

文章编号: 1004 - 0609(2004) 06 - 0956 - 05

2519 铝合金焊接接头的组织与性能^①

李慧中, 张新明, 陈明安, 龚敏如, 周卓平

(中南大学 材料科学与工程学院, 长沙 410083)

摘 要: 采用进口 4047 焊丝对 2519 铝合金进行熔化极惰性气体保护焊(MIG), 对焊接接头的力学性能和显微组织进行了研究。结果表明, 2519 铝合金焊接性能较好, 由于热循环的作用, 焊接接头的力学性能相对于基材发生了较大变化。2519 铝合金焊接接头的力学性能低于基材的性能, 焊缝处是合金接头的最薄弱环节, 其次是焊接热影响区内的软化区, 强化相粒子发生过时效而粗化是形成软化区的主要原因。

关键词: 2519 铝合金; 焊接接头; 显微组织

中图分类号: TG 146

文献标识码: A

Microstructures and properties of welded joint of 2519 aluminum alloy

LI Hui-zhong, ZHANG Xin-ming, CHEN Ming-an, GONG Min-ru, ZHOU Zhuo-ping

(School of Materials Science and Engineering, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: 2519 aluminum alloy was welded by using imported 4047 welding wire with method of MIG. The mechanical properties and microstructures of welded joint were studied. The results show that the weldability of 2519 aluminum alloy is fairly good, but due to the weld thermal cycle, the mechanical properties of the welded joint have changed greatly to the base metal relatively. The mechanical properties of 2519 aluminum alloy welded joint are worse than those of the base metal. The weld zone is the weakest point in welded joint, and the soften zone in heat-affected zone(HAZ) is the second weakest point in welded joint, which is formed due to the overageing of the main strengthening phase particles leading to coarsening.

Key words: 2519 aluminum alloy; welded joint; microstructure

2519 铝合金是 Al-Cu 系热处理可强化合金, 是继 5083(Al-Mg 合金)、7039(Al-Zr-Mg 合金) 铝合金后于 20 世纪 80 年代开发的一种新型装甲铝合金, 其目的是在防护效能不低于 7039 合金的前提下提高装甲铝合金海水及盐雾环境下的抗应力腐蚀性能, 并有良好的焊接工艺性^[1~8]。有关铝合金的焊接性能方面的研究已有较多的报道^[9~13], 但对 2519 铝合金焊接性能的研究报道甚少。虽然 2519 铝合金有着良好的综合性能, 但在焊接过程中受焊接热输入的影响, 组织结构发生了变化, 焊缝及焊

接热影响区内合金性能发生了变化, 严重影响装甲车体焊接构件的总体强度和使用寿命^[14]。因此, 研究 2519 铝合金焊接接头组织和性能及其影响机制很有必要。

1 实验

1.1 材料

2519 铝合金的成分见表 1。其制备工艺流程为: 采用 Al-Cu, Al-Mn, Al-Ti 和 Al-Zr 等中间合金

① 基金项目: 国家重点基础研究发展规划资助项目(G1999064908)

收稿日期: 2003 - 10 - 17; 修订日期: 2003 - 12 - 10

作者简介: 李慧中(1968 -), 男, 讲师, 博士研究生。

通讯作者: 李慧中, 电话: 0731 - 8830265; E-mail: lhz606@mail.csu.edu.cn

及纯 Mg、工业纯 Al 配制合金; 用石墨坩埚在井式电炉中进行熔炼, 熔炼温度为 780 ℃; 用 KCl+ NaCl 精炼, 精炼后于 740 ℃将合金液浇入预热至 250 ℃的铁模中, 浇铸尺寸为 100 mm × 100 mm × 25 mm 的合金铸锭。铸锭经 505 ℃, 18 h 均匀化处理, 铣面后将 20 mm 厚的铸锭在电炉中加热至 460 ℃, 保温 2 h 后热轧至 7 mm; 热轧后样品再经 430 ℃, 2 h 的中间退火; 最后冷轧至 2.4 mm。合金的形变热处理工艺为: 530 ℃, 2 h 固溶, 水淬(水温 15 ℃), 冷变形 8%, 于 175 ℃时效 20 h(T87 态)。采用直径为 1.6 mm 的进口 4047 焊丝进行焊接, 焊丝的主要化学成分见表 1。

