

# 2219厚板铝合金TIG和MIG焊接接头组织与性能对比

丁吉坤 宋建岭 蒙丹阳 高泽峰 王亚森

(天津航天长征火箭制造有限公司, 天津 300462)

**文 摘** 对15 mm厚2219-C10S铝合金分别进行钨极惰性气体保护焊(TIG)、熔化极惰性气体保护焊(MIG)对接试验,对接头焊缝成形、内部质量、组织形貌及力学拉伸性能进行对比分析。结果表明,TIG焊缝表面光洁,鱼鳞纹美观,焊缝内部近无缺陷;MIG焊缝飞溅较多,焊缝表面较为粗糙,焊缝内部存在少数单个小气孔。TIG焊缝晶粒尺寸较为细小,分布均匀;MIG焊盖面的焊缝组织晶粒则比较粗大,分布不均,热影响区比TIG焊接头的晶粒更为粗大。两种接头的熔合区组织不均匀,晶粒大小不一。常温拉伸试验中,两种接头均沿熔合区断裂,TIG焊接头强度和塑性要优于MIG接头。

**关键词** 2219铝合金,焊缝成形,组织形貌,力学拉伸性能

中图分类号: TG442

DOI: 10.12044/j.issn.1007-2330.XXXX.XX.001

## Comparative Research on Microstructure and Properties of 2219 Thick Plate Aluminum Alloy TIG and MIG Welded Joints

DING Jikun SONG Jianling MENG Danyang GAO Zefeng WANG Yasen

(Tianjin Long March Launch Vehicle Manufacturing Co. Ltd, Tianjin 300462)

**Abstract** The tungsten inert gas welding (TIG) and metal inert gas welding (MIG) welding tests were carried out on the 15mm-thick 2219 aluminum plates. The shape, internal quality, microstructure and tensile properties of the joints were compared and analyzed. The results show that the surface of TIG weld is bright and clean while the MIG welds are rough. There are a few tiny pores in MIG weld while the inside of the TIG weld is very clean. The grain size in weld seam of TIG joint is finer and more uniformly distributed than that of MIG joints. The grain size in heat affected zone (HAZ) of MIG joints is coarser than that of TIG joints. The grain size in fusion zone of both joints is quite uneven. Two kinds of joints cracked along the fusion zone in the tensile test at room temperature. The strength and plasticity of TIG joint is better than that of MIG joint.

**Key words** 2219 aluminum alloy thick plate, Weld shape, Microstructure, Mechanical tensile property

### 0 引言

2219铝合金是一种铝铜系可热处理强化铝合金,具有良好的高低温性能、抗腐蚀性能及焊接性能,被广泛用做新一代运载火箭的贮箱结构材料<sup>[1-5]</sup>。现役火箭贮箱厚度大多在10 mm以下,采用不开坡口的单面两层TIG焊工艺,可满足大多数贮箱的焊接<sup>[6-8]</sup>。新一代载人运载火箭首次采用箱底传力结构设计,为满足箱底传力要求,将箱底主焊缝的焊接区厚度增加到15 mm,如何实现大厚度铝合金高效率、高质量的焊接,对于当前焊接工艺提出了新的挑战。本文以15 mm厚2219铝合金为研究对象,采用TIG和MIG两种工艺分别进行铝合金平板对接试

验,系统对比接头的焊缝成形、内部质量、接头组织形貌和拉伸性能等方面的差异,为工程实践提供一定的参考。

### 1 试验

#### 1.1 试验材料

试验材料选用2219铝合金试板,尺寸为300 mm×170 mm×15 mm,热处理状态为C10S(固溶处理后经10%的冷加工变形然后人工时效)。母材主要成分表1,母材常温平均抗拉强度469 MPa,断后伸长率11.3%。选用ER2325  $\Phi$ 1.6 mm光亮焊丝,保护气为纯度为99.999%高纯氩气和氦气。

