

文章编号: 1001-4888(2017)03-0371-06

ZL303 合金电磁热止裂后力学性能研究^{*}

付宇明, 杜文连, 李登科, 郑丽娟

(燕山大学 机械工程学院 结构损伤与修复研究所, 秦皇岛 066004)

摘要: 利用自制的 ZL-2 超强脉冲放电装置对含有单边裂纹的 ZL303 合金试件进行电磁热止裂试验。通过微机控制电子万能试验机对止裂前后试件进行拉伸试验, 并用 SEM 扫描电镜对断口进行观察, 最后理论分析了受拉伸试件的应力强度因子。结果表明, 电磁热止裂技术对 ZL303 具有良好的止裂效果; 放电强化作用主要集中在裂尖附近, 裂尖钝化形成焊口, 裂尖处组织变细且强度提高, 试件的抗拉强度平均提高了 16.5%; 电热应力强度因子削弱了拉应力所产生的应力强度因子, 达到力学性能强化的效果。

关键词: ZL303 合金; 电磁热止裂; 断口; 应力强度因子; 力学性能

中图分类号: TG146.21; O346.1 **文献标识码:** A **DOI:** 10.7520/1001-4888-16-137

0 引言

在铝合金的凝固过程中施加脉冲电流是最近几年发展起来的非平衡电磁细化技术, 具有细化晶粒、改善铝合金组织的作用^[1-5], 国内外电脉冲处理技术主要影响液态金属凝固过程组织和性能, 但对于改善固态铝合金材料组织和性能尚未开展研究。利用电磁场的热效应来遏制金属构件裂纹的扩展是非常有发展前景的非平衡止裂技术, 具有提高结构安全性和可靠性、遏制裂纹扩展的作用^[6-10]。目前, 电磁热止裂技术对 45 钢等黑色金属研究较多, 对于应用广泛的有色合金研究很少, 特别是铸造铝合金, 几乎没有涉及。

在铸造 Al-Mg 合金系中, ZL303 合金具有优良的耐腐蚀性能、可切削加工性能、可焊性能、耐热性能, 主要用于在腐蚀介质下承受中等载荷的船舶用、航空用构件及内燃机机车的零件^[11,12], 这些部件对材料的力学性能提出了很高的要求, 对其止裂强化尤为重要。本文主要从试验角度研究电磁热止裂技术对 ZL303 合金材料的止裂效果, 可为将此技术推广到有色金属构件裂纹止裂以提高其力学性能提供参考。

1 试验研究

1.1 理论依据

导体在通电瞬间, 由于裂纹的存在, 使得在裂纹尖端处出现强烈的电流绕流现象, 裂尖处的电流密度高度集中, 产生的热量足以使裂尖处的金属熔化, 形成局部焊点, 裂尖曲率半径增大, 裂尖钝化, 减少甚至消除裂纹前缘处的应力集中, 从而达到裂纹止裂的目的。

1.2 试件制备

选择 ZL303 铸造铝合金棒材, 其化学成分见表 1, 在线切割机上按设计尺寸制备试件, 由于工程实

^{*} 收稿日期: 2016-07-29; 修回日期: 2016-10-27

基金项目: 河北省自然科学基金项目(E2014203223, E2015203217)

通讯作者: 付宇明(1971—), 男, 博士, 教授, 博导。主要研究领域: 机械强度学。Email: mec9@ysu.edu.cn

践中疲劳裂纹失效形式较多,裂纹细小,预置裂纹宽度为 0.1 mm,长度为 9 mm,并在疲劳试验机上预制疲劳裂纹,两端的工艺孔用于放电时夹持试件,尺寸及模型如图 1 所示。

表 1 ZL303 合金的化学成分(质量分数(%))

Tab. 1 Chemical composition of ZL303 alloy (mass fraction(%))

