

热处理对喷射成形 7xxx 系铝合金 TIG 焊接头组织与性能的影响

严 铿, 施志强, 王锡岭

(江苏科技大学 先进焊接技术省级重点实验室, 镇江 212003)

摘 要: 采用 7055 焊丝对喷射成形 7xxx 系铝合金进行 TIG 焊接, 接头经 $450\text{ }^{\circ}\text{C} \times 1\text{ h} + 475\text{ }^{\circ}\text{C} \times 1\text{ h}$ 的双级固溶后水淬, 再进行 $120\text{ }^{\circ}\text{C} \times 24\text{ h}$ 的时效处理后, 焊缝组织均匀、晶粒有所长大, 但没有出现过烧现象。经复合固溶处理后合金元素充分溶入基体, 使得基体中的合金元素含量高于固溶前的含量, 而固溶之前分布在晶界的合金元素经固溶之后降低了, 固溶过程使合金成分区域趋于均匀化, 后续的时效过程中过饱和固溶体析出强化相, 使得接头强度得到了显著提高, 7055 达到了母材强度的 65%, 7475 达到了母材强度的 91%。结果表明, 试验拟定的热处理工艺是合理的。

关键词: 喷射成形铝合金; 热处理; 力学性能

中图分类号: TG456.9 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-360X(2012)03-0033-04



严 铿

0 序 言

7xxx 铝合金属于 Al-Zn-Mg-Cu 系可时效强化合金, 经喷射成形技术制备的 7xxx 铝合金具有超高强度、高韧性、抗疲劳、耐腐蚀、可超塑性成形等性能, 国外被广泛用于飞机机身、机翼梁、机舱壁板、核工业和火箭高强度结构件的制造^[1]。国内还处于研究阶段。然而由于喷射成形铝合金的强化机理和熔化焊截然不同, 采用普通的熔焊工艺方法焊接存在明显的接头软化问题, 很难达到喷射成形的强度。而产生接头软化主要是由于焊缝的时效不足和热影响区中的过时效所造成的。由于焊缝凝固后大量的溶质元素偏析在枝晶间而导致固溶体中的过饱和度不足, 因此在焊后的时效过程中只能有少量的析出

硬化相。在这种情况下, 即使焊后进行人工时效也无法将焊缝强度提高到接近母材的水平^[2]。文中采用 7055 焊丝对喷射成形 7475, 7055 铝合金进行 TIG 焊接, 对接头通过 $450\text{ }^{\circ}\text{C} \times 1\text{ h} + 475\text{ }^{\circ}\text{C} \times 1\text{ h}$, 水淬, $120\text{ }^{\circ}\text{C} \times 24\text{ h}$ 双级固溶处理, 研究焊后热处理对喷射成形 7xxx 系铝合金接头性能的影响。

1 试验方法

母材采用经挤压、轧制加工制备的喷射成形 7475, 7055 铝合金板材, 板材尺寸为 $250\text{ mm} \times 100\text{ mm} \times 5\text{ mm}$ 。焊丝是由 7055 板材上线切割出 $4\text{ mm} \times 4\text{ mm}$ 的焊材。7475, 7055 铝合金名义成分如表 1 所示, 力学性能如表 2 所示^[3]。

表 1 7475 和 7055 铝合金名义成分(质量分数, %)

Table 1 Nominal compositions of 7475, 7055 Al alloy

牌号	Mg	Cu	Zn	Si	Fe	Mn	Cr	Ti	Al
7475	0.06	1.2 ~ 1.9	5.2 ~ 6.2	0.1	0.12	0.06	0.18 ~ 0.25	0.06	余量
7055	1.80 ~ 2.30	2.0 ~ 2.6	7.6 ~ 8.4	0.1	0.15	0.05	0.04	0.06	余量

采用交流钨极氩弧焊焊接喷射成形 7475, 7055

铝合金, 开 60° 坡口, 间隙为 2 mm , 采用对接接头。焊接保护气体为氩气, 氩气流量为 10 L/min , 钨极直径为 1.6 mm 。采用由 7055 板材经线切割出的焊丝对喷射成形 7475, 7055 铝合金进行焊接试验, 焊接工艺参数如表 3 所示。

收稿日期: 2010-12-30

基金项目: 江苏省自然科学基金资助项目(BK2010342); 江苏省科技支撑计划基金资助项目(BE2009126); 江苏高校优势学科建设工程基金资助项目(PAPD)

