 I/A	焊接电压 U/V	焊接速度 v/(mm · min ⁻¹)	气体流量/(L · min ⁻¹)	焊丝直径 D/mm	备注
打底	135 ~ 139	15 ~ 16	75	15	2.4	使用 4 种不同 N_2 含量的保护气分别焊接 4 块试板
填充	200 ~ 202	20 ~ 21	106	15	3.2	
盖面	200 ~ 210	20 ~ 21	143	15	3.2	

1.2 双相不锈钢多层多道焊试验

试验选用的母材为外径 219 mm、厚度 12.9 mm

的 2205 双相不锈钢管. 采用 $70^\circ V$ 型坡口, 钝边厚度为 1.5 mm, 不留间隙. 焊材为直径 1.2 mm 的 ER2209

焊丝. 母材及焊材的主要合金成分见表 3.

试验采用自动填丝 GTAW 工艺, 焊接转台带动管子匀速转动, 在 1 G 位置进行焊接. 试验组打底, 填充, 盖面层的保护气分别选用 Ar-3%N₂、Ar-2%N₂ 和 Ar-4%N₂. 对照组选用 15 L/min 的纯 Ar (99.998%) 作为保护气进行多层多道焊接. 使用的焊接电源是 Miller 公司生产的 PIPEPRO 450 RFC TIG 焊机. 焊接试验参数见表 4, 焊道分布如图 2 所示. 利用线切割对焊道取样后进行打磨、抛光至镜面, 使用 Behara (90 mL H₂O + 10 mL HCl + 1 g K₂S₂O₅) 试剂腐蚀后用

OLYMPUS GX51 金相显微镜观察组织.

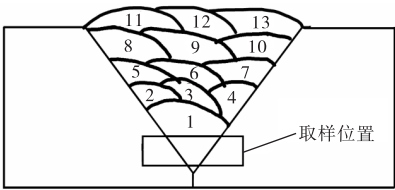


图 2 2205 不锈钢多层多道焊焊道分布
Fig.2 Weldment distribution of the 2205 stainless steel multi-pass joint

表 3 2205 母材及熔敷金属化学成分

Tab.3 Chemical composition of the 2205 base metal and deposited metal										%
成分	W _C	W _{Si}	W _{Mn}	W _{Ni}	W _{Cr}	W _P	W _S	W _{Mo}	W _N	W _{Fe}
2205	0.024	0.420	1.300	4.820	22.320	0.025	0.001	2.730	0.181	余量
ER-2209	0.008	0.380	1.690	8.710	22.700	0.016	0.005	3.150	0.150	余量

表 4 2205 不锈钢多层多道焊接试验参数

Tab.4 Welding parameters of the 2205 stainless steel multi-pass joint						
位置	焊接电流 I/A	焊接电压 U/V	焊接速度 $v/(mm \cdot \min^{-1})$	气体流量 $/(L \cdot \min^{-1})$	焊丝直径 D/mm	备注
打底	164 ~ 174	13.0 ~ 14.1	110	15	1.2	使用 4 种不同 N_2 含量的保护气分别焊接 4 块试板
填充	158 ~ 168	11.5 ~ 12.8	110	15	1.2	
盖面	136 ~ 139	13.0 ~ 14.1	110	15	1.2	

2 结果与分析

2.1 N₂ 含量对 304L 不锈钢焊缝铁素体数的影响

图 3 是 304L 不锈钢接头各焊道的铁素体数 (FN) 与保护气体中的 N₂ 含量以及熔敷金属中的氮元素含量之间的关系. 从图中可以看出: ①随着保护气中 N₂ 含量的增加, 熔敷金属中的氮元素含量有明显增加趋势; 纯 Ar 保护下的焊缝中氮元素质量分数在 0.03% ~ 0.05% 之间, 当保护气中添加了 3.0% 的 N₂ 后, 焊缝中氮元素含量升高到了 0.08% ~ 0.13%; ②随着保护气中 N₂ 含量的增加, 熔敷金属中的铁素体含量也逐步减少; 保护气中不添加 N₂ 时各焊道的铁素体数基本都在 7 以上; ③当 N₂ 添加量在 0.5% ~ 1.0% 范围时, 各道焊道的 FN 值基本在理想的 3 ~ 7 范围之内, 此时焊缝中的氮元素含量大约在 0.06% ~ 0.10%; ④当 N₂ 添加量达到 1.5% 时, 焊缝 FN 值基本都在 3 以下, 部分焊道的 FN 值甚至小于 1.

