

TIG 熔修对 7N01 铝合金焊接接头疲劳性能的影响

闫忠杰¹, 刘雪松¹, 方洪渊¹, 尚哲¹, 汪认², 孟立春²

(1. 哈尔滨工业大学 先进焊接与连接国家重点实验室, 哈尔滨 150001;

2. 南车青岛四方机车车辆股份有限公司 技术工程部, 青岛 266111)

摘 要: 采用焊条电弧焊的方法对 7N01 铝合金焊接试板进行 TIG 熔修, 对熔修前后的试件进行疲劳寿命测试, 并对焊接接头的显微硬度变化进行测试, 采用扫描电镜对疲劳断口进行显微形貌分析, 并对疲劳源区缺陷进行 XRD 成分检测。结果表明, TIG 熔修对焊趾应力集中的降低有限, 还可能引入新的焊接缺陷成为疲劳裂纹源; 同时 TIG 熔修使得焊接区域经二次加热, 沉淀强化相的形态和重新分布造成接头组织弱化, 降低了焊接接头抵抗疲劳裂纹扩展的能力, 多方面作用的结果是: 经 TIG 熔修后铝合金焊接接头疲劳寿命略有降低, 所以对于 7N01 高强铝合金对接接头单纯采用焊趾 TIG 熔修的方法提高疲劳性能不具备可行性。

关键词: TIG 熔修; 疲劳; 焊接接头

中图分类号: TG404 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-360X(2013)04-0105-04



闫忠杰

0 序 言

高强铝合金材料以其优良的综合性能广泛应用于高速列车车身和底架结构制造领域, 然而在车辆运行中结构的失效破坏甚至灾难性事故在各国均有发生。列车服役中承受的低应力交变载荷常造成结构的疲劳失效破坏, 其影响因素包括应力集中, 表面状态, 接头几何形状, 载荷工况等。焊趾位置的几何不连续引起的缺口应力峰值, 是导致焊接结构件疲劳性能下降的主要因素。

焊接接头的几何形状优化, 特别是降低焊趾附近承载时的应力集中和局部强化是提高疲劳性能的重要方法^[1], 其工艺措施包括焊趾磨削, 焊趾熔修, 机械冲击^[2,3]等。其中 TIG 熔修作为一种重要的提高构件疲劳性能的工艺措施在高强钢焊缝几何形状优化中应用广泛, 且收到了很好的效果^[4,5]。TIG 熔修在时效强化铝合金上的应用尚无较多的研究工作报道, 熔修时的二次热循环作用是否会对铝合金焊接接头组织性能产生不良影响还有待进一步考察。为此文中重点对高速列车用 7N01 铝合金的对接接头的焊趾 TIG 熔修技术进行了研究, 对影响接头疲劳性能的主要因素进行了探讨和分析, 为相关技术的科学合理应用提供参考和借鉴。

1 模拟试块及其检测

试验材料选用的 7N01 铝合金, 焊缝填充材料为 SAF 5356 焊丝, 焊丝直径为 2.5 mm, 母材和熔敷金属的屈服强度分别为 295 MPa 和 128 MPa, 二者的材料化学成分如表 1 所示。试板规格为 500 mm × 250 mm × 12.5 mm, 采用平板对接方式进行焊接, 参照高速列车的焊接制造工艺, 试板开单边 V 形坡口, 坡口形式如图 1 所示。

表 1 母材和焊丝的化学成分(质量分数, %)
Table 1 Compositions of base metal and welding wire

	Zn	Mg	Fe	Si	
母材	4.50	1.20	0.40	0.35	
焊丝	0.13	4.9	0.12	0.057	
	Cu	Cr	Mn	Ti	Al
母材	0.20	0.2	0.15	—	余量
焊丝	0.011	0.065	<0.13	0.11	余量

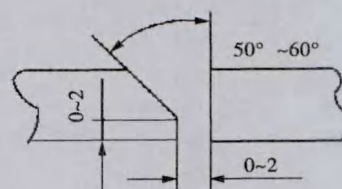


图 1 焊接坡口(mm)

