

## 含有裂纹的 Al-Mg 合金构件电磁热止裂

付宇明, 王俊丽, 郑丽娟, 向 龙, 张金森

(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:** 利用自行研制的 ZL-2 型超强脉冲电流发生装置对带有单边裂纹的 Al-Mg 合金试件进行电磁热止裂实验, 并对放电前后裂纹尖端的微观组织进行对比分析; 采用热-电-结构耦合的数值分析方法求得放电后试件的电流密度场、温度场及热应力场; 从理论上计算放电后的电热应力强度因子。结果表明: 放电电压对止裂效果存在最优值; 在适当的强脉冲电流作用下, 裂纹尖端在小范围内被瞬间强化加热, 随后在极大的热压应力作用下快速冷却, 组织发生明显变化, 晶粒得到细化, 并围绕裂纹尖端形成等值压缩热应力, 对裂纹尖端有“夹紧”作用, 进而阻止裂纹扩展。

**关键词:** Al-Mg 合金; 单边裂纹; 微观组织; 止裂; 电磁热效应

中图分类号: TG146.21; O346.1

文献标志码: A

## Crack arrest of Al-Mg alloy component with cracks by electromagnetic heating

FU Yu-ming, WANG Jun-li, ZHENG Li-juan, XIANG Long, ZHANG Jin-sen

(Institute of Structure Damage and Restore, School of Mechanical Engineering,  
Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China)

**Abstract:** Al-Mg alloys specimens with unilateral crack were used to perform electromagnetic heating crack arrest experiment using a self-made ZL-2 super pulse current generation equipment, and the microstructures around the crack tip were analyzed before and after discharge. The current density field, temperature field and thermal stress field were obtained at the moment of the pulse current discharge by the thermal-electrical-structure coupling numerical analysis method. The electrothermal stress intensity factors were theoretically calculated. The results show that there exists an optimal discharge voltage value for the effect of the crack arrest. Under the action of appropriate super pulse current, the crack tip around small-scale is instantly strengthen-heated, followed by rapid cooling under a great thermal compressive stress. The microstructure has an obvious change, and the grains are refined. And the equivalent heat compression stress generates around the crack tip, which has “clamping” role to the crack tip, and then prevents the crack expansion.

**Key words:** Al-Mg alloy; unilateral crack; microstructure; crack arrest; electromagnetic heating effect

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<sup>[1-5]</sup>; 利用电磁场的热效应来遏制金属构件裂纹的扩展是又一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<sup>[6-9]</sup>。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, 但对于改善固态的铝合金材料组织和性能尚未开展研究。目前, 电磁热止裂技术所研究的材料多是黑色金属, 如 45 钢等, 对于工程实践中含有裂纹的有色合金研究很少, 特别是 Al-Mg 合金, 对止裂后裂纹尖端微小区域的微观组织分析几乎没有涉及。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51075351, 51105325)

收稿日期: 2012-02-07; 修订日期: 2012-06-07

通信作者: 付宇明, 教授, 博士; 电话: 0335-8054450, 13011978900; E-mail: mec9@ysu.edu.cn

为了使这一具有明显优越性的技术应用于实际生产中,选择在航空航天及常规工业中应用比较广泛的Al-Mg合金试件,在DK7740线切割机上预制单边裂纹,并通过疲劳试验机预制疲劳裂纹。将自制的ZL-2型设备产生的瞬间超强脉冲电流作用于试件两端,当脉冲电流遇到裂纹、绕过单边裂纹尖端时,在裂纹尖端产生强烈的绕流效应,瞬间在裂纹尖端很小的范围内产生很大的电流和压缩热应力及较多的热量,裂纹尖端形成微小的焊口,裂纹尖端钝化,在不改变结构及不含裂纹部分原有组织和性能的情况下,能实现缺陷处裂纹止裂和裂纹尖端组织的超细化<sup>[10]</sup>。本文作者从实验、数值模拟及理论三方面研究电磁热止裂技术对铝镁合金这一特殊材料的止裂效果,为将此技术推广到有色金属构件裂纹止裂以提高其寿命奠定基础。

