

# 2219合金TIG补焊接头亮线影像成因及其力学性能

彭江涛 欧阳婷婷 龚习 李庆庆 韩磊

(天津航天长征火箭制造有限公司, 天津 300462)

**文 摘** 针对2219合金TIG补焊接头X射线底片亮线影像,开展2219合金不同坡口面角TIG补焊接头组织及性能研究。通过X射线、扫描电镜及能谱仪分析接头底片亮线影像位置对应的微观形貌及成分,并通过拉伸试验评价补焊接头力学性能。结果显示:在 $0^{\circ}\sim 20^{\circ}$ 随坡口面角 $\alpha$ 值的增大,X射线底片上亮线影像的黑度逐渐降低;Cu含量较高的 $\alpha(\text{Al})+\theta$ 非平衡共晶组织对X射线的散射与吸收作用较强,是X射线底片亮线影像的成因;坡口面角 $\alpha$ 角侧受电磁搅拌作用弱于 $\beta$ 角侧,其固-液界面前沿的边界层宽度大于 $\beta$ 角侧,且温度梯度及边界层内的成分过冷度均大于 $\beta$ 角侧,促进了 $\alpha$ 角侧枝晶的生长。当 $\beta$ 角为 $20^{\circ}$ 时,在 $0^{\circ}\sim 20^{\circ}$ 随着 $\alpha$ 角度值增大,接头的抗拉强度与延伸率逐渐增大, $20^{\circ}$ 时获得了优良的室温力学性能。X射线底片上存在亮线影像的补焊接头力学性能满足型号使用要求,亮线影像结构可不按焊接缺陷处理。

**关键词** 坡口面角,X射线影像,非平衡共晶组织,微观形貌,力学性能

中图分类号: TG444

DOI: 10.12044/j.issn.1007-2330.2020.03.015

## Bright Line Image Formation and Mechanical Properties of 2219 Alloy TIG Repairing Welding Joints

PENG Jiangtao OUYANG Tingting GONG Xi LI Qingqing HAN Lei

(Tianjin Aerospace Long March Rocket Manufacturing Co. Ltd., Tianjin 300462)

**Abstract** The microstructure and properties of TIG repairing welding joints of 2219 alloy with different bevel angle were studied against the bright line image in the X-ray film. After X-ray detection, SEM observation, energy spectrum analysis, and tensile test, it was found that, the blackness of bright line image in the X-ray film decreased gradually, with the increase of the  $\alpha$  bevel angle at the range of  $0^{\circ}$  to  $20^{\circ}$ . In addition, the  $\alpha(\text{Al})+\theta$  non-equilibrium eutectic structure with high copper content, had a stronger effect on X-ray scattering and absorption, which was the cause of bright line image in the X-ray film. Meanwhile, the electromagnetic stirring nearby the  $\alpha$  bevel angle was weaker, and the boundary layer width in front of the solid-liquid interface was wider, than that of beside the  $\beta$  bevel angle. Also the temperature gradient and the degree of constitutional supercooling in the boundary layer was larger than that of alongside the  $\beta$  bevel angle, both of which promoted the growth of the dendrites beside the  $\alpha$  bevel angle. When the  $\beta$  bevel angle was for  $20^{\circ}$ , the tensile strength and elongation of the joint gradually increased with the increase of  $\alpha$  bevel angle, in the range of  $0^{\circ}$  to  $20^{\circ}$ , and the excellent room temperature mechanical property was obtained at  $20^{\circ}$ . The bright line image in the X-ray film of the repair welding joint could not be treated as the welding defect.

