

铝合金搅拌摩擦裂纹修复区的显微组织及力学性能

任俊刚^{1,2}, 谢里阳^{1,2}, 王磊³, 张占昌⁴
(1. 东北大学 机械工程与自动化学院, 辽宁 沈阳 110819;
2. 东北大学 航空动力装备振动及控制教育部重点实验室, 辽宁 沈阳 110819;
3. 沈阳航空航天大学 机电工程学院, 辽宁 沈阳 110136; 4. 沈阳飞机工业(集团)有限公司 45 厂, 辽宁 沈阳 110850)

摘 要: 对表面预制了 0.8 mm 深、0.5 mm 宽裂纹的 2A12 铝合金进行搅拌摩擦修复,修复后对其修复区显微组织变化规律和力学性能进行了详细研究.结果表明:在合理修复工艺下,实现了裂纹的修复,修复区的平均抗拉强度 R_m 、屈服强度 R_{eL} 可达到母材的 90.1% 和 92.2%.修复区存在 3 个组织变化区,其中修复核心区的晶粒被反复碎化、长大及动态再结晶;热机影响区晶粒具有明显的塑性变形,与晶粒显著长大的热影响区共同构成组织软化区;表面硬度与截面上部硬度曲线相似,截面硬度上部依次高于下部;修复核心区存在大量的小角晶粒,并且内部存在一定密度的位错,在晶粒四周均匀分布细小强化相.

关 键 词: 搅拌摩擦;2A12 铝合金;裂纹修复;微观组织;力学性能

中图分类号: TG 113.26+3 文献标志码: A 文章编号: 1005-3026(2018)01-0112-06

Microstructure and Mechanical Properties of Crack Repairing Zone of Aluminum Alloy Through Friction Stir

REN Jun-gang^{1,2}, XIE Li-yang^{1,2}, WANG Lei³, ZHANG Zhan-chang⁴
(1. School of Mechanical Engineering & Automation, Northeastern University, Shenyang 110819, China; 2. Key Laboratory of Vibration and Control of Aero-Propulsion System, Ministry of Education, Northeastern University, Shenyang 110819, China; 3. Department of Electromechanical Engineering, Shenyang Aerospace University, Shenyang 110136, China; 4. Workshop 45, Shenyang Aircraft Corporation, Shenyang 110850, China.
Corresponding author: REN Jun-gang, E-mail: renjungang1314@163.com)

Abstract: Aviation aluminum alloy 2A12 containing the prefabricated 0.8 mm deep and 0.5 mm horizontal cracks was repaired by the friction stir method, and the microstructure evolution and mechanical properties of the healing zone were observed and analyzed in details. The results showed that the crack repairing is realized in the reasonable healing process, and the tensile strength R_m and the yield strength R_{eL} can reach 90.1% and 92.2% of the base metal. The healing zone consists of three different evolution zones, and in the core zone the cracks are repaired by grain fragmentation, growth and recrystallization. The structural softened zone consists of the thermo-mechanically affected zone with obvious plastic deformation and the heat affected zone with obvious grain growth. The surface hardness is similar to that of the upper cross section with the upper section being harder than that of the lower section. The healing core zone consists of many small angle crystals with dislocated lines inside and tiny strengthening phases around.

Key words: friction stir; aluminum alloy 2A12; crack repairing; microstructure; mechanical property

我国制造业急需解决的问题是产品的使用寿命和可靠性,然而对材料和结构损害最大的缺陷是裂纹.裂纹是材料最常见的最终失效形式之一,其特点一般是多发性、无规律性、突发性和反复性,在载荷作用下裂纹不断扩展,最终导致材料或结构失效.为了延长机械设备和结构件的使用寿命,

命,必须在裂纹失稳扩展前对裂纹进行有效修复.但是,至今对金属裂纹的控制和修复技术还远没有达到理想状态.