## 1 实验

### 1.1 试件制备

实验材料为加工态的Al-Mg合金,在DK7740线切割机上首先切割宽度为0.1 mm、长度为9 mm的裂缝,然后用疲劳试验机预制宽度约为0.01 mm、长度约为3 mm的单边裂纹试件8个,其尺寸及模型如图1所示。

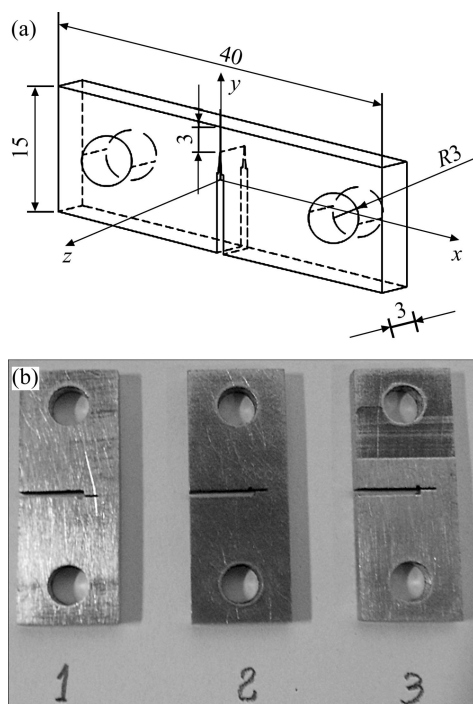


图1 具有单边裂纹的Al-Mg合金试件

Fig. 1 Specimen of Al-Mg alloys with unilateral crack (mm): (a) Dimension figure; (b) Specimen figure

### 1.2 止裂实验方法

Al-Mg合金的止裂实验在自制的ZL-2型超强脉冲电流发生器上进行,脉冲电压的宽度为100 μs,作用时间约为15 μs,放电电压根据数值模拟结果确定。数值模拟结果表明,当脉冲电压达到4 kV时,可使图1试件裂纹尖端的温度达到1 200 °C,超过了Al-Mg合金的熔点(625 °C),使裂纹尖端熔化形成焊口,从而达到止裂的目的。考虑到数值模拟结果存在误差,选取不同电压进行实验研究,分析不同电压对裂纹止裂效果的影响。

### 1.3 止裂效果及讨论

#### 1.3.1 宏观形貌分析

通过对裂纹尖端钝化程度的比较及宏观形貌对比分析来考察不同电压对止裂效果的影响。电压为4 kV时,裂纹尖端无任何钝化愈合现象;电压为4.5 kV时,裂纹尖端的愈合不明显;电压为5.5 kV时,裂纹尖端钝化,达到止裂目的;当电压达到6 kV时,试件从裂纹处开裂。实验中效果最佳的放电电压(5.5 kV)比数值模拟的(4 kV)高,这是因为在空气中Al-Mg合金试件表面可形成Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>·MgO尖晶的氧化膜,此氧化膜具有比Al-Mg合金更高的熔点。另一方面也说明了放电电压对止裂效果存在最优值或最优值区间,即放电电压过低时达不到止裂效果,放电电压过高时试件沿着裂纹处开裂,而并非电压越高越好。

图2所示为止裂前后裂纹尖端的宏观形貌。图2(a)所示为止裂前裂纹尖端形貌。可以看出,裂纹尖端的初始半径可以近似视为0,是奇异点。图2(b)所示为放电电压为5.5 kV时裂纹尖端形貌。可以看出,裂纹尖端处形成焊口,裂纹尖端钝化,半径将增大2~3个数量级,阻止了裂纹的扩展。

#### 1.3.2 微观组织分析

以氢氟酸(1.15 g/mL、2 mL)、盐酸(1.19 g/mL、3 mL)、硝酸(1.40 g/mL、5 mL)、水190 mL的混合液作为侵蚀剂对止裂后Al-Mg合金侵蚀以显示其晶粒组织。图3所示为止裂前后裂纹尖端附近材料的显微组织。未经脉冲放电的组织为具有较强方向性的枝状晶成形组织,且分布不均匀,如图3(a)所示。而经过5.5 kV脉冲电压放电处理后,裂纹尖端处的组织虽仍为枝状晶组织,但方向性明显减弱,枝晶变得更加短小、零乱,合金组织明显均匀化,如图3(b)所示。同时,可以看出,裂纹尖端附近的组织比周围基体组织明显细化,这是由于脉冲放电瞬间裂纹尖端温度迅速升高,其后裂纹尖端处组织在极大的热压应力作用下快速冷却的结晶过程,抑制了晶粒的形核和长大。细化的晶

