保护气体对低镍不锈钢激光-电弧复合焊电弧特性及组织性能影响

方乃文[1]，王星星[2]，徐 锴[1]，龙伟民[3]，黄瑞生[1]，徐亦楠[1]，杨义成[1]，马一鸣[1]

(1. 哈尔滨焊接研究院有限公司，黑龙江 哈尔滨 150028)

(2. 华北水利水电大学 河南省高效特种绿色焊接国际联合实验室，河南 郑州 450045)

(3. 郑州机械研究所有限公司 新型钎焊材料与技术国家重点实验室，河南 郑州 450001)

摘　要：为揭示保护气体对低镍含氮奥氏体不锈钢焊接接头微观组织和力学性能的影响机制，分别采用 92%Ar+8%N_2 与 95%Ar+5%CO_2 2 种混合比例的保护气体对 QN1803 低镍含氮奥氏体不锈钢进行了激光-MAG 电弧复合焊。结果表明：氮气的加入使焊接接头平均显微硬度有所下降；电弧收缩明显，焊接飞溅增加且体积增大，电弧稳定性变差；焊缝中奥氏体含量增加约 20%，而铁素体枝晶变细，二次枝晶臂变短。焊缝组织中未发现 σ 相及氮化物析出；从 4 个晶面观察奥氏体晶粒尺寸也是随着氮气的加入而减小，焊接接头硬度及拉伸性能略微下降。

关键词：N 含量；低镍含氮奥氏体不锈钢；激光电弧复合焊；组织性能

中图法分类号：TG442　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1002-185X(2022)08-3089-06

低镍含氮奥氏体不锈钢（简称低镍钢），是一种使用 N 元素代替成本昂贵的 Ni 元素作为主要的奥氏体化元素的强度高、韧性好的资源节约型奥氏体不锈钢[1]，由于固溶在钢中的 N 元素有着较高的层错能[2]，可优化材料微观组织、大幅提高材料综合性能，近年来受到化工装备及建筑装饰等行业的持续关注。

国内外相关学者针对保护气体对低镍钢焊接过程的影响机制已进行了不少研究。Zhao 等人[3]采用激光焊进行低镍钢的焊接，发现随着保护气体中氮气含量的增加，焊缝中的氮含量也略有增加。Bonnefois 等人[4]应用 2 种不同 TIG 工艺焊接低镍钢发现，氮可以以一定比例通过保护气体的途径向高温熔池进行过渡。强伟等人[5]采用双面同轴 TIG 自熔焊接低镍钢时发现保护气体中氮气占比的提升可以使电弧收缩明显并增加飞溅量，认为氮气比例应低于 20%。有人采用 N_2-Ar-O_2 作为保护气体进行了低镍高氮钢的焊接，发现随着保护气体中 N_2 占比的增加，焊缝中的氮含量出现先增加后降低的趋势[6]。相比于激光焊或 TIG 焊，激光-MAG 复合焊可有效保证能量利用率，降低激光功率损耗、增加电弧稳定性，同时还可以提高金属润湿铺展性能、改善焊缝成形、控制变形和应力集中[6-8]。因此，激光-MAG 电弧复合焊接工艺在工业生产领域具有广阔的应用潜力[9,10]。方乃文等人[11]采用 100%Ar、98%Ar+2%N_2、92%Ar+8%N_2 及 85%Ar+15%N_2 4 种混合气体对低镍不锈钢进行激光-MAG 电弧复合焊接，发现保护气体中氮气比例对焊缝中气孔的数量、焊缝熔深及熔宽、电弧形态、微观组织及铁素体含量均有较大影响，并最终通过比对得出 N_2 比例不宜超过 8%，可获得较好的综合性能。

本研究将激光-MAG 电弧复合焊工艺应用于低镍钢焊接，对 92%Ar+8%N_2 与奥氏体不锈钢常用的 95%Ar+5%CO_2 2 种保护气体形式获得的电弧形态、焊接接头组织和性能、铁素体含量等进行研究分析，以期为拓展低镍不锈钢的应用领域奠定研究基础。