目前针对裂纹修复技术的研究主要集中在玻璃和陶瓷等有机材料^[1-2], Gao 等^[3-4]通过加热试样至 1 000 K 以上观察到微裂纹在 α -Fe 中可以愈合,但这种修复方法只能被应用到尺寸非常小的裂纹. Murray 等^[5]利用电子束辐照技术,使得由电火花加工造成的表面裂纹实现修复,但是表面产生了对腐蚀环境极其敏感的凹陷. Laha 等^[6-7]发现在奥氏体不锈钢中加入硼元素形成的沉淀相可以使纳米级的缺陷,如位错和空位得到修复. Zhou 等^[8-9]报道在产生裂纹的钢中,脉冲电流通过提高温度和裂纹区的压应力能够修复部分裂缝. Hosoi 等^[10]对裂纹尖端施加高密度电流进行研究,发现高密度电流可以使裂纹闭合修复.

虽然金属裂纹修复的方法较多,但是裂纹修复效果不是十分理想. 本文使用自主设计的搅拌头作为修复工具,利用摩擦搅拌的原理,让裂纹周围的材料处于热塑性状态,实现热塑性材料流动迁移与再结晶,恢复裂纹周围原子金属键作用,最终达到裂纹修复的目的,把该方法称之为搅拌摩擦裂纹修复(friction stir crack repairing, FSCR)技术. 针对 FSCR 技术的研究目前还鲜有报道. 搅拌摩擦裂纹修复是一个复杂的过程,包括晶粒变形、碎化、长大、成核和再结晶的连续过程.

1 实验材料和方法

1.1 试样制备与裂纹修复

实验材料选用 4 mm 厚的 2A12 航空铝合金板,主要化学成分(质量分数,%)为 Si 0.5, Fe 0.5, Cu 3.8 ~ 4.9, Mg 1.2 ~ 1.8, Zn 0.3, Ti 0.15, Mn 0.3 ~ 0.9, Ni 0.1, 余量为 Al. 试样尺寸为 300 mm × 100 mm × 4 mm 平板. 在轧制方向板材中心预制深度约 0.8 mm、宽度约 0.5 mm 的长直表面裂纹. 修复设备选用 FSW-3LM-4012 搅拌摩擦焊系统,修复工具选取无针且轴肩内置环形凹槽的搅拌头进行修复实验. 修复工艺参数包括轴肩直径 12 mm、主轴倾角 2.5°、轴肩下压量 0.25 mm,进给速度(mm/min)和搅拌头转速(r/min)在给定的范围内变化.

1.2 形态学观测与机械性能测试

利用 Olympus GX51 光学显微镜观察修复后各区显微组织;利用 FEI Tecnai G² F20 透射电镜观察修复区析出相分布和位错信息, TEM 试样经

机械减薄抛光,在 25 ℃ 下用 30% 硝酸 + 70% 甲醇电解液双喷减薄,电压为 12 V;室温下利用 Instron 电子拉伸试验机对修复试样进行拉伸试验,应变速率为 $1 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$;利用 FEI-QUANTA600 扫描电镜观测试样断口微观形貌;利用 HVS-1000A 型数显硬度计通过打点测菱形面积,求得其表面、截面上部、中部、底部显微硬度,其中测量点包括母材区、热影响区,测量点间隔 0.5 mm,修复核心区测量点间隔 1 mm,热影响区附近测量点间隔为 0.25 mm,载荷 4.9 N,保荷 12 s.

2 结果与讨论

2.1 修复工艺参数对强度影响

搅拌摩擦修复裂纹时,进给速度(v)、转速(ω)、轴肩下压量(z)、轴肩倾角、修复工具尺寸等都会影响试样强度,但影响修复强度最大的是 v 和 ω ,所以选取固定的 $v = 110 \text{ mm/min}$, $\omega = 300 \sim 1\,500 \text{ r/min}$,以及固定的 $\omega = 1\,100 \text{ r/min}$, $v = 30 \sim 150 \text{ mm/min}$. 图 1 所示为只考虑进给速度和转速对强度的影响,从图中可以得出,搅拌摩擦修复铝合金裂纹试样能获得较高强度,并且其工艺可调参数范围比较宽.