粒一方面有利于晶粒承受晶界拉应力时晶粒位置的调整, 避免开裂; 另一方面能增加合金中晶界的数量, 使低熔点相更均匀地分布于合金中, 从而改善合金的热裂倾向<sup>[11]</sup>, 达到止裂的目的。

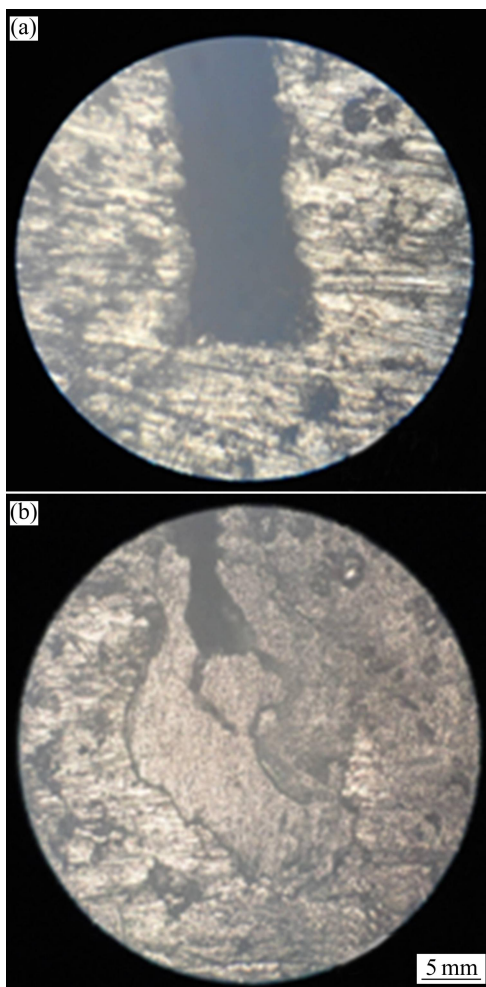


图 2 止裂前后裂纹尖端宏观形貌  
Fig. 2 Macro morphologies of crack tip before (a) and after (b) crack arrest

## 2 电磁热止裂数值模拟

### 2.1 数值模拟方法

利用 Ansys 有限元软件, 采用热-电-结构单向顺序耦合分析方法, 选择 solid69 单元, 先进行热-电耦合分析, 求得温度场及温度梯度场, 再进行热-结构耦合分析。利用 Ansys 软件参数化程序语言 APDL 功能将热-电耦合过程中节点温度作为体载荷施加到结构应力分析中, 并且设定沿裂纹方向的所有节点的位移自由度为 0, 进而求得热应力场。划分网格时, 裂纹尖端采用奇异单元, 先对一纵切面划分, 然后对

