

DOI: 10.7512/j.issn.1001-2303.2025.03.13

异种热处理状态2219铝合金T字接头熔合区 微气孔控制及其对焊缝性能的影响

孙文亮, 赵刚, 杨君, 张文韬, 米海明, 刘紫阳, 刘涛

首都航天机械有限公司, 北京 100076

摘要: 2219 铝合金焊接过程中易出现气孔缺陷, 尤其是在T字接头区域, 不仅降低了接头的力学性能, 也可能导致结构的失效。本研究针对C10S和CYS状态的2219铝合金, 采用氦弧打底和氦弧盖面单面双层焊工艺试验, 系统研究了T字接头的微气孔控制及其对焊缝性能的影响。试验结果表明, T字接头的近熔合区容易产生密集微气孔, 这些微气孔对接头的抗拉强度具有显著影响。拉伸试验发现, T字接头的断裂位置集中在CYS侧, 密集微气孔加剧了CYS侧的断裂倾向, 使有密集微气孔的T字接头抗拉强度比无密集微气孔的接头低10~15 MPa。通过X射线无损检测和扫描电镜分析, 发现这些微气孔主要是由于液态铝中氢的溶解度差异引起的氢气孔。进一步研究表明, 优化焊接工艺参数, 特别是增加氦弧盖面焊电流10~15 A, 可有效抑制熔合区密集微气孔的产生。这种工艺改进通过扩大熔池体积和延长氢气排出时间, 减少气孔缺陷, 提高了接头力学性能。研究结果说明, 通过合理调整焊接参数, 可以有效提升铝合金结构的焊接质量和力学性能, 满足铝合金压力容器高可靠性场合的实际需求。

关键词: 2219 铝合金; 氦弧打底; 氦弧盖面; 力学性能; 熔合区; 密集微气孔

中图分类号: TG457.14 文献标识码: A 文章编号: 1001-2303(2025)03-0096-07

Control of Micro-pores in the Fusion Zone of Dissimilar Heat Treatment State 2219 Aluminum Alloy T-Joints and Its Impact on Weld Seam Performance

SUN Wenliang, ZHAO Gang, YANG Jun, ZHANG Wentao, MI Haiming, LIU Ziyang, LIU Tao

Capital Aerospace Machinery Co., Ltd., Beijing 100076, China

Abstract: 2219 aluminum alloy is prone to porosity defects during welding, particularly in the T-joint region, which not only reduces the mechanical properties of the joint but may also lead to structural failure. This study investigates the control of micropores in T-joints and their effect on weld properties, using C10S and CYS state 2219 aluminum alloy plates with a helium arc backing and argon arc double-layer welding process. The results show that the area near the weld pool in the T-joint is susceptible to dense micropores, which significantly affect the tensile strength of the joint. Tensile tests revealed that fractures consistently occurred on the CYS side, with dense micropores exacerbating the tendency for fracture on the CYS side, resulting in a 10~15 MPa reduction in the ultimate tensile strength of T-joints with dense micropores compared to those without. X-ray non-destructive testing and scanning electron microscopy analysis indicated that these micropores are primarily hydrogen pores caused by the significant difference in hydrogen solubility between liquid and solid aluminum. Further research demonstrated that optimizing welding parameters, particularly increasing the argon arc welding current by 10~15 A, can effectively suppress the formation of dense micropores in the weld pool. This improvement, achieved by enlarging the weld pool and extending the time for hydrogen evasion, reduced porosity defects and enhanced the mechanical properties of the joint. The findings indicate that reasonable adjustments to welding parameters can effectively improve the quality and mechanical performance of aluminum alloy welds, meeting the high-reliability requirements of Aluminum alloy pressure vessel.

收稿日期: 2024-06-04 修回日期: 2024-08-06

作者简介: 孙文亮(1979—),男,硕士,工程师,主要从事铝合金焊接工艺研究。E-mail: 149216614@qq.com。

Keywords: 2219 aluminum alloy; first layer helium arc welding; the second layer argon arc welding; mechanical property; the bond; the dense micropores

引用格式:孙文亮,赵刚,杨君,等. 异种热处理状态 2219 铝合金 T 字接头熔合区微气孔控制及其对焊缝性能的影响[J]. 电焊机, 2025, 55(3): 96–102.