表 1 2519 铝合金焊接基材及 4047 焊丝的化学成分

Table 1 Chemical compositions of 2519 aluminum alloy and 4047 welding wire(mass fraction, %)					
Alloy	Cu	Mg	Mn	Zr	Ti
2519	5.80	0.22	0.28	0.21	0.06
4047	0.30	0.10	0.15		
Alloy	Fe	Si	Zn	Al	
2519	0.15	0.06	0.20	Bal.	
4047	0.80	12.3	0.20	Bal.	

1.2 实验方法

采用半自动 MIG 焊接法对 2519 T87 态铝合金试样进行对接, 采用单面焊, 焊接工艺参数见表 2。在试板上沿焊缝横向取试样, 加工成拉伸试样(轧向), 在 CSS-44100 电子拉伸机上进行拉伸; 在 HVA-10A 维氏硬度计上测量其维氏硬度, 从焊缝中心开始向基材逐点测量; 在 JSM-5600LV 扫描电镜上观察焊接接头断口; 焊后各区显微组织的观察在 POLYVAR-MET 光学金相显微镜上进行。在基材和离焊缝中心 8 mm 的热影响区取样并制成透射电镜样, 在 H-800 透射电镜上观察基材和热影响区析出相大小。

2 实验结果

2.1 2519 铝合金焊接接头抗拉强度

焊接接头的平均抗拉强度见表 3。可见, 焊接接头的强度均比基材的强度低, 焊接系数为 0.6 左右。

2.2 2519 铝合金焊接接头的显微组织

Table 2 Parameters of welding		
Current/ A	Voltage/ V	Welding speed/ (m•min ⁻¹)
120	24	0.6
Feed wire rate/ (m•min ⁻¹)	Argon flow rate/ (L•min ⁻¹)	Head of welding torch/ mm
4.0	12	15

表 3 2519 铝合金基材和焊接接头拉伸性能(轧向)

Table 3 Tensile strength of welding joint and base alloy of 2519 aluminum alloy			
Alloy	σ_b / MPa	$\sigma_{0.2}$ / MPa	δ / %
Base alloy	465	398	12.0
Welding joint	281	210	5.5

2519 铝合金焊接接头不同区域金相显微组织如图 1 所示。由图可见, 2519 合金焊接接头由以下几个区域组成, 即焊缝区 WZ(Weld zone)、熔合区 FZ(Fusion zone)、热影响区 HAZ(Heat affected zone)和基材区 BM(Base metal)。2519 铝合金焊接接头的焊缝区为树枝状晶铸态组织(图 1(a)); 熔合区靠焊缝一侧晶粒大多为等轴晶晶粒, 但大小不均匀、并有少量沿散热方向生长的柱状晶(图 1(b)); 靠基材一侧组织为细小的等轴晶组织, 晶粒大小较为均匀(图 1(c)); 热影响区内晶粒明显粗化, 但晶粒粗化的程度不一致, 靠熔合区粗化的程度较大(图 1(c))。2519 铝基材组织为完全再结晶组织(图 1(d))。

2.3 2519 铝合金焊接接头的硬度分布

2519 铝合金板材焊接接头沿垂直焊缝方向的硬度分布如图 2 所示。可以看出, 焊缝区的宽度约 5 mm, 焊缝中心部位硬度最低(HV81), 远离焊缝中心, 硬度逐渐增加。但在热影响区中距焊缝中心 6 mm 左右处, 硬度再次降低, 进入软化区。软化区的最低硬度为 HV98。此后, 硬度逐渐增加, 在距焊缝中心约 15 mm 处, 硬度达到原始基材的硬度。