体进行扫略划分。常温下 Al-Mg 合金的物性参数如表 1 所列。

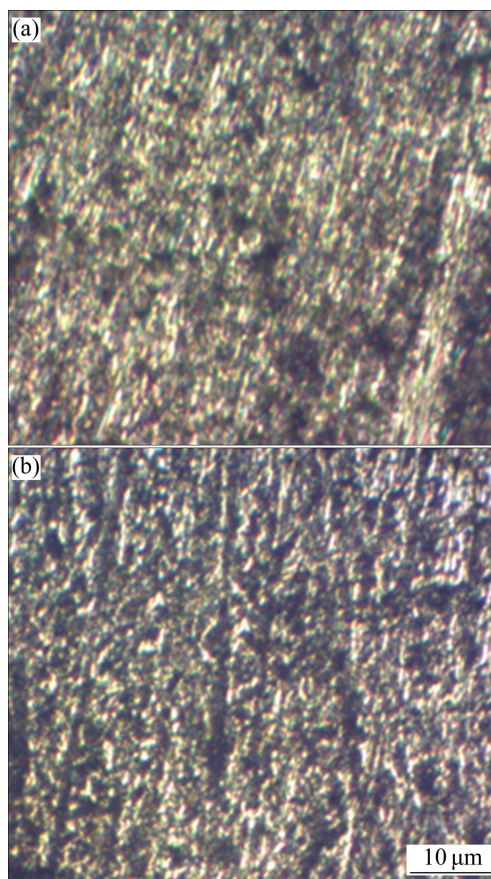


图 3 止裂前后裂纹尖端附近材料的显微组织  
Fig. 3 Microstructures of material at crack tip: (a) Before crack arrest; (b) After crack arrest

表 1 Al-Mg 合金的物性参数

Material parameter	Value
$E/\text{GPa}$	66.8
$c/(\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$	1 088.6
$\lambda/(\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$	92.1
$\sigma/(\Omega\cdot\text{m})$	$9.12\times 10^{-8}$
$\alpha_0/\text{K}^{-1}$	$2.73\times 10^{-5}$

### 2.2 数值模拟结果与讨论

#### 2.2.1 电流密度场和温度场

向含有单边裂纹的 Al-Mg 合金试件两端通入均匀强脉冲电流时, 均匀的电流场被试件中的裂纹阻隔, 裂纹尖端产生强烈的绕流现象, 电流密度场在裂纹尖端处具有奇异性, 电流密度场矢量图如图 4 所示。

电流密度在裂纹尖端的强烈绕流现象使裂纹尖端微小区域内产生足够大的电流和较多的热量, 该处的

温度达到甚至超过材料的熔化温度而形成焊点, 裂纹尖端明显钝化, 达到止裂目的。其温度场分布如图 5 所示。

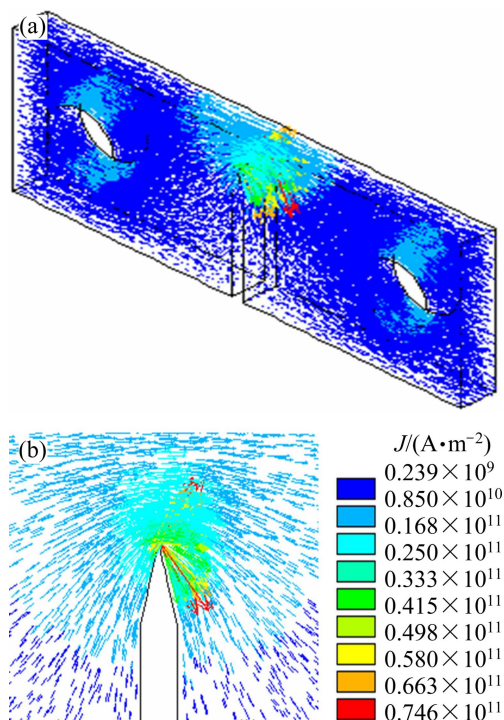


图 4 Al-Mg 合金试样电流密度矢量图

Fig. 4 Current density vectors of Al-Mg alloy specimen: (a) Current density overall profile; (b) Partial enlarged drawing of current density near crack tip

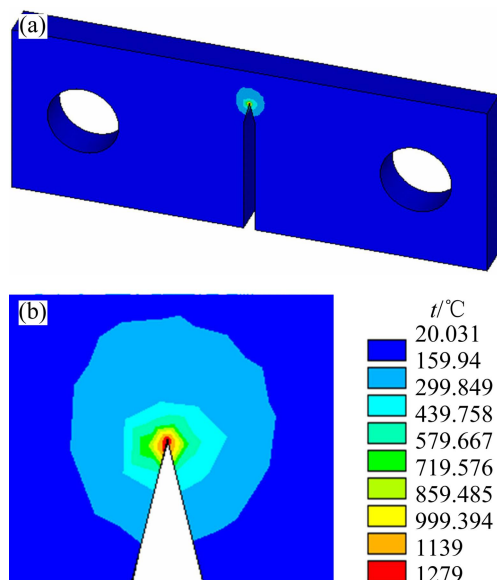


图 5 脉冲放电瞬间裂纹尖端的温度场云图

Fig. 5 Temperature contour bands around crack tip after pulse discharge: (a) Temperature field overall profile; (b) Partial enlarged drawing of temperature field near crack tip