Citation:SUN Wenliang, ZHAO Gang, YANG Jun, et al. Control of Micro-pores in the Fusion Zone of Dissimilar Heat Treatment State 2219 Aluminum Alloy T-Joints and Its Impact on Weld Seam Performance[J]. Electric Welding Machine, 2025, 55(3): 96–102.

0 引言

2219 铝合金因其良好的加工性、较强的耐腐蚀性、较高的比强度^[1],以及良好的焊接性和较低焊接热裂纹倾向^[2],在工业领域尤其是航空航天领域得到了广泛应用。然而,其常规焊接过程中气孔发生率较高^[3],且不同热处理状态下的材料性能差异较大,这对 2219 铝合金的焊接质量控制和性能稳定性带来了挑战。2219 铝合金主要包括 C10S、CYS、MCS、CS、M 等 5 种热处理状态。其中,C10S、CYS 两种热处理状态在大型铝合金压力容器制造中得到了广泛应用^[3]。

铝合金压力容器是一种硬壳式或半硬壳式的大型钣金焊接结构,由环向焊缝和纵向焊缝拼接而成^[4]。在环缝与纵缝交叉形成的 T 字对接接头处,焊接应力集中现象明显,这使得气孔缺陷对铝合金 T 字接头性能的影响尤为关键。目前,国内外学者针对铝合金焊接工艺方法开展了大量研究,其中等离子焊、激光复合焊、搅拌摩擦焊等能有效防止铝合金焊接气孔缺陷的产生^[5]。广泛应用于铝合金焊接的变极性 TIG 焊接工艺能够有效减少气孔缺陷的产生,采用摆动焊接工艺^[6]及超声振动^[7]辅助条件下,接头的力学性能有所提高。然而,在不同热处理状态的 2219 铝合金焊接过程中,锻件熔合区微气孔缺陷仍频繁出现,严重影响了焊接接头的质量和性能。

当前,国内外针对不同热处理状态铝合金 T 字焊接接头的熔合区微气孔影响的研究工作较少。本研究采用单面双层焊接工艺^[8],针对熔合区密集微气孔对 2219 铝合金 T 字对接接头组织及性能影响展开研究,旨在探索减少熔合区微气孔的工艺改进方法,提升铝合金结构的焊接质量和力学性能,以满足铝合金压力容器高可靠性的实际需要。

1 试验方法

1.1 试验材料

试验材料采用 Al–Cu 系 2219 铝合金,CYS 状态为大直径整体锻件成形,C10S 状态为板材轧制成形,其化学成分及力学性能如表 1、表 2 所示。C10S 状态合金具有更高的抗拉强度和延伸率,而 CYS 状态合金的屈服强度更为突出。

表 1 2219 铝合金的化学成分(质量分数,%)

Table 1 Chemical composition of 2219 aluminum alloy (wt. %)					
Cu	Mn	Ti	Mg	Zr	
5.8~6.8	0.2~0.4	0.02~0.10	0.02	0.10~0.25	
Zn	Ni	V	Fe	Si	Al
0.10	—	0.05~0.15	0.3	0.2	余量

表 2 2219 铝合金常温力学性能

Table 2 Ambient temperature mechanical properties of 2219 Al alloy			
材料状态	R_m /MPa	$R_{p0.2}$ /MPa	A /%
CYS	390	290	4.0
C10S	440	330	12.0

1.2 试验方法

首先选用 150 mm×300 mm×3 mm 2219 C10S 铝合金进行对接焊,焊接完成后将试片对半切开,然后将切开的试片沿长边方向与 150 mm×300 mm×3 mm 2219 CYS 铝合金平板对接焊。焊丝牌号为 2325,直径 1.6 mm。焊接设备采用米勒 Dynasty 700 焊机,额定输出电流为 5~700 A。

采用直流正接氦弧打底、变极性氩弧盖面工艺进行单面双层焊接工艺试验。焊接工艺参数设置如下:(1)打底焊层。采用直流正接,氦气保护,气体流量 11~13 L/min,电流 130~140 A,电压 12 V,焊接速度 300 mm/min;(2)盖面焊层。保护气体为氩气,气体流量 13~16 L/min,电流 220~240 A,焊接电压 18 V,焊接速度 150 mm/min。