元素	Mg	Si	Mn	Zn	Fe	Cu	其他杂质	Al
含量	4.5~5.5	0.8~1.3	0.1~0.4	0.5	0.5	0.1	0.15	余量

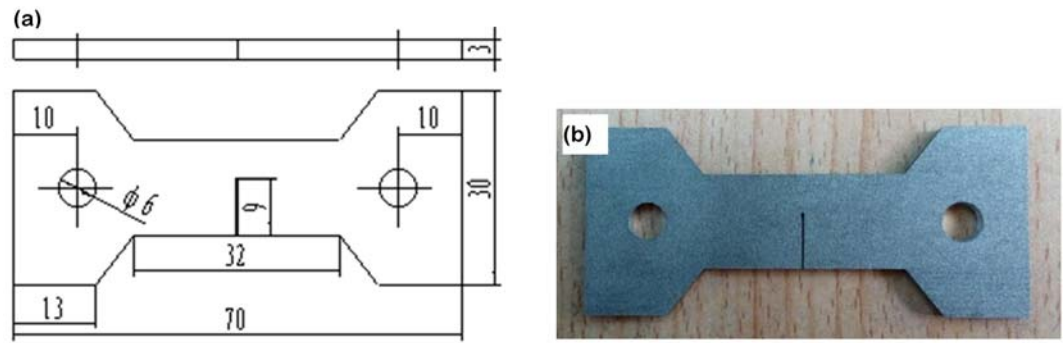


图 1 ZL303 合金试件:(a)试件尺寸;(b)试件形貌

Fig. 1 ZL303 alloy specimen: (a)dimension of specimen(mm);(b)specimen figure

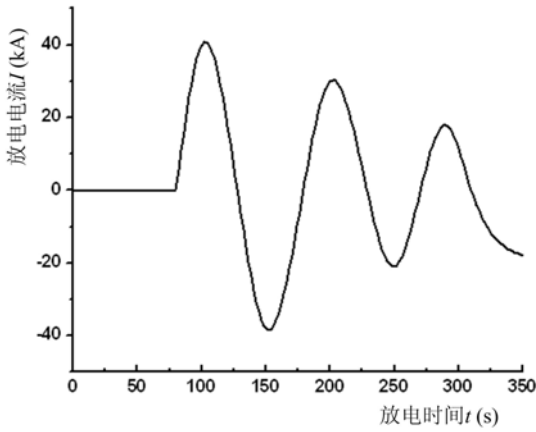


图 2 脉冲电流波形图

Fig. 2 Pulse current waveform

1.3 试验过程

选取 5 个试件,分别在 5kV、5.5kV、6kV、6.5kV、7kV 的电压下对其进行放电,其结果如表 2 所示,由表可知最佳放电电压为 6kV。为作对比研究,将制备好的试件分成两组,第一组试件进行 6kV 脉冲放电处理,第二组试件不进行放电处理。放电试验是在自制的 ZL-2 型超强脉冲电流装置上进行的^[13],该装置可以实现电流和电压大范围调节,最小放电周期为 250μs,最大脉冲放电电流可达 140kA,将试件串联在电容放电回路中,可使试件获得强大的瞬时电流,电流热集中效应仅集中在裂尖附近,产生大量焦耳热,脉冲放电曲线如图 2 所示。放电瞬间听到“啪”的

一声异响,并伴有金属熔化后的喷射现象,放电瞬间所产生的热压应力作用于裂尖处熔化的金属,使得裂尖处微小区域熔化的金属产生喷射。选取的电压越大,喷射现象也越严重,过大甚至会造成构件断裂,6kV 放电电压是经过多次试验确定的最佳放电电压,裂尖处金属喷射后,使得裂尖曲率半径增大。由于金属喷射仅局限于裂尖处,范围非常小,不会造成试样裂纹处的“缺肉”,钝化的裂尖起到遏制裂纹扩展的作用。由于疲劳裂纹的存在,试样裂纹处断面本身是不均匀的,且裂纹极易扩展,经脉冲放电强化后,裂尖锐化,从而改善了裂纹断面的不均匀性,起到放电强化的作用。

表 2 放电电压与止裂效果之间的关系

Tab. 2 Relationship between the discharge voltage and crack arrest effect

电压(kV)	5	5.5	6	6.5	7
止裂效果	无变化	效果不明显	裂尖锐化	裂纹扩展	试件断裂

放电试验后,取强化前后试件若干,在室温下利用 WDW3050 微机控制电子万能试验机对其进行拉伸试验,用 SEM 扫描电镜对断口进行观察;并利用型号为 FM-ARS9000 的全自动显微硬度测量系统对 ZL303 强化前后试件进行显微硬度测试。