收稿日期: XXXX-XX-XX

第一作者简介: 丁吉坤, 1988年出生, 硕士, 主要从事新一代运载火箭燃料贮箱的焊接工艺技术研究工作。E-mail: djktju@163.com

表1 2219铝合金的化学成分

Tab.1 Chemical composition of 2219 aluminum wt%

Si	Fe	Cu	Mn	Zr	Al
0.2	0.3	5.8~6.8	0.2~0.4	0.1~0.25	余量

## 1.2 试验方法及设备

### 1.2.1 焊接试验

分别采用TIG和MIG两种工艺进行试板的单面对接焊。TIG焊为4层焊，MIG焊为3层焊。试板开U形坡口，坡口形式见图1，实物照片见图2，坡口底部加工出3.4 mm宽的平台，并与侧壁采用R5圆角过渡以保证侧壁根部熔透。采用酒精或汽油清理工件表面的油污，然后采用手工拉刀或者风动打磨刷清理工件正面、背面及端面的氧化膜，要求工件表面露出金属光泽。焊接试板通过机械压板固定在带有焊漏垫板的试验平台上，焊前调整两试板间隙小于0.5 mm，错缝小于0.5 mm。

TIG焊接采用的Miller Dynasty700变极性TIG焊接电源，可输出交流方波，正负半波电流可独立调

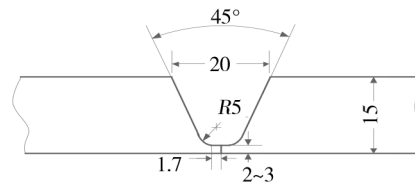


图1 焊接坡口形式

Fig.1 Diagram of the welding groove

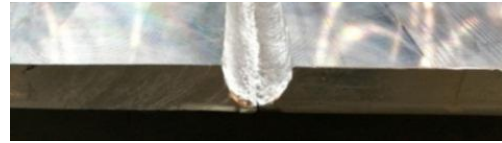


图2 坡口实物照片

Fig.2 Photo of the welding groove

节，便于实现热输入的精准控制；MIG焊采用Miller公司生产的Invision 450 MPa型MIG电源，配合S-74MPa Plus四轮送丝机能够实现一元化脉冲功能，可通过设置送丝机上的送丝速度，自动调整其它参数，使焊机输出功率与送丝速度匹配。两种焊接工艺的参数如表2、表3所示。

表2 TIG焊接工艺参数

Tab.2 Parameters of TIG welding

板厚 /mm	焊接 层数	焊丝直径 /mm	钨极直径 /mm	焊接电流 /A	电流 种类	喷嘴直径 /mm	保护气体流量/L·min <sup>-1</sup>	
							Ar	He
15	4	4	4~5	260~280	交流	14	14~16	1~2

表3 MIG焊接工艺参数

Tab.3 Parameters of MIG welding

板厚 /mm	焊接 层数	焊丝直径 /mm	焊接电流 /A	电弧电压 /U	电流 种类	送丝速度 /m·min <sup>-1</sup>	保护气体Ar流量 /L·min <sup>-1</sup>
15	3	1.6	180~250	21.5~23.5	直流反接	4~7	20~22

### 1.2.2 接头性能测试

焊后对比两种接头的焊缝成形情况，参照Q/Y420—2011标准进行X射线透视检查焊缝内部质量。采用线切割工艺垂直于焊缝方向截取拉伸试样和金相试样，参照GB/T228—2010《金属材料室温拉伸试验方法》标准，采用CMT5105型拉伸试验机进行拉伸性能测试，采用“HF+HCL+HNO<sub>3</sub>+H<sub>2</sub>O”的混合试剂腐蚀金相试样，观察组织形貌。

## 2 试验结果及分析

### 2.1 焊缝表面成形

试板焊接完成后，采用机械方法修整焊缝背部焊漏至1.5~2.0 mm高度，观察两种接头的焊缝表面成形情况，如图3所示。可以看出，TIG焊缝正面光滑，鱼鳞纹均匀美观，TIG焊熔敷速率较低，需要4层焊接才能填满焊缝熔池，最后一层盖面焊接时焊枪进行摆动，以保证焊缝宽度，可以看到明显的摆动痕



(a) TIG正面



(b) MIG正面

图3 接头焊缝表面成形

Fig.3 Shape of welded joint surface

迹，背部焊漏均匀饱满。测量正面宽度25 mm左右，背面宽度10 mm左右；与TIG焊缝相比，MIG焊缝正

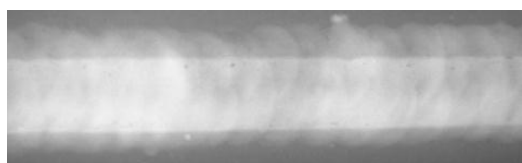
面较为粗糙,主要是由于MIG焊接时熔滴过渡形式为喷射过渡,易产生飞溅,导致焊缝粗糙,但是MIG焊熔敷速率比TIG焊高,盖面时同样进行了摆动,测量焊缝正面宽28 mm左右,背面宽15 mm左右。