## 2.2.2 热应力场

利用 Ansys 软件参数化程序语言 APDL 功能将图 5 中热-电耦合过程中节点温度作为体载荷施加到结构应力分析中, 得到试件放电瞬间热应力场分布。图 6(a)所示为  $x$  方向热应力分布,  $y$  和  $z$  方向热应力分布与  $x$  方向的相似, 这里不再给出。图 6(b)所示为裂纹尖端附近热应力等值面局部放大图。从图 6(b)中可以看出, 围绕裂纹尖端形成了一层层等值压缩热应力, 镶嵌在裂纹尖端外围, 对裂纹尖端起到“夹紧”作用, 阻止了裂纹扩展。

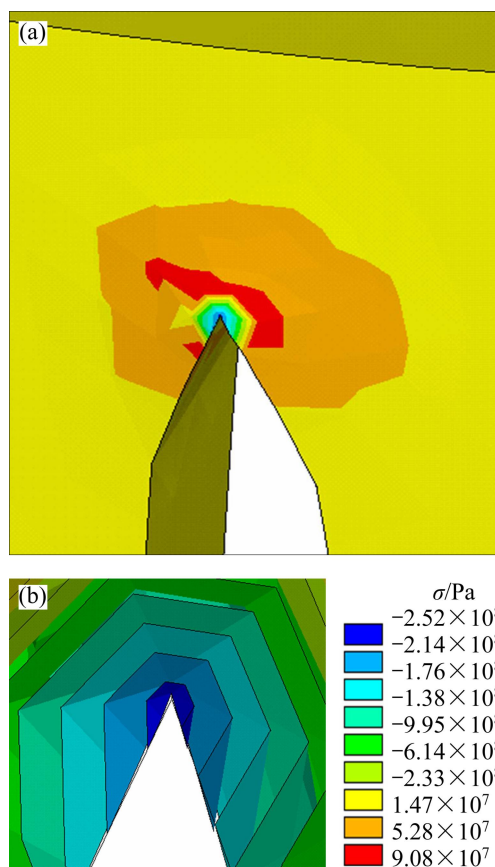


图 6 放电后裂纹尖端附近的热应力场

Fig. 6 Thermal stress field near crack tip after discharge: (a) Thermal stress distribution in  $x$  direction; (b) Partial enlarged drawing of thermal stress contour surface crack tip

## 3 电热止裂前后应力强度因子分析

### 3.1 电热应力强度因子的求解

通过上述实验和数值模拟均可证明电磁热止裂技术对 Al-Mg 合金止裂的可行性, 为了更进一步说明其止裂效果, 利用热源功率计算公式和复变函数理论求解止裂前后应力强度因子, 从另一角度证明此技术的

有效性。

图 7 所示为在受拉伸应力及电流密度为  $J_0$  时单边裂纹的载荷板模型。当试件只通入电流密度为  $J_0$  的电流时, 在裂纹尖端产生热源功率密度为  $Q$  的点热源,  $Q$  的表达式为<sup>[12]</sup>

$$Q(x, y) = \frac{2hJ_0^2(x^2 + y^2)}{\sigma_t \sqrt{(x^2 + y^2)^2 + 2a^2(x^2 - y^2) + a^4}} \quad (1)$$

式中:  $\sigma_t$  为电导率;  $h$  为薄板的厚度;  $a$  为裂纹长度。

当根据复变函数共形映射将图 7 转化为图 8 时,  $Q$  的表达式变为

$$Q(x, y) = \frac{2hJ_0^2(y^2 + x^2)}{\sigma_t \sqrt{(y^2 + x^2)^2 + 2a^2(y^2 - x^2) + a^4}} \quad (2)$$