2 试验结果及讨论

2.1 力学性能分析

选取经放电强化和未经放电强化的试件各 5 个,分成 5 组,在相同的试验条件下对试件进行拉伸性能测试,由于试验条件的限制,仅作定性分析,而不做定量分析。通过拉伸试验得到的 5 组数据如表 3 所示,由数据可知,强化前和强化后试件的试验数据均有一定的分散性,这是由铸造铝合金材料的本身差异造成的,以 5 组数据的平均值作为衡量拉伸性能的指标。

通过拉伸试验得到的曲线大致相同,图 3 为其中一组试件拉伸过程中的负荷一位移曲线。由图 3 可知,经放电强化的试件所能承受的最大力明显大于未经放电强化的试件。通过对比分析表 3 数据,得到强化前试件所能承受的平均最大拉伸力为 956N,经脉冲放电强化后试件所能承受的最大拉伸力为 1114.4N,经放电强化后,试件所能承受的最大拉伸力增大,抗拉强度提高,平均提高了 16.5%。

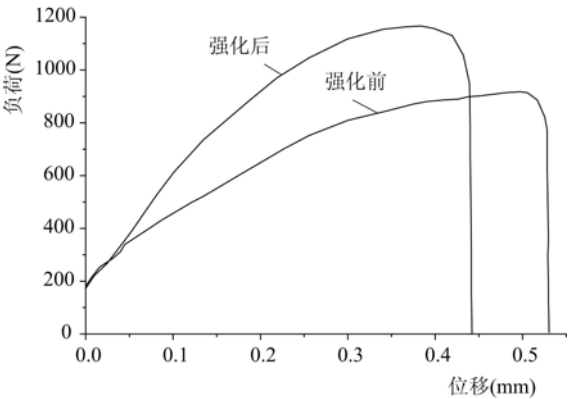


图 3 止裂前后负荷一位移曲线

Fig. 3 Curve load-displacement before and after crack arrest

表 3 拉伸试验数据		
Tab. 3 Tensile test data		
编号	最大负荷(N)	
	强化前	强化后
1	675	677
2	932	936
3	919	1161
4	1089	1235
5	1165	1563
平均	956	1114.4

2.2 显微硬度分析

压痕精度为 0.1 μ m,选用负载 500g,保载时间 10s,从裂纹尖端开始打点,共打 10 个点,每两个点之间的距离为 0.2mm。在初始测试过程中发现,当金刚石压痕打在材料的析出相上时,具有硬度过大的现象(可达 126HV),影响分析的准确性,针对这一问题,避开析出相打点,经测试共得到 10 个有效硬度数值,将所测得的试验数据用 Origin 软件生成显微硬度分布图,得到两条硬度值随距裂纹尖端距离变化的硬度曲线,如图 4 所示。

硬度值大小可以反映材料力学性能的强弱,由图 4 观察强化前试件曲线,曲线呈波浪式但保持水平,说明材料硬度值均匀;经放电强化的试件,从裂尖区到母材区硬度值呈现波浪式下降的趋势,最终跟母材持平。对比强化前后硬度曲线可知,经放电强化后试件裂尖区域(距裂尖 0.8 mm 以内)的显微硬度明显高于强化前试件,而母材区硬度相差不大,说明电磁热强化主要作用在裂尖附近,而对 ZL303 试件母材的硬度影响不大。

2.3 断口分析

所有拉伸试件均从裂纹处断裂。试件宏观断口如图 5 所示,在扫描电镜下观察的微观断口

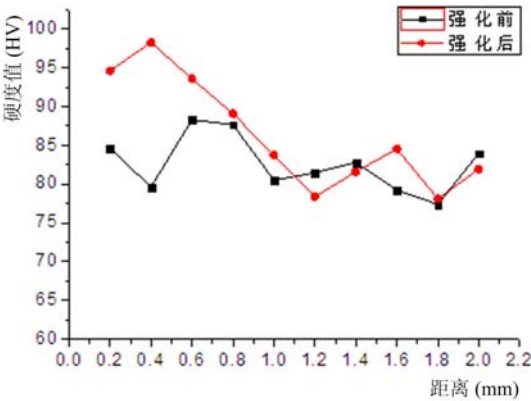


图 4 显微硬度曲线

Fig. 4 Micro hardness curve

形貌如图 6 所示。宏观上看,断口附近没有明显的宏观塑性变形,且断口表面相对比较平齐,判断为脆性断口;微观上看,整个断口比较光亮且为一个完整的平面,可见为穿晶的脆性断裂即解理断裂,被劈开的面为解理面。