1　实　验

实验用低镍钢牌号为 QN1803，钢板长宽高分别为 350 mm × 175 mm × 13 mm，单边坡口角度为 30°，根部间隙为 1 mm。焊丝型号为 E308L，直径为 1.2 mm，钢材及焊丝成分见表 1。激光-MAG 复合焊接系统如图 1 所示，实验以额定功率 30 kW 的 IPG YLS-30000 固体激光器为核心，搭配六轴联动机器人和 TPS4000 脉冲焊机。激光功率为 3.8 kW，光丝间距为 5 mm，

收稿日期：2021-09-25

基金项目：黑龙江省省级资金资助项目（GX18A007）；黑龙江省头雁行动计划-能源装备先进焊接技术创新团队资助（201916120）

作者简介：方乃文，男，1987 年生，博士，高级工程师，哈尔滨焊接研究院有限公司，黑龙江 哈尔滨 150028，电话：0451-86312374，E-mail: naiwen20@163.com

表 1　钢板 QN1803 和焊丝 E308L 化学成分

Table 1　Chemical composition of steel plate QN1803 and welding wire E308L (ω/%)

Material	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu	N	V	Nb
QN1803	0.072	0.39	6.58	0.038	0.001	18.15	2.89	0.10	1.79	0.235	0.115	0.01
E308L	0.016	0.54	1.92	0.017	0.010	19.89	9.99	0.01	0.01	0.008	-	-

聚焦镜焦距为 168 mm，焦斑直径为 Φ0.25 mm；采用表 2 中的参数进行打底焊接一道、盖面焊接一道即共计 2 道完成整条焊缝的焊接。

用丙酮擦拭打磨好的待焊低镍钢板坡口表面的油污。焊接接头微观组织形貌通过 OLYMPUS 光学显微镜进行观察；激光电弧复合焊接过程中的电弧形态通过 PHOTRON ULRM512 高速摄像仪进行捕捉；焊缝组织硬度通过 HVS-1000Z 型硬度测试仪进行测量；焊缝中铁素体含量通过菲希尔 FMP 铁素体测量仪进行表征；焊缝物相组成通过 PANalytical X’pert PRO 型 X 射线衍射仪进行标定。

2　结果与分析

2.1 保护气体对焊接电弧形态的影响

焊接电弧是对焊缝成形影响最直接的因素。图 2 所示为 2 种保护气体下的电弧形态，电弧弧柱宽度用 d 表示，氮气的添加使 d 减小，焊接飞溅增加，电弧稳定性变差；而没有氮气添加的焊接过程中飞溅极少，电弧呈周期性有规律的收缩扩张。这是因为：氮在金属材料中的溶解度极为有限[12]，当低镍钢在激光电弧复合作用下处于高温熔融状态时，外部电弧气氛中的氮气会进入熔池内部，而低镍钢中已经固溶的氮又会克服熔池表面张力，突破液态金属包围而逸出，氮的反复进入与逸出会扰乱气体保护氛围，从而导致电弧不稳，并引发电弧吹力不均；另外，激光的介入加强了对电弧的吸引并使之发生偏转，促使电弧长度增加[13]。因此，氮气的添加使焊接飞溅增加，电弧稳定性变差。

2.2　保护气体对焊接接头组织形貌的影响

2 种保护气体氛围获得的焊接接头宏观形貌如图 3 所示。未发现气孔、裂纹、夹渣及未熔合等焊接缺陷。焊缝晶粒以柱状晶结构为主，其生长方向垂直于熔合线，并贯穿焊道。从焊接接头宏观形貌也可看出，加入氮气后可以大幅减少熔宽，这也进一步验证了氮气的添加可以收缩电弧，使电弧弧柱宽度减小的观点。

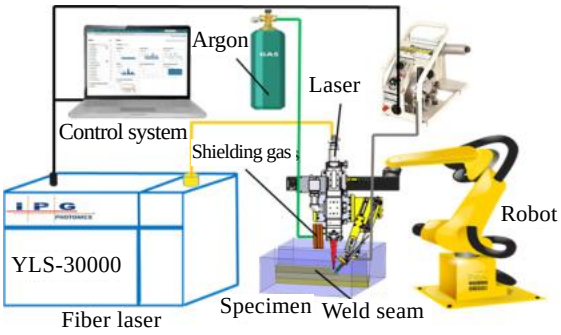

图 1　焊接系统

Fig.1　Welding system

表 2　焊接工艺参数

Table 2　Welding parameters

Shielding gas	Flow rate, Q/L min^{-1}	Current, I/A	Arc voltage, U/ V	Welding speed, V/mm s^{-1}	Wire extension, l/mm	Torch angle, α/(°)	Incidence angle of laser, θ/(°)
92%Ar+8%N_2 95%Ar+5%CO_2	18	180	28	6.7	18	40	6