Fig. 1 Bevel of welding

制备两块相同的待焊试板,在焊前首先用砂布和丙酮去除待焊部位附近的氧化膜和油污,采取 MIG 焊的方法对两块试板施焊,焊接电流为 220 A,电弧电压为 23 V,焊接速度为 40 cm/min. 选取其中一块进行 TIG 填丝堆焊熔修,焊接电流为 200 A,电弧电压为 240 V,焊接速度为 8 cm/min. 在采用 TIG 熔修及未采用熔修的正常焊接试板上分别取 8 个疲劳试样,试样尺寸参照国家标准 GB/T13816—92《焊接接头脉动拉伸疲劳试验方法》,疲劳试样示意图如图 2 所示. 在试验前将试件表面依次用 80 号,240 号,600 号砂纸打磨光滑,疲劳试验在 MTS810 液压伺服低频疲劳试验机上进行,频率范围为 15~20 Hz,最大动负载 50 kN. 采用脉动循环载荷,最大应力为 90 MPa. 断口分析试件在拉断的试件上直接截取,用肉眼和放大镜进行了宏观观察后,在 HITACHI S-3400 扫描电子显微镜下进行微观观察,对部分区域进行能谱分析. 在 HX-1000 显微硬度计上对 TIG 熔修及未熔修焊接接头进行硬度测试,硬度试验所用载荷为 0.48 N,相邻硬度点间距大于 1 mm.

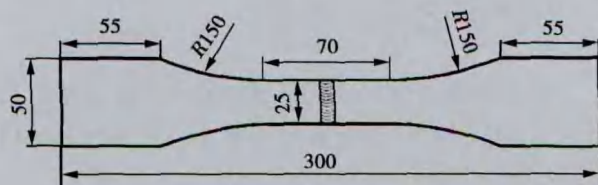


图 2 疲劳试验件几何尺寸(mm)

Fig. 2 Geometric dimensions of fatigue test specimen

2 试验结果及分析

表 2 为原始状态焊接接头的疲劳试验结果,可以看出,平均寿命约为 81 万周次,疲劳破坏主要发生于焊趾附近,这与焊趾位置具有明显的几何不连续从而造成应力集中密切相关.

表 2 原始状态焊接接头疲劳试验结果

Table 2 Fatigue experiment results of as-welded joints

试件编号	疲劳寿命 $N/(10^6 \text{ 周次})$	断裂位置
1	1.854	焊趾
2	0.358	焊趾
3	0.138	焊缝
4	0.481	焊趾
5	0.688	焊趾
6	0.891	焊趾
7	0.699	焊趾
8	1.425	焊趾

图 3 为原始状态焊接接头疲劳断口宏观形貌. 图 3a 为断于焊趾位置的 1 号试件的宏观断口形貌,可以看出疲劳源区位于焊趾应力集中处,稳定扩展区在整个断口所占比例很大. 图 3b 为断于焊缝位置的 3 号试件的宏观断口形貌,焊缝中存在较多夹杂物和少量熔合不良区域,在交变载荷作用下这些区域优先形成疲劳源,大幅度降低了试件的疲劳寿命. 图 4 为原始状态焊接接头断口疲劳源区显微形貌,疲劳裂纹常萌生于焊趾应力集中附近的氧化物夹杂、气孔等缺陷处. 表 3 为疲劳源区夹杂物的 XRD 能谱分析成分,杂质主要为含有 Fe, Mn 等元素的氧化物,这些元素在焊接热过程作用下使强化相发生偏聚,导致材料性能弱化.

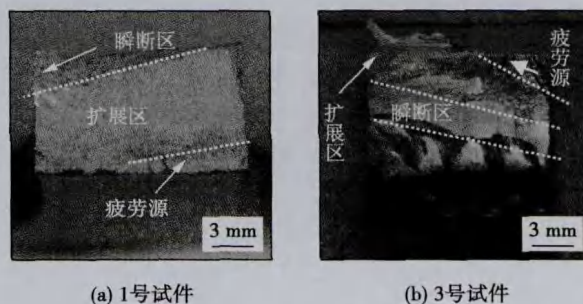


图 3 原始状态焊接接头疲劳断口宏观形貌

Fig. 3 Macrostructure of as-welded joint fatigue fractures

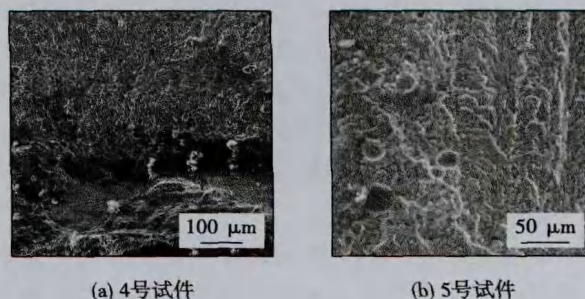


图 4 原始状态焊接接头断口源区显微形貌

Fig. 4 Microstructure of as-welded joint fatigue fractures in initiation zone

表 3 夹杂物 XRD 成分分析(质量分数,%)