图 5 宏观断口形貌

Fig. 5 Macroscopic fracture morphology

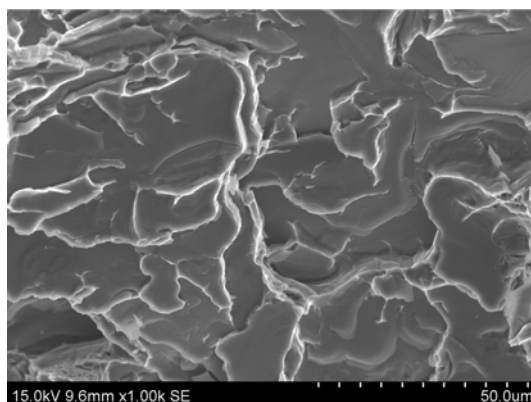


图 6 微观断口形貌

Fig. 6 Micro fracture morphology

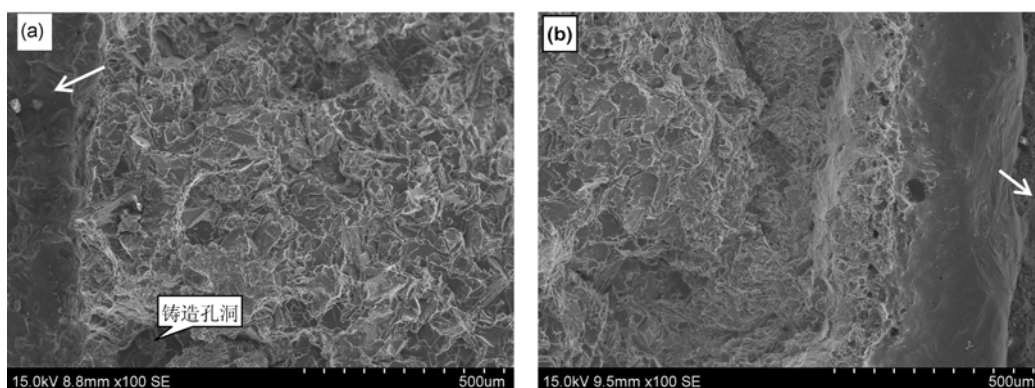


图 7 裂尖处微观断口形貌对比图:(a)强化前;(b)强化后

Fig. 7 Comparison of the micro fracture morphology at the crack tip:(a)before discharge;(b)after discharge

图 7 为试件裂尖处的微观断口形貌对比图,图中箭头所指区域为裂缝底部区域,对比发现,强化前试件整个断口的解理面大小几乎一致,而经放电强化的试件,裂缝底端即裂尖处断口有明显的焊接现象且解理面明显小于基体,断口基体解理面与强化前试件大小无差别,说明放电强化作用主要作用于裂尖附近,经放电强化后,裂尖钝化形成焊口,裂尖处组织细化。这是由于当对试件施加脉冲电流时,由于脉冲电流作用时间极为短暂,整个过程属于瞬时的高能量输入,并且脉冲电流聚集在裂尖附近,所以会使裂尖周围处材料在很短的时间内迅速升温,经过一个类似的热处理过程,发生组织的转变,裂尖处金属材料的急冷,又使得细化的组织来不及长大;适当的脉冲电流产生的电磁力能够破碎熔体中的初生固相,干扰晶体的正常生长过程^[16];另外电脉冲可以起到干扰金属原子的正常迁移规律,减慢枝晶生长速度的作用。综合以上三方面原因,电磁热作用产生的相变产物必将获得超细的晶粒度和相变组织,位错密度增加,塑性变形抗力增大,从而提高裂尖处材料硬度和力学性能。