表 2 7xxx 系铝合金力学性能
Table 2 Mechanical properties of 7xxx series Al alloys

牌号	热处理状态	抗拉强度 R_m/MPa	屈服强度 R_{eL}/MPa	断后伸长率 $A(\%)$
7475	T76	552	489	11
7055	T7751	661	641	10

表 3 焊接工艺参数
Table 3 Process parameters of welding

母材	焊接电流 I/A	电弧电压 U/V	焊接速度 $v/(\text{mm}\cdot\text{s}^{-1})$
7475	180	17	2.29
7055	180	17	2.27

对喷射成形 7475, 7055 铝合金焊接接头的焊后固溶 + 时效处理条件: $450\text{ }^{\circ}\text{C} \times 1\text{ h}$ + $475\text{ }^{\circ}\text{C} \times 1\text{ h}$, 水淬, $120\text{ }^{\circ}\text{C} \times 24\text{ h}$. 具体热处理工艺参数如图 1 所示.

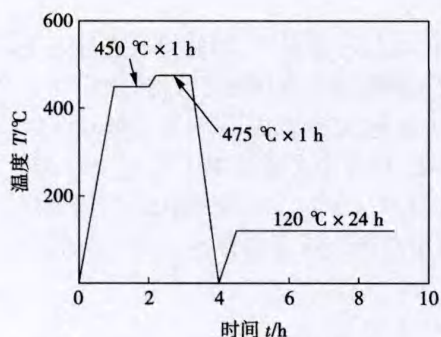


图 1 热处理工艺参数

Fig. 1 Parameters of heat treatment process

2 试验结果及分析

2.1 接头的力学性能

将热处理前、后的板材加工成拉伸试样, 在 CMT 5205 微机控制电子万能(拉力)试验机上进行接头的常温拉伸试验, 取两种板材热处理前后各 3 个试样测试值的平均值作为该状态下的测定值. 热处理前、后的接头断裂位置都位于焊缝中心. 喷射成形 7475, 7055 铝合金焊接接头经热处理前后的抗拉强度分别如表 4 所示.

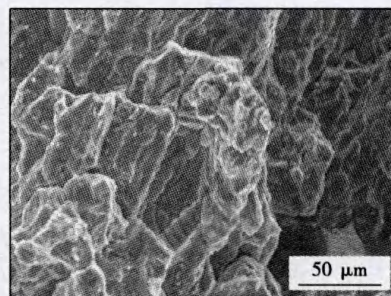
喷射成形 7475, 7055 铝合金焊接接头经热处理后, 抗拉强度都显著提高了, 喷射成形 7055 铝合金的接头抗拉强度由热处理前的 242 MPa 提高到热处

表 4 喷射成形 7xxx 系铝合金接头热处理前后的抗拉强度
Table 4 Tensile strength of welded joint of spray formed 7xxx series Al-alloy under heat treatment

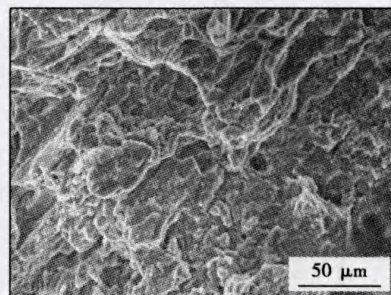
母材	焊接电流 I/A	电弧电压 U/V	焊接速度 $v/(\text{mm}\cdot\text{s}^{-1})$	抗拉强度 R_m/MPa	
				热处理前	热处理后
7475	180	17	2.29	256	502
7055	180	17	2.27	242	414

理后的 414 MPa. 喷射成形 7475 铝合金接头的抗拉强度由热处理前的 256 MPa 提高到热处理后的 502 MPa.

图 2 为喷射成形 7055 铝合金焊接接头热处理前后的拉伸断口形貌. 图 3 为喷射成形 7475 铝合金焊接接头热处理前后的拉伸断口形貌.



(a) 7055 铝合金热处理前接头断口形貌



(b) 7055 铝合金热处理后接头断口形貌

图 2 7055 铝合金接头热处理前后拉伸断口形貌

Fig. 2 SEM morphologies of tensile fracture of 7055 Al-alloy welded joint under heat treatment

由图 2a 可知, 喷射成形 7055 铝合金热处理前接头断口为脆性断裂, 断口整个的晶粒被拉出, 没有任何韧窝特征. 而经热处理后如图 2b 所示, 接头断口为类解理断裂; 图 3a 为喷射成形 7475 铝合金热处理前断口形貌, 断口为沿晶断裂, 局部区域存在空洞及二次裂纹, 而经热处理后断口存在明显的韧窝状, 为韧性断裂, 小部分区域有晶粒被拉出的痕迹, 如图 3b 所示.