在盖面焊接 T 字接头区域时,通过对焊接电流

保持不变与适当增加焊接电流的参数优化改进,T 字接头获得圆滑过渡焊缝外观及其无密集微气孔焊缝内部质量。优化前保持 220~225 A 电流不变通过 T 字接头区域,优化后焊接电流增加 10~15 A,通过 T 字接头区域,获得稳定可靠的焊缝质量。焊前对试片进行酸洗及刮削打磨处理,清除表面油污。

焊后对试片进行 X 射线无损检测,焊缝采用 QJ2698A-2011 I 级评价标准判定。力学性能测试在室温下进行。采用 WDW3100 万能拉力试验机进行拉伸性能试验。拉伸试样的取样形式:每对焊接试片沿纵缝方向取 T 字接头拉伸试样,取样位置及试样尺寸如图 1 所示。采用 HXD-1000TM 显微镜进行组织分析,JSM-6490LV 扫描电子显微镜进行断口形貌分析。

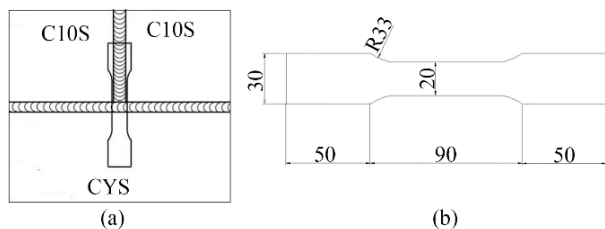


图 1 T 字接头试样的取样位置及尺寸
Fig. 1 Sampling location and size of T-joint specimens

2 试验结果及分析

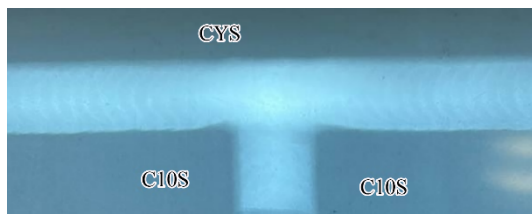
2.1 2219 铝合金 T 字接头内部质量

2219 铝合金的焊接气孔敏感性较大,内部气孔缺陷是焊接质量的重要评判标准。厚度 3.0 mm 的 2219 铝合金单面焊双面成形试验时,采用直流正接氩弧打底+交流脉冲氩弧盖面焊接工艺的 T 字接头 X 光无损影像照片如图 2 所示,电流优化前后焊缝内部无缺陷(标准中内部微气孔小于 0.2 mm)。当焊接电流从 220 A 优化至 235 A 时,T 字接头纵缝与环缝的焊角处过渡较为圆滑。

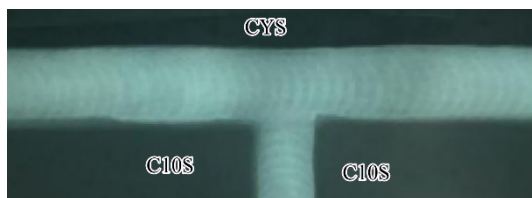
T 字接头拉伸断口扫描电镜照片如图 3 所示。分析可知,锻件熔合区存在密集微气孔,直径小于 150 μm 。但 X 光无损检测判定为 I 级焊缝合格,证明 X 光检测不能排除存在小于 0.2 mm 的微气孔。

2.2 气孔的形成机理

2219 铝合金的气孔缺陷主要为氢气孔。氢原



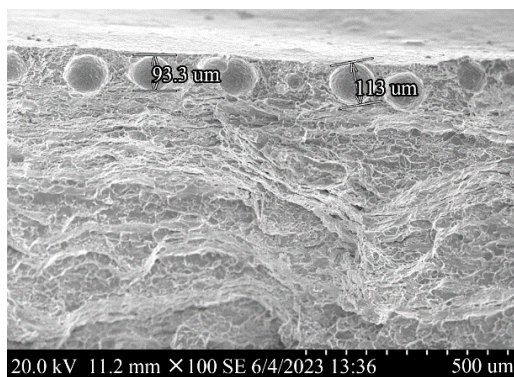
(a) 电流未优化(220 A)