3 应力强度因子分析

若不经放电,只用强度为 σ 的外力拉伸试件,则试件放电前在受拉伸时的应力强度因子为^[14]

$$K_I = K_o = 1.1215 \sigma \sqrt{\pi a} \quad (1)$$

式中, σ 为拉伸应力; a 为裂纹长度。

试件经放电后,裂尖前缘瞬间温升很大,周边温度接近初始温度,由温度不均引起的热应力强度因

子为^[15]

$$K_T = \frac{qE\alpha_t}{4} \left(1 + 2\lg \frac{2}{a} \right) \sqrt{\pi a} \quad (2)$$

式中, E 为弹性模量; α_t 为热胀系数; $q = -\frac{Q}{2\pi\lambda}$, Q 为热源功率密度, λ 为导热系数。

由式(2)可知, $K_T < 0$ 。证明试件不会由于放电过程而使裂纹失稳, 并且试件会向不利于裂纹扩展的方向转变, 根据应力强度因子叠加原理, 综合应力强度因子为

$$K'_I = K_T + K_\sigma = -\frac{QE\alpha_t}{8\pi\lambda} \left(1 + 2\lg \frac{2}{a} \right) \sqrt{\pi a} + 1.1215\sigma \sqrt{\pi a} \quad (3)$$

通过比较, $K'_I < K_I$, 可见经脉冲放电后, 试件裂纹前缘的应力强度因子降低了, 从而使得裂纹扩展几率降低, 达到力学性能强化的目的。

4 结论

(1) 电磁热止裂技术对 ZL303 这一特殊材料具有良好的止裂效果, 经放电强化后, 裂尖处显微硬度明显提高, 试件所能承受的最大拉伸力增大, 抗拉强度提高, 平均提高了 16.5%, 达到力学性能强化的效果。

(2) 对比分析强化前后试件的拉伸断口, 得知放电强化主要作用于裂尖附近, 裂尖钝化形成焊口, 裂尖处组织变细且强度提高, 降低了裂纹扩展速度, 使得力学性能提高。

(3) 经放电强化, 裂尖所产生的电热应力强度因子为负, 在一定程度上削弱了拉应力所产生的应力强度因子, 达到力学性能强化的目的, 理论和试验得到互相验证。

参考文献:

- [1] Charles V. Electromagnetic refining of aluminum alloys by the CREM process. Part1: Working principle and metallurgical results[J]. Metall Trans B, 1989, 20(5):623—629.
- [2] MAI Leijuan, HAO Hai, DONG Hanwei. Effects of electromagnetic field on structure and heat treatment behavior of Mg-Li-Al alloys[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2008, 18(S1):96—100.
- [3] ZHU Qingfeng, ZHAO Zhihao, ZUO Yubo, et al. The effect of grain refiner and combined electromagnetic field on grain evolution of horizontal direct chill casting 7075 aluminum alloy[J]. International Journal of Materials Research, 2010, 101(3):380—385.
- [4] 郭世杰, 薛冠霞, 刘金炎. 电磁软接触铸造 7050 高强度铝合金扁锭的组织 and 力学性能[J]. 中国有色金属学报, 2010, 20(7):1282—1289 (GUO Shijie, XUE Guanxia, LIU Jinyan. Microstructures and mechanical properties of soft-contact electromagnetic DC casting 7050 high strength alloy ingot[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2010, 20(7):1282—1289 (in Chinese))
- [5] ZUO Yubo, ZHAO Zhihao, ZHANG Haitao, et al. Combined effect of electro-magnetic field and grain refiner on microstructure of $\phi 310$ mm 7050 aluminum alloy ingot[J]. Advanced Materials Research, 2012, 399:1708—1711.
- [6] FU Yuming, TIAN Zhenguo, ZHENG Lijuan. Analysis on the thermal stress field when crack arrest in an axial symmetry metal die using electromagnetic heating[J]. Applied of Mathematics and Mechanics, 2006, 8(3):53—55.
- [7] 付宇明, 吴杰, 康玮明, 等. 2A12 铝合金试件中空间斜裂纹在线止裂及性能分析[J]. 航空学报, 2008, 29(4):1073—1078 (FU Yuming, WU Jie, KANG Weiming, et al. On-line crack prevention and performance analysis of aluminum alloy 2A12 specimen with oblique crack[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2008, 29(4):1073—1078 (in Chinese))
- [8] 郑丽娟, 李伟, 付宇明, 等. 40CrNiMo 试件单边裂纹在线止裂及组织分析[J]. 塑性工程学报, 2009, 16(3):84—87 (ZHENG Lijuan, LI Wei, FU Yuming, et al. Research on crack preventing on-line in 40CrNiMo specimen with edge crack and its microstructure analysis[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2009, 16(3):84—87 (in Chinese))
- [9] ZUO Yubo, ZHAO Zhihao, ZHANG Haitao, et al. Combined effect of electro-magnetic field and grain refiner on microstructure of X310 inn 7050 aluminum alloy ingot[J]. Advanced Materials Research, 2012, 399:1708—1711.