从图 1a 可以得出,当 $\omega = 700 \sim 1\,100 \text{ r/min}$, $v = 110 \text{ mm/min}$ 时,修复件的机械性能较好;由图 1b 可以看出,当 $v = 70 \sim 110 \text{ mm/min}$, $\omega = 1\,100 \text{ r/min}$ 时,修复件也可以得到较好的机械性能. 当 $v = 110 \text{ mm/min}$, $\omega = 700 \text{ r/min}$ 和 $\omega = 1\,100 \text{ r/min}$, $v = 90 \text{ mm/min}$ 时,试样修复区的抗拉强度(R_m)、屈服强度(R_{el})、伸长率(δ)和断面收缩率(φ)较好,分别是 419.6 MPa, 283.5 MPa, 7.0%, 15.3% 和 422.3 MPa, 275.6 MPa, 6.1%, 14.7%.

2.2 力学性能

经实验得出优化的工艺参数,从图 1 数据中可以看出,当 $v = 110 \text{ mm/min}$, $\omega = 700 \text{ r/min}$ 时修复件的机械性能表现最好. 从表 1 母材试件(BM)、修复试件(RS)、裂纹试件(CS)、修复热处理试件(HTS)的机械性能对比中得知,修复试件(RS)的平均 $R_m = 419.6 \text{ MPa}$,达到母材试样的 90.1%;平均 $R_{el} = 283.5 \text{ MPa}$,达到母材试样的 92.2%;修复试样的平均 $\delta = 7.0\%$,略低于母材试样. 从以上 4 方面综合考虑,2A12 铝合金表面长直裂纹经搅拌摩擦修复后修复区域的力学性能良好. 修复试样通过热处理,固溶温度 495 ℃,保

温 2 h, 自然时效, 其机械性能得到进一步提升.

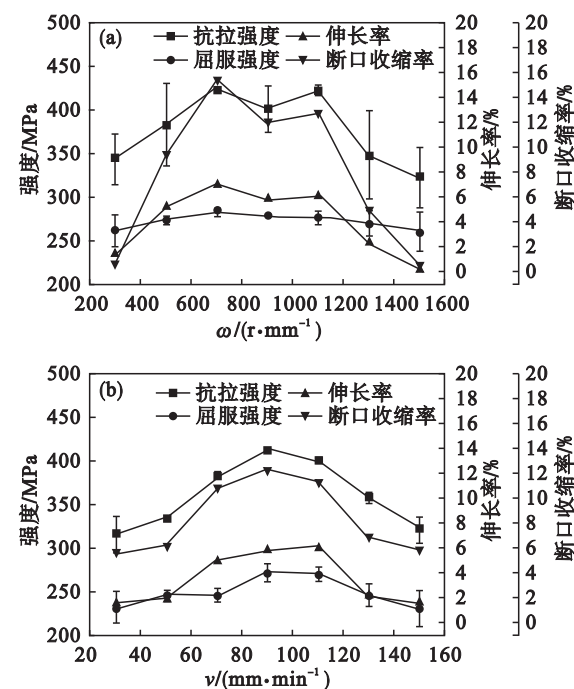


图 1 机械性能
Fig. 1 Mechanical properties
(a)—力学性能与转速关系;
(b)—力学性能与进给速度关系.

表 1 2A12 铝合金母材、修复和裂纹区力学性能对比					
Table 1 Mechanical properties of BM, repaired samples and crack samples of aluminum alloy 2A12					
项目	R_m/MPa	R_{el}/MPa	$\delta/\%$	$\varphi/\%$	E/GPa
母材	465.8	307.5	19.5	24.6	72.6
修复	419.6	283.5	7.0	15.3	64.4
裂纹	204.3	121.3	0.8	2.2	59.2
热处理	436.2	295.3	10.3	16.9	66.8

2.3 组织形貌

图 2 是修复区域的宏观组织形貌,从图中可以看出,修复区横截面的宏观特征呈倒置“Ω”形.根据修复区的组织特征可以分为母材区 (base metal, BM)、热影响区 (heat affected zone, HAZ)、热机影响区 (thermo-mechanically affected zone, TMAZ) 及修复核心区 (healing core zone, HCZ). 修复试样的力学性能与修复区的微观组织有关,不同区域的微观组织如图 2 所示.