在工程上一般认为奥氏体不锈钢焊缝的铁素体数在 3 ~ 7 范围内最理想^[7], 这个比例的铁素体含量既可以保证焊缝优良的低温韧性和耐腐蚀性能, 也可以大大降低出现焊接热裂纹的风险. 在本试验中纯 Ar 保护的焊缝铁素体数偏高, 超出了某些 LNG 关键结构对铁素体含量上限的要求, 存在低温韧性不足的

风险^[8]; 而 Ar-1.5% N₂ 保护的焊缝铁素体数又过低, 大大增加了焊接热裂的倾向^[9]; 在本试验条件下, 添加 0.5% ~ 1.0% N₂ 的混合气体保护的焊缝铁素体数则处于理想区间内. 在实际生产中, 可以根据现场实际情况利用 Ar-N₂ 配比器向保护气中灵活添加 0.5% ~ 1.0% 的 N₂, 从而动态调整 304L 不锈钢焊缝中的 FN 值.

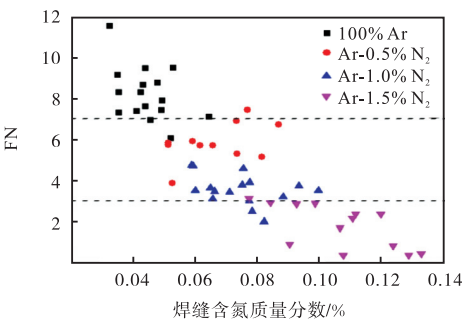


图 3 304L 不锈钢焊缝 FN 值与焊缝氮含量的关系
Fig.3 Relationship between the FN and N content in the 304L stainless steel welding passes

图 4 是最后一道焊道的 FN 值与焊缝中心位置 FN 值的统计结果. 可以看出: 最后一道焊道的铁素体数普遍比焊缝中心的铁素体数要高. 这是因为最后一道焊道紧贴母材, 母材对焊道的稀释率较高, 奥氏体形成元素浓度低且焊接过程冷却速度较快, 高温相变时间短, 故形成的奥氏体的量相对较少. 因此,

在实际应用中,也应该考虑在盖面焊缝时利用 Ar-N_2 配比器适当提高保护气中 N_2 含量来保证在整个接头内 FN 值都能控制在理想范围内。

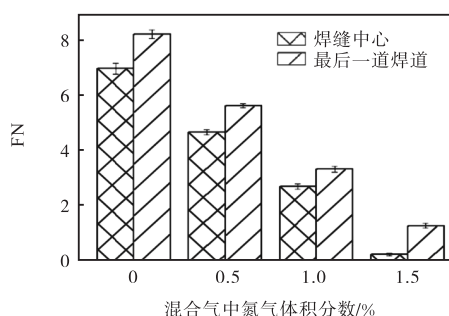


图 4 304L 不锈钢最后一道焊道和焊缝中心位置的 FN 值对比结果

Fig.4 Comparison of FN between the last welding pass and the center of weld in the 304L stainless steel joint

2.2 氮气含量对 2205 不锈钢焊缝相比比例和组织演变的影响

图 5 给出了在纯 Ar 保护和添加 N_2 两种条件下的 2205 不锈钢焊缝各部位相比比例的测量统计结果。从图中可以看出:加入 N_2 后,焊缝各部位的铁素体含量均有不同程度的降低。其中,焊缝根部的降低程度最小,从 55% 左右降低到 45% 左右,相比比例在合理的范围内。焊缝中心和焊缝顶部位置的铁素体含量分别从 42% 和 50% 下降到 20% 左右,已经明显偏离双相不锈钢焊缝的合理相比比例范围。因此,在 2205 不锈钢焊缝的多层多道焊过程中,在填充层和盖面层的保护气应该适当减少保护气体中的 N_2 添加量或直接使用纯 Ar 作为保护气来保证熔敷金属的相比比例在合理范围内。