2.4 2519 铝合金焊接接头透射电镜显微组织

2519 合金焊接接头基材区和热影响区透射电镜显微组织如图 3 所示。可以看出, 2519 铝合金焊接热影响区强化相粒子与基体相比明显粗化。

2.5 2519 铝合金焊接接头断口扫描电镜分析

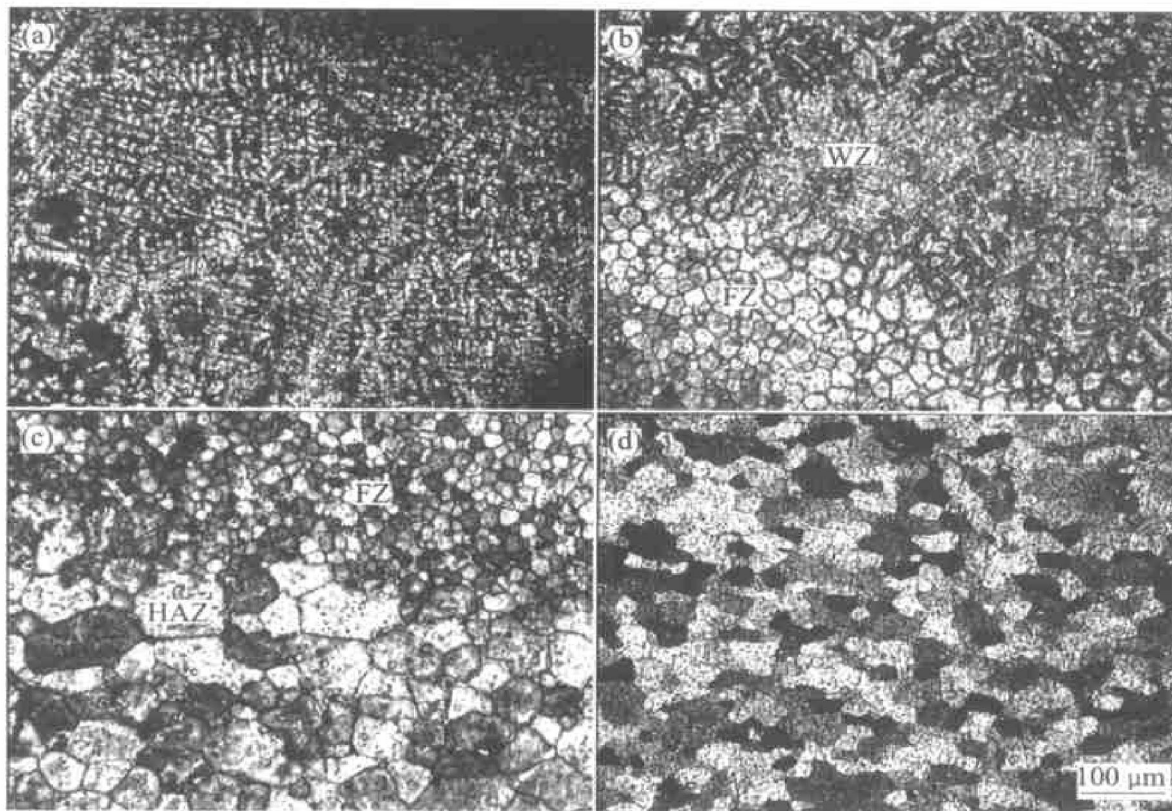


图 1 2519 铝合金焊接接头不同区域的显微组织

Fig. 1 Microstructures of welded joint of 2519 aluminum alloy at different area
(a) —WZ; (b) —WZ+ FZ; (c) —HAZ+ FZ; (d) —BM

