

2219-T87 铝合金变极性 TIG 接头微观组织与力学性能

Microstructures and Mechanical Properties of 2219-T87 Aluminum Alloy TIG Welded Joints

北京航空航天大学 熊欢 庄来杰 曲文卿 姚君山 尹玉环

[摘要] 通过试验测定了 2219-T87 母材及 VPTIG 焊接接头在不同温度下的力学性能,并对母材和焊接接头的微观组织及断口形貌进行了观察和分析,讨论了温度对母材及焊接接头性能的影响。试验结果表明,2219-T87 铝合金有低温增强现象,比较适合低温状态下工作。但与母材相比,焊接接头的各项力学性能均有所下降。

关键词: 2219 铝合金 VPTIG 力学性能

[ABSTRACT] The mechanical properties of 2219-T87 aluminum alloy base metal and its TIG welded joint are tested under different test temperatures. The microstructures and the fractography of base metal and the TIG welded joint are observed and analyzed. The effect of test temperature on mechanical properties is discussed. The results indicate that the mechanical property of 2219-T87 base metal will increase under cryogenic temperature, suitable for service at cryogenic temperature. Contrasting with property of base metal, the mechanical property of TIG welded joint is lower.

Keywords: 2219 aluminum alloy VPTIG Mechanical property

2219 铝合金是航天领域中重要的结构材料,是航天运载低温储箱等部件未来最有发展前途的铝合金结构材料,在 $-250\sim 250^{\circ}\text{C}$ 的范围内,具有良好的焊接性及优良的力学性能。由于 2219 铝合金使用环境非常特殊,在低温条件下母材和焊接接头的力学性能对于火箭低温贮箱的结构设计和构件的安全使用有很大的影响^[1-3]。关于 2219 铝合金的焊接方法,国内外学者开展了一系列的研究,成果卓著。目前国际上比较常用的方法包括搅拌摩擦焊(FSW)、熔化极气体保护焊(MIG)、钨极氩弧焊(TIG)、电子束焊(EBW)、变极性等离子弧焊(VPPAW)等多种焊接方法,其中关于 2219 铝合金搅拌摩擦焊的研究尤为受重视^[4]。

目前,我们国内的学者关于 2219 铝合金的研究多半集中在搅拌摩擦焊和变极性等离子弧焊^[5-7],像上海交通大学、哈尔滨工业大学、上海 800 所等科研院所开

展了 2219 铝合金的搅拌摩擦焊、变极性等离子弧焊方面的相关研究工作,关于焊接接头性能方面,由于低温试验条件和技术等方面的限制,主要开展了室温状态下的研究,对低温环境下的力学性能研究较少。

相比于上述两种常用的焊接方法,变极性 TIG(VPTIG)焊是一种特殊的方波交流 TIG 焊,是一种输出电流频率、正负半波导通时间及幅值均可独立调节的钨极氩弧焊方法。本文所讨论的正是 VPTIG 对 2219 铝合金的影响,其中重点研究了 2219 铝合金母材及其接头在低温状态下的力学性能及其微观组织。

1 试验材料及方法

试验材料选用 8mm 厚的 2219 (Al-Cu-Mn 系)高强度铝合金板材,热处理状态为 T87,即“固溶处理 +7% 冷变形 + 人工时效”,其化学成分见表 1,试样尺寸按照国标 GB/T 228—2002 和 GB/T 2651—1989 要求进行加工。2219-T87 铝合金是可热强化铝合金,主要强化元素为 Cu 和 Mn,焊接方向垂直于板材的轧制方向。焊后沿试样横截面(轧制方向)截取试样,经研磨、抛光后,用质量比“1%HF+1.5%HCL+2.5%HNO₃+95%H₂O”混合酸溶液进行腐蚀,在光学显微镜下观察母材及焊接接头的微观组织。