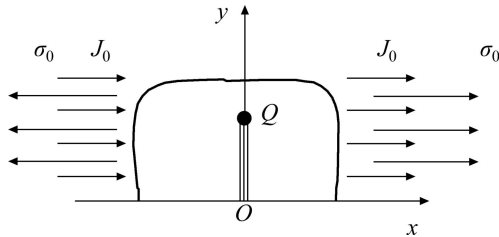


图 7 施加外载荷的含单边裂纹载流薄板模型

Fig. 7 Model of current-carrying plate with unilateral crack under action of loading

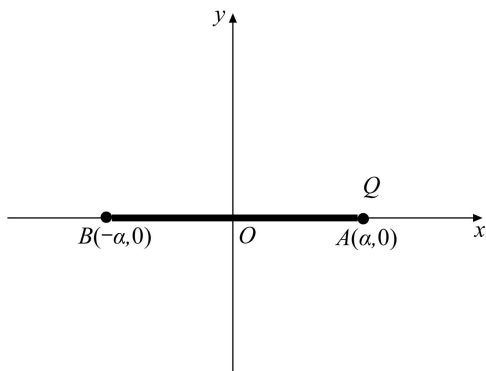


图 8 图 7 的共形映射图

Fig. 8 Conformal map of Fig. 7

由文献[13]可知, 长度为  $AB=L$  的裂纹, 在裂纹尖端  $A$  点作用有一热量为  $q$  的点热源产生的应力强度因子可表达为

$$K_q = \frac{qE\alpha_t}{4} (1 + 2\lg \frac{2}{a}) \sqrt{\pi a} \quad (3)$$

$$q = -\frac{Q}{2\pi\lambda} \quad (4)$$

式中:  $\lambda$  为导热系数;  $\alpha_t$  为线膨胀系数;  $E$  为弹性模量。

将式(2)和(4)代入式(3)即可得单边裂纹通电瞬间产生电热应力强度因子  $K_q$  为

$$K_q = -\frac{E\alpha_t J_0^2 (x^2 + y^2)}{8\lambda\sigma_t \sqrt{(x^2 + y^2)^2 - 2a^2(x^2 - y^2) + a^4}} \cdot (1 + 2\lg \frac{2}{a}) \sqrt{\pi a} \quad (5)$$

### 3.2 综合应力强度因子的求解及分析

对于图 7 所示模型, 若只用强度为  $\sigma$  的外力拉伸试件时所产生的应力强度因子  $K_\sigma$  为

$$K_\sigma = 1.121 5\sigma\sqrt{\pi a} \quad (6)$$

式中:  $\sigma$  为拉伸应力。

综合应力强度因子( $K_I$ )是电热应力强度因子和拉伸应力强度因子的叠加。其值为

$$K_I = K_q + K_\sigma = -\frac{E\alpha_t J_0^2 (x^2 + y^2)}{8\lambda\sigma_t \sqrt{(x^2 + y^2)^2 - 2a^2(x^2 - y^2) + a^4}} \cdot (1 + 2\lg \frac{2}{a}) \sqrt{\pi a} + 1.121 5\sigma\sqrt{\pi a} \quad (7)$$

应力强度因子是表征裂纹尖端附近应力场强度的一个有效参数, 可作为判断裂纹是否进入失稳状态的一个指标。从式(5)可以看出, 电热应力强度因子的符号为负, 在一定程度上削弱外载荷产生的应力强度因子, 使电磁热止裂后综合应力强度因子的数值有所下降, 与裂纹失稳扩展的临界值( $K_{IC}$ )差距增大, 这也就保证了裂纹失稳扩展几率大大减小。同时, 也说明电热应力强度因子可以遏制裂纹的扩展<sup>[14-15]</sup>。

## 4 结论

1) 电磁热止裂技术对 Al-Mg 合金这一特殊材料具有良好的止裂效果, 放电电压对止裂效果存在最优值, 放电后裂纹尖端处的组织明显细化且均匀化, 使低熔点相更均匀地分布在合金中, 从而改善裂纹尖端开裂倾向, 达到止裂的目的。