**Key words** Bevel angle, X-ray image, The non-equilibrium eutectic, Microstructure, Mechanical properties

### 0 引言

2219合金是Al-Cu-Mn系可热处理强化铝合金,具有优异的高、低温力学性能与抗应力腐蚀性能,以及良好的铸造性与焊接工艺性,已广泛应用于国外航天运载器上<sup>[1]</sup>,同时已被选为我国新一代液体运载火箭燃料贮箱主体结构材料<sup>[2]</sup>。

新一代液体运载火箭贮箱制造大量采用了VPTIG自动焊接工艺<sup>[3]</sup>。在铝合金熔焊过程中,气孔夹杂等缺

陷难以有效避免。工程应用过程中常采用手工TIG焊对形状不规则、易产生应力集中的焊接缺陷进行补焊。补焊槽加工成“船形”结构,时常存在补焊槽坡口面角度较小的情况,此类船形槽经补焊后,X射线底片上常存在一条黑度明显低于周围区域的亮线影像。

目前,国内外暂无关于2219铝合金TIG焊缝补焊接头X射线底片亮线影像的报道。本文针对不同坡口面角补焊槽结构开展手工TIG补焊实验,并对补

收稿日期:2019-12-17

第一作者简介:彭江涛,1985年出生,硕士,主要从事航天产品焊接技术研究工作。E-mail:hnpjt811@126.com

焊接头 X 射线底片亮线影像成因、接头微观形貌及常温力学性能等进行研究,拟为 2219 铝合金的工程应用提供重要支撑。

## 1 实验

### 1.1 材料

材料为采用 VPTIG 自动焊工艺制造的 8.0 mm×500 mm×1 000 mm 的 2219T87/T87 铝合金对接焊弧板。补焊焊丝为综合性能优良的 2325 合金焊丝<sup>[4]</sup>,其成分见表 1<sup>[5]</sup>。

表 1 2219 铝合金及 2325 焊丝化学成分

合金	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	Zr	V	Al
2219	6.18	0.3	≤0.02	≤0.1	0.048	0.12	0.07	余
2325	6.32	0.3	≤0.02	0.25	0.15	0.18	0.1	余

### 1.2 设备及方法

补焊前对自动焊弧板进行酸洗除油,并用气动铣刀在焊缝背部加工补焊槽,槽深约 6 mm。采用 Miller Dynasty 700 变极性焊接电源两次完成补焊,焊接电流 210 A,交流频率 55 Hz。焊缝无损检测设备为 MG-165 型定向 X 射线机,检测电压 55 kV,曝光 3 min。采用 Sirion 200 扫描电镜(SEM)观察补焊接头横截面微观形貌与常温拉伸断口形貌,加速电压 20 kV,且用电镜配置的 GENESIS 60S 能谱仪(EDS)检测补焊接头中底片亮线影像对应物质的成分。补焊接头室温单向拉伸实验在 Instron 8032 电子拉伸机上,拉伸速度 2 mm/min。

## 2 结果与讨论

### 2.1 补焊槽结构及焊缝底片影像分析

焊缝背部补焊槽截面示意图 1,人员手持工具操作侧的坡口面角为  $\alpha$ ,对侧坡口面角为  $\beta$ 。受操作习惯及视线受限的影响,补焊槽常呈现  $\alpha \leq \beta$  与  $18^\circ \leq \beta \leq 30^\circ$  的特点。2219 铝合金焊接性优良,预研攻关实验显示,接头高熔合比即可获得高质量的焊缝,又能降低焊丝消耗,故本实验补焊槽坡口面角  $\beta$  选择  $20^\circ$ ,坡口面角  $\alpha$  为变量。

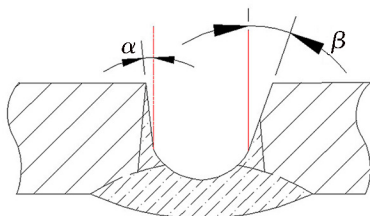


图 1 焊缝背部补焊槽横截面示意图

Fig. 1 Cross section of repair groove

图 2 为不同坡口面角度手工 TIG 补焊接头的 X 射线底片影像。当坡口面角度  $\beta$  约为  $20^\circ$ , $\alpha$  值分别为  $0^\circ$ 、 $5^\circ$ 、 $10^\circ$  及  $15^\circ$  时,局部补焊接头底片上  $\alpha$  角侧均存在一