表1 2219-T87铝合金化学成分(质量分数) %

Cu	Mn	Fe	Ti	V	Zn	Si	Zr	Al
6.48	0.32	0.23	0.06	0.08	0.04	0.49	0.20	余量

按照 GB/T 228—2002《金属材料室温拉伸试验方法》对母材进行拉伸试验,按照 GB/T 2649—1989《焊接接头机械性能试验取样方法》和 GB/T 2651—1989《焊接接头拉伸试验方法》沿板材轧制方向取样并进行拉伸试验。拉伸试验是在 MTS880 液压伺服材料系统上完成的,拉伸速度为 2mm/min,传感器量程为 100kN,精度为 0.5%。焊接接头的测试温度为 5 个点: -182°C , -120°C , 15°C , 78°C , 120°C 。通过向环境箱中通液氮来保证拉伸试验所需的低温环境,并通过温度控制箱来控制温度,试样在保温 30min 后进行拉伸试验。完成拉伸试验之后用 JSM-5800 扫描电镜观察母材和接头的断口形貌。

2 试验结果与分析

2.1 焊接接头微观组织分析

图 1 为未拉伸的 2219-T87 母材室温状态下的微观组织。从图 1 中可以清楚地看到,母材的微观组织呈板条形状,由细小的颗粒状组织组成,排列非常规律。母材是以 α (Al) 为基体,许多大小约为几个 μm 到十几个 μm 的小颗粒 θ 相 (Al_2Cu) 弥散分布于基体晶粒边界,起到强化基体的作用,各个晶粒中分布的沉淀相的数量非常多。

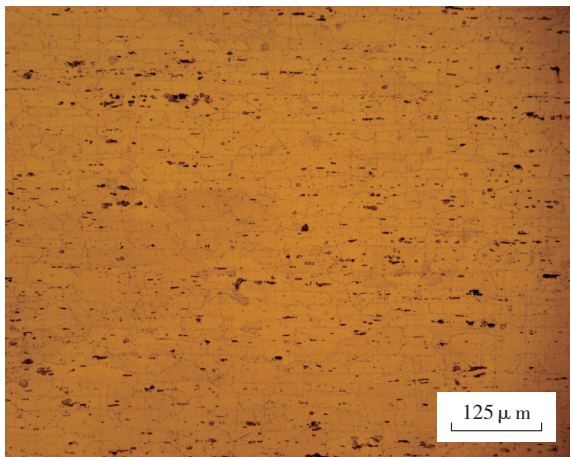


图1 铝合金母材微观组织

Fig.1 Microstructure of aluminum alloy base metal

图 2~4 为 2219-T87 铝合金 VPTIG 接头微观组织。VPTIG 接头分为 3 个部分:焊缝、熔合区以及热影响区。从图 3 中可以清楚地看到,整个熔合区以及靠近熔合区