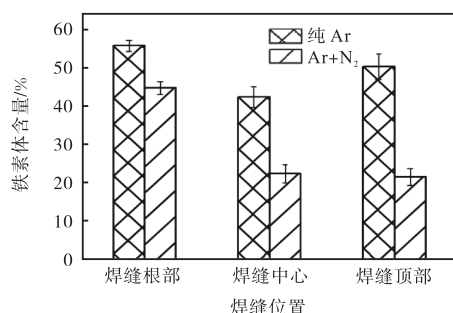


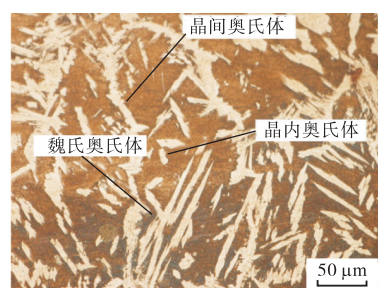
图 5 2205 不锈钢焊缝相比比例统计结果

Fig.5 Statisticals results of phase ratio in the 2205 stainless steel weld joints

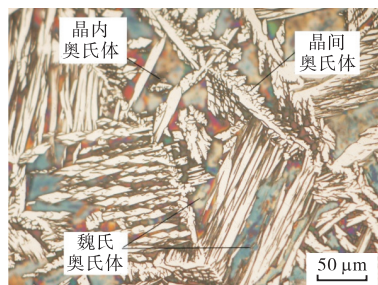
但是,保护气中添加 N_2 对打底焊道的组织演变有着重要的影响。在打底层的保护气中加入 3.0% 左右的 N_2 不仅能够调整焊缝的相比比例,更重要的是能够改变其组织演变过程,提高焊缝中的一次奥氏体含

量,抑制耐蚀性较差的二次奥氏体的形成^[10]。

图 6 是打底层刚焊完时的显微组织。对比图 6(a)和(b)可以发现:纯 Ar 保护的打底焊缝铁素体基体的晶粒尺寸要明显大于 $\text{Ar-3\%N}_2$ 保护的情况。纯 Ar 保护的打底层在刚焊完时奥氏体含量仅为 36%,这就导致在焊缝冷却过程中铁素体中过饱和的氮原子不能及时扩散到奥氏体中而与铁素体中的 Cr 结合形成 Cr_2N 。而在打底层焊接保护气中加入 3.0% 的 N_2 ,会形成更多的一次奥氏体组织,同时铁素体基体的晶粒尺寸也有所减小,此时刚焊完的打底层奥氏体含量为 52%,其凝固及冷却过程中铁素体中过饱和的氮原子能够及时扩散到奥氏体中,所以 Cr_2N 的形成受到了抑制。这样的两种打底层组织在后续热循环中将发生不同的演变。



(a) 纯 Ar 保护



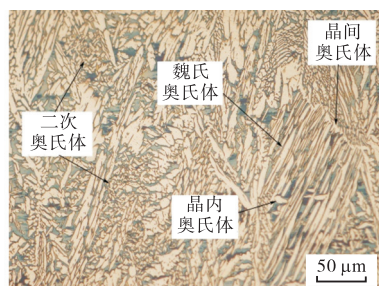
(b) $\text{Ar-3\%N}_2$ 保护

图 6 打底层刚焊完时的显微组织

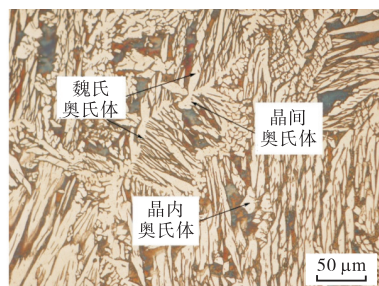
Fig.6 Microstructure of the roots without being reheated

图 7 是焊完第 4 层后根部焊缝的微观组织演变情况。对比图 6(a)和图 7(a)可以发现,纯 Ar 保护的根部焊缝在经过后续 3 道的热循环后,原铁素体晶粒内部出现了大量的二次奥氏体。一次奥氏体的比例仅占 40% 左右。从图 6(b)和图 7(b)的对比则发现,在 $\text{Ar-3\%N}_2$ 保护的根部焊缝经过后续 3 层焊缝的热循环后却没有明显的二次奥氏体析出。这是因为焊缝中的二次奥氏体主要依托 Cr_2N 析出物形核^[11]。出现这种组织演变上的差别主要是因为纯 Ar 保护的打底焊道中的铁素体尺寸较大,其中 Cr 原子和过饱和的 N 原子在冷却过程中以 Cr_2N 的形式析出,这为二次奥氏体的形核提供了条件。因此在焊完第 4 层焊