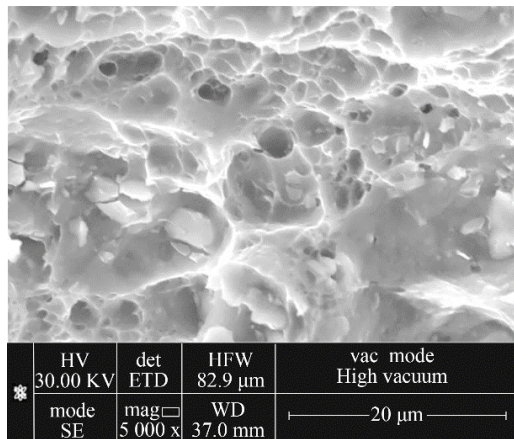
(b) 电流优化增加(235 A)

图 2 2219 铝合金 T 字接头焊缝成形 X 光影像

Fig. 2 X-ray imaging of 2219 aluminum alloy T-joint weld bead formation



(a) 锻件熔合区低倍照片



(b) 锻件熔合区高倍照片

图 3 T 字接头拉伸断口扫描电镜照片

Fig. 3 Scanning electron microscope photos of T-joint tensile fracture
子在液态铝和固态铝中的溶解度差别较大,液态铝中氢的溶解度(0.69 mL/100 g)是固态铝中氢溶解度(0.036 mL/100 g)的近 20 倍,这种较大的溶解度差

异是铝合金焊接时出现氢气孔的主要原因。即使液态铝中含有微量的氢,但凝固后也很容易超出固态铝中的溶解极限,导致形成大量气孔^[9]。

焊接时铝合金的氢源很多,如零件和焊丝表面的氧化物和油膜等碳氢化合物、惰性保护气体内所含的杂质和水分、母材和焊丝本身所含的气体(氢)等。

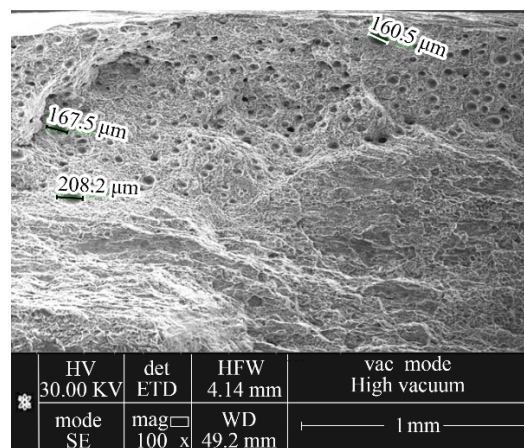
图3扫描电镜照片中位于锻件熔合区附近一侧的链状微气孔应为弥散氢气孔。由于存在溶解度差异,焊接时固态母材所含的氢向熔池扩散和溶解,而熔池快速结晶时氢未析出,形成熔合区气孔。由图3可以看出,熔合区附近链状微气孔位于变极性氩弧盖面焊层,说明在直流氩弧打底焊接时,电弧能量集中不易产生气孔,对于氢气孔产生有一定抑制作用。图4为T字接头断口气孔形貌,可以看出C10S一侧熔合区与CYS一侧熔合区均存在密集型气孔。一般认为变极性氩弧盖面焊的变极性条件可有效减少气孔的产生,但是在T字接头区域存在纵向焊缝,环向焊缝焊接时散热条件发生变化,导致T字接头熔合区附近区域容易出现密集微气孔。

2.3 气孔的抑制分析

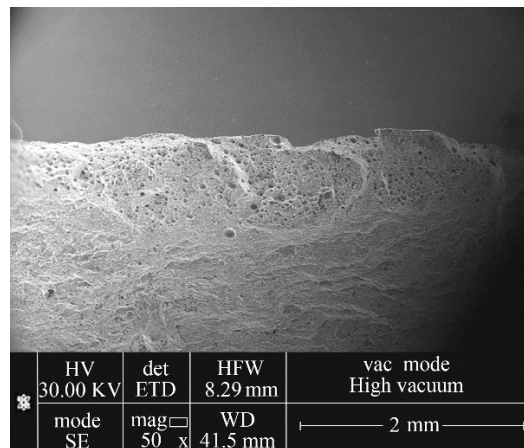
气孔缺陷的有效抑制对于提高铝合金焊接接头质量和性能有重要意义,深入研究气孔抑制方法已成为提升铝合金焊接性能的关键。