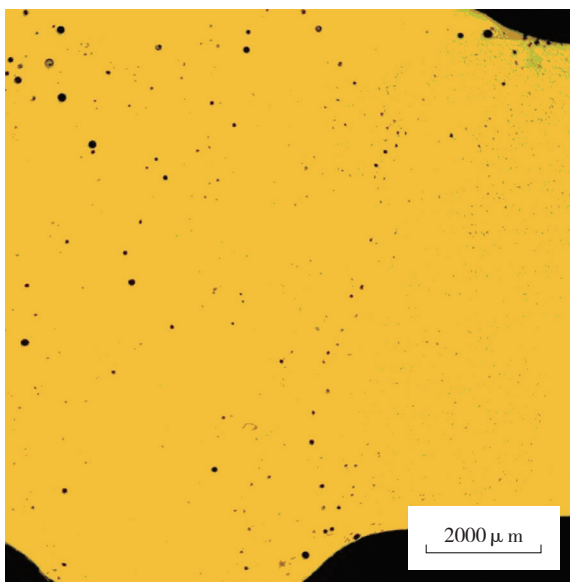


图2 铝合金接头的微观形貌

Fig.2 Microstructure of aluminum alloy welded joint

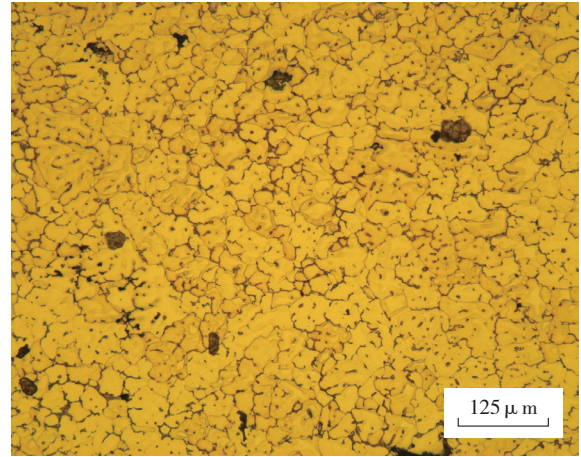


图3 铝合金接头焊缝的微观组织

Fig.3 Microstructure of aluminum alloy welded seam zone

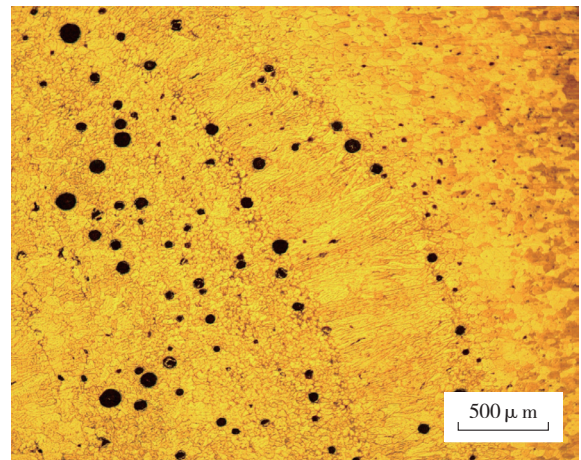


图4 铝合金接头熔合区的微观组织

Fig.4 Microstructure of aluminum alloy welded joint of fusion zone

的焊缝内均存在大量的气孔缺陷,这与接头经过了两次 VPTIG 有很大关系。气孔的存在不仅减小了接头的有效承载面积,而且会使应力集中,使得接头的强度和韧性下降,有时甚至成为裂纹源。这也解释了接头在抗拉强度和延伸率方面都较母材有很明显下降的原因。

从焊缝的微观组织中不难发现,原本板条状的组织已经消失了,变成了细小的树枝晶。由于在完成了 VPTIG 焊后又进行了盖帽焊,所以原本由熔合区生长过来的树枝晶的方向性发生了一定的变化。

从图 4 可以看出,熔合区的微观组织为柱状树枝晶和胞状树枝晶,且垂直于熔合线,向焊缝中心发展。熔合区中分布着大量的大小不一的气孔,从气孔的分布可以判断,出现气孔的原因是伴随着树枝晶偏析和层状偏析所产生的的小气泡因孔隙被封闭而残留在了焊缝内部。在拉伸试验中,发现大多数的断口几乎都位于熔合区内靠近焊缝的位置,这也在宏观上验证了熔合区内大量气孔的存在。

由于热影响区只受到了焊接热循环的作用而并未发生熔化,所以该区域保留了母材的板条状组织,只是在焊接热循环的作用下发生了一定程度的组织粗化。

2.2 拉伸试验结果

母材和接头的抗拉强度和延伸率见图5。母材的抗拉强度随着温度的降低呈现出增强的趋势,说明了2219-T87铝合金有低温增强的现象,适合在低温状态下工作。相比于母材,接头的抗拉强度在-120~120℃