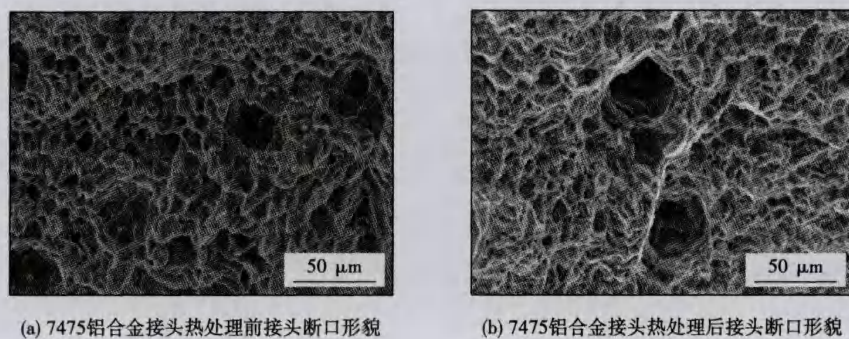


图3 7475 铝合金接头热处理前后拉伸断口形貌

Fig. 3 SEM morphologies of tensile fracture of welded joint of 7475 Al-alloy under heat treatment

2.2 接头组织特征分析

图4为喷射成形7475,7055铝合金热处理前后焊缝金相组织形貌。对比热处理前后焊缝金相组织形貌,发现喷射成形7475,7055铝合金经热处理前

后焊缝组织都比较均匀,热处理后的晶粒有所长大,没有出现过热现象,未热处理的焊缝组织晶界比较明显,而经热处理后的焊缝晶界则不明显。图5为喷射成形7055铝合金接头热处理前后焊缝组织的

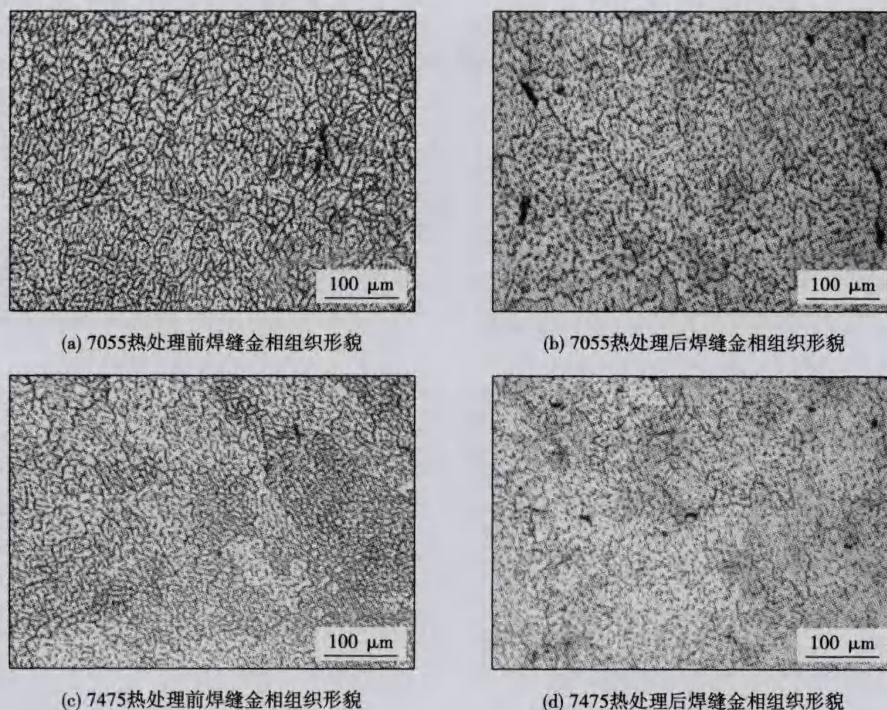


图4 喷射成形7055和7475铝合金热处理前后焊缝金相组织形貌

Fig. 4 SEM morphologies of tensile fracture of welded joint of spray formed 7055, 7475 Al-alloy under heat treatment