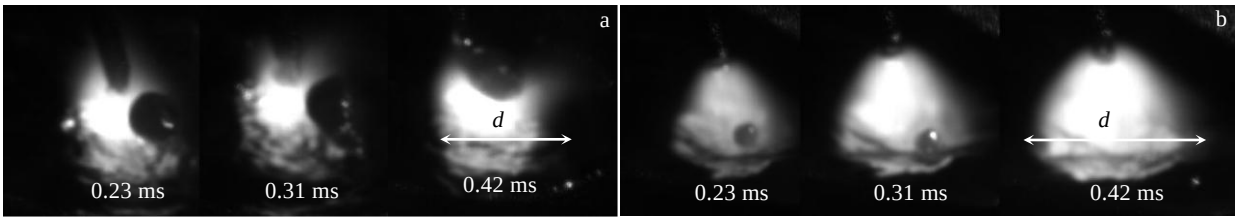

图 2　2 种保护气体下的电弧形态

Fig.2　Arc shape under two kinds of shielding gases: (a) 92%Ar+8%N_2 and (b) 95%Ar+5%CO_2

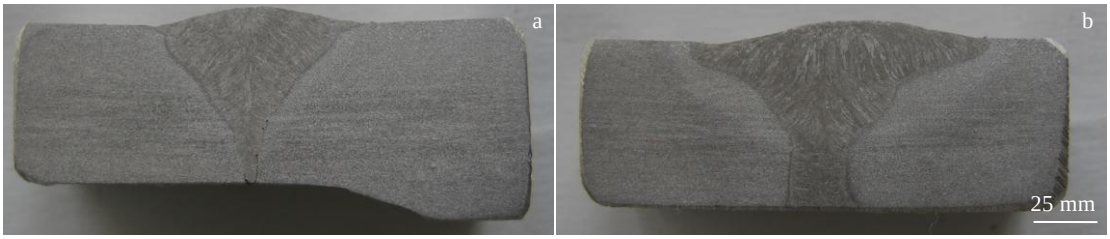

图 3　2 种保护气体下焊接接头宏观形貌

Fig.3 Macro shape of welded joint under two kinds of shielding gases: (a) 92%Ar+8%N_2 and (b) 95%Ar+5%CO_2

图 4 和图 5 分别是 2 种气体保护作用下焊接接头的微观组织。焊缝的微观组织特征基本相同，都是由离散的铁素体和奥氏体基体组成，不过图 4a 焊缝组织中铁素体呈骨骼状分布于奥氏体枝晶轴上，铁素体含量为 10.9%；图 5a 焊缝组织中铁素体呈蠕虫状依附于奥氏体枝晶间，铁素体含量较多，约为 14.1%。文献[11]也指出氮的添加会促使铁素体枝晶变细、二次枝晶臂变短，这是由于在激光-MAG 复合焊后极快冷却条件下，偏离平衡凝固过程，铁素体向奥氏体+铁素体转变的过程进行并不完全，铁素体不能充分完全转变成奥氏体，而奥氏体稳定元素氮介入了相的转变过程，提高了凝固过程中奥氏体的转变率，因此可以大幅提高奥氏体含量，增加约 20%。

另外，氮又是一种强烈的奥氏体形成元素，具有细晶强化作用[14]。对比图 4b 和图 5b 中熔合区靠近焊缝区域部分可以看出，氮气的加入使该部位的平均晶粒尺寸有所减小，经过金相法测算出由 59.3 μm 细化到 39.4 μm。

