

脉动磁场对 Al-Cu 合金热裂的影响^①

宁志良 徐志辉 梁维中 崔天真
(哈尔滨理工大学 807 信箱, 哈尔滨 150080)

杨万胜
(哈尔滨燃气化工总公司, 哈尔滨 150076)

摘要 用对比的方法, 研究了脉动磁场对 Al-Cu 合金热裂倾向性的影响。实验结果表明: 脉动磁场具有缩小 Al-Cu 合金有效结晶区间、减小有效结晶区间线收缩之功能, 有效地降低了 Al-Cu 合金热裂倾向性; 磁场频率的影响为: $f = 19.5 \text{ Hz}$ 时热裂纹最小, $f > 37.5 \text{ Hz}$ 时影响不大。

关键词 脉动磁场 Al-Cu 合金 热裂

热裂是铸钢、有色合金生产中常见且危害最大的缺陷之一。人们在本世纪初就注意到这个问题, 在揭示热裂形成机理, 防止热裂产生等方面做了大量工作, 但到目前为止, 有关热裂形成机理尚无定论, 有关热裂的研究主要集中在裂纹形成机理和探求防止热裂产生的有关措施方面^[1-3]。

在脉动磁场对金属凝固行为影响的实验中, 我们发现脉动磁场具有提高合金填充性、消除缩松的作用^[4-5], 同时发现脉动磁场具有减轻热裂倾向性的作用。

1 脉动磁场铸造原理简介

脉动磁场铸造是实验研究中的新发现应用至生产实际而发展起来的一种新的工艺技术。脉动磁场发生设备主要由多层漆包线圈, 自耦调压器, 可控硅及控制线路组成。脉动磁场铸造的工艺过程是将铸型放置在由漆包线绕成的线圈中, 浇注金属后线圈立即被通入特定波形及特定频率的电流并产生脉动磁场, 金属便在这种磁场下凝固并受到脉动电磁场压力的作用。

图 1 示出脉动磁场对液体金属凝固过程作用原理的示意图。当感应线圈通入脉动电流即

按特定的频率间歇出现电流 I_1 时, 在线圈中按右手定则产生磁场 H , 磁场方向如箭头所示; 在磁场作用下产生感生电流 I_2 , 在线圈内产生压力 F , 沿径向将液体金属压向轴心。当电流 I_1 与图示相反时, 压力 F 亦相反。

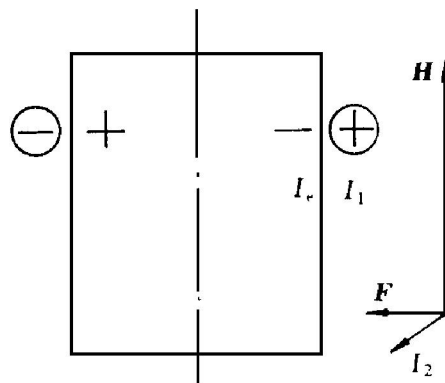


图 1 脉动磁场对液体金属的作用原理
 I_1 ——一次电流; I_2 ——感应电流

根据拉普拉斯定律, 感应线圈内 A 点处的磁场密度 B 为

$$B = \frac{\mu_0 n I_1 (4r_1^2 - r^2)}{8r_1(r_1^2 - r^2)} \quad (1)$$

感应线圈内 A 点的感生电流 I_2 为

$$I_2 = \frac{\mu_0 n I_1 f \pi r_1 [\beta - 3 \ln(1 - \beta^2)]}{4 \sqrt{R_2^2 + Z_2^2}} \quad (2)$$

图 2 为感应线圈中 A 点的磁场强度。感

应线圈对液体金属单位面积施加压力,即电磁压力

$$F = BI_2 \quad (3)$$

在(1)至(3)式中: μ_0 为空气导磁系数, B 为感应线圈内磁通密度, n 为感应线圈匝数, I_2 为感生电流, I_1 为一次电流, f 为电流频率, R_2 为液体金属电阻, Z_2 为液体金属感抗, β 为试样半径与线圈半径之比。