SEM形貌。

对热处理前焊缝组织如图5a中的基体(A区)和晶界(B区)以及热处理后的焊缝组织如图5b中的基体(C区)和晶界(D区)进行EDS成分分析,试验结果如表5所示。

EDS试验数据表明,在热处理前焊缝中的合金

元素分布很不均匀,焊缝晶界(B区)处的合金元素比焊缝基体(A区)中合金元素的含量要高得多,Cu,Mn,Zn等合金元素在晶界偏析;而热处理后焊缝基体(C区)中合金元素相对于热处理之前基体的含量上升了,而晶界(D区)中合金元素由于溶入基体,其含量相应降低了,热处理后的焊缝中合金元

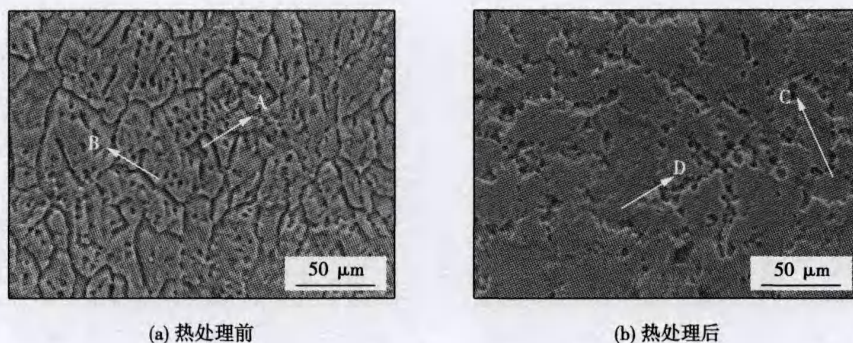


图5 喷射成形7055铝合金接头热处理前后焊缝组织SEM形貌

Fig. 5 SEM morphologies of joint of spray formed 7055 Al-alloy in TIG welding

表5 EDS分析结果(质量分数,%)
Table 5 EDS composition analysis results

元素	热处理前		热处理后	
	A区	B区	C区	D区
MgK	2.23	1.49	2.73	2.00
AlK	88.37	60.16	85.87	82.10
SiK	0.21	0.00	0.18	0.00
MnK	0.38	0.60	0.55	0.61
FeK	0.40	0.59	0.51	0.45
CuK	1.01	17.07	1.99	4.02
ZnK	7.40	19.96	8.15	10.81

素分布比较均匀,偏析消除了。

由于喷射成形7xxx系铝合金主要通过时效析出而强化,在时效处理之前通过固溶处理获得过饱和固溶体,先升温至450℃保温1h后,再升温至475℃保温1h,采用双级固溶处理提高材料的固溶程度,使结晶相充分固溶,固溶的合金元素浓度增加,合金元素充分溶入基体,使得基体中的合金元素含量高于固溶前的含量,Cu元素含量由1.01%上升至1.99%;Zn元素含量由7.4%上升至8.15%;Mg元素含量由2.23%上升至2.73%,如表5中A区,C区试验数据。而固溶之前分布在晶界的合金元素经固溶之后降低了,Cu元素含量由17.07%下降至4.02%;Zn元素含量由19.96%下降到10.81%,如表5中B区,D区试验数据。固溶过程中基体中的溶质原子含量高且扩散充分,合金成分区域趋于均匀化,高温固溶后淬火形成的过饱和固溶体,由于喷射成形7xxx系铝合金基体中合金元素含量很高使得时效过程中析出第二相的相变驱动力增加,减小第二相临界晶核尺寸,高的过饱和程度使得时效析出相的数量提高了,在沉淀过程中形成了均匀、弥散的共格和半共格过渡相,而这些相的性能和结构与基体不同,从而在基体中能造成强烈的应

变场,提高了对位错运动的阻力,使合金得到很好的强化^[4,5]。

3 结论

(1) 采用TIG焊方法,7055焊丝焊接的喷射成形7xxx系铝合金焊接接头通过450℃×1h+475℃×1h,水淬,120℃×24h双级固溶处理后,接头强度得到了显著提高。7055铝合金的接头抗拉强度由242MPa提高到414MPa,达到母材的65%。7475铝合金接头抗拉强度由256MPa提高到502MPa,达到母材的91%。

(2) 采用双级固溶处理提高了材料的固溶程度,使结晶相充分固溶,固溶的合金元素浓度增加,合金元素充分溶入基体,使得基体中的合金元素含量高于固溶前的含量,而固溶之前分布在晶界的合金元素经固溶之后降低了,固溶过程使合金成分区域趋于均匀化,后续的时效过程中过饱和固溶体析出强化相,使得接头强度得到了显著提高。