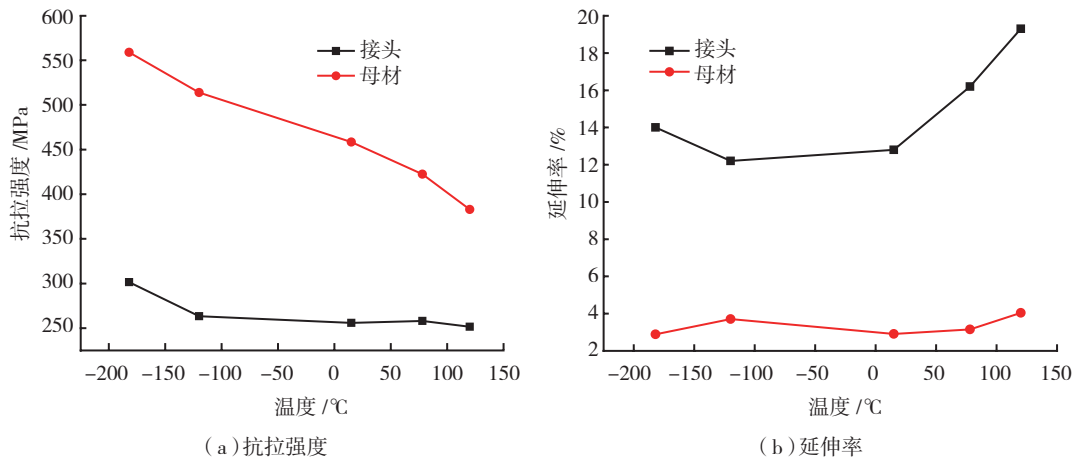


图5 不同温度对2219-T87铝合金母材和VPTIG焊接接头力学性能的影响

Fig.5 Effects of different temperatures on mechanical properties of base metal and VPTIG welded joint of 2219-T87 aluminum alloy

的温度区间内,变化不大,而在-182℃时明显高于其他温度。这表明VPTIG对母材产生了较大的影响,使得其低温增强现象在低于一定温度后才变得明显,同时接头的抗拉强度也仅有母材的一半左右。

塑性方面,母材无论是低温还是高温条件下都出现了增强现象,高温条件要比低温条件的增强效果更明显;相比于母材,接头的延伸率在低温条件下变化并不明显,甚至在-182℃略有下降,而高温条件有一定程度的增强。从延伸率的比较中可以发现,VIPTIG使得母材延伸率的变化趋于平缓,这与接头的微观组织改变有关。

2.3 断口形貌分析

在拉伸试验中发现,接头的断裂位置大多位于接头熔合区内靠近焊缝的区域,且断面存在大量气孔缺陷。通过扫描电镜,

观察了断口的微观形貌。

图6给出了母材在15℃、78℃、-120℃以及-182℃时的拉伸断口形貌。从图中可以看出母材断口是由大小不一的撕裂岭和韧窝组成的韧性断口。在拉伸试验的过程中,过载是材料断裂的主要原因,材料的破坏是由微孔的产生和聚集而导致的穿晶断裂。微孔通常存在于基体与第二相界面处,也可通过第二相本身开裂而形成。当载荷增大时,微孔通过复杂的范性流变机构长