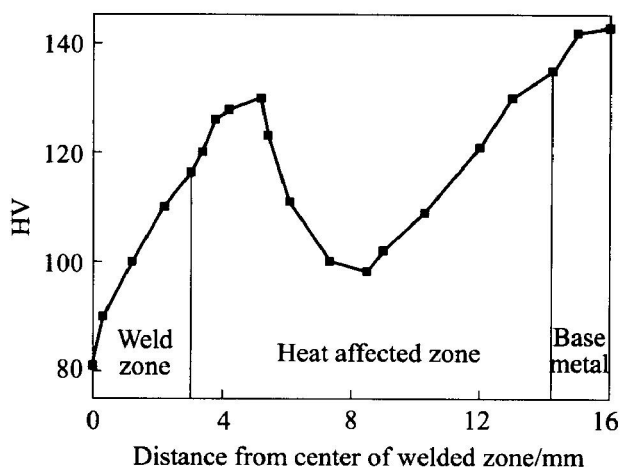


图 2 合金焊接接头硬度分布

Fig. 2 Distribution of hardness of welded joint

图 4 所示为 2519 铝合金母材和焊接接头拉伸断口的形貌。由图 4(a) 可以看出, 合金基材的拉伸断口断面上分布着许多大小不同的韧窝, 且韧窝较深, 材料发生了剧烈的塑性流动。由图 4(b) 可见, 焊接接头的拉伸断口断面上分布的韧窝尺寸较小, 且韧窝的大小接近, 未发生明显的塑性流动, 呈现出铸态断口特征。

