

同质异种热处理状态铝合金搅拌摩擦焊 接头组织与性能

郝云飞 毕煌圣 孙宇明 孙世烜 李延民

(首都航天机械公司,北京 100076)

文 摘 开展了 2219MCS 叉形环和 2219C10S 筒段组成的接底接头的搅拌摩擦焊工艺试验,分析了焊接速度、2219MCS 叉形环位置对接头组织形貌、显微硬度、力学性能的影响规律。结果表明:2219MCS 叉形环的原始粗大组织晶粒导致其无论位于前进侧还是后退侧,均是整个接头的薄弱环节。接头显微硬度呈现出典型的“W”型分布,叉形环一侧的热机影响区的显微硬度最低。在焊接参数相同时,叉形环位于后退侧的力学性能优于其位于前进侧;当焊接速度为 180~220 mm/min 且叉形环为后退侧时,其接头综合性能最优,抗拉强度可达到 330 MPa,低温抗拉强度可达到 420 MPa,延伸率超过 3.5%,正弯性能均可以达到 180°无裂纹,但是 2219MCS 母材开始出现裂纹,而背弯性能较差,并且背部裂纹沿着 2219MCS 热机影响区一侧起裂、扩展。

关键词 2219MCS+2219C10S 接底接头,搅拌摩擦焊接,微观组织,力学性能

中图分类号: TG4

DOI: 10.3969/j.issn.1007-2330.2016.03.006

Microstructure and Mechanical Properties of the FSWed Joints Between 2219MCS Ring and 2219C10S Barrel

HAO Yunfei BI Huangsheng SUN Yuming SUN Shixuan LI Yanmin

(Capital Aerospace Machinery Company, Beijing 100076)

Abstract An extensive investigation has been carried out on the friction stir welded butt joint consisting of a 2219MCS ring and a 2219C10S barrel, and the effect of welding speed and the location of the 2219MCS ring on the microstructure, microhardness distribution and mechanical properties of the butt joint has been systematically analyzed in this paper. The results showed that the 2219MCS ring whether located in the advancing side or retracting side is the weak link of the joint due to the original coarse grain. The microhardness distribution of the joint showed the typical “W” type with the TMAZ of the 2219MCS ring the lowest. The optimized investigation results showed that the performance of the joint with the 2219MCS ring located in the retracting side is more than the joint with the 2219MCS ring located in the advancing side. When the welding speed is 180 to 220 mm/min and the 2219MCS ring located in the retracting side, the room temperature mechanical strength can be up to 330 MPa, the low temperature strength 420 MPa, and the ductility all more than 3.5%. The face bending angle can reach 180° without crack on the joint, but some cracks occurred on the parent metal of the 2219MCS ring. The back bending performance is so poor, and the crack occurred and spreaded along the TMAZ of the 2219MCS ring.

Key words Butt joint, 2219MCS ring, 2219C10S barrel, Friction stir welding, Microstructure, Mechanical property

0 引言

运载火箭贮箱接底环缝是连接前(后)箱底叉形环与中间筒段的一条对接环缝,在飞行过程中承受较大的内压载荷,且其接底环缝两侧母材虽然同为

2219 铝合金,但是热处理状态及母材组织存在很大差异,箱底叉形环为 MCS 状态,组织晶粒粗大,形状不规则;而中间筒段为 C10S 状态,组织呈细小板条状晶粒。前期国内诸多高校、宇航机构在 2219C10S

收稿日期:2015-06-15;修回日期:2016-03-08

作者简介:郝云飞,1984 年出生,硕士,工程师,主要从事搅拌摩擦焊、摩擦塞补焊、运载火箭贮箱研制等工作。E-mail:haoyunfei1234@163.com

铝合金搅拌摩擦焊对接接头开展了大量研究,获得了足以支持型号应用的数据^[1-2]。但是国内针对2219MCS+2219C10S对接接头开展的研究较少。本文以2219MCS叉形环+2219C10S中间筒段组成的对接接头为研究对象,重点分析叉形环/筒段位于焊缝前进侧、焊接速度等对接头焊缝成型、组织形貌及力学性能的影响,以获得优化的运载火箭贮箱接底对接接头搅拌摩擦焊工艺。