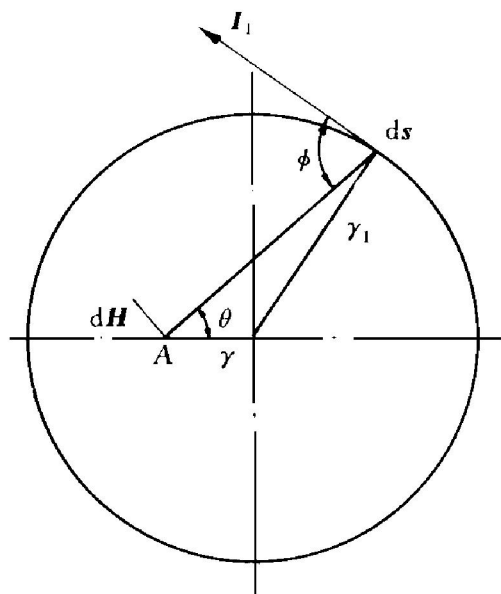


图2 感应线圈中A点的磁场强度

因为一次电流 I_1 是脉动的, 所以电磁压力 F 也是脉动的, 即按特定的频率间歇地出

现脉动磁场。一次电流强度, 一次电流波形及一次电流频率是影响脉动磁场铸造效果的三大关键因素。

2 实验方法

合金由工业纯铝(99.98%)及 Al-50% Cu 中间合金配制, 用 SG-7.5-10 坩埚炉熔化。用改进的 ZQS-2000 双棒线收缩热裂仪测定合金的线收缩及有效结晶区间温度。试样尺寸为 $d20\text{ mm} \times 200\text{ mm}$ 标准试棒, 用 XWTD-664 自动平衡记录仪记录数据。试验用铸型为石墨型。裂纹倾向性由偏心热裂环测定。

本实验用对比方法, 即在铸型、浇注温度等因素相同的条件下, 分别在重力场和脉动磁场浇注试样。

3 实验结果及分析

3.1 脉动磁场对热裂倾向性的影响

裂纹宽度越大, 危害性越大, 因此采用最大裂纹宽度评定热裂倾向性较为合理。图3为热裂纹扫描图, 图4为脉动磁场频率对热裂倾向性的影响。脉动磁场频率由脉动磁场发生器

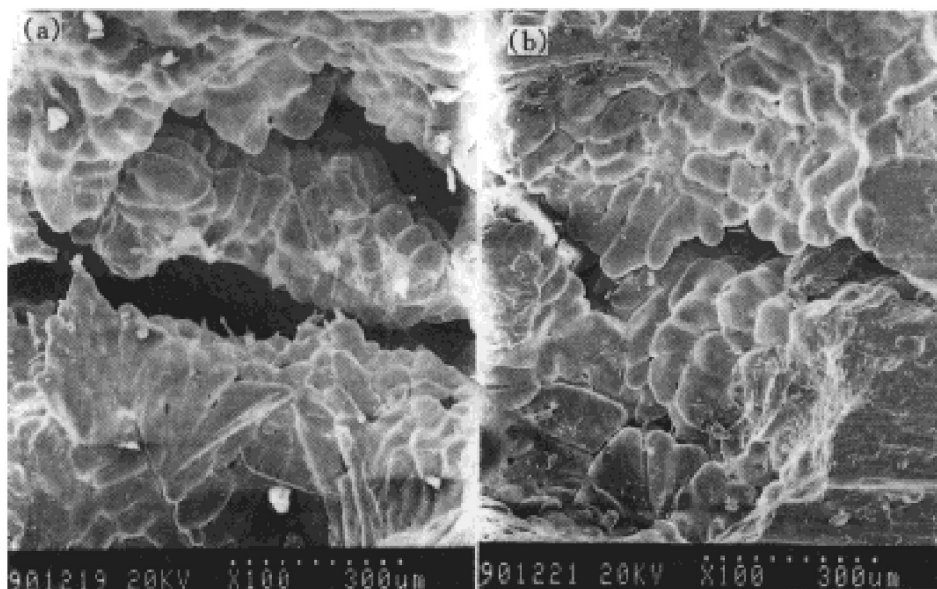


图3 热裂纹扫描图

(a) —重力场; (b) —磁场(Al-4.5% Cu $f = 10\text{ Hz}$)