条亮线影像,且随着  $\alpha$  值的增大,亮线的黑度逐渐降低;当  $\alpha$  角度值为  $20^\circ$  与  $25^\circ$  时,底片上亮线影像消失。X 射线底片影像的黑度与胶片的感光度成正比,在相同的材料、厚度及 X 射线辐射条件下,影像黑度与物质密度密切相关,物质密度越高,X 射线的衰减越严重,则胶片感光度越低,对应的影像黑度越小<sup>[6]</sup>。由此判断底片亮线影像对应区域的物质对 X 射线的散射与吸收程度较高,其密度应高于其他区域物质。

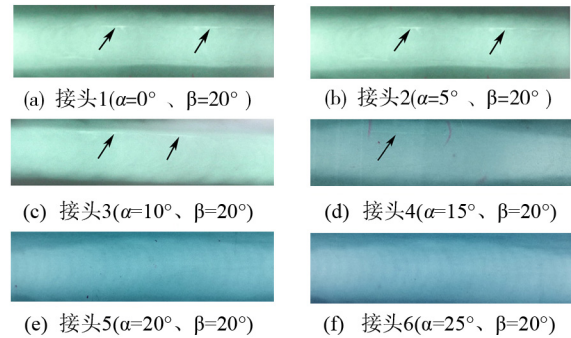


图 2 不同坡口面角度补焊接头 X 射线底片影像

Fig. 2 X-ray film images of repair welding joint with different bevel angles

### 2.2 接头微观形貌及成分分析

接头 2 亮线影像对应处的横截面形貌如图 3 所示,直线处为坡口面角  $\alpha$  为  $5^\circ$  侧的陡峭侧壁,其附近一定宽度范围内存在粗大、密集的白色树枝晶,一次枝晶两侧还存在二次枝晶;而临近该区的焊缝中的析出物相对细小、分散。

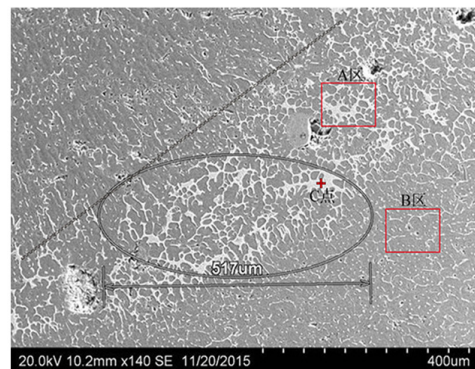


图 3 接头 2 亮线处横截面微观形貌

Fig. 3 Microstructure of cross section at bright line of joint 2

对截面上 A 区及 B 区进行面扫描能谱分析,A 区 Al、Cu 质量分数分别为 82.56%、16.8%;B 区 Al、Cu 质量分数分别为 91.36% 与 8.64%;A 区中 Cu 元素含量明显高于 B 区,表明接头中存在一定的宏观偏析。此外,对 C 点处粗大的析出物进行点扫描分析,Al、Cu 元素质量分数分别为 68.21%、31.79%。文献[7]显示 Al-Cu 系合金共晶组织中 Cu 原子质量分数 33.2%,与本实验检测结果较为接近,推断陡峭侧壁附近的粗大析出物为 Cu 含量较高的  $\alpha(\text{Al})+\theta$  共

晶组织,此推断与文献[5]报道的2219合金熔焊焊缝内部存在非平衡共晶的观点一致,也与前文横截面上底片亮线影像对应处物质密度高于其他区域的观点相应证,其局部区域偏析引起Cu含量升高是造成X射线底片亮线影像的原因。