Table 3 Compositions of inclusion analyzed by XRD

Mg	Al	Mn	Fe	Zn
0.859 3	73.388 0	1.348 6	1.153 6	22.341 1

表 4 为 TIG 熔修后焊接接头的疲劳试验结果,试件的平均寿命约为 64 万次,与熔修前相比疲劳寿命变化不大,所有疲劳裂纹均萌生于焊趾附近. 图 5 为 TIG 熔修后焊接接头的宏观形貌,在焊趾位置

TIG 熔修后缺口处的几何不连续得到了一定缓解,但应力集中改善不明显,焊趾依然是疲劳载荷下的薄弱环节。

表 4 TIG 熔修后焊接接头疲劳试验结果

Table 4 Fatigue experiment results of TIG dressing weld joints

试件编号	疲劳寿命 $N/(10^6 \text{ 周次})$	断裂位置
1	0.590	焊趾
2	0.692	焊趾
3	0.667	焊趾
4	0.371	焊趾
5	1.101	焊趾
6	0.521	焊趾
7	0.675	焊趾
8	0.528	焊趾

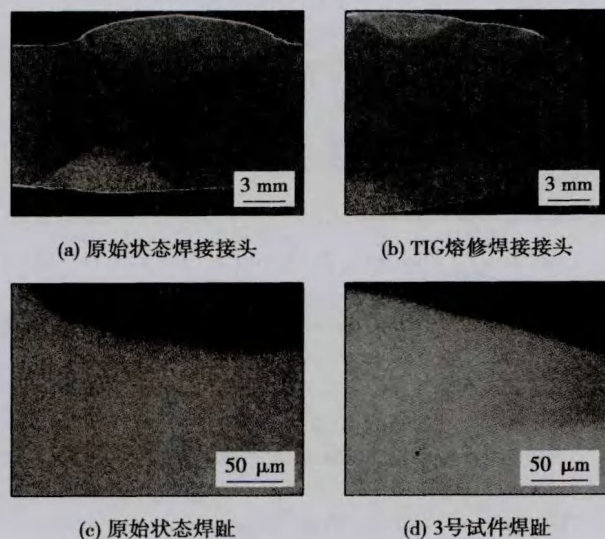


图 5 TIG 熔修及原始状态焊接接头的宏观形貌

Fig. 5 Macrostructure of as-welded and TIG dressing joint fatigue fractures

图 6 为 TIG 熔修前后焊接接头的显微硬度分布曲线,分析发现,与原始接头硬度相比,在焊趾处进行焊条电弧焊 TIG 熔修后,整个接头的维氏硬度趋势不变但数值明显降低,主要原因是在焊趾处堆焊的过程中对接头进行了重新加热,时效强化的沉淀相将会过分长大,使整个接头硬度下降。组织的软化降低了铝合金焊接接头抵抗疲劳裂纹扩展的能力,因此经 TIG 熔修处理的铝合金焊接接头疲劳性能没有明显提高,甚至略有降低。