从图 2a 可以看出, BM 的晶粒组织形态是轧制变形导致的具有方向性的板条状晶粒,晶粒比较粗大.从图 2b 可以看出, HAZ 的晶粒比母材晶粒略大.原因是在修复过程中修复工具与母材上表面产生的摩擦热使修复区外侧仅仅受到高温作用使晶粒吸收热量而长大.从图 2c 可知,热机影

响区范围很小,原因是该区没有受到搅拌头的直接搅拌,使得该区域的晶粒与母材晶粒形态稍有差异,其晶粒尺寸略小,显微组织经历了大的塑性变形,且有一定的方向性,其组织在热力作用下发生了动态回复和不完全再结晶. HCZ 的晶粒为细小的等轴晶且尺寸明显小于其他区域,部分达到纳米级,如图 2d 所示. 该区域在修复过程中所受温度最高、应变速率最大、塑变最大,晶粒循环被打碎, HCZ 发生了再结晶,细小晶粒来不及长大而形成微小的等轴晶,驱动力是热循环下的机械搅拌.

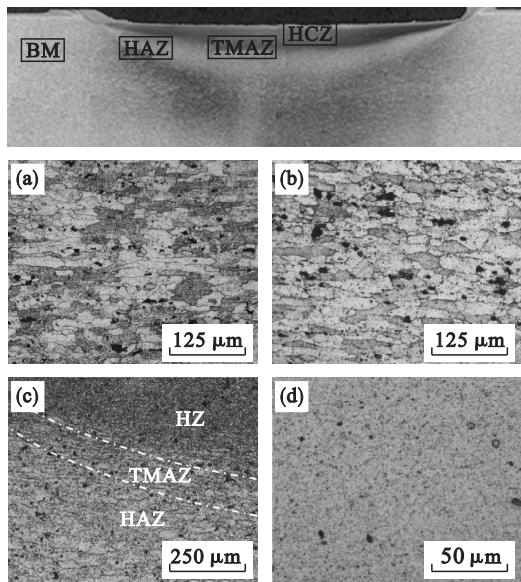


图 2 修复区宏观组织形貌
Fig. 2 Macrographic morphology of healing zones
(a)—母材区; (b)—热影响区;
(c)—热机影响区; (d)—修复核心区.

2.4 显微硬度

搅拌摩擦修复是一个由搅拌头与母材挤压摩擦而引起的黏性层流过程,决定了修复表面与截面材料处于不同的温度与载荷作用状态,显微硬度的不同通常能说明修复各区的组织形态差异,从 BM 到 HCZ 硬度分布差异比较大.

从图 3 可以看出,截面上部硬度与表面硬度分布基本一致,呈经典的“W”形,硬度最低值出现在前进侧影响区;在截面上, HCZ 硬度从上部到下部依次降低. 分析结果得出,在裂纹修复过程中组织发生了软化,修复区维氏硬度比 BM 维氏硬度 (1 249 MPa) 整体略低. 硬度从 TMAZ 开始下降,到 HAZ 时降到最低,之后硬度逐渐上升到 BM,其中维氏硬度的最低值为 835 MPa. 影响区中组织粗化、变形、析出相长大、残余应力集中,成为修复区域最薄弱的部分,所以断裂发生在影响

区. 修复区硬度分布可能与显微组织和析出相的情况有关. 在热机影响区和热影响区中, 弥散分布的细小强化相可能由于修复过程中机械搅拌和摩擦热而发生丛聚, 使得晶粒长大, 成为修复区强度薄弱最明显的区域. HCZ 析出相可能大部分溶解于基体, 但 HCZ 主要为细小等轴再结晶, 晶粒内部存在一定的位错线, 且周围弥散分布细小强化相, 见图 4c, 所以硬度比影响区更高.