- [10] 付宇明, 王俊丽, 郑丽娟, 等. 含有裂纹的 Al-Mg 合金构件电磁热止裂[J]. 中国有色金属学报, 2013, 23(1):29—34 (FU Yuming, WANG Junli, ZHENG Lijuan, et al. Crack arrest of Al-Mg alloy component with cracks by electromagnetic heating[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2013, 23(1):29—34 (in Chinese))
- [11] 张春波, 王祝堂. 航空航天器铸造铝合金(3)[J]. 轻合金加工技术, 2013, 41(1):1—14 (ZHANG Chunbo, WANG Zhutang. Casting aluminum alloys used for aeronautic and aerospace vehicle (3) [J]. Light Alloy Fabrication Technology, 2013, 41(1):1—14 (in Chinese))
- [12] 王祝堂. 最耐海水腐蚀的铸造铝合金 ZL303[N]. 中国有色金属报, 2015-10-31(007) (WANG Zhutang. The cast aluminum alloy ZL303 of the most resistant to seawater corrosion[N]. Chinese News of Nonferrous Metals, 2015-10-31(007) (in Chinese))
- [13] 郑丽娟, 付宇明, 李晓慧, 等. 带有空间裂纹的拉伸试件电磁热止裂及机械性能测试[J]. 工程力学, 2007, 24(9):154—158 (ZHENG Lijuan, FU Yuming, LI Xiaohui, et al. Preventing crack using electromagnetic heating and mechanical property testing for specimens with space crack under tension[J]. Engineering Mechanics, 2007, 24(9):154—158 (in Chinese))
- [14] 中国航空研究院. 应力强度因子手册[M]. 北京: 科学出版社, 1993: 791—792 (Chinese Aeronautical Establishment. Stress intensity factors[M]. Beijing: Science Press, 1993: 791—792 (in Chinese))
- [15] Zhang X Z, Hasebe N. Basic singular thermoelastic solutions for a crack[J]. International Journal of Fracture, 1993, 62(2):97—118.
- [16] 何树先, 王俊, 孙宝德, 等. 高密度脉冲电流对 A356 铝合金凝固组织的影响[J]. 中国有色金属学报, 2002(3): 426—429 (HE Shuxian, WANG Jun, SUN Baode, et al. Effect of high density pulse current on solidification structure of A356 alloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2002(3):426—429 (in Chinese))

Experimental Study on Mechanical Properties of ZL303 Alloy Subjected to Electromagnetic Thermal Crack Arrest

FU Yu-ming, DU Wen-lian, LI Deng-ke, ZHENG Li-juan

(School of Mechanical Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China)

Abstract: In this paper, electromagnetic thermal crack arrest experiment of ZL303 alloy specimen with unilateral crack was carried out by using a self-made ZL-2 super pulse discharge device. Tensile experiment of specimens before and after thermal crack arrest treatment was carried out based on computer controlled electronic universal testing machine. The fracture surface was observed by scanning electron microscope (SEM). Finally, stress intensity factor of tensile specimen was theoretically analyzed. Results show that the electromagnetic thermal arrest technique has a good effect on crack arrest of ZL303; The discharge enhancement effect is mainly concentrated near the crack tip; Crack tip passivation forms solder joint, and its microstructure becomes thinner and strength is improved. The tensile strength of specimen increases averagely up to 16.5%. The thermal stress intensity factor weakens the stress intensity factor produced by tensile stress, so, the enhancement effect of mechanical properties is achieved.

Keywords: ZL303 alloy; electromagnetic thermal crack arrest; fracture; stress intensity factor; mechanical properties