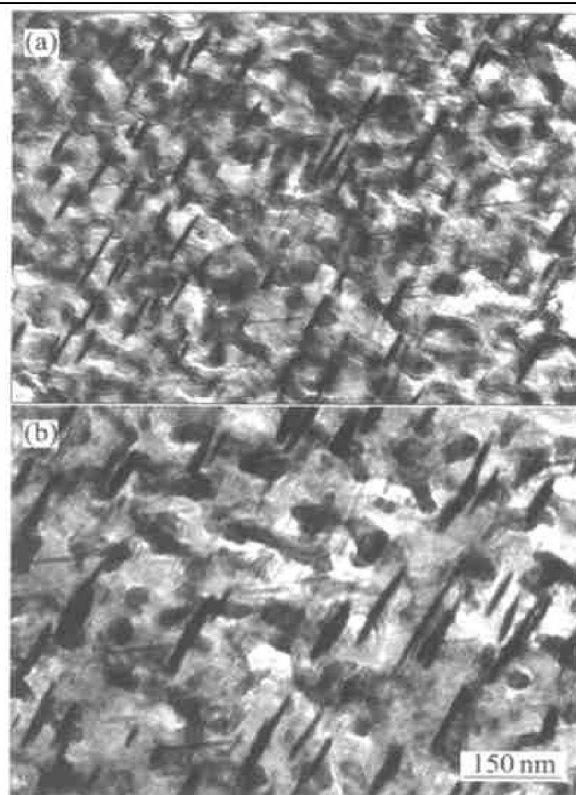


图 3 2519 铝合金焊接接头透射电镜组织

Fig. 3 TEM images of welded joint of 2519 aluminum alloy
(a) —BM; (b) —HAZ

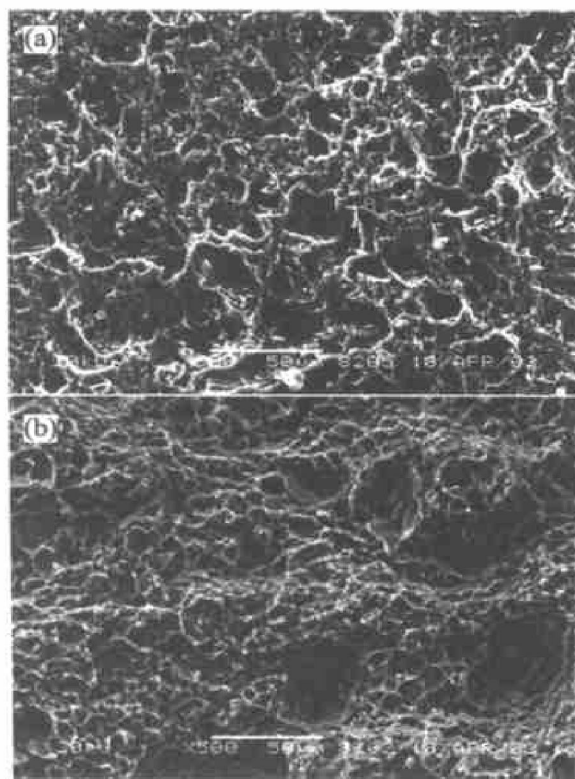


图 4 焊接接头断口的扫描电镜形貌

Fig. 4 SEM morphologies of tensile fracture of welded joint and base metal of 2519 aluminum alloy
(a) —Base metal; (b) —Welded joint

3 分析与讨论

以上实验结果表明, 在焊接过程中, 由于焊接热循环的作用, 导致接头不同区域具有不同的硬度值, 显微组织也有很大区别。2519 铝合金焊接接头沿温度降低的方向依次为焊缝区、熔合区、热影响区和基材区。焊缝是焊丝熔化后急冷的结晶组织, 其性能取决于焊丝合金的化学成分和结晶过程。2519 合金焊缝为树枝晶铸态组织(图 1(a)), 这种铸态组织结构疏松, 强度、硬度低, 塑性差。图 2 表明, 焊缝处的硬度最低, 说明该处为焊接接头的最薄弱处。熔合区是焊丝与基体金属形成的一种交混合金。从图 1(b), 1(c) 可以看出, 2519 铝合金熔化区是一些细小的等轴晶粒, 这些沿熔化边界等轴晶区的形成是非均匀形核的结果。由于 2519 铝合金成分中含有 0.21% Zr(质量分数), 在母材淬火-形变-时效的过程中弥散析出了 Al_3Zr 沉淀, 在合金焊接时, 由于固液两相界面处静止边界的存在, 这些 Al_3Zr 沉淀粒子不能因熔池中液态金属的搅拌和对流作用而进入温度更高的熔池中心。因此, 这些存在于静止边界弥散分布的 Al_3Zr 沉淀粒子成为了液

态金属非金属形核的核心, 从而提高了形核率, 使晶粒细化^[15]。由 Hall-Petch 方程 $\sigma_y = \sigma_0 + Kd^{-1/2}$ 可得, 晶粒尺寸愈小, 屈服强度越高。因此, 该处的硬度较焊缝区有所提高。从合金焊接热影响区可以看出, 由于焊接热影响区的温度不同, 距焊缝边界各点焊接热循环不同, 各不同点晶粒尺寸便有不同的变化, 距焊缝边界越近, 晶粒粗化越明显(图 1(c))。焊接使用的 2519 铝合金是经淬火、时效后的合金, 其主要强化相为时效析出 θ 相的过渡相。在焊接热循环的影响下, 基材中的这些沉淀相粒子将发生再次固溶、析出、长大过程, 对焊接前的基材产生或多或少的破坏。在焊接热的作用下, 焊缝区的温度最高, 热影响区靠近焊缝区域的强化元素 Cu 具有较大的活性而固溶到基体中; 冷却时, 由于冷速较快, 获得 Cu 的过饱和固溶体在一定的结晶面上偏聚形成和基体完全共格或部分共格的 GP 区, 使合金强化, 形成了热影响区内的淬火区, 合金硬度提高(图 2); 热影响区内离焊缝较远的区域随电弧热作用的减弱, Cu 原子的活性减弱, 只有少量固溶在基体中, 大部分受热影响发生过时效而长大(图 3(b)), 形成热影响区内的软化区, 使合金的硬度降低。

4 结论

- 1) 2519 铝合金焊接接头的力学性能低于 2519 铝合金基材的力学性能, 焊接系数为 0.6 左右。
- 2) 焊接接头的拉伸断裂在焊缝处, 焊缝是焊接接头最薄弱点。
- 3) 受焊接的热影响, 强化相粒子发生过时效而粗化是形成软化区的主要原因。