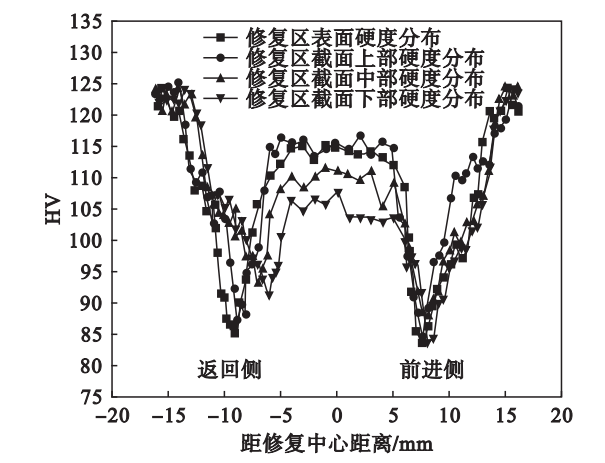


图 3 修复区硬度分布图
Fig. 3 Hardness distribution of healing zones

2.5 修复区析出相分布

强化相是决定力学性能的主要因素, 大量试验研究表明, 在 2A12 铝合金中主要强化相是 Al_2CuMg (S 相)、 CuAl_2 (θ 相), 也可能同时伴有极少量的弱化相, 如 CuFeAl_7 和 $(\text{FeMn})\text{Al}_6$ 等. 从图 4 修复区表面 SEM 结果可见, BM, HAZ 和 TMAZ 中的晶粒尺寸约为几十微米, 尺寸相对较大; HCZ 的晶粒最小, 一小部分甚至可达纳米级. 修复核心区中可见大量小角度晶粒, 晶粒细化程度高且分布均匀, 晶粒内部存在一定量的位错线, 且在晶粒周围分布细小析出沉淀相, 一小部分棒状析出沉淀相消失, 影响区中的析出沉淀相丛聚吸热长大, 最终导致 HCZ 的强度得到显著提高.

母材中存在一些细而长呈棒状的析出相, 见图 4a, 这与前人研究报道的 S 相特点一致. S 相在 2A12 铝合金中与基体呈现良好的取向, 这点有利于提高合金的机械性能. 从图 4b 可看出, HAZ 和 TMAZ 中的析出沉淀发生丛聚长大, 析出沉淀的长大导致了该区硬度和韧性的降低. 大量位错在 $\langle 001 \rangle$ 带轴出现, 析出相较多, 断口的韧性断裂特点不显著, 成为了修复区强度最低的区域, 见图 4c, 修复核心区中仍有大量的位错, 原因是在裂纹修复时发生了动态再结晶过程, 晶粒因为较大的

塑变而存在大量的位错.

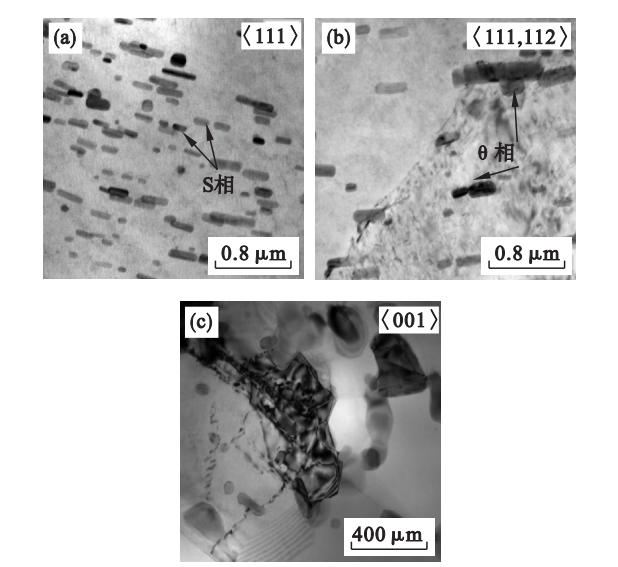


图 4 修复区析出相情况
Fig. 4 Precipitated phase of healing zones
(a) —沿 $\langle 111 \rangle$ 带轴母材区; (b) —沿 $\langle 111, 112 \rangle$ 带轴影响区; (c) —沿 $\langle 001 \rangle$ 带轴修复核心区.

对母材区和影响区中棒状颗粒区域进行能谱标定分析, 结果为 BM 棒状析出相是 Al_2CuMg (S 相), 见图 4a 中所标注. 从图中可以看出, 晶粒内部析出的 S 相分布十分均匀, 且在晶界处析出的 S 相形成了晶间网络; 通过能谱标定得出影响区中的棒状析出沉淀也为 S 相, 影响区中的细小析出相吸收摩擦热而发生丛聚长大, 椭圆形颗粒为 CuAl_2 (θ 相), 见图 4b 中标注. 修复核心区中未见大尺寸的棒状沉淀, 晶粒细小, 该区中的析出相经历强烈的搅拌碎化与溶解后再析出两种过程, 使得这些析出沉淀既有成分变化, 也伴有分布规律的变化. 这解释了裂纹修复时析出相经过溶解、析出和碎化的循环过程, 析出相发生了显著的细化, 修复区硬度差异的根源就是这些微观组织结构的变化导致的.