图4是熔池液相横截面及其液相各区简化示意图。

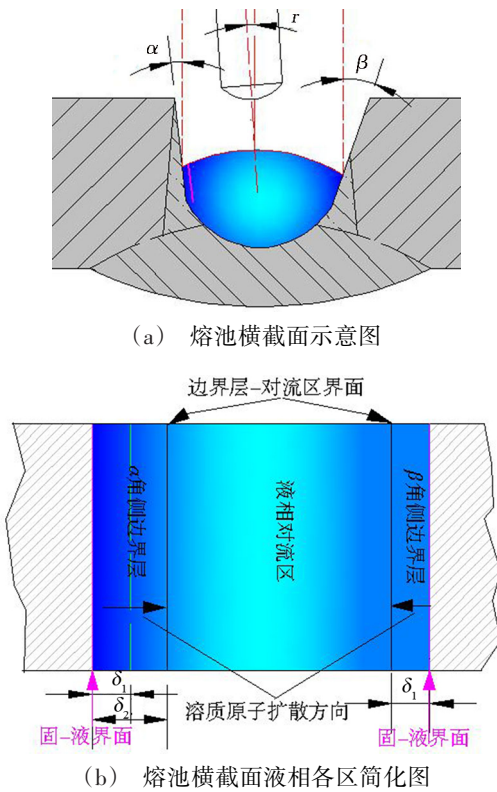


图4 熔池横截面及液相各区简化图

Fig. 4 Diagram on cross section of molten pool and each region of liquid phase

熔池液相在固-液界面上存在一薄的无流动的边界层,其层内界面法向无原子的对流传输,溶质原子只能通过扩散传输而迁移至边界层以外的液相区<sup>[8]</sup>。因补焊槽为非对称结构( $\alpha < \beta$ ),且手工焊枪前端存在小倾角 $r$ ,同时受人员持枪有轻微偏对侧习惯的影响,TIG补焊过程熔池内的发散电流与自身磁场交互形成的电磁力<sup>[9]</sup>对 $\alpha$ 角侧壁附近液相区的电磁搅拌弱于 $\beta$ 角侧壁附近。假设在当前补焊条件下,距 $\beta$ 角侧固-液界面 $\delta_1$ 位置处,溶质原子经扩散通过“边界层-对流区界面”的输出等于边界层溶质原子的输入,则边界层将稳定在 $\delta_1$ 宽度。因 $\alpha$ 角侧边界层受液相强制对流的冲刷作用较弱,在距 $\alpha$ 角侧固-液界面 $\delta_1$ 位置面上,溶质原子扩散通过量势必难以被液相对流及时传输走,层内溶质原子将发生积聚,其浓度梯度变大,扩散驱动力增加,将引起边界层界面迁移,当宽度增加到某一临界值 $\delta_2$ ,边界层溶质原子的输入等于原子扩散输出时,边界层宽度即维持稳定。由

此判断 $\delta_1 < \delta_2$ ,边界层宽度随电磁搅拌作用的减小而增加。

坡口面角 $\alpha$ 侧固-液界面前沿的边界层相对略宽。焊接热源前移后,熔池金属液迅速冷却,其结晶为非平衡凝固过程,固-液界面上发生了Cu、Mn等溶质原子的重新分配,先凝固的 $\alpha$ (Al)固溶体溶质含量低,剩余液相的溶质浓度随液相线变化而逐渐增高,当剩余液相成分达到共晶点后,形成偏析的非平衡共晶组织<sup>[8]</sup>;同时由相图可知,亚共晶Al-Cu合金固-液界面前沿的液相温度随溶质浓度的增加而降低<sup>[7]</sup>,故 $\alpha$ 角侧的边界层内成分过冷度略大。在凝固初始阶段,沿界面法向通过母材的散热较快,温度梯度大,且成分过冷也略大,综合因素都促进树枝晶的长大。当枝晶区长大到一定宽度,母材温度上升,界面法向的散热速度降低,温度梯度降低,枝晶生长的驱动力下降,同时受液相对流区的冲刷作用增强,树枝晶生长受到抑制。在 $\beta$ 角侧区域,其边界层内的成分过冷略低,同时受电磁搅拌作用较强,液相对流产生的温度起伏与冲刷作用促使该区凝固初期的枝晶熔断<sup>[10]</sup>,成为形核基底,有利于内部晶核的增殖,故其析出相分布相对弥散,并未发现粗大的枝晶组织,X射线底片也未见亮线影像。