1 试验

1.1 材料

2219MCS($\sigma_b=440\text{ MPa}$, $\delta=4\%\sim6\%$),实际产品横截面(图1),长度为400 mm;筒段一侧材料为2219C10S($\sigma_b=440\text{ MPa}$, $\delta=15\%$),规格为400 mm×150 mm×8 mm。两种材料的主要化学成分见表1。

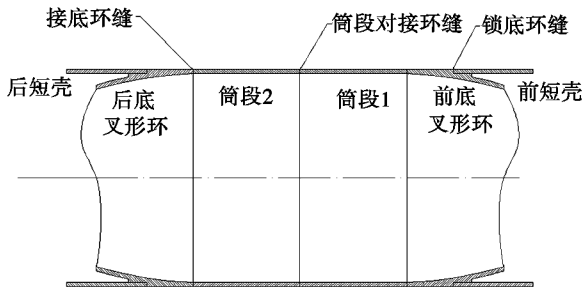


图1 运载火箭贮箱结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of launch vehicle tank

表1 2219 铝合金的化学成分

Tab.1 Chemical composition of 2219 aluminium alloy

								wt%
Cu	Mn	Fe	Si	Ti	Zr	V	Al	
5.8~6.8	0.20~0.40	0.30	0.20	0.02~0.10	0.10~0.25	0.05~0.15	余	

1.2 试样制备



(a) 2219MCS



(b) 2219C10S



(c) 焊缝表面成型

图2 采用搅拌摩擦焊技术焊接的贮箱接底接头

Fig.2 FSWed tank joint between 2219MCS ring and 2219C10S barrel

2.2 接头宏观和微观组织形貌

图3为2219MCS叉形环和2219C10S筒段位于焊缝前进侧的搅拌摩擦焊接底接头宏观组织形貌。从总体上看,两者的宏观形貌非常相似,均由前进侧(后退侧)热机影响区、轴肩影响区、焊核区、母材区

2219 铝合金接底接头试片(厚8 mm)在自制的搅拌摩擦焊设备和工装上进行。试验方案为:(1)搅拌头旋转速度固定为800 r/min,搅拌头倾角为2.7°,焊接速度设置为80、120、180、220、260 mm/min。搅拌头的轴肩直径为20 mm,轴肩结构为10°内凹斜面,搅拌针长度为7.8 mm,根部直径均为7.0 mm,结构为20°圆锥螺纹;(2)对每一焊接速度,分别将叉形环(A)和筒段试片(B)置于焊缝前进侧位置;(3)拉伸接头的延伸率测试标距为45 mm。

1.3 性能评价

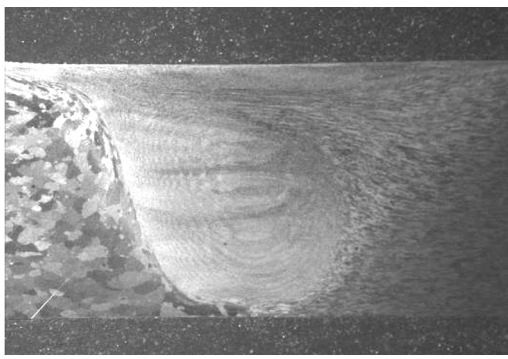
用X射线探伤与相控阵超声波检测不同参数组合下的贮箱接底接头是否存在焊接缺陷。合格后沿垂直于焊缝方向切取金相试样,用混合酸(1 mL HF+1.5 mL HCl+2.5 mL HNO₃+95 mL H₂O)溶液对抛光后的试样进行腐蚀,在OLYMPUS光学显微镜下进行典型区域金相组织分析和显微硬度分析。从每一组试样取样进行常温 and 低温(液氮,-196℃)拉伸性能测试,拉伸性能测试时的延伸率测试标距为45 mm。依据JB4744—2000进行弯曲性能测试时,弯芯直径D=32 mm,跨距为51 mm。在JSM-5910LV扫描电镜下进行试样的断口形貌观察。

2 结果与分析

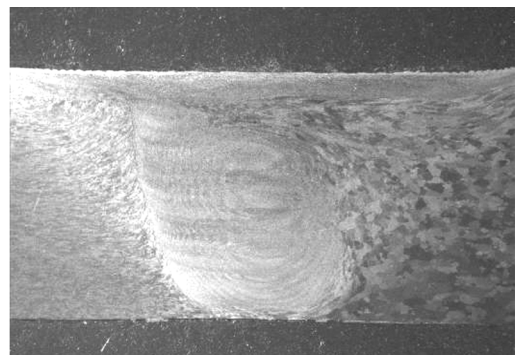
2.1 接头表面成型及无损检测

图2是2219MCS叉形环和2219C10S筒段位于焊缝前进侧的搅拌摩擦焊试片,从图中可以看出焊缝表面成型良好,光滑平整,两侧飞边量均匀,表面鱼鳞纹均匀明显。X射线探伤和超声相控阵检测结果显示,80~260 mm/min,2219MCS叉形环/2219C10S短壳位于焊缝前进侧,焊缝质量均可以达到I级接头质量要求。