2) 数值模拟与实验得到相互验证。模拟结果表面: Al-Mg 合金放电瞬间围绕裂纹尖端形成一层层等值压缩应力, 对裂纹尖端有“夹紧”作用, 能抑制裂纹的扩展。

3) 根据复变函数从理论上推导了电热应力强度

因子, 其符号为负, 削弱了外载荷产生的应力强度因子, 使综合应力强度因子与裂纹失稳扩展的临界值 ( $K_{IC}$ ) 差距增大, 这也证明了电磁热裂纹止裂技术的有效性。

## REFERENCES

- [1] CHARLES V. Electromagnetic refining of aluminum alloys by the CREM process. Part I: Working principle and metallurgical results [J]. *Metall Trans B*, 1989, 20(5): 623–629.
- [2] MAI Lei-juan, HAO Hai, DONG Han-wei. 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 Qing-feng, ZHAO Zhi-hao, ZUO Yu-bo, WANG Xiang-jie, CUI Jian-zhong. 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 Shi-jie, XUE Guan-xia, LIU Jin-yan. 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.
- [5] ZUO Yu-bo, ZHAO Zhi-hao, ZHANG Hai-tao, QIN Ke, CUI Jian-zhong. 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] 付宇明, 尹京, 郑丽娟, 陈革新. 冷塑性成形后铝合金交变电磁处理及耦合场分析[J]. *塑性工程学报*, 2009, 16(2): 192–193.  
FU Yu-ming, YIN Jing, ZHENG Li-juan, CHEN Ge-xin. Alternating magnetic treatment of aluminum alloy after cool figuration and coupled field analysis [J]. *Journal of Plasticity Engineering*, 2009, 16(2): 192–193.
- [7] FU Yu-ming, TIAN Zhen-guo, ZHENG Li-juan. 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.
- [8] ZHENG Li-juan, FU Yu-ming. Analysis on the temperature field when crack arresting in an axial symmetry metal die by pulse current discharged key engineering materials [J]. *Advances in Fracture and Damage Mechanics*, 2007, 348/349: 765–768.
- [9] 郑丽娟, 李伟, 付宇明, 康玮明. 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 Li-juan, LI Wei, FU Yu-ming, KANG Wei-ming. 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.
- [10] 付宇明, 郑丽娟, 白象忠. 带有半埋藏空间裂纹的 Cr12 构件电磁热止裂分析[J]. *固体力学学报*, 2008, 29(2): 134–140.  
FU Yu-ming, ZHENG Li-juan, BAI Xiang-zhong. Analysis on crack arrest by electromagnetic heating in Cr12 components with spatially half-embedding crack[J]. *Acta Mechanica Solida Sinica*, 2008, 29(2): 134–140.
- [11] 王建中, 齐锦刚. 金属熔体电脉冲处理理论及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2011: 160–162.  
WANG Jian-zhong, QI Jin-gang. The theory and application on electric pulse in metal melt[M]. Beijing: Science Press, 2011: 160–162.
- [12] 刘思远, 白象忠, 刘俊杰, 敖涛. 机械载荷作用下的单边裂纹电热止裂效应分析[J]. *科学技术与工程*, 2004, 4(10): 825–829.  
LIU Si-yuan, BAI Xiang-zhong, LIU Jun-jie, AO Tao. The analysis of crack arresting efficiency as a result of electrothermal effects under the mechanical load [J]. *Science Technology and Engineering*, 2004, 4(10): 825–829.
- [13] ZHANG X Z, HASEBE N. Basic singular thermoelastic solutions for a crack [J]. *Int J Fracture*, 1993, 62(2): 97–118.
- [14] 付宇明, 白象忠, 郑丽娟, 田振国. 金属模具电磁热裂纹止裂研究的新进展[J]. *燕山大学学报*, 2007, 31(3): 95–102.  
FU Yu-ming, BAI Xiang-zhong, ZHENG Li-juan, TIAN Zhen-guo. Advance of research on crack arrest in metal die by using electromagnetic heating [J]. *Journal of Yanshan University*, 2007, 31(3): 95–102.
- [15] SHI Hai-fang, ZHANG Wei-qiang. Effects of electromagnetic stirring on microstructures of solidified aluminum alloys [J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2003, 13(5): 1171–1174.

(编辑 陈卫萍)