2.6 断口形貌

图 5a, 5b 为修复试样的拉伸断口宏观形貌, 在修复核心区上表层裂纹扩展特点表现为脆性, 见图 5a 中 A 区标注; 在更高倍数下观测, 见图 5d (B 区)、5e (C 区) 和 5f (D 区) 中标注区域, 所显示区域由撕裂棱和韧窝组成, 说明断口形貌表现为剪切特性; 从图 5e 中能清楚地看到裂纹沿修复区内的再结晶晶粒扩展.

详细地分析修复试样两种断裂形式得出: 修复核心区裂纹沿晶扩展, 见图 5c 所示, 在修复区上表层断口形貌特点是典型的局部脆性断裂, 裂纹扩展是沿着修复核心区内延续^[10], 而不是在

HAZ,TMAZ 和 BM 的过渡区扩展,原始裂纹周围是裂纹扩展的首先位置,即未完全被修复的夹层部分. 裂纹扩展在再结晶晶内发生,见图 5d 所示. 修复试样断裂后,断口微观形貌出现了大量的韧窝和撕裂棱,展现出良好的韧性特征. 图 5e 标注的是等轴韧窝群,再结晶晶粒发生明显的塑性变形;断口形貌可以看到明显的穿晶断裂,在韧窝中能观察到析出沉淀相断裂后的平面,并且拉伸断口微观形貌中变为大小不一的椭球形或者圆形的韧窝群,这是很典型的韧窝断裂,如图 5f 所示. 由此得出:修复区的断裂形式包含韧性和脆性断裂两种模式. 裂纹更容易在影响区中扩展而不是在 HCZ,表明 HCZ 比影响区强度更高. 各区域显微硬度的对比也说明了这点的正确性,硬度和强度差异能通过析出沉淀情况和晶粒尺寸情况进行解释说明,即 Hall - Petch 理论公式,在其他条件相同情况下,晶粒尺寸越小,强度越高.

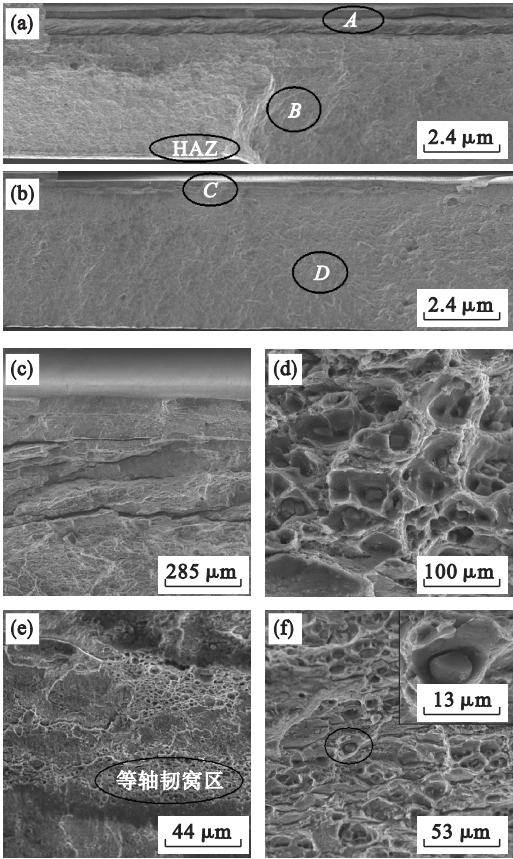


图 5 拉伸断口

Fig. 5 Fracture of tensile fractures

(a,b) —宏观断口; (c) —A 区放大图; (d) —B 区放大图; (e) —等轴韧窝区(C 区); (f) —D 区放大图.