### 2.3 补焊接头力学性能及断口分析

X射线底片上存在亮线影像的补焊接头室温力学性能见图5。由图可知: $\alpha$ 角在 $0 \sim 20^\circ$ ,随着坡口面角 $\alpha$ 值的增大,补焊接头抗拉强度 $\sigma_b$ 及延伸率 $\delta_5$ 值均呈缓慢上升, $\alpha$ 角约为 $20^\circ$ 时,底片上无亮线影像,补焊接头抗拉强度达295 MPa、延伸率为5%;当 $\alpha$ 角为 $25^\circ$ 时,补焊接头强度略降,延伸率值无明显变化。补焊接头性能较为优良,这可能与两道次补焊,接头单位时间内的焊接热输入值低于一道次完成补焊有关<sup>[11]</sup>。 $\alpha$ 角在 $0 \sim 25^\circ$ ,补焊接头性能均满足运载火箭制造工程应用时,接头系数 $\geq 0.5$ ,延伸率 $\geq 3\%$ 的许可要求。

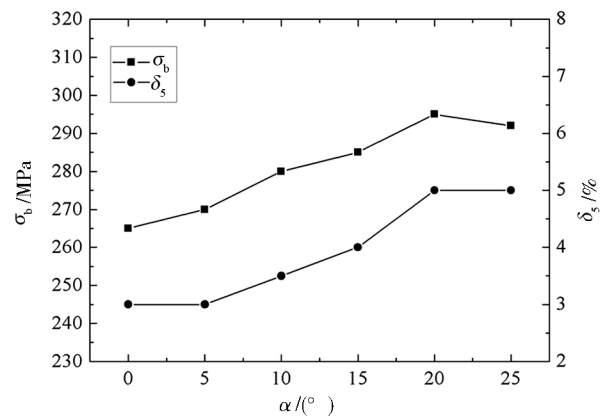


图5 补焊接头室温力学性能

Fig. 5 Mechanical properties of repair welding joints at room temperature



图6是坡口面角 $\alpha$ 分别为 $5^\circ$ 及 $20^\circ$ 时补焊接头室温断口形貌。接头2( $\alpha=5^\circ$ )自坡口面角 $\alpha$ 侧焊缝根部启裂。

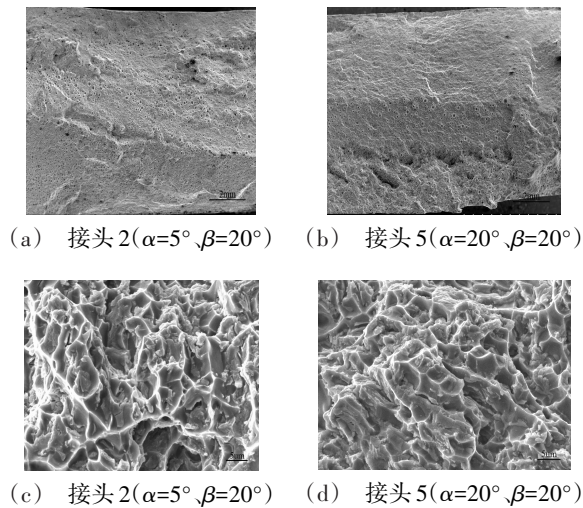


图6 常温拉伸断口形貌

Fig. 6 Tensile fracture morphology at room temperature

由图6可看出接头2( $\alpha=5^\circ$ )内部的微气孔数量明显高于接头5( $\alpha=20^\circ$ ),补焊过程焊枪前移后,熔池金属液快速冷却,其中的微小氢气泡未能及时聚集长大,易附着于陡峭侧壁难以及时上浮溢出;同时因大量微气孔的存在,接头2的有效横截面积略低于接头5,此现象也是接头强度偏低的原因之一。此外,相对于接头5,接头2断口面上的韧窝大且浅,表明接头2的析出相略粗,其基体相在裂纹扩展过程中的形变有限,故其延伸率略低,但仍满足延伸率 $\geq 3\%$ 的使用要求,因此,补焊接头X射线底片上的亮线影像可不按焊接缺陷进行处理。

### 3 结论

(1)在 $0\sim 20^\circ$ ,随坡口面角 $\alpha$ 值的增大,X射线底片上亮线影像的黑度逐渐降低,至与周围金属黑度一致,亮线影像对应处的物质为含Cu量较高且粗大的 $\alpha(\text{Al})+\theta$ 相非平衡共晶组织。