## 2.2 焊缝内部质量

对接头焊缝进行X光射线检测,结果见图4。可见,MIG焊缝中存在少数单个气孔,气孔尺寸较小,TIG焊缝则非常洁净,几乎成“白片”,这是由于MIG焊是焊丝的熔滴过渡过程,焊丝较细,焊丝的比表面积较大,焊丝表面的氧化膜及污染物进入熔池的几率较大,因此,MIG焊时产生焊缝气孔的敏感性较TIG焊大<sup>[9]</sup>。两种接头的焊缝内部均无明显夹杂、裂纹、未熔合等缺陷。

## 2.3 焊接接头组织

两种接头的宏观形貌如图5所示。从图5(a) TIG焊接头截面形貌中可以看出多层焊缝堆焊的痕



(a) MIG 焊缝



(b) TIG 焊缝

图4 焊缝X光片

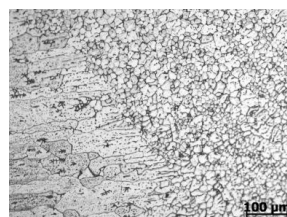
Fig. 4 X-ray photos of welded joint



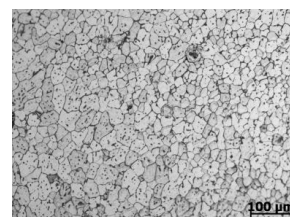
(a) TIG 母材区



(b) TIG 热影响区



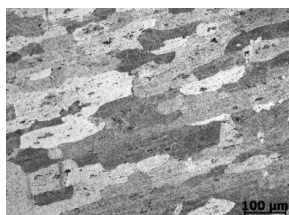
(c) TIG 熔合区



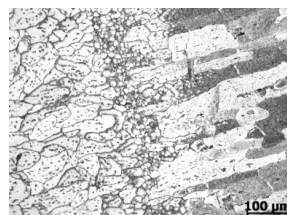
(d) TIG 焊缝区



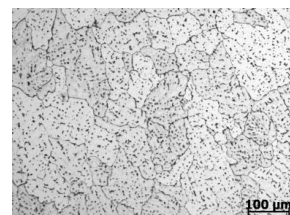
(e) MIG 母材区



(f) MIG 热影响区



(g) MIG 熔合区



(h) MIG 焊缝区

图6 接头微观组织

Fig. 6 Microstructure of welded joints

迹,其中打底焊缝窄而深,形状近似矩形,盖面焊缝成倒三角形,宽度约为打底焊的2.5倍,与2.1测量结果一致。图5(b)中MIG接头中打底焊缝较宽,整个截面面积比TIG焊大得多。焊缝截面形状与尺寸的差异与焊接工艺方法有关,TIG焊填丝速度和焊接电流可以独立控制,可控制母材与焊丝熔化比例,在不改变焊缝大小的情况下可以控制焊缝金属的稀释和热输入。MIG焊的熔敷速率比TIG焊高的多,热输入较大,母材熔化的多,因而焊缝的截面积较大<sup>[10]</sup>。



(a) TIG



(b) MIG

图5 接头宏观形貌

Fig. 5 Macro feature of welded joints

两种接头的微观组织如图6所示,可见母材均为板条状组织,沿母材轧制方向分布,母材相以 $\alpha(\text{Al})$ 基体为主,基体上弥散分布着大量的第二相颗粒,起到弥散强化作用。热影响区并未发生熔化,保留了母材的板条状组织,由于受到焊接热循环的影响,该区域组织发生了一定程度的粗化。