2.7 修复区位错变化

2A12 航空铝合金可以通过热处理进行强化,影响其机械性能的因素有很多,其中主要包括晶粒尺寸、位错、空位等. 该铝合金板材是轧制的,轧

制过程使板材本身存在着大量的位错等微缺陷,如图 6a 所示. 前人研究中指出一定量的位错能提高材料强度;从图 6b 中能看到 HAZ 和 TMAZ 的位错密度明显高于 BM,大量的空位、位错等微缺陷显著地减弱了材料的强度. 裂纹修复时,在修复工具和母材搅拌摩擦产生的热循环的作用下,晶粒明显长大,微小析出沉淀相发生丛聚长大;由于各种应力作用,位错在质点两边塞积,若干位错合并成微孔,形成修复区最薄弱的区域. 修复核心区的晶粒经搅拌、碎化、回复、吸热、再结晶的循环过程,在晶粒周围均匀分布微小强化相,且内部存在一定密度的位错,这些微观变化都大大强化了修复区的机械强度,见图 6c.

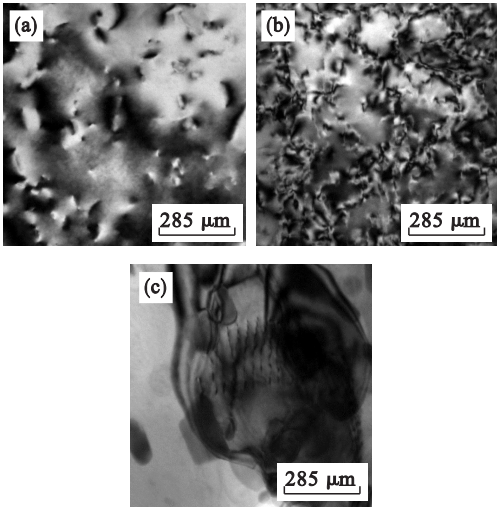


图 6 修复区位错情况

Fig. 6 Dislocation of healing zones

(a) —母材区; (b) —影响区; (c) —修复核心区 .

3 结 论

- 1) 当转速 $\omega = 700 \text{ r/min}$ 、进给速度 $v = 110 \text{ mm/min}$ 时,能获得比较好的力学性能:抗拉强度 419.6 MPa、屈服强度 283.5 MPa、伸长率 7.0%、断面收缩率 15.3%,强度分别达到母材的 90.1% 和 92.2%,并且修复工艺区间相对较宽.
- 2) 表面硬度和截面硬度分布规律相似,横截面硬度分布上部依次高于下部,且硬度最低点都出现在 HAZ 和 TMAZ 之间. 微观断口中存在大量撕裂棱和韧窝,主要发生韧性断裂,修复区表层部分位置发生脆性断裂. 韧窝中含有第二相粒子,表明修复区塑性高. 拉伸结果表明裂纹扩展方式包括沿晶扩展和晶内扩展.
- 3) 修复区微观组织特征区别较大,影响区和母材的晶粒尺寸大部分为几十微米,HCZ 晶粒尺

寸较小,最小可达纳米级。铝合金中主要强化相是椭圆型 θ 相和棒状 S 相。热影响区中细小强化相发生丛聚而使晶粒长大,使该区的强度严重下降;修复核心区晶粒周围分布细小强化相,且晶粒内部存在一定密度的位错,修复核心区强度得到了显著提高。

参考文献:

[1] Wang J Y, Soens H, Verstraete W, et al. Self-healing concrete by use of microencapsulated bacterial spores[J]. *Cement and Concrete Research*, 2014, 56(2): 139 – 152.

[2] Nam K, Kim E S. Healing properties of SiC ceramics according to surface roughness[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2012, 547(11): 125 – 127.

[3] Gao K W, Qiao L J, Chu W Y. In situ TEM observation of crack healing in α -Fe[J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2001, 44(7): 1055 – 1059.

[4] Chen H, Chu W Y, Gao K W, et al. Effect of hydrogen-induced martensite on stress corrosion cracking of type 304

stainless steel in boiling $MgCl_2$ [J]. *Journal of Materials Science Letters*, 2002, 21(17): 1337 – 1338.

[5] Murray J W, Clare A T. Repair of EDM induced surface cracks by pulsed electron beam irradiation[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2012, 212(12): 2642 – 2651.