焊缝气孔的控制可以从两个方面进行:一是尽量减少焊接过程氢融入熔池;二是通过合理的工艺措施,促使已进入熔池的氢溢出^[5]。减少氢源的措施主要包括焊前清理、控制保护气体纯度以及严格控制母材与焊丝的含氢量。而合理的工艺措施主要是对焊接参数的优化。如图5所示,在未优化的工艺参数以及焊前清理不充分的情况下,焊缝核心区域出现了弥散、链状的密集气孔。

图6为T字接头焊接参数优化前后的断口形貌。可以看出,盖面焊接电流参数没有进行微调整时,熔合区一侧存在密集微气孔,从气孔的形貌判断为氢气孔,如图6a所示。主要原因是:T字接头区域的纵缝焊接接头厚度较母材更大,导致该区域散热条件发生变化,熔池体积减小,凝固时间缩短。由于氢原子在液态铝中的溶解度远高于固态铝,快速凝固过程中氢未能及时逸出,从而在熔合区形成



(a)C10S 侧熔合区气孔



(b)CYS 侧熔合区气孔

图4 T字接头断口气孔形貌

Fig. 4 Appearance of gas pores at T-junction breakout

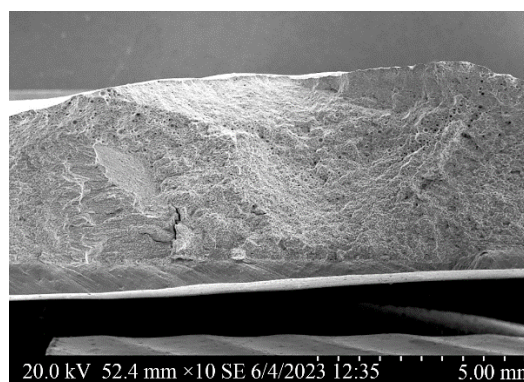
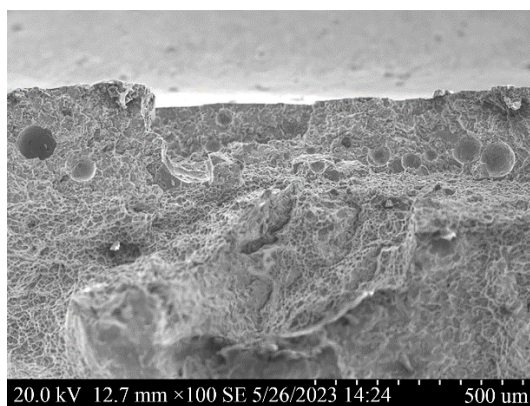


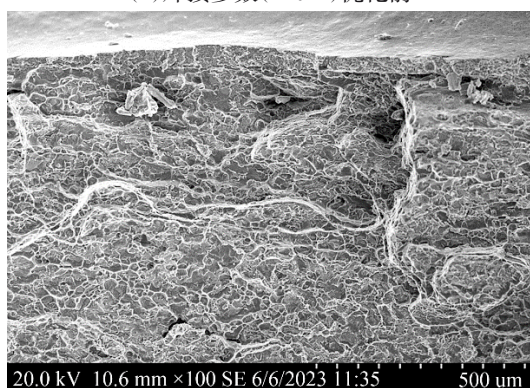
图5 未优化工艺参数且清理不干净的焊缝组织形貌

Fig. 5 The microstructure of a weld bead with unoptimized process parameters and incomplete cleaning

密集气孔。根据T字接头实际散热条件,调整焊接参数即增加10~15 A盖面峰值电流后,熔合区一侧密集气孔得到抑制,如图6b所示。电流增大后,焊接熔池增大,熔池的氢气孔溢出时间延长,从而有



(a) 焊接参数(220 A)优化前



(b) 焊接参数(235 A)优化后

图6 T字接头焊接参数优化前后的断口形貌

Fig. 6 Fracture morphology before and after the optimization of T-joint welding parameters