对比发现,MIG焊接头热影响区要比TIG焊接头的晶粒更为粗大,这与MIG焊热输入大导致晶粒长大较多有关。两种接头的熔合区组织形貌比较相似,均为典型的2219铝合金熔合区组织形貌,由大小不一的晶粒组织组成,图6(c)(g)中可以看出晶粒尺寸从临近焊缝一侧到热影响区晶粒由大到小的变化,且在靠近焊缝的部分熔化区存在细小等轴晶带。对比图6(d)(h)发现中两种接头的焊缝区组织存在明显不同。TIG焊缝晶粒平均尺寸较为细小,晶粒直径为20~30 μm,且分布均匀。MIG焊盖面的焊缝组织晶粒则比较粗大,最大晶粒直径可达100 μm,且大小不均。两种焊缝均为典型的等轴晶组织,晶界清晰,可观察到在晶粒内部分布着许多黑色的强化相颗粒。

#### 2.4 焊接接头力学性能

从焊后试板上各切取8个拉伸试样进行常温拉伸试验,表4列出了接头的平均拉伸试验数据:拉强度,TIG接头强度为293 MPa,强度系数0.62,MIG接头强度为279 MPa,强度系数0.59;断后伸长率,TIG焊接头为5%,MIG焊接头为4%。可知两种接头均满足常规火箭贮箱焊缝设计要求(强度系数大于0.5,断后伸长率大于3%),TIG焊接头比MIG焊接头抗拉强度和断后伸长率分别提高了4.9%和27%。在常温下,金属的晶粒越细小,强度越高,塑性也越好,因此,由于MIG焊熔敷速率高,热输入大,导致接头组织明显比TIG焊接头粗大,强度和伸长率较低,而TIG焊接组织最为细小,其接头强度和延伸率也较高<sup>[11]</sup>。

表4 焊接接头拉伸试验性能

Tab. 4 Mechanical tensile properties of welded joints

接头类型	抗拉强度 $R_m$ /MPa	断后伸长率 $A$ /%	断裂区域
TIG	293	5	PMZ
MIG	279	4	PMZ

选取两种接头的打底层焊缝区域,按照从焊缝中心向母材的方向依次取点进行显微硬度测试,测试结果绘制成硬度曲线(图7),两种接头硬度值均为焊缝区最低,熔合区硬度分布不均,靠近热影响区的粗晶区硬度显著增大,在过时效区硬度值较低,然后逐渐恢复到母材硬度。图7中可以看出两种接头硬度曲线走势大致相同,TIG焊接头整体较MIG焊接头高一些,这从侧面也佐证了TIG焊接头抗拉强度高于MIG焊接头的试验结论。

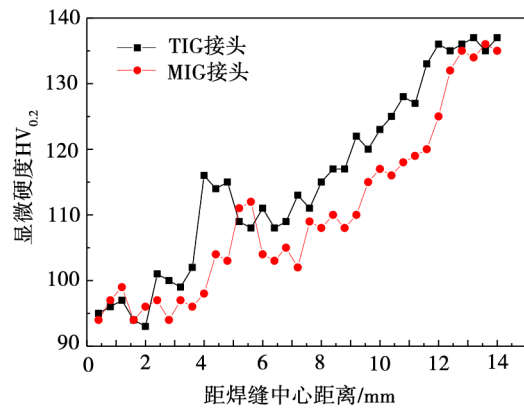


图7 两种接头硬度测试曲线

Fig. 7 Hardness tests of two joints

拉断后的接头如图8所示,可以看出接头的断口全部位于熔合区,说明熔合区是接头的薄弱区。这是由于焊接接头的力学性能与组织密切相关,熔合区介于熔化的焊缝与非熔化的热影响区之间,该区晶粒组织大小差异较大,导致该区性能薄弱且具有奇异性,在常温拉伸过程中常常成为接头断裂的位置。

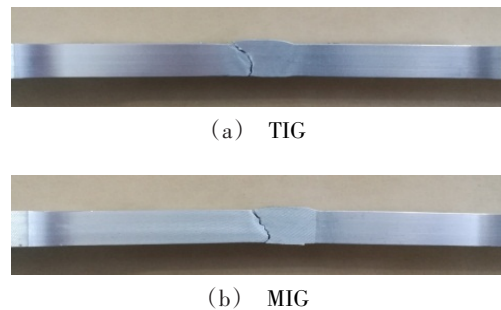


图8 接头拉伸断裂路径

Fig. 8 Fracture path of welded joint

### 3 结论

(1) TIG焊缝表面光洁,鱼鳞纹美观,焊缝内部无缺陷;MIG焊缝飞溅较多,表面较为粗糙,焊缝内部存在少数单个小气孔,两种接头的焊缝内部均无夹杂、裂纹、未熔合等缺陷。