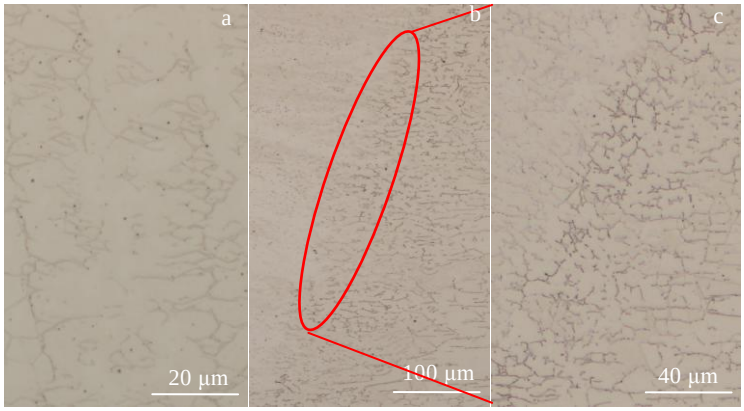

图 4　92%Ar+8%N_2 保护气体的焊接接头微观组织

Fig.4　Microstructures of welded joint under 92%Ar+8%N_2: (a) the weld zone and (b, c) the fusion zone

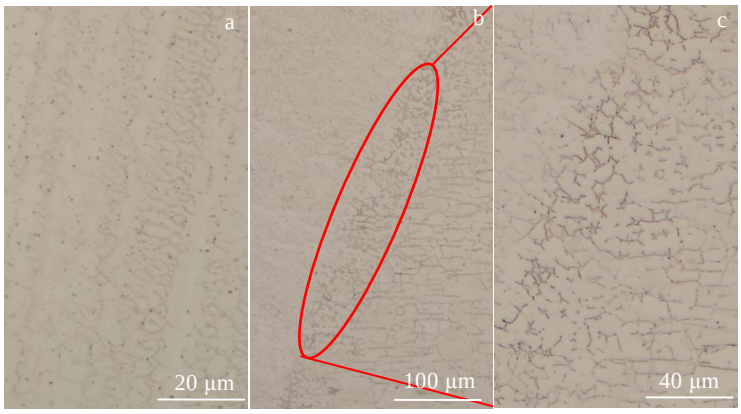

图 5　95%Ar+5%CO_2 保护气体焊接接头微观组织

Fig.5　Microstructures of welded joint under 95%Ar+5%CO_2: (a) the weld zone and (b, c) the fusion zone

图 6 所示为通过铁素体含量测定仪对焊缝组织进行铁素体含量测定结果，发现其与金相法测得的趋势一致，保护气体中氮气的加入使焊缝中平均铁素体含量由 13.2%降低至 10.3%。

2.3　保护气体比例对硬度的影响

2 种保护气体比例获得的焊接接头显微硬度测试结果如图 7 所示。2 组焊接接头的硬度分布趋势基本一致；保护气体中添加氮气后，焊缝区及热影响区硬度均呈下降趋势，这是因为氮气的加入降低了铁素体含量，增加了奥氏体含量，而铁素体硬度高于奥氏体，导致上述两区域硬度下降；同时，焊缝区内的氮含量始终低于母材中固溶氮含量。因此，母材的硬度值始终略高于焊缝区。

2.4　XRD 分析

低镍钢焊接过程中很容易析出诸如 σ 相、Cr_2N 等有害相，可以大幅降低焊缝组织的力学性能及耐腐蚀性能[15]。XRD 分析结果如图 8 所示，焊缝组织中仅发现少量α相和较多 γ 相，没有发现 σ 相、Cr_2N 及 Fe_4N 等析出相，分析原因可能是：激光-MAG 复合焊过程中，激光等离子体中的金属蒸气分压可有效分担保护气体中的氮气分压，导致氮在熔池中溶解度受限。同时激光-MAG 复合焊接接头冷却速度很快，电离分解的 N 无法充分溶解，而此时高温熔池已开始凝固，这在一定程度上又限制了焊缝中氮的过饱和溶解，从而有效控制了氮化物的形成与析出。通过物相分析也可发现，氮气的加入使铁素体含量由 13.9%减少到 10.6%，进一步验证了上述金相法与铁素体含量测定法的测试结果。

图 9 是焊缝组织中奥氏体晶粒度测试结果，氮气的添加使 4 个晶面的奥氏体晶粒尺寸均不同程度的减小，这是因为氮会减小铬在奥氏体中扩散系数，并降低其扩散速度，同时减小碳化物的晶格常数，增加界面位错密度，削弱各相生长动力，从而制约其形核与生长[16]。