REFERENCES

- [1] Carter H B, David H E, Ashok S, et al. Transient crack growth behavior in aluminum alloys C415-T8 and 2519-T87 [J]. Engineering Fracture Mechanics, 1999, 62(1): 1 - 22.
- [2] Fisher J, James J. Aluminum alloy 2519 in military vehicles [J]. Advanced Materials and Processes, 2002, 160(9): 43 - 46.
- [3] Zhang J, Perez R J. Damping behavior of particulate reinforced 2519 Al metal matrix composites [J]. Scripta Metallurgica et Materialia, 1993, 28(1): 91 - 96.
- [4] Carter H B, David H E, Ashok S, et al. Creep crack growth behavior of aluminum alloy 2519 (part I): experimental analysis [J]. ASTM Special Technical Publication, 1997,

- 1297(1): 3 - 18.
- [5] Kramer L S, Blair T P, Blough S D, et al. Stress-corrosion cracking susceptibility of various product forms of aluminum alloy 2519[J]. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2002, 11(6): 645 - 650.
- [6] 陈险峰, 彭大暑, 张 辉, 等. 热处理制度对 2519 铝合金板材力学性能和应力腐蚀敏感性的影响[J]. *中国有色金属学报*, 2003, 13(4): 934 - 938.
- CHEN Xianfeng, PENG Dashi, ZHANG hui, et al. Influence of heat treatment on mechanical properties and stress corrosion sensitivity of 2519 aluminum alloy plate[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2003, 13(4): 934 - 938.
- [7] Dymek S, Dollar M. TEM investigation of age-hardenable Al 2519 alloy subjected to stress corrosion cracking tests[J]. *Materials Chemistry and Physics*, 2003, 81(2/3): 286 - 288.
- [8] Tsangarakis N. All modes fracture toughness of two aluminum alloys[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 1987, 26(3): 313 - 321.
- [9] 高明霞, 余红华. LC9CS 铝合金焊缝的组织 and 强度及断裂形式[J]. *焊接学报*, 1998(12): 58 - 62.
- GAO Ming-xiao, YU Hong-hua. The metallographic structure and tensile strength and fracture form of the weld of LC9CS aluminum alloy[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 1998(12): 58 - 62.
- [10] 刘静安, 王元良, 屈金山. 铁道车辆用铝材的焊接特性[J]. *中国有色金属学报*, 1996, 6(2): 87 - 92.
- LIU Jing-an, WANG Yuanliang, QU Jirshan. Welding characteristics of aluminum alloys for railway vehicles[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 1996, 6(2): 87 - 92.
- [11] 王元良, 屈金山, 宴传鹏. 铝合金焊接性能及焊接接头性能[J]. *中国有色金属学报*, 1997, 7(1): 69 - 74.
- WANG Yuanliang, QU Jirshan, YAN Chuangpeng. Weldability of aluminum alloys and properties of weld joints[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 1997, 7(1): 69 - 74.
- [12] 陈 建, 张修智, 吴忍耕. 高强铝合金焊接接头 SCC 机理探讨[J]. *焊接学报*, 1990, 11(2): 91 - 98.
- CHEN Jian, ZHANG Xiuzhi, WU Renheng. Investigation on SCC mechanism of welded joints of high strength aluminum alloy[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 1990, 11(2): 91 - 98.
- [13] Devincen S M, Devletian J H, Gedeon S A. Weld properties of the newly developed 2519-T87 aluminum armor alloy[J]. *Welding Journal*, 1988(3): 33 - 43.
- [14] Zhang J, Perez R J, Gupta M, et al. Damping behavior of particulate reinforced 2519 Al metal matrix composites[J]. *Scripta Metallurgica et Materialia*, 1993, 28(1): 91 - 96.
- [15] Gutierrez A, Lippold J C. A proposed mechanism for equiaxed grain formation along the fusion boundary in aluminum-copper-lithium alloys[J]. *Welding Journal*, 1998(3): 123 - 132.

(编辑 陈爱华)