(2) TIG焊缝晶粒尺寸较为细小,MIG焊缝组织晶粒则比较粗大,且分布不均。MIG焊接头热影响区比TIG焊接头的晶粒更为粗大。两种接头的熔合区晶粒大小不一,存在组织不均匀性。

(3) 两种接头的常温拉伸试验中均沿熔合区断裂,TIG接头强度为293 MPa,伸长率5%,MIG焊接头强度279 MPa,伸长率4%,两种接头均满足结构设计要求,TIG焊接头的强度和塑性优于MIG焊接头。

## 参考文献

[1] 薛彩军,许江波,梁珩,等. 2219 铝合金焊缝组织及其对力学性能的影响[J]. 南京理工大学学报,2013,37(1):145-149.

XUE Caijun, XU Jiangbo, LIANG Heng, et al. Microstructure and effects of mechanical properties of 2219 aluminum alloy welded joint [J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology, 2013, 37(1):145-149.

[2] DING J K, Wang D P, WANG Y, et al. Effect of post weld heat treatment on properties of variable polarity TIG welded AA2219 aluminium alloy joints [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2014(5):1307-1316.

[3] 从保强,齐铂金,周兴国,等. 2219 高强铝合金超快变换 VPTIG 焊缝组织和性能[J]. 焊接学报,2010,31(4):85-88.

CONG Baoqiang, QI Bojin, ZHOU Xingguo, et al. Microstructure and mechanical properties of ultrafast-convert VPTIG arc welding of 2219 high strength aluminum alloy [J]. Transactions of The China Welding Institution, 2010, 31(4):85-88.

[4] 栗慧,邹家生,姚君山,等. 2219 高强铝合金活性 TIG 焊工艺[J]. 材料工程,2018,46(4):66-73.

LI Hui, ZOU Jiasheng, YAO Junshan, et al. Activating flux TIG welding technology of 2219 high strength aluminum alloy [J]. Journal of Materials Engineering, 2018, 46(4):66-73.

[5] 熊欢,庄来杰,曲文卿,等. 2219-T87 铝合金变极 TIG 接头微观组织与力学性能[J]. 航空制造技术,2014(10):75-78.

XIONG Huan, ZHUANG Laijie, QU Wenqing, et al. Microstructures and mechanical properties of 2219-T87 aluminum alloy TIG welded joints [J]. Aeronautical

Manufacturing Technology, 2014(10):75-78.

[6] 韩国良,王惠苗,刘含伟,等. 不同焊接工艺下 2219 铝合金 TIG 焊接头性能分析[J]. 焊接,2019(5):48-51.

HAN Guoliang, WANG Huimiao, LIU Hanwei, et al. Performance analysis of 2219 aluminum alloy TIG welded joints under different welding processes [J]. Welding & Joining, 2019(5):48-51.

[7] 王国庆,熊林玉,田志杰,等. 不同热处理状态 2219 铝合金 TIG 焊接接头组织性能分析[J]. 焊接学报,2017,38(1):121-124.

WANG Guoqing, XIONG Linyu, TIAN Zhijie, et al. Microstructure and property of TIG welded 2219 aluminum alloy by different heat treatment [J]. Transactions of The China Welding Institution, 2017,38(1):121-124.

[8] 宋建岭,孙志鹏,王惠苗,等. 2219 铝合金锻件焊接接头组织与性能[J]. 焊接,2014(7):51-54.

SONG Jianling, SUN Zhipeng, WANG Huimiao, et al. Structure and properties of welded joints of forging 2219 aluminum alloy [J]. Welding & Joining, 2014(7):51-54.

[9] 周万盛,姚君山. 铝及铝合金的焊接[M]. 北京:机械工业出版社,2011.

ZHOU Wansheng, YAO Junshan. Welding aluminum and its alloy. Beijing: China Machine Press, 2011.

[10] 张文钺. 焊接冶金学[M]. 北京:机械工业出版社,2010.

ZHANG Wenye. Welding metallurgy [M]. Beijing: China Machine Press, 2010.

[11] 崔忠圻,覃耀春. 金属学与热处理[M]. 北京:机械工业出版社,2007.

CUI Zhongqi, QIN Yaochun. Metallographic and thermal treatment [M]. Beijing: China Machine Press, 2007.