的设计而定，磁场强度 720 GS。由图 3 可以看出，脉动磁场下热裂纹宽度明显减小，说明脉动磁场使 Al-Cu 合金的抗热裂性能提高。由图 4 可知，在其它参数不变的条件下，磁场频率对热裂倾向性影响较大；本实验条件下， $f = 19.5 \text{ Hz}$ 时热裂倾向性最小。当 $f > 37.5 \text{ Hz}$ 时频率的变化对热裂倾向性影响不大。

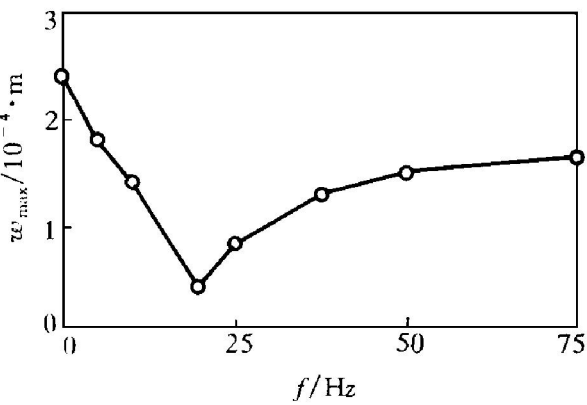


图 4 磁场频率与 Al-4.5% Cu 合金裂纹最大宽度 $w_{\max}$ 的关系

3.2 脉动磁场对 Al-Cu 合金有效结晶区间及其线收缩的影响

有效结晶区间，其上限是指形成晶体骨架即线收缩开始的温度，其下限为凝固结束的固相线温度^[6]。有效结晶区间愈大，热裂产生的倾向性愈大。图 5 为用改进的 ZQS-2000 双棒线收缩热裂仪测定 Al-Cu 合金有效结晶区间及其线收缩示意图，其磁场强度为 720 GS，频率为 19.5 Hz。图 6 是脉动磁场对 Al-Cu 合金有效结晶区间的影响，由图 6 可知，脉动磁场使 Al-Cu 合金有效结晶区间上限降低，即有效结晶区间下移，而对有效结晶区间下限的影响不大，使有效结晶区间缩小。

有效结晶区间的大小，不仅与合金种类和合金成分有关，且与合金生长方式有关。本实验所用 Al-Cu 合金，其结晶区间大，枝晶生长粗大，枝晶易于搭接。在脉动磁场作用下，由于电磁力作用，使熔液做反复运动，能更好地与型壁接触，有效地发挥型壁的冷却作用；同时电磁力使合金液产生搅拌，型壁上晶粒游离，并使熔液在凝固界面产生强烈扰动，这种

扰动使晶粒在“颈缩”部位熔断或折断。熔断或折断的晶粒成为等轴晶的晶核，而使晶粒细化。

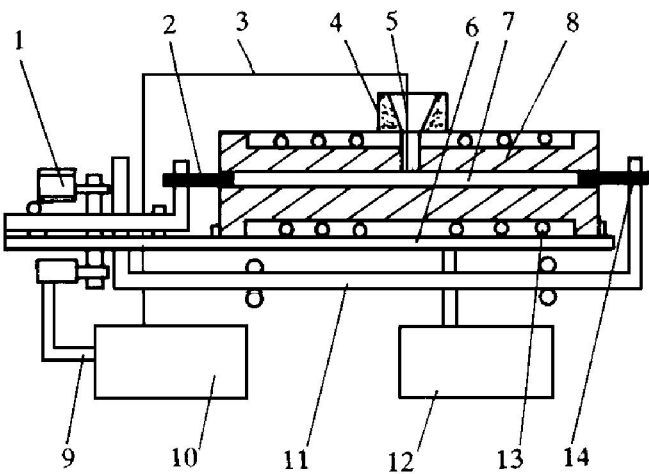


图 5 有效结晶区间及其线收缩测定示意图

- 1—百分表；2—联接棒 I；3—热电偶；
- 4—浇口杯；5—直浇道；6—底板；
- 7—试棒；8—石墨型；9—位移传感器；
- 10—XWTD-664 记录仪；11—门型构件；
- 12—脉动磁场发生器；13—线圈；14—联接棒 II