效减少了熔合区的密集微气孔。

在焊接过程中,焊接工况的波动可能导致熔合区附近密微气孔的产生,尤其是在异种状态铝合金的焊接过程中。对于2219铝合金T字焊接接头,由于接头区域与非接头区域的散热条件存在差异,优化后的焊接参数能够有效减少熔合区的密集微气孔的出现。通常认为,在铝合金的TIG焊过程中,尽量减少采用小热输入以减少熔池存在时间,从而减少氢的溶入,同时要保证根部熔化以利于氧化膜上的气泡浮出。因此利用大电流配合较高的焊接速度比较有利。但是,对于压力容器,铝合金焊接接头有一定的延伸率要求,在严格控制氢含量的条件下,保证根部熔化,需要配合低的焊接速度,延长气泡的浮出时间,减少产生气孔^[10-11]。

2.4 气孔对力学性能的影响

气孔缺陷是影响铝合金构件可靠性的关键因素之一。铝合金内部的气孔尺寸差异较大^[12];大尺

寸气孔(直径>50 μm)极易形成裂纹源^[13],也显著降低构件的疲劳性能和强度^[14-15];显微气孔是较为常见的冶金缺陷^[16]。气孔在收缩应力作用下会产生内应力,造成应力集中,裂纹极易萌生扩展使构件发生失效^[17]。

图7为2219铝合金T字接头焊缝及断口横截面宏观形貌,可以看出,接头沿CYS侧热影响区发生断裂。对于异种热处理状态的T字接头,CYS侧是接头的薄弱环节^[18-21]。CYS侧熔合区的晶粒尺寸明显大于C10S侧,CYS侧延伸率小于C10S侧,因此断裂位置均在CYS侧。此外,熔合区密集微气孔对CYS侧的影响大于C10S侧。



图7 T字接头焊缝及断口横截面宏观形貌

Fig. 7 Macroscopic appearance of T-joint weld and cross-section of fracture

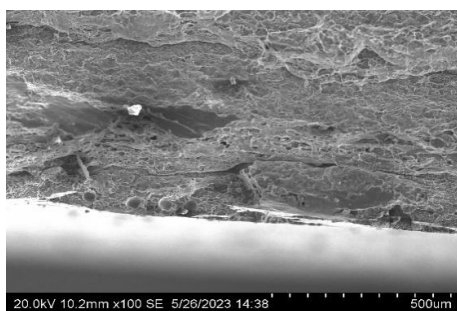
T字接头的力学性能测试结果如表3所示。由表可知,有密集气孔的T字接头的抗拉强度较无密集气孔的下降10~15 MPa,而两者的屈服强度相当。断后伸长率从无气孔接头的4.17%下降至有气孔接头的4.0%,因此,可以认为T字接头中的密集气孔显著降低接头抗拉强度和韧性,而接头屈服强度对密集气孔不敏感。

表3 T字接头与其余位置接头的性能对比

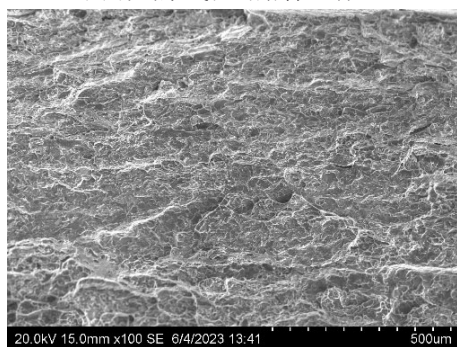
Table 3 Performance comparison of T-joints with other position joints

试样 编号	T字接头位置力学性能 (无密集气孔)			T字接头位置力学性能 (有密集气孔)		
	R_m /MPa	$R_{p0.2}$ /MPa	A /%	R_m /MPa	$R_{p0.2}$ /MPa	A /%
1	248	137	4.5	238	138	4.0
2	250	139	5.0	237	132	4.5
3	245	141	3.0	233	142	3.5
平均值	247.67	139	4.17	236	137.34	4.0