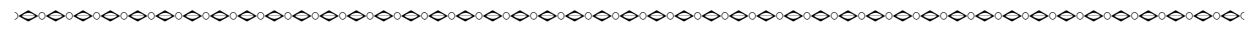
[6] Laha K, Kyono J, Kishimoto S, et al. Beneficial effect of B segregation on creep cavitation in a type 347 austenitic stainless steel[J]. *Scripta Materialia*, 2005, 52(7): 675 – 678.

[7] Laha K, Kyono J, Shinya N. An advanced creep cavitation resistance Cu-containing 18Cr – 12Ni – Nb austenitic stainless steel[J]. *Scripta Materialia*, 2007, 56(10): 915 – 918.

[8] Zhou Y Z, Zeng Y, He G H. The healing of quenched crack in 1045 steel under electropulsing[J]. *Materials Research Society*, 2001, 16(1): 17 – 19.

[9] Zhou Y Z, Guo J D, Gao M, et al. Crack healing in a steel by using electropulsing technique[J]. *Materials Letters*, 2004, 58(11): 1732 – 1736.

[10] Hosoi A, Nagahama T, Ju Y. Fatigue crack healing by a controlled high density electric current field[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2012, 533(1): 38 – 42.



(上接第 111 页)

4 结 论

- 1) 传动系统启动冲击峰值为 138 mm/s^2 , 数值上约为重载截割冲击的 2 倍; 平稳运行时行星级振动加速度峰值最大, 达 67 mm/s^2 。
- 2) 传动级(包括行星级、惰轮级及直齿级) X 向为主要振动方向, 铰接处铰接孔径向为主要振动方向。
- 3) 行星级与惰轮系统结合处频率耦合作用最强。频率耦合是造成摇臂共振的主要原因, 降低频率耦合可减少激励频率成分并避免共振。
- 4) 采煤机摇臂形成了以第 3、第 5 阶振型模态振动为主要振动特征的弹性振动。这种振动特征也是导致行星级 X 向及铰接处 X、Y 向振动响应偏大的主要原因。

参考文献:

[1] Zaghbani I, Songmene V. Estimation of machine-tool dynamic parameters during machining operation through operational modal analysis [J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2009, 49: 974 – 978.

[2] Zhou S H, Song G Q, Ren Z H, et al. Nonlinear dynamic analysis of coupled gear-rotor-bearing system [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2016, 29(2): 281 – 282.

[3] Jiang H, Guo X D. Research on modal parameters

identification of bridge structure under ambient excitation [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2008, 27(11): 126 – 128.

[4] Rubio H. Dynamic analysis of rolling bearing system using Lagrangian model [C]//The 12th IFToMM World Congress. Besancon, 2007: 18 – 21.

[5] Song C S, Zhu C H, Liu H J, et al. Dynamic analysis and experimental study of a marine gearbox [J]. *Mechanism and Machine Theory*, 2015, 92(10): 17 – 28.

[6] Hu W G, Liu Z M, Liu D K, et al. Fatigue failure analysis of high speed train gearbox housings [J]. *Engineering Failure Analysis*, 2017, 73(2): 57 – 71.

[7] Budak K E. Structural modeling of end mills for form error and stability analysis [J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2004, 44(11): 1151 – 1161.

[8] 刘辉, 蔡仲昌, 项昌乐, 等. 两级行星齿轮传动非线性啮合力频率耦合与动态特性研究[J]. 振动与冲击, 2015, 34(9): 14 – 20.

(Liu Hui, Cai Zhong-chang, Xiang Chang-le, et al. Frequency coupling and dynamic characteristics of nonlinear meshing force for two-stage planetary gears [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2015, 34(9): 14 – 20.)

[9] 周建星, 刘更, 吴立言, 等. 含弹性支撑的船用减速器箱体动态特性[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2012, 44(7): 98 – 100.

(Zhou Jian-xing, Liu Geng, Wu Li-yan, et al. Dynamic characteristics of ship speed reducer box with elastic support [J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2012, 44(7): 98 – 100.)

[10] Parker R G, Lin J. Mesh phasing relationships in planetary and epicyclic gears[J]. *Journal of Mechanical Design*, 2004, 126: 365 – 370.