等组成,其中前进侧热机影响区与焊核区的分界线几乎为一倾斜直线,约为45°;后退侧热机影响区呈楔形进入焊缝内部,其上部为轴肩影响区,下部为焊核区;焊核区呈现出左高右低的不对称扁平状结构。



(a) 2219MCS 叉形环



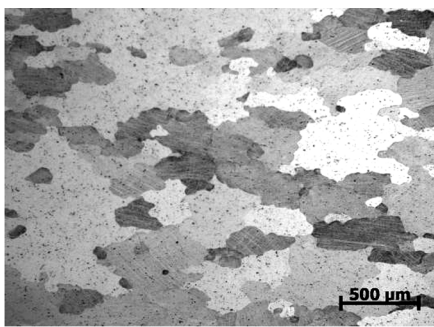
(b) 2219C10S 筒段

图3 焊接速度为 180 mm/min 的搅拌摩擦焊接底接头宏观组织形貌 5×

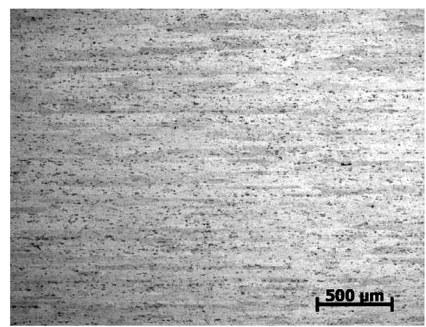
Fig.3 Transverse cross section of the joint with the welding speed of 180 mm/min

由于两者的 2219MCS 叉形环和 2219C10S 筒段分布位置不同,这必然导致两者的微观组织形貌存在一定的差异^[3]。从图 4(a)可以看出 2219MCS 叉形环的母材组织晶粒较为粗大,形状不规则(长约 500 μm ,宽为 100~200 μm)。叉形环经过固溶、人工时效等获得较高的强度,但是由于其没有进行充分的冷加工变形,因此其晶粒较为粗大。图 4(b)为 2219C10S 筒段母材微观组织,由一系列具有明显轧制方向板条状晶粒组成,这和板材通过轧制成型经受 10%的冷加工变形过程相关,且在晶粒内部及晶间分布有大量其细小强化相。图 4(c)~(e)分别为 $v=180\text{ mm/min}$,叉形环位于焊缝前进侧试样的前进侧、后退侧热机影响区以及进入焊缝内部的楔形部分的组织形貌。从图中可以看出:(1)2219MCS 前进侧热机影响区发生了一定程度的弯曲变形,与焊核区过渡急剧,过渡区域较窄。由于经受了一定程度的反复反

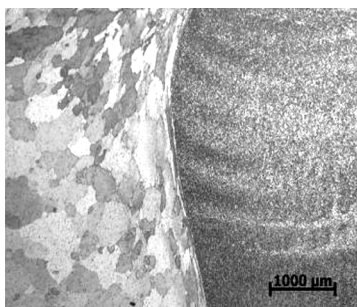
应,粗大组织晶粒有所减小。可以推断,2219MCS 前进侧热机影响区与焊核区之间的组织取向差异、晶粒度差异较大必然导致其成为整个接头的薄弱环节;(2)2219C10S 后退侧热机影响区与焊核区过渡较为平滑,且过渡区域较宽;另外进入焊缝内部的楔形部分虽表现出一定的走向,但是均由细小的等轴晶组成。图 4(f)~(h)分别为 $v=180\text{ mm/min}$,筒段位于焊缝前进侧试样的后退侧、前进侧热机影响区以及进入焊缝内部的楔形部分的组织形貌。从图中可以看出:(1)2219MCS 后退侧热机影响区及其进入焊缝内部的楔形部分的组织晶粒较为粗大,与焊核区的晶粒度差异较大,但是两者之间的过渡区域较缓且过渡界面长;(2)2219C10S 前进侧热机影响区呈弯曲变形晶粒,与焊核区过渡急剧,但是两者的晶粒度差异不大。从中可以看出,后退侧热机影响区由于其晶粒度差异较大,必然成为接头的薄弱环节。