(2)在TIG补焊过程中,熔池坡口面角 $\alpha$ 角侧受电磁搅拌弱于 $\beta$ 角侧,其固-液界面前沿的边界层宽度大于 $\beta$ 角侧;凝固初期, $\alpha$ 角侧的温度梯度与边界层内的成分过冷度均高于坡口面角 $\beta$ 角侧,促进了坡口面角 $\alpha$ 角侧树枝晶的生长。

(3)当 $\beta$ 角为 $20^\circ$ 时, $\alpha$ 角在 $0\sim 20^\circ$ 随角度值的增大,补焊接头的抗拉强度与延伸率逐渐升高,当 $\alpha$ 角达 $20^\circ$ 时获得了优良的室温力学性能;X射线底片上存在亮线影像的补焊接头力学性能满足运载火箭使用许可要求,亮线影像结构可不按焊接缺陷处理。

### 参考文献

- [1] IMMARIGEON J P, HOT R T, KOUL A K, et al. Light weight materials for aircraft applications [J]. Material Characterization, 1995, 35(1): 41-67.
- [2] 李来平, 刘学军, 曲文卿. 2219 铝合金 VPTIG 焊接接头拉伸性能分析[J]. 宇航材料工艺, 2013, 43(6): 84-87.  
LI Laiping, LIU Xuejun, QU Wenqing. Research on tensile properties of 2219 aluminum alloy VPTIG welding joint [J]. Aerospace Material & Technology, 2013, 43(6): 84-87.
- [3] 黄诚, 王非凡, 鄢东洋, 等. 2219-T87/T852 铝合金异质接头力学性能弱化及断裂机制[J]. 宇航材料工艺, 2018, 48(2): 56-59.  
HUANG Cheng, WANG Feifan, YAN Dongyang, et al. Weakening mechanism and fracture behavior of dissimilar joint of 2219-T87/T852 aluminum alloy [J]. Aerospace Material & Technology, 2018, 48(2): 56-59.
- [4] 焦好军, 胡明臣, 周炼钢, 等. 新一代运载火箭 2219 铝合金配用焊丝研制[J]. 宇航材料工艺, 2007, 37(6): 61-64.  
JIANG Haojun, HU Mingchen, ZHOU Liangang, et al. Welding wire matched 2219 aluminum alloy in new generation launch vehicle [J]. Aerospace Material & Technology, 2007, 37(6): 61-64.
- [5] LI Quan, WU Aiping, LI Yanjun, et al. [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2017(27): 258-271.
- [6] 刘贵民, 马丽丽. 无损检测技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2009: 21-28.  
LIU Guiming, MA Lili. Nondestructive testing technology [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2009: 21-28.
- [7] 刘燕. 贮箱用 2219 铝合金热处理工艺研究[D]. 天津大学, 2013.  
LIU Yan. Study on the heat treatment process of the 2219 aluminum alloy for tank[D]. Tianjin University, 2013.
- [8] 郑子樵. 材料科学基础[M]. 长沙: 中南大学出版社, 2002: 191-215.  
ZHENG Ziqiao. Fundamentals of Materials Science [M]. Chang Sha: Central South University Press, 2002: 191-215.
- [9] 武传松. 焊接热过程与熔池形态[M]. 北京: 机械工业出版社, 2008: 2-3.  
WU Chuansong. Welding heat process and weld pool shape [M]. Beijing: China Machine Press, 2008: 2-3.
- [10] 陈存中. 有色金属熔炼与铸锭[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2006: 71-72.  
CHEN Cunzhong. Smelting and ingot of nonferrous metals [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2006: 71-72.
- [11] 鄢东洋, 吴会强, 常志龙, 等. 2219 铝合金单、双道焊接头性能分析[J]. 宇航材料工艺, 2013, 43(6): 79-83.  
YAN Dongyang, WU Huiqiang, CHANG Zhilong, et al. Analysis on the properties of 2219 aluminum alloy joints with single-layer welding and single-sided double-layer welding procwss [J]. Aerospace Material & Technology, 2013, 43(6): 79-83.