图 7 为 TIG 熔修焊接接头疲劳断口微观形貌,从疲劳断口源区可以发现,在焊趾处进行 TIG 熔修后引入了新的焊接缺陷,在疲劳裂纹处存在较多的

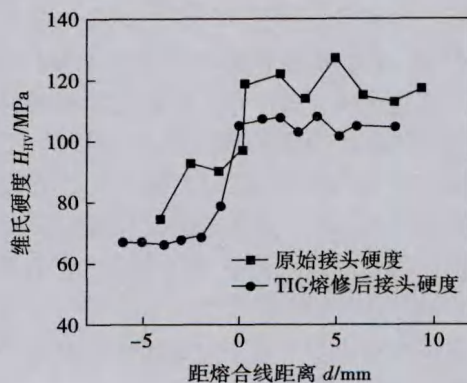


图 6 TIG 熔修前后焊接接头显微硬度对比

Fig. 6 Comparison of micro-hardness between TIG dressing and as-welded joints

夹杂、氧化皮、气孔等焊接缺陷,部分扩展区呈现辉纹加韧窝的混合形貌,可以推断由于在源区存在较多的缺陷及其引起的应力集中,裂纹在萌生后很快进入了高速扩展阶段,并在较少周次循环载荷作用后发生失稳瞬间断裂。焊接缺陷、组织软化和应力集中是焊接接头疲劳失效破坏的主要原因。

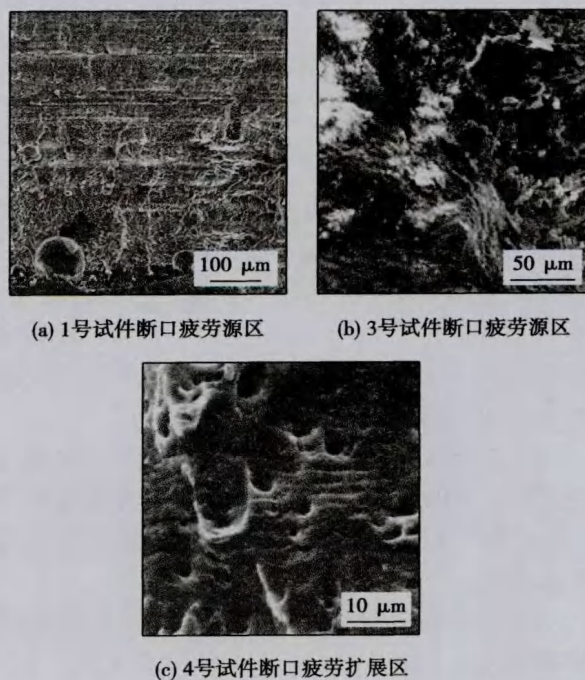


图 7 TIG 熔修焊接接头疲劳断口微观形貌

Fig. 7 Fatigue fractures of TIG dressing weld joints

3 结 论

(1) 对 TIG 熔修及未熔修的 7N01 铝合金焊接接头的疲劳寿命分别进行测试发现,原始状态焊接

接头疲劳寿命平均值约为 81 万次, TIG 熔修后平均寿命约为 64 万次, 疲劳破坏主要发生于焊趾位置。

(2) 试验证实, 采用 TIG 熔修技术很难精确控制 7N01 铝合金对接接头焊趾处几何形状, 不能有效降低接头的应力集中, 同时熔修工艺还极易引入的新的焊接缺陷, 这些缺陷将诱发疲劳裂纹的萌生甚至直接作为初始裂纹使疲劳过程进入扩展阶段。

(3) TIG 熔修对铝合金焊接接头进行了重新加热将会使接头组织发生软化, 抵抗疲劳裂纹扩展的能力降低。

参考文献:

- [1] 赵智力, 杨建国, 刘雪松, 等. 低匹配对接接头应力集中系数计算及回归分析[J]. 焊接学报, 2008, 29(7): 109-112.
Zhao Zhili, Yang Jianguo, Liu Xuesong, et al. Influence of joint geometric parameters on shape factor of under-matched butt joint with center crack[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2008, 29(7): 109-112.
- [2] 王东坡, 霍立兴, 张玉凤, 等. 提高焊接接头疲劳强度的超声波冲击法[J]. 焊接学报, 1999, 29(3): 158-163.
Wang Dongpo, Huo Lixing, Zhang Yufeng, et al. Ultrasonic peen-

ing method to improve fatigue strength of welded joint[J]. Transactions of the China Welding Institution, 1999, 29(3): 158-163.