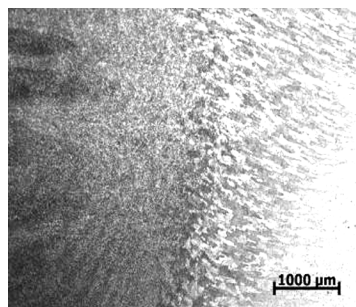
(a) 2219MCS 母材



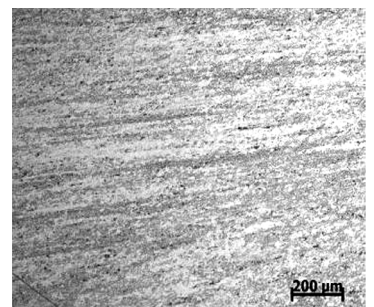
(b) 2219C10S 母材



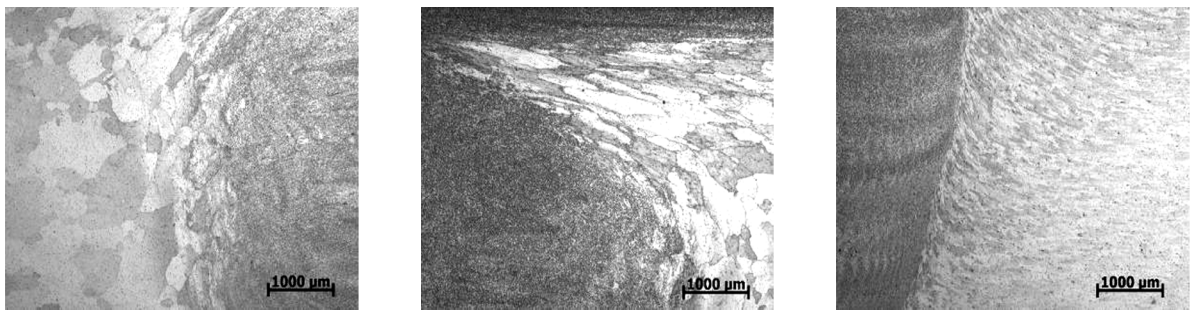
(c) 前进侧(2219MCS)



(d) 后退侧(2219C10S)



(e) 进入焊缝内部的楔形部分(C10S)



(f) 后退侧(2219MCS) (g) 进入焊缝内部的楔形部分(MCS) (h) 前进侧(2219C10S)

图4 焊接速度为 180 mm/min 试样的接头微观组织形貌

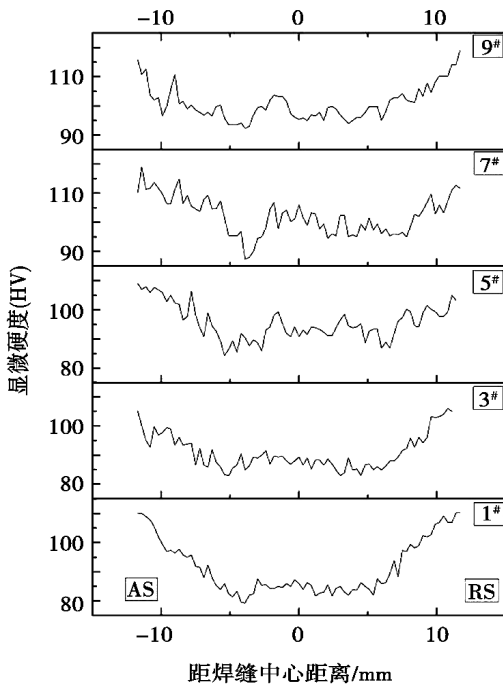
Fig.4 Microstructural morphology of the joint with the welding speed of 180 mm/min

综合比较两者可以得出:无论 2219MCS 叉形环位于前进侧还是后退侧,均是整个接头的薄弱环节。但是由于其位于后退侧时的组织过渡平滑且过渡界面较长,但是晶粒度差异也较大,而位于前进侧时的组织取向、晶粒度差异均较大,因此可以推断当 2219MCS 叉形环位于后退侧时力学性能相对较高,同时也必然影响两者的接头断裂方式。