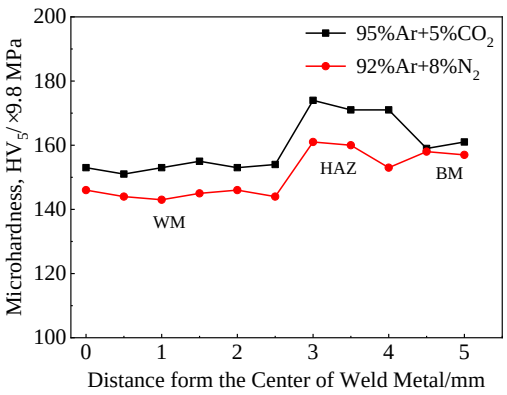

图 7　2 种保护气体下焊接接头的显微硬度

Fig.7　Micro-hardness of different zones for welded joints under two kinds of shielding gases

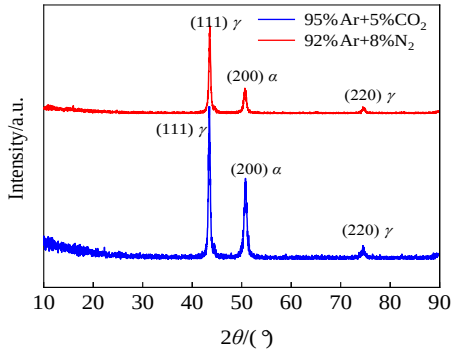

图 8　2 种保护气体下焊接接头焊缝 XRD 图谱

Fig.8　XRD patterns in weld zones of welded joints under two kinds of shielding gases

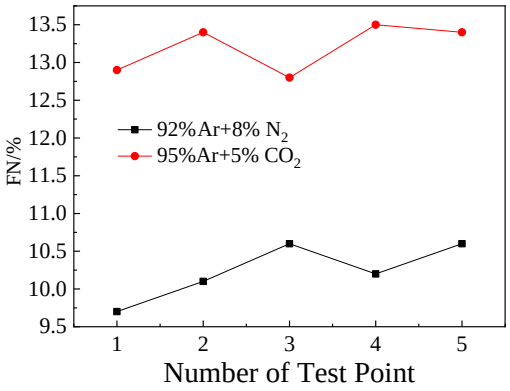

图 6　2 种保护气体下焊接接头不同位置铁素体含量

Fig.6　Ferrite content (FE) of different positions for welded joints under two kinds of shielding gases

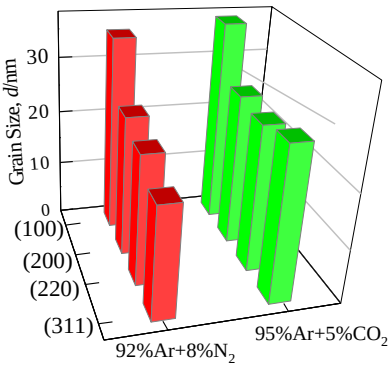

图 9　焊缝组织的奥氏体晶粒度

Fig.9　Austenite grain sizes of weld zones of welded joints under two kinds of shielding gases

2.5　拉伸及冲击性能分析

焊接接头力学性能如表 3 所示。间隙固溶原子将引起晶格点阵产生畸变，造成微裂纹尖端应力集中，从而可以导致材料韧性下降[17]。氮在焊接接头中主要以间隙固溶态存在[18]，这是造成其塑性和低温冲击韧性下降因素之一。由于组织变化及分布，即前文分析的焊缝组织中铁素体含量减少，且焊缝中由于 N 的间隙固溶，使 δ-铁素体分布于奥氏体枝晶轴上和枝晶间对于焊缝塑性变形的阻力产生差别，其中焊接保护气体为 95%Ar+5%CO_2 的焊缝组织中 δ-铁素体分布于奥氏体枝晶间，对塑性变形的阻力较大，因而，δ-铁素体分布位置变化可能是保护气体为 92%Ar+8%N_2 获得的焊接接头力学性能下降的主要原因。