缝后,根部焊缝的铁素体晶粒中形成了大量的二次奥氏体。而对于 Ar-3%N₂ 保护的情况,铁素体晶粒较小,大量氮原子通过扩散进入了一次奥氏体中,从而不能形成大量的 Cr₂N,所以在后续焊层的热循环作用下,不会形成过多的二次奥氏体。因为焊缝中的二次奥氏体耐蚀性能较差,所以通过在打底层保护气中加入一定量的 N₂ 有利于提高焊缝根部的耐蚀性能。



(a) 纯 Ar 保护



(b) Ar-3%N₂ 保护

图7 第4层焊完后根部焊缝微观组织

Fig.7 Microstructure of the roots reheated by four welding passes

3 结 论

(1) 在不锈钢 GTAW 焊接工艺中,向保护气中加入适量 N₂ 可以有效调控焊缝金属中的铁素体含量和微观组织特征,通过动态调整和精确控制 N₂ 含量可以精确地控制铁素体的比例和微观组织构成。

(2) 在本试验条件下,对 304L 奥氏体不锈钢多层多道焊,通过在保护气中添加 0.5%~1.0%的 N₂,能将焊缝各位置的铁素体数控制在3~7理想范围内。

(3) 对 2205 双相不锈钢,在打底焊保护气中添加 3.0%的 N₂,能够有效促进一次奥氏体的形成,并减少二次奥氏体的比例,填充及盖面层应减少保护气中 N₂ 含量或使用纯 Ar 作为保护气来保证相比在合理范围内。

参考文献:

[1] 颜泽钢. 高氮奥氏体不锈钢氮氩混合气保焊焊接工艺试验研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2016.

Yan Zegang. Research of Nitrogen-Argon Mixture

Shielding Gas Welding Process of High Nitrogen Austenite Stainless Steel[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2016(in Chinese).

[2] Kujanpaa V, Suutala N, Takalo, T, et al. Correlation between solidification cracking and microstructure in austenitic and austenitic ferritic tainless steel welds[J]. Welding Research International, 1979, 9(2): 55-75.

[3] Hammar O, Svensson U. Solidification and Casting of Metals[M]. London: Metal Society, 1979.

[4] Arata Y, Matesuda F, Nakagawa H, et al. Solidification cracking susceptibility of fully austenitic stainless steels(Report 4): Effect of decreasing P and S on solidification cracking susceptibility of SUS 310 austenitic stainless steel weld metals[J]. Transactions of TWRI, 1978, 7(2): 169-172.

[5] Shankar V, Gill T P S, Mannan S L, et al. Effect of nitrogen addition on microstructure and fusion zone cracking in type 316 L stainless steel weld metals[J]. Materials Science and Engineering A, 2003, 343(1): 170-181.

[6] 龚利华, 张 欢, 程东亮. 保护气体氮对双相不锈钢焊接接头腐蚀行为的影响[J]. 材料热处理学报, 2013, 34(9): 112-115.

Gong Lihua, Zhang Huan, Cheng Dongliang. Corrosion behavior effect of duplex stainless steel welding with nitrogen in shielding gas[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2013, 34(9): 112-115(in Chinese).

[7] Wang Z, Li Y, Chang C. Application of automatic TIG welding for Yamal LNG process piping fabrication[J]. International Journal of Oil, Gas and Coal Engineering, 2018, 6(4): 44-49.

[8] Read D, Mchenry H, Steinmeyer P, et al. Metallurgical factors affecting the toughness of 316L SMA weldments at cryogenic temperatures[J]. Welding Journal, 1980, 59(4): 104-113.

[9] Liu R, Dong Z, Pan Y. The effect of solidification behaviour of austenitic stainless steel on the solidification cracking susceptibility[J]. China Welding, 2005, 14(1): 38-43.

[10] Nilsson J O, Karlsson L, Andersson J O. Secondary austenite formation and its relation to pitting corrosion in duplex stainless steel weld metal[J]. Metal Science Journal, 1995, 11(3): 276-283.

[11] Ramirez A J, Brandi S D, Lippold J C. Secondary austenite and chromium nitride precipitation in simulated heat affected zones of duplex stainless steels[J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2004, 9(4): 301-313.

(责任编辑: 田 军)