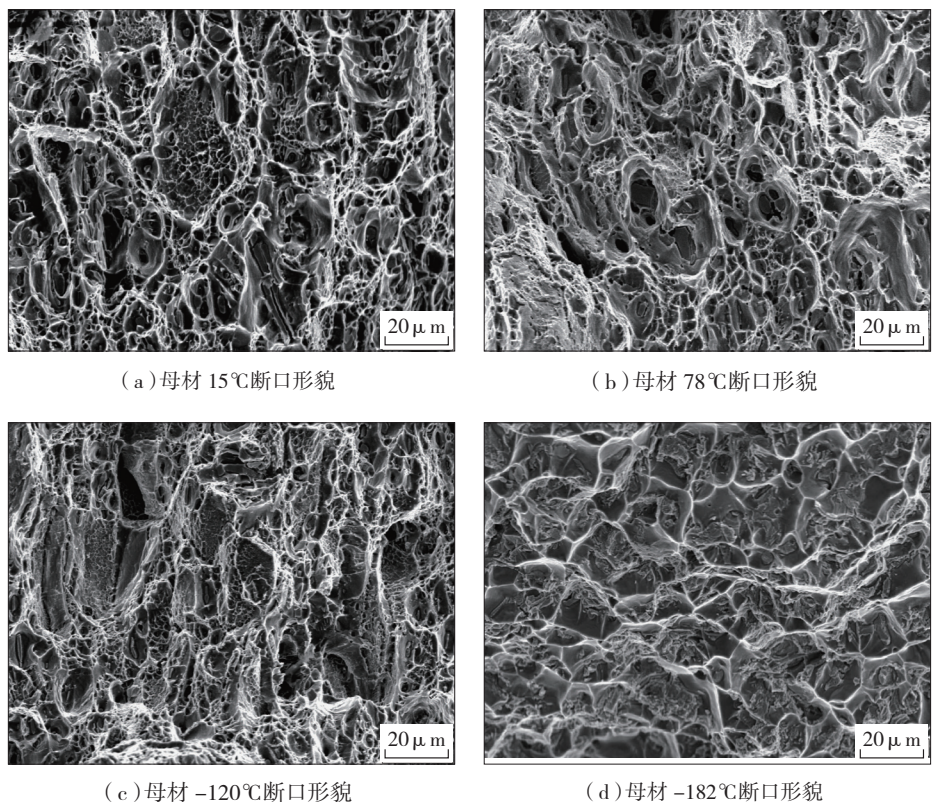


图6 2219-T87铝合金母材在不同温度下拉伸断口形貌

Fig.6 Tensile fractography of 2219-T87 aluminum alloy base metal under different temperatures

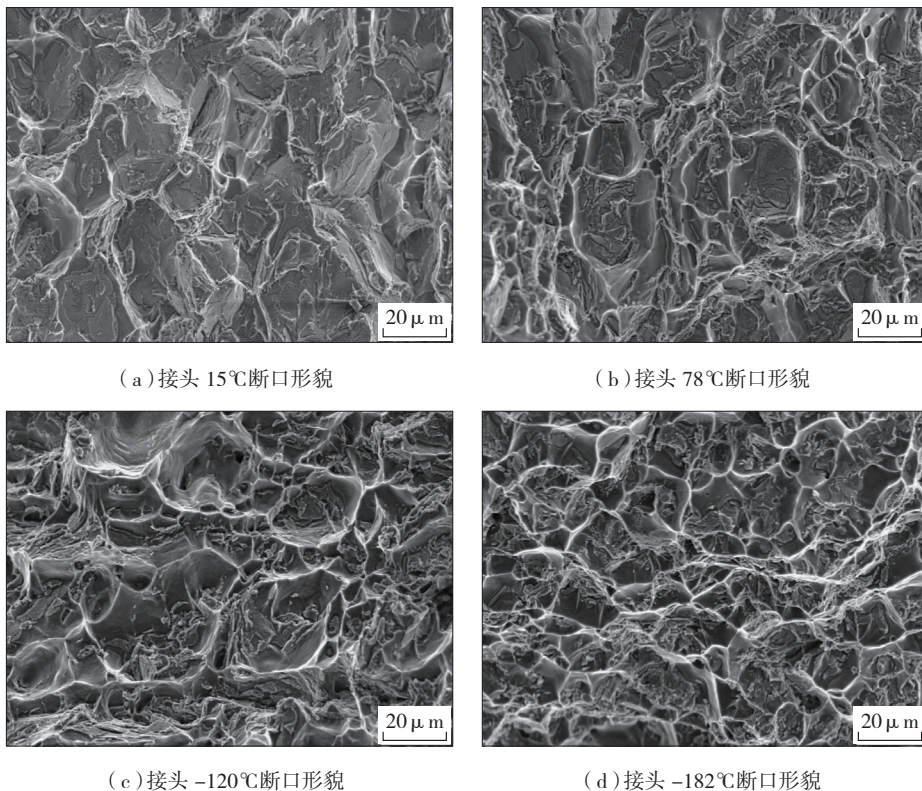


图7 2219-T87铝合金VPTIG接头在不同温度下拉伸断口形貌

Fig.7 Tensile fractography of 2219-T87 aluminum alloy VPTIG welded joints under different temperatures