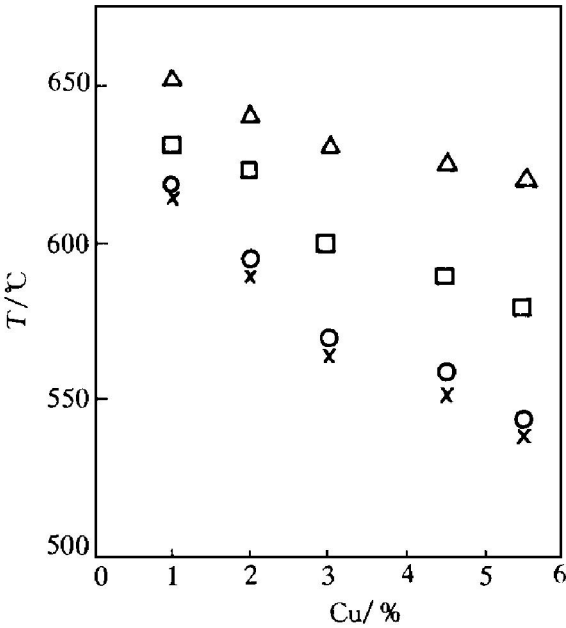


图 6 脉动磁场对 Al-Cu 合金有效结晶区间的影响

- Δ—重力场下有效结晶区间下限；
- 脉动磁场下有效结晶区间上限；
- 脉动磁场下有效结晶区间下限；
- x—重力场下有效结晶区间上限

脉动磁场细化晶粒的另一个主要原因是使临界晶核尺寸降低, 临界晶核尺寸可由下式表示:

$$r^* = \frac{2\sigma_{LS} \cdot T_0}{L \Delta T}$$

r^* —临界晶核尺寸, m; L —结晶潜热, J·m⁻³;
 ΔT —过冷度, K; T_0 —合金熔点, K;
 σ_{LS} —晶核与液体之间的比界面能, J·m⁻²

图 7 是测定脉动磁场对合金比界面能影响的示意图。图 8 表示脉动磁场强度对润湿角的影响。表 1 是脉动磁场对比界面能的影响结果。由实验结果可知, 脉动磁场降低液态金属的比界面能, 并使临界晶核尺寸 r^* 降低、晶粒细化。

由于脉动磁场显著细化晶粒, 枝晶难以搭接, 当固相分数达到一定比例时, 才能形成晶体骨架, 所以脉动磁场使有效结晶区间上限下移, 有效结晶区间缩小。

表 1 脉动磁场对比界面能的影响

磁场强度/GS	润湿角 $\theta/ (^{\circ})$	比界面能 / kJ·m ⁻²
0	124	840.0
180	123	813.1
360	106	418.4
720	76	298.2

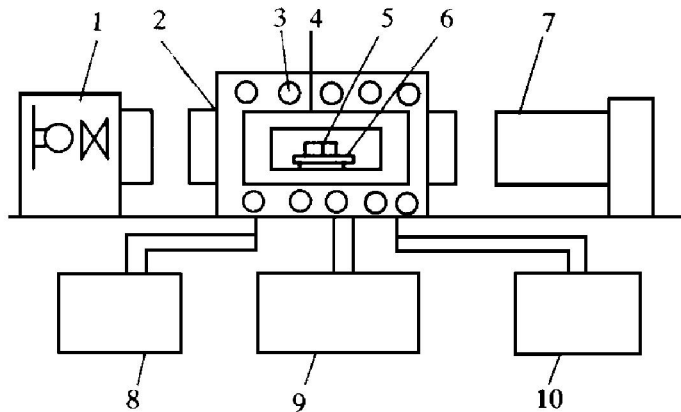


图 7 测定脉动磁场对合金比界面能影响的示意图

- 1—光学系统; 2—真空室; 3—线圈; 4—加热系统;
- 5—液态金属; 6—石墨平板; 7—照相系统;
- 8—温控系统; 9—真空系统; 10—脉动磁场发生器

脉动磁场对 Al-Cu 合金有效结晶区间线收缩影响的实验结果见表 2, 结果表明: 脉动磁场使有效结晶区间的线收缩降低了 0.02%~0.06%。表 2 中 Al-2.5% Cu 线收缩最小, 为实验误差所致。