为了进一步研究保护气体中氮气的加入对焊接接头冲击韧性的影响，对冲击断口形貌进行 SEM 观察，如图 10 所示。2 组冲击断口均能观察到等轴韧窝存在，但韧窝大小及形态有一定的区别。图 10a、10b 中冲击断口呈脆/韧混合断裂模式，铁素体可能是其断裂途径，并有部分撕裂棱存在，组织呈柱状晶形貌；图 10c、10d 中冲击断口韧窝较大且较深，并有较大的二次撕裂棱。

表 3　2 种保护气体下焊接接头力学性能

Table 3　Mechanical properties of welded joints under two kinds of shielding gases

Shielding gas	Tensile strength, R_m/MPa	Fracture position	Elongation, A/%	−60 ℃, a_{kv_2}/J
92%Ar+8%N_2	673 685	Weld metal	22.5 24.0	90, 98, 93, 92, 96,94
95%Ar+5%CO_2	704 710	Weld metal	26.5 29.0	107, 110, 114, 105, 107, 109

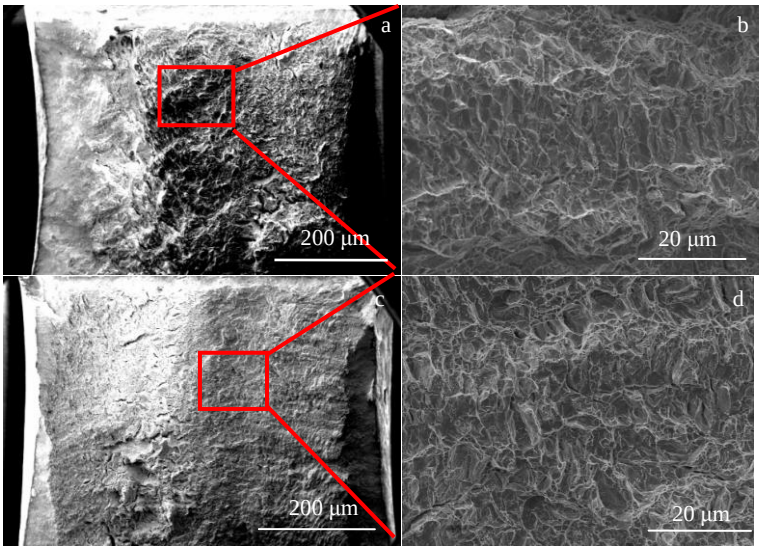

图 10　2 种保护气体下焊接接头的冲击断口形貌

Fig.10　Impact fracture morphologies of welded joints under two kinds of shielding gases: (a, b) 92%Ar+8%N_2 and (c, d) 95%Ar+5%CO_2

3　结 论

1）焊接保护气体中加入氮气后，电弧收缩明显，焊接飞溅增加，电弧稳定性变差；激光的介入增大了对电弧吸引作用并使电弧发生偏转。

2）加入氮气使得焊缝组织中铁素体呈骨骼状分布于奥氏体枝晶轴上，铁素体含量为 10.9%；无氮气保护的的焊缝组织中铁素体呈蠕虫状依附在奥氏体枝晶间，铁素体含量较多，约为 14.1%；加入氮气使得熔合区中靠近焊缝区部位的晶粒平均尺寸由 59.3 μm 细化到 39.4 μm。

3）氮气的添加降低了铁素体含量，导致焊缝组织平均硬度下降；焊缝组织中没有发现 σ 相、Cr_2N 及 Fe_4N 等有害相析出，保护气体中加入氮气使 4 个晶面上的奥氏体晶粒尺寸均减小。

参考文献　　References

[1] Dai Hong, Xia Xiwei, Fang Naiwen *et al. China Welding*[J],

2019, 28(3): 48

[2] Ming Zhu(明 珠), Wang Kehong(王克鸿), Wang Wei(王 伟) *et al*. *Transactions of the China Welding Institution*(焊接学报)[J], 2019, 40(1): 104

[3] Zhao L, Tian Z, Peng Y. *ISIJ International*[J], 2007, 47(12): 1772

[4] Bonnefois B, Coudreuse L, Charles J. *Welding International*[J], 2004, 18(3): 208