大,通过微孔间金属的撕裂而聚合,进而形成连续的断面。断面上会形成大量的细小的孔坑,孔坑中大都包含一个夹杂物或第二相粒子,且第二相粒子越大,韧窝的尺寸也越大。

对比不同温度下的母材断口形貌,可以看出温度的影响很大。同室温条件下相比,低温断口呈现大小韧窝交叉分布的特征,韧窝数量多,撕裂岭也很多。由此判断,低温拉伸断裂前,试样产生了大量形变。而高温条件下的断口相比于室温条件,韧窝变大变深,第二相粒子较多较大并伴有破碎现象,并且存在大量的晶间微坑断口,说明在拉伸过程中晶界萌生出大量的微孔。从断口形貌的分析中可以发现,无论是低温还是高温状态下,母材的塑性都有一定程度的增强,这与母材在延伸率方面的表现是一致的。

图7给出了焊接接头在15℃、78℃、-120℃以及-182℃时的拉伸断口形貌。VPTIG接头主要以晶界脆性断裂为主,断口形貌呈明显的多面体,外形如岩石状花样,没有明显的塑性变形。与母材类似,温度对VPTIG接头拉伸断口形貌同样存在一定的影响。与室温拉伸断口相比,低温状态下的断口撕裂较较多、韧窝较小且深;而高温断口的韧窝较大,且存在较多的晶间微坑断口,在拉伸试验过程中,晶界萌生出大量的微孔。

3 结论

(1) 2219-T87 铝合金母材的强度随着温度的降低而升高,说明 2219-T87 铝合金具有低温增强的效果,适合低温条件下工作。相比于母材,VPTIG 接头的强度只有母材的 50% 左右,而且在 -120℃ 到 120℃ 这个区间内变化不大,只有在温度下降到了一定程度之后,低温增强的效果才会明显。说明了 VPTIG 降低了 2219-T87 铝合金的强度并且减弱了它的低温增强效果。

(2) 2219-T87 铝合金母材的塑性无论是在高温还是低温状态下,相比于室温状态下都有所增强,而高温状态下的增强效果尤为明显。VPTIG 接头的塑性比母材低很多,高温状态下比室温状态略有增强,在低温状态下甚至出现下降,但总体变化不大。可以看出 VPTIG 使得 2219-T87 铝合金在不同温度下

的塑性变化趋于平缓。

(3) 在 VPTIG 接头的熔合区的微观组织内发现大量的气孔缺陷,这些缺陷降低了 2219-T87 铝合金的强度,而且在接头拉伸试验中发现,断口大多出现在熔合区靠近焊缝的区域内。

(4) 2219-T87 铝合金母材的断口属于韧性断裂,而接头的断口属于以脆性断裂为主的混合型断裂。

参考文献

- [1] 姚君山,蔡益飞,李程刚. 运载火箭箭体结构制造技术发展与应用. 航空制造技术,2007(10):36-42.
- [2] 何肇基. 金属的力学性质. 北京: 冶金工业出版社,1982.
- [3] Wigley D A. Mechanical properties of materials at low temperatures. New York: Plenum Press, 1971.
- [4] Thomas W M, Nicholas ED. Friction stir welding for the transportation industries. Materials and Design, 1997(4-6): 269-273.
- [5] 孔祥峰,林涛,陈华斌. 2219 铝合金交叉焊缝的微观组织与力学性能分析. 上海交通大学学报,2010(44):95-98.
- [6] 王后孝,杨春利,魏艳红,等. 变极性等离子弧焊穿孔熔池的稳定建立. 机械工程学报,2006(12):59-64.
- [7] 邢美源,姚君山,刘杰. 新一代运载贮箱搅拌摩擦焊应用研究. 上海航天,2006(4):39-43.

(责编 杰一)