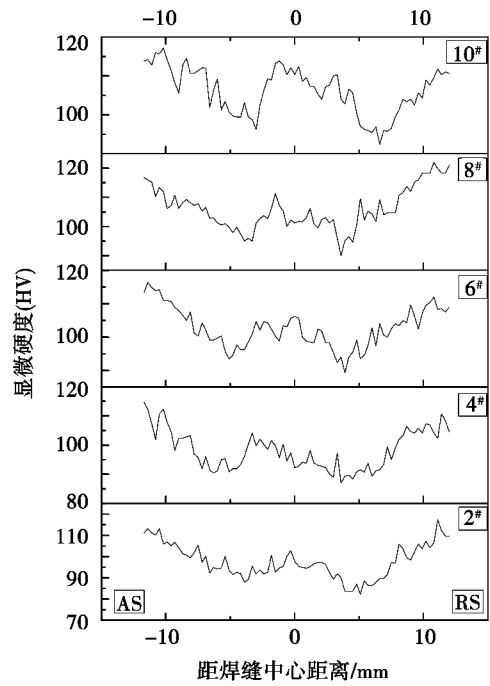
2.3 接头横截面显微硬度

图5为 2219MCS、2219C10S 位于焊缝前进侧的

接底接头横截面显微硬度分布趋势。从图中可以看出,不同参数组合下的搅拌摩擦焊接底接头横截面显微硬度分布均呈现出典型的“W”型,接头两侧母材的显微硬度最高,当跨入到热影响区后显微硬度逐渐降低,热机影响区最低,而跨入到焊核区后显微硬度又逐渐升高,但不会超过母材。另外,可以发现随着焊接速度的逐渐升高,整个接头的显微硬度也略微升高;且无论 2219MCS 位于焊缝前进侧还是后退侧,2219MCS 一侧的热机影响区的显微硬度最低。



(a) 2219MCS 位于前进侧



(b) 2219C10S 位于前进侧

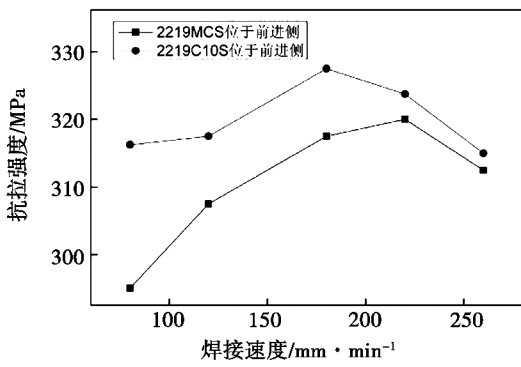
图5 不同参数组合下的接底接头横截面显微硬度分布趋势

Fig.5 Microhardness distribution of the joints under different parameters

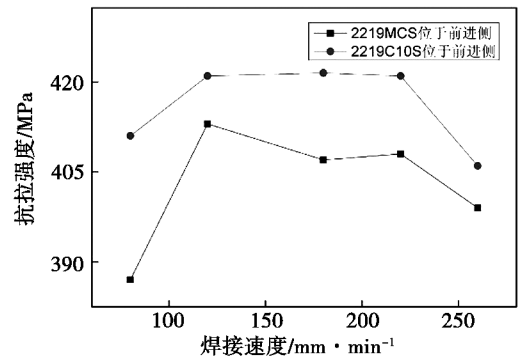
2.4 前进侧位置和焊接速度对接头力学性能的影响

图6是前进侧位置、焊接速度对搅拌摩擦焊接底接头常温性能和低温性能的影响趋势。从图中可以看出:(1)2219MCS 叉形环的位置确定时,随着焊接速度的逐渐增加,其常温和低温力学性能逐渐升高,当焊接速度达到 180~220 mm/min 时,力学性能达到

最高,之后随着焊接速度继续升高,力学性能开始下降;(2)焊接参数相同时,2219MCS 叉形环位于前进侧的力学性能低于其位于后退侧;(3)当焊接速度为 180~220 mm/min,且 2219MCS 叉形环为后退侧时,接头常温性能最高可达到 325~330 MPa,低温性能达到 420 MPa 左右,延伸率均超过 3.5%。



(a) 常温性能



(b) 低温性能(-196°C)