(3) 喷射成形7055,7475铝合金经热处理前后焊缝组织均匀、细小,热处理后的晶粒有所长大,但没有出现过烧现象,且强度提高,表明试验拟定的热处理工艺是合理的。

参考文献:

- [1] 张豪,张捷,杨杰,等. 喷射成形工艺的发展现状及其对先进铝合金产业的影响[J]. 铝加工, 2005, 163(4): 1-6. Zhang Hao, Zhang Jie, Yang Jie, et al. Current development situation of spray forming process and its influence on advanced aluminium alloy industry[J]. Aluminum Fabrication, 2005, 163(4): 1-6.
- [2] 李云飞. 2195铝锂合金焊接热裂纹敏感性和焊接材料研究[D]. 北京: 北京航空材料研究院, 2007.

[下转第40页]

为大厚板的自动化焊接提供了工艺保障。

参考文献:

- [1] 张 蕾, 李亚江, 蒋庆磊. 淬火 + 回火低合金高强钢焊接的研究现状[J]. 现代焊接, 2010(10): 17-21.
Zhang Lei, Li Yajiang, Jiang Qinglei. Present situation of study on the welding of quenching + tempering low-alloy and high-strength steel[J]. Modern Welding Technology, 2010(10): 17-21.
- [2] 赵伯捷, 曹凌源, 郑惠锦, 等. 船舶高效焊接工艺及装备[J]. 国防制造技术, 2010(3): 5-11.
Zhao Bojian, Cao Lingyuan, Zheng Huijin, et al. High efficiency welding technology and equipment in shipping[J]. Defense Manufacturing Technology, 2010(3): 5-11.
- [3] 邹家生. 造船工业及焊接技术的现状和发展[J]. 现代焊接, 2008(4): 1-6.
Zou Jiasheng. The present situation and development of shipping industry and welding technology[J]. Modern Welding Technology, 2008(4): 1-6.
- [4] Gao M, Cao Y, Zeng X Y, et al. Mechanical properties and mi-

crostructures of hybrid laser MIG welded dissimilar Mg-Al-Zn alloys[J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2010, 15(7): 638-645.

- [5] Sharma A, Chaudhary A K, Arora N, et al. Estimation of heat source model parameters for twin-wire submerged arc welding[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2009, 45(11/12): 1096-1103.
- [6] Liu Dianbao, Zhao Huihui, Li Fuquan, et al. Numerical simulation of dynamic thermal process during double-sided asymmetrical TIG backing welding of large thick plates[J]. China Welding, 2011, 20(1): 44-48.
- [7] 刘殿宝, 李福泉, 谭财旺, 等. EH36 钢厚板双面双弧打底焊焊缝组织及性能研究[J]. 焊接学报, 2011, 32(1): 81-84.
Liu Dianbao, Li Fuquan, Tan Caiwang, et al. Microstructure and performance of backing weld joint of EH36 steel thick plate by double-sided arc welding[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2011, 32(1): 81-84.

作者简介: 刘殿宝,男,1966 年出生,博士研究生,研究员. 主要从事焊接工艺与焊接冶金方面的研究. 发表论文 10 篇. Email: hld6499@yahoo.com.cn

通讯作者: 张广军,男,博士,教授. Email: zhanggj@hit.edu.cn

[上接第 36 页]

- [3] 甘卫平, 范洪涛, 许可勤, 等. Al-Zn-Mg-Cu 系高强铝合金研究进展[J]. 铝加工, 2003, 161(3): 6-12.
Gan Weiping, Fan Hongtao, Xu Keqin, et al. Study progress of Al-Zn-Mg-Cu series high strength aluminium alloys[J]. Aluminium Fabrication, 2003, 161(3): 6-12.
- [4] 李先聚. 喷射成形 7055 铝合金组织和性能的研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2008.
- [5] 黄光杰, 汪凌云. 热处理对 2024 铝合金组织和性能的影响

[J]. 重庆大学学报, 2000, 23(4): 99-102.

Huang Guangjie, Wang Lingyun. The influence of heat treatment on the microstructures and properties of 2024 aluminum [J]. Chongqing University Journal, 2000, 23(4): 99-102.

作者简介: 严 铿,男,1961 年出生,教授,硕士研究生导师. 主要从事新材料焊接以及焊接新工艺和搅拌摩擦焊工艺研究. 发表论文 50 余篇. Email: yankeng@126.com