- [3] 王涛, 杨建国, 刘雪松, 等. TIG 含中心裂纹低匹配对接接头形状参数对形状因子的影响[J]. 焊接学报, 2008, 29(6): 77-80.
Wang Tao, Yang Jianguo, Liu Xuesong, et al. Finite element calculation and regression analysis on stress concentration factors of undermatching butt joints[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2008, 29(6): 77-80.
- [4] 薛钢, 王任甫. 焊趾 TIG 熔修对 10Ni5CrMoV 钢焊接节点疲劳性能的影响[J]. 焊接学报, 2012, 33(1): 101-104.
Xue Gang, Wang Renfu. Influence of TIG dressing on fatigue property of 10Ni5CrMoV steel welded joints[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2012, 33(1): 101-104.
- [5] 王东坡, 霍立兴, 张玉凤. TIG 熔修法改善含咬边缺陷焊接接头疲劳性能[J]. 天津大学学报, 2004, 37(7): 570-574.
Wang Dongpo, Huo Lixing, Zhang Yufeng. Influence of undercuts on fatigue property of welded joints by TIG dressing treatment[J]. Journal of Tianjin University, 2004, 37(7): 570-574.

作者简介: 闫忠杰, 女, 1986 年出生, 博士研究生. 主要从事焊接结构可靠性研究. 发表论文 2 篇. Email: yzj_hit@163.com.

通讯作者: 刘雪松, 男, 副教授, 博士研究生导师. Email: liuxuesong@hit.edu.cn

[上接第 95 页]

3 结 论

(1) 采用热弹塑性有限元法计算了 LNG 船用 Invar 钢薄膜的焊接温度场和残余应力场, 并计算了焊接残余应力与液体晃荡压力叠加后的疲劳载荷, 以此为基础计算了 Invar 钢焊缝的疲劳寿命, 计算结果表明焊接残余应力对于 LNG 船液舱薄膜的疲劳寿命有着重要的影响。

(2) 焊缝表面中心线上的节点的纵向残余应力可达 298.1 MPa 左右, 焊缝纵向残余应力的峰值可达 328.3 MPa 左右, 高于 Invar 钢的室温屈服强度 280.1 MPa;

(3) 由于焊接残余应力的存在, Invar 钢薄膜焊缝的疲劳寿命约由 2.1×10^6 降低到 1.7×10^5 。

参考文献:

- [1] Lin W S, Zhang N, Gu A Z. LNG (liquefied natural gas): A necessary part in China's future energy infrastructure[J]. Energy, 2010, 35: 4383-4391.
- [2] Bubbico R, Cave S D, Mazzarotta B. Preliminary risk analysis for LNG tankers approaching a maritime terminal[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2009, 22: 634-638.
- [3] Vanem E, Antao P, Østvik I. Analysing the risk of LNG carrier

operations[J]. Reliability Engineering and System Safety, 2008, 93: 1328-1344.

- [4] Kim M H, Lee S M, Lee J M. Fatigue strength assessment of MARK-III type LNG cargo containment system. Ocean Engineering, 2010, 37: 1243-1252.
- [5] 刘雪松, 闫德俊, 杨建国, 等. 有限元分析热-力学参量对焊接残余应力峰值特征的影响[J]. 焊接学报, 2010, 31(7): 27-30.
Liu Xuesong, Yan Dejun, Yang Jianguo, et al. Effect of thermo-mechanical parameters on hump feature of welding residual stress by finite element analysis[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2010, 31(7): 27-30.
- [6] 汪建华, 陆皓. 焊接残余应力形成机制与消除原理若干问题的讨论[J]. 焊接学报, 2002, 23(3): 75-79.
Wang Jianhua, Lu Hao. Some discussions on principle of causing and relieving welding residual stress[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2002, 23(3): 75-79.
- [7] 吕一仕, 荆洪阳, 徐连勇. TIG 熔修后 T 形接头的焊接残余应力及消除. 焊接学报, 2012, 33(9): 37-40.
Lv Yishi, Jing Hongyang, Xu Lianrong. Welding residual stress in T-joint after TIG dressing and its relief[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2012, 33(9): 37-40.
- [8] Park W S, Chun M S, Han M S, et al. Comparative study on mechanical behavior of low temperature application materials for ships and offshore structures: Part I-Experimental investigations[J]. Materials Science and Engineering A, 2011, 528: 5790-5803.

作者简介: 赵东升, 男, 1980 年出生, 博士, 讲师, 硕士生导师. 主要从事异种材料连接及焊接结构疲劳寿命评估的研究. 发表论文 10 余篇. Email: dszhao@dlut.edu.cn