[5] Qiang Wei(强 伟), Wang Kehong(王克鸿), Hou Yao(侯 瑶). *Transactions of The China Welding Institution*(焊接学报)[J], 2017, 38(9): 70

[6] Bagger C, Olsen F O. *Journal of Laser Applications*[J], 2005, 17(1): 2

[7] Le Guen E, Fabbro R, Carin M *et al*. *Optics & Laser Technology*[J], 2011, 43(7): 1155

[8] Walz C, Seefeld T, Sepold G. *Laser Opto*[J], 2001, 33(2): 64

[9] Zhang L J, Zhang J X, Gumenyuk A *et al*. *Journal of Materials Processing Technology*[J], 2014, 214(8): 1710

[10] Chen Yanbin(陈彦宾), Chen Jie(陈 杰), Li Liqun(李俐群) *et al*. *Transactions of the China Welding Institution*(焊接学报)[J], 2003, 24(1): 56

[11] Fang Naiwen(方乃文), Huang Ruisheng(黄瑞生), Yan Dejun(闫德俊) *et al*. *Transactions of the China Welding Institution*(焊接学报)[J], 2021, 42(1): 70

[12] Xia Mingsheng(夏明生), Tian Zhiling(田志凌), Peng Yun(彭云) *et al*. *Materials Review*(材料导报)[J], 2006(2): 61

[13] Yang Tao(杨 涛), He Shuang(何 双), Chen Yong(陈 勇) *et al*. *Transactions of the China Welding Institution*(焊接学报)[J], 2016, 37(7): 65

[14] Jiang Yi(蒋 一), Cheng Manlang(程满浪), Jiang Haihong(姜海洪) *et al*. *Acta Metallurgica Sinica*(金属学报)[J], 2020, 56(4): 642

[15] Deng Baozhu(邓宝柱), Peng Yun(彭 云), Liao Pibo(廖丕博). *Journal of Mechanical Engineering*(机械工程学报)[J], 2011, 47(18): 66

[16] Ding Yutian (丁雨田), Meng Bin(孟 斌), Gao Yubi(高钰璧) *et al*. *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2019, 48(5): 1605

[17] Chang Haitao(畅海涛), Huo Xiaofeng(霍晓峰), Li Wangpeng(李万鹏) *et al*. *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2020, 49(10): 3633

[18] Guo Yang(郭 洋), Zhang Jianxun(张建勋), Xiong Jiankun(熊建坤) *et al*. *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2021, 50(4): 1462

Effect of Shielding Gas on Arc Characteristics and Microstructure and Properties of Laser-Arc Hybrid Welding of Low Nickel Stainless Steel

Fang Naiwen[1], Wang Xingxing[2], Xu Kai[1], Long Weimin[3], Huang Ruisheng[1], Xu Yinan[1], Yang Yicheng[1], Ma Yiming[1]

(1. Harbin Welding Institute Limited Company, Harbin 150028, China)

(2. Henan International Joint Laboratory of High-efficiency Special Green Welding, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450045, China)

(3. State Key Laboratory of Advanced Brazing Filler Metals & Technology, Zhengzhou Research Institute of Mechanical Engineering Co., Ltd，Zhengzhou 450001, China)

Abstract： In order to reveal the mechanism of the effect of shielding gas on the microstructure and mechanical properties of low nickel nitrogen austenitic stainless steel welded joints, the laser-MAG arc hybrid welding of QN1803 with low nickel and nitrogen content was carried out using 92%Ar + 8%N_2 and 95%Ar + 5%CO_2 as shielding gases. The results show that the average microhardness of the welded joint decreases with the addition of N_2. The arc contraction is obvious, the spatter increases and the volume increases, and the arc stability becomes worse. The austenite content in the weld increases by about 20%, and the ferrite dendrite becomes fine, the secondary dendrite arm becomes shorter. No σ phase and nitride precipitates are found in the weld. The austenite grain size decreases with the addition of nitrogen, and the tensile property of the welded joint decreases slightly.

Key words： N content; low nickel nitrogen austenitic stainless steel; laser arc hybrid welding; microstructure and mechanical properties

Corresponding author: Wang Xingxing, Associate Professor, North China University of Water Resource and Electric Power, Zhengzhou 450045, P. R. China, E-mail: wangxingxing@ncwu.edu.cn