图6 2219MCS位于前进侧/后退侧及焊接速度对接底接头性能的影响趋势

Fig.6 Effect of location of 2219MCS ring and welding speed on mechanical properties of joints

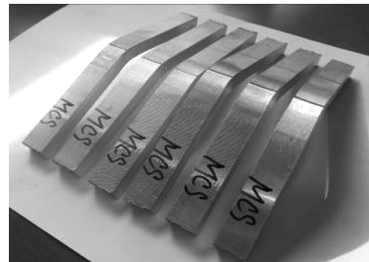
2.5 接头的弯曲性能

从接头的正弯和背弯测试结果得出:(1)在任何参数组合下的接底接头的正弯性能均可以达到180°无裂纹,但是2219MCS一侧母材开始出现裂纹[图7

(a)];(2)其背弯性能仅能达到30°~50°就开始出现裂纹,并且背部裂纹沿着热机影响区向2219MCS一侧起裂、扩展[图7(b)].这主要是由于2219MCS一侧与焊核区的组织取向、晶粒度差异较大造成的。



(a) 正弯(180°无裂纹)



(b) 背弯(裂纹向MCS热机影响区一侧)

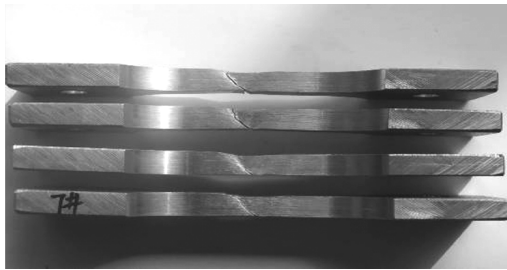
图7 FSW接底接头弯曲性能分析

Fig.7 Results of the bending performance of the joints

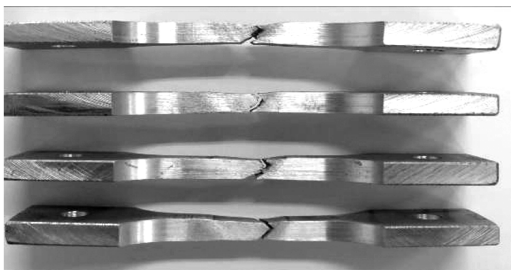
2.6 接头断裂方式及断口形貌

在上述分析中得知,2219MCS叉形环一侧热机影响区是整个接头的薄弱环节,在进行拉伸性能测试

时必然从此断裂。以下重点分析2219MCS位于前进侧或后退侧是否影响接头的断裂方式,图8为搅拌摩擦焊接底接头断裂方式。



(a) 2219MCS位于焊缝前进侧的接头断裂方式



(b) 2219C10S位于焊缝前进侧的接头断裂方式



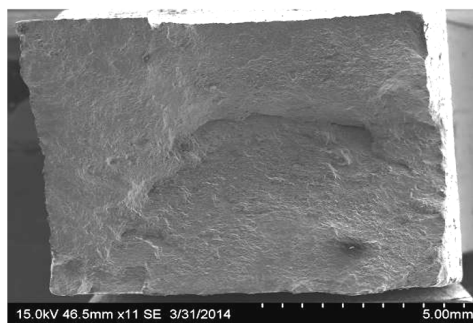
图8 搅拌摩擦焊接接底接头断裂方式

Fig.8 Effect of 2219MCS ring location on the fracture of the joints

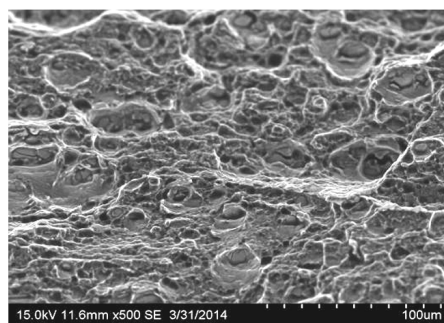
可以看出:(1)当2219MCS位于焊缝前进侧时,接底接头断裂面与承力方向呈45°,这是由于前进侧

热机影响区与焊核区的分界线几乎为一条呈 45° 的斜线造成的; (2) 当 2219MCS 位于焊缝后退侧时, 接头断裂面呈“楔”型, 这与 2219MCS 后退侧热机影响区部分呈楔形进入焊缝内部有关, 或者说后退侧热机影响区与焊核区的分界线成为接头的断裂面。从接头断裂方式来看, 当 2219MCS 位于焊缝后退侧时, 其断裂面长度较长且断裂面存在转折, 因此其接头的起