图8为T字接头断口扫描电镜照片。由图可知,断口以韧性断裂为主,接头具备一定的韧塑性。接头从两侧起裂,却从断口中部开裂。这是因为试验采用多层焊方式,打底焊缝与盖面焊缝的交界位置为应力集中薄弱区,在外力作用下易开裂。



(a)有密集气孔的熔合区断口



(b)无密集气孔的熔合区断口

图8 T字接头断口扫描电镜照片

Fig. 8 SEM photomicrographs of T-joint fracture

3 结论

(1)2219 铝合金 T 字焊接接头熔合区易出现密集微气孔。熔合区密集微气孔显著降低接头的抗拉强度,而对接头的屈服强度影响较小。具有密集微气孔的 T 字接头抗拉强度比无密集微气孔的接头平均低 10~15 MPa,表明微气孔是导致接头力学性能下降的主要原因。

(2)2219 铝合金焊接过程中产生的微气孔主要为氢气孔。氢原子在液态铝和固态铝中的溶解度差异较大,导致熔池中过饱和的氢在凝固过程中析出形成气孔。锻件熔合区附近的链状微气孔即为弥散氢气孔,其形成与熔池快速结晶和氢气逸出时间不足有关。

(3)2219 铝合金 T 字接头焊接过程中,盖面氩弧焊电流增加 10~15 A,能够有效抑制 T 字接头熔合区密集微气孔的产生。

(3)2219 铝合金 T 字接头断口扫描分析表明,T 字接头均在锻件一侧熔合区断裂。熔合区密集微气孔对 CYS 一侧影响大于 C10S 一侧。

(5)在盖面焊接 2219 铝合金 T 字接头时,在 T 字接头区域增加焊接电流,随后恢复正常焊接电流,继续焊接非 T 字接头区域。该工艺改进能够有效提高铝合金压力容器的焊接质量和力学性能。

参考文献:

- [1] 宋民远,赵海云,曲文卿,等. 2219 铝合金及变极性 TIG 焊焊接接头的力学性能[J]. 铝加工,2010(3): 30-33.
SONG M Y, ZHAO H Y, QU W Q, et al. Mechanical Properties of 2219 Aluminum Alloy and TIG Welding Joints[J]. Aluminium Fabrication, 2010(3): 30-33.
- [2] 周万盛,姚君山. 铝及铝合金的焊接[M]. 北京:机械工业出版社,2006.
- [3] 刘含伟,宋建岭,孙志鹏,等. 异种热处理状态 2219 铝合金 TIG 焊接头性能研究[J]. 焊接,2014(10): 58-60+63.
LIU H W, SONG J L, SUN Z P, et al. Properties of TIG welded joint of 2219 aluminium alloy with dissimilar heat treatment[J]. Welding & Joining, 2014(10): 58-60+63.
- [4] 吴奇,李晓延,孙鲁阳,等. 2219 铝合金焊接接头软化模型的建立与应用[J]. 材料导报,2020,34(5): 10138-10143.
WU Q, LI X Y, SUN L Y, et al. Establishment and Application of Softening Model of 2219 Aluminum Alloy Welding Joint [J]. Materials Reports, 2020, 34 (5): 10138-10143.
- [5] 邹增大,杜则裕,田志凌,等. 焊接手册 第二卷:材料的焊接[M]. 北京:机械工业出版社,2012.
- [6] 蒙丹阳,王惠苗,丁吉坤,等. 摆动焊接对异种热处理状态 2219 铝合金焊接接头性能的影响[J]. 宇航材料工艺,2021,51(2): 62-67.
MENG D Y, WANG H M, DING J K, et al. Effect of Weaving Welding on Properties of Dissimilar Heat Treated 2219 Aluminum Alloy Welded Joint[J]. Aerospace Materials & Technology, 2021, 51(2): 62-67.
- [7] 李攀,郭顺,杨东青,等. 超声振动辅助电弧增材制造 2219 铝合金的显微组织及力学性能[J]. 有色金属学报,2023,33(7): 2081-2089.
LI P, GUO S, YANG D Q, et al. Microstructure and mechanical properties of 2219 aluminum alloy manufactured by ultrasonic vibration assisted wire and arc additively manufacturing [J]. The Chinese Journal of Non-ferrous Metals, 2023, 33(7): 2081-2089.
- [8] 梁文博,闫辉. 单面焊双面成形的焊接技术[J]. 煤矿