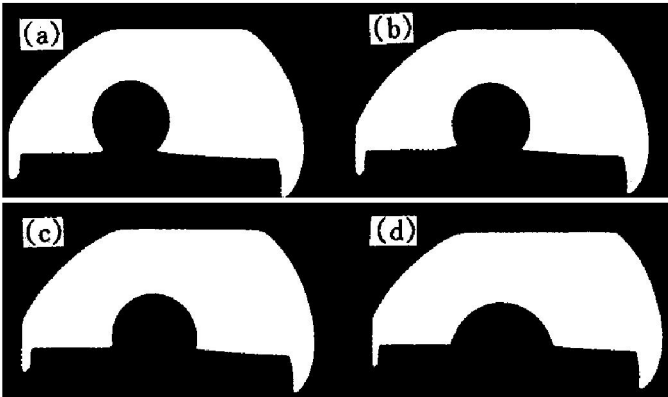


图 8 脉动磁场强度对润湿角的影响
(a) —0GS124; (b) —180GS123;
(c) —360GS106; (d) —720GS76

表 2 脉动磁场对有效结晶区间线收缩的影响

成份 Cu/ %	重力场/ %	脉动磁场/ %
1	0.29	0.23
2.5	0.23	0.19
4.5	0.36	0.30
5.5	0.38	0.36

4 结论

- (1) 脉动磁场使 Al-Cu 合金热裂倾向性明显降低, 影响程度与磁场频率有关, 在本实验条件下, $f = 19.5 \text{ Hz}$ 时热裂纹最小; $f > 37.5 \text{ Hz}$ 时, 频率的改变对热裂的影响不大。
- (2) 脉动磁场使 Al-Cu 合金有效结晶区间上限下移, 而对下限影响不大, 缩小了有效结晶区间, 并使有效结晶区间线收缩降低。

参考文献

1 雄谷, 藤井等. 轻金属, 1984, 34(9): 511.

2 刘 驰. 中国稀土学报, 1986, (3): 45.

3 李庆春. 金属科学与工艺, 1982, (1): 66.

4 葛丰德. 机械工程学报, 1989, 25(1): 1-7.

6 李庆春. 铸件形成理论基础. 北京: 机械工业出版社,

5 葛丰德. 哈尔滨科技大学学报, 1983, (1): 80.

1982: 250-256.

EFFECT OF PULSATING ELECTROMAGNETIC FIELD ON HOT CRACKING OF Al-Cu ALLOYS

Ning Zhiliang, Xu Zhihui, Liang Weizhong, Cui Tianzhen
Harbin University of Science and Technology, Harbin 150080

Yang Wansheng
Harbin Company of Gas, Harbin 150076

ABSTRACT Under laboratory conditions, the effects of pulsating electromagnetic field on the tendency of the hot cracking of Al-Cu alloys were studied by comparative method. It was shown that pulsating electromagnetic field can contract the valid crystallization region and lessen the line shrinkage of Al-Cu alloys. The tendency of hot cracking of Al-Cu alloys decreases markedly under pulsating electromagnetic field. When f is equal to 19.5 Hz, the effect of pulsating electromagnetic field on the tendency of hot cracking is lesser than any other frequency conditions and when f is larger than 37.5 Hz the pulsating electromagnetic field gives little effect on the hot cracking.

Key words pulsating electromagnetic field Al-Cu alloy hot crack

(编辑 黄劲松)

(上接 128 页)

DEFLECTION CHARACTERISTICS OF MATERIALS' ACOUSTIC MICROSTRUCTURES UNDER LOADING CONDITIONS

Sun Kangning, Zhang Jingde, Liu Yuanchao, Wang Xin, Yin Yansheng
School of Materials Science and Engineering,

Shandong University of Technology, Jinan 250061

Maslove K I, Zhang S G

Russian Academy

ABSTRACT The materials acoustic microstructures under different loading conditions were analysed. The results indicate that not only the sound speed but also the materials' acoustic microstructures change with the load. The structures distort in the condition of elastic deformation, which reflects a new acoustic property of materials.

Key words materials acoustic microscope microstructures deflection characteristics

(编辑 彭超群)