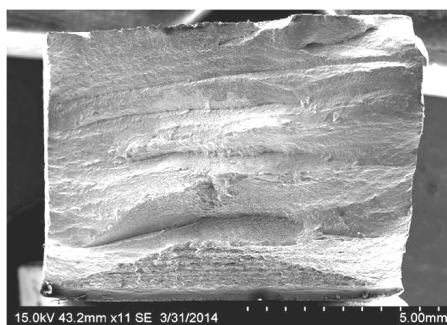
裂门槛值和抗裂纹扩展能力均较强, 这也是其接头拉伸性能较好的原因之一^[4-6]。图 9 是搅拌摩擦焊接底接头常温拉伸断裂试样的宏观和微观断口形貌。可以看出, 断裂面上展现出大量的韧窝和撕裂棱结构, 并且在韧窝内部含有大量的第二相粒子, 因此其断裂方式为典型的韧性断裂。



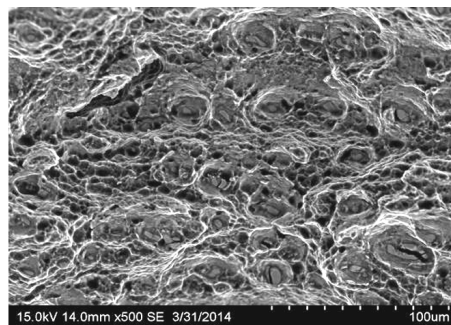
(a) 宏观断口(2219MCS 位于 AS)



(b) 微观断口形貌



(c) 宏观断口(2219MCS 位于 RS)



(d) 微观断口形貌

图 9 搅拌摩擦焊接底接头断口宏观和微观形貌

Fig.9 Fracture morphology of the joints

3 结论

(1) 2219MCS 叉形环的原始粗大组织晶粒导致其无论位于前进侧还是后退侧, 均是整个接头的薄弱环节。当其位于后退侧时, 与焊核区组织过渡平滑且过渡界面较长, 但是晶粒度差异较大; 而位于前进侧时, 其与焊核区的组织取向、晶粒度差异均较大。可以推断当 2219MCS 叉形环位于后退侧时力学性能较高。

(2) 不同参数组合下的搅拌摩擦焊接接底接头横截面显微硬度分布均呈现出典型的“W”型, 随着焊接速度的逐渐升高, 整个接头的显微硬度也略微升高; 无论 2219MCS 位于焊缝前进侧还是后退侧, 2219MCS 一侧的热机影响区的显微硬度最低。

(3) 当焊接速度为 180 ~ 220 mm/min, 且 2219MCS 叉形环为后退侧时的接底接头性能最优, 常温性能可达到 325 ~ 330 MPa, 低温性能达到 420 MPa 左右, 延伸率均超过 3.5%。

(4) 搅拌摩擦焊接接底接头的正弯性能均可以达到 180° 无裂纹, 但是 2219MCS 母材开始出现裂纹, 而其背部性能较差, 仅为 30° ~ 50°, 并且背部裂纹沿

着 2219MCS 热机影响区一侧起裂、扩展。

参考文献

[1] 贺地求, 邓航, 周鹏展. 2219 厚板搅拌摩擦焊组织及性能分析[J]. 焊接学报, 2007, 28(8): 13-16.

[2] 邢美源, 姚君山, 刘杰. 新一代运载贮箱搅拌摩擦焊应用研究[J]. 上海航天, 2006(4): 39-43.

[3] 郝云飞, 王国庆, 厉晓笑, 等. 焊透深度和前进侧位置对 FSW 贮箱锁底接头性能的影响[J]. 宇航材料工艺, 2014, 44(6): 14-19.

[4] 邢丽, 宋晓, 柯黎明. 2198 和 C24S 异种铝锂合金搅拌摩擦焊接头的显微组织和力学性能[J]. 中国有色金属学报, 2014, 24(7): 1714-1719.

[5] PARK S K, HONG S T, PARK J H, et al. Effect of material locations on properties of friction stir welding joints of dissimilar aluminium alloys[J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2010, 15(4): 331-336.

[6] BAHMMAT P, HAGHPANAHI M, BESHARATI M K, et al. Study on dissimilar friction stir butt welding of AA7075-O and AA2024-T4 considering the manufacturing limitation[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2012, 59(9/12): 939-953.