- 现代化,2011(1):116-117.
- LIANG W B, YAN H. Single-side Welding Technology with Double Sided Formation[J]. Coal Mine Modernization,2011(1):116-117.
- [9] Wu B T, Pan Z X, Ding D H, et al. A review of the wire arc additive manufacturing of metals: properties, defects and quality improvement[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2018, 35: 127-139.
- [10] 李恒, 徐光霁, 张宇辉, 等. 2219/5A06 异种铝合金焊接接头组织与性能相关性[J]. 焊接学报, 2020, 41(9):8-15.
- LI H, XU G S, ZHANG Y H, et al. Correlation between microstructure and properties of 2219/5A06 dissimilar aluminum alloy welded joint[J]. Transactions of The China Welding Institution, 2020, 41(9):8-15.
- [11] 康悦, 赵艳秋, 李悦, 等. 驱动力对 2219 铝合金 DLBSW 焊接熔池行为的影响[J]. 焊接学报, 2022, 43(2): 82-87.
- KANG Y, ZHAO Y Q, LI Y, et al. Effect of driving force on molten pool behavior of 2219 aluminum alloy DLBSW process[J]. Transactions of The China Welding Institution, 2022, 43(2):82-87.
- [12] Ren L L, Gu H M, Wang W, et al. Effects of interpass cooling on material properties of wire arc additive manufactured Al-6.3 Mg alloy[J]. 3D Printing and Additive Manufacturing, 2019, 6(6):344-353.
- [13] Mayer H, Papakyriacou M, Zettl B, et al. Influence of porosity on the fatigue limit of die cast magnesium and aluminium alloys[J]. International Journal of Fatigue, 2003, 25(3):245-256.
- [14] Kbayashi M, Dorce Y, Toda H, et al. Effect of local volume fraction of microporosity on tensile properties in Al-Si-Mg cast alloy[J]. Materials Science and Technology, 2010, 26(8):962-967.
- [15] Toda H, Oogo H, Uesugi K, et al. Roles of pre-existing hydrogen micropores on ductile fracture[J]. Materials Transactions, 2009, 50(9):2285-2290.
- [16] 张宇豪, 许永超, 刘森, 等. 微量元素对增材制造 Al-Zn-Mg-Cu 合金组织及性能的影响[J]. 焊接技术, 2022, 51(2):1-4.
- ZHANG Y H, XU Y C, LIU S, et al. Influence of trace elements on microstructure and mechanical properties of additive manufacturing of Al-Zn-Mg-Cu alloy[J]. Welding Technology, 2022, 51(2):1-4.
- [17] Zhang Y B, Xu J H, Zhai T G. Distributions of pore size and fatigue weak link strength in an A713 sand cast aluminum alloy[J]. Materials Science and Engineering A, 2010, 527(16):3639-3644.
- [18] 戴军, 张娜, 杨莉, 等. 2219 铝合金变极性等离子弧焊接接头[J]. 电焊机, 2016, 46(01): 113-115.
- DAI J, ZHANG N, YANG L, et al. Variable polarity plasma arc welded joints of 2219 aluminum alloy[J]. Electric Welding Machine, 2016, 46(01): 113-115..
- [19] 赵志远. 铝和铝合金牌号与金相图谱速用速查及金相检验技术创新应用指导手册[M]. 北京: 中国知识出版社, 2005.
- [20] 张雷, 龙伟民, 鲍丽, 等. 2219 铝合金直流活性焊接技术[J]. 电焊机, 2018, 48(03): 72-75.
- ZHANG L, LONG W M, BAO L, et al. Direct current activated welding technology of 2219 aluminum alloy[J]. Electric Welding Machine, 2018, 48(03): 72-75.
- [21] 于勇征, 栾国红, 孙成彬. LF6/LD10 铝合金搅拌摩擦焊工艺参数对接头性能的影响[J]. 焊接学报, 2005, 26(11):67-70.
- YU Y Z, LUAN G H, SUN C B. Influences of FSW parameters on mechanical properties of LF6/LD10 aluminum alloy[J]. Transactions of The China Welding Institution, 2005, 26(11):67-70.