

铝合金凝固收缩行为研究

乐启炽, 李浩宇, 柏媛媛, 张海涛

(东北大学 材料电磁过程研究教育部重点实验室, 辽宁 沈阳 110819)

摘 要: 通过自行设计的实验装置研究合金在自由收缩和受阻收缩过程中的凝固特征, 研究了 5083, 6061 和 7075 三种典型铝合金的凝固收缩行为, 预测其铸造过程中的热裂倾向性, 引入衡量合金热裂倾向性大小的评价指标应力累积系数(k). 结果表明, 本实验装置能够准确记录铝合金凝固过程中温度、收缩位移和收缩应力的细微变化; 结合热力学软件 JMatPro 的计算结果, 提出铝合金凝固过程中 4 个阶段的特征; 实验预测得出 3 种实验合金的热裂倾向性大小为: $k(5083) > k(7075) > k(6061)$, 与实际铸造过程及 CSC 预测的结果相符合. 研究结果表明该实验装置及数据分析方法具有可行性, 利用 k 值可以准确预测铝合金的热裂倾向性.

关 键 词: 凝固收缩; 热裂倾向性; 应力累积系数; 凝固特征; 铝合金

中图分类号: TG 146.21; TG 113.261 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-3026(2015)05-0646-05

Study on Solidification Contraction of Aluminum Alloys

LE Qi-chi, LI Hao-yu, BAI Yuan-yuan, ZHANG Hai-tao

(Key Laboratory of Electromagnetic Processing of Materials, Ministry of Education, Northeastern University, Shenyang 110819, China. Corresponding author: LE Qi-chi, professor, E-mail: qichil@mail.neu.edu.cn)

Abstract: An equipment was developed to study the solidification characteristics during free and blocked contraction. The solidification contraction behaviors of 5083, 6061 and 7075 aluminum alloys were investigated to predict the hot cracking tendency, and the stress accumulating coefficient (k) was introduced to evaluate the hot cracking tendency. The results indicated that the equipment can record the subtle changes of temperature, thermal shrinkage displacement and shrinkage stress during solidification. Combined with the calculation of thermal software JMatPro, four solidification stages are proposed. The sequence of hot cracking tendency of three investigated alloys is $k(5083) > k(7075) > k(6061)$, which coincides with the result during reality casting and the result of CSC. All the results indicate that the developed equipment and the data analysis method are available, and k can be used to predict accurately the hot cracking tendency of aluminum alloys.

Key words: solidification contraction; hot cracking tendency; stress accumulating coefficient; solidification characteristic; aluminum alloys

铝合金作为用量仅次于钢材的第二大金属材料, 具有密度小、成本低、易加工等特点, 在航空航天、交通运输、电子电器、印刷包装等领域有着十分广泛的应用^[1]. DC 铸造是目前广泛应用的铝合金半连续铸造技术, 但在铸造过程中产生的热应力能够使铸锭中产生微裂纹, 甚至能够使铸锭完全开裂. 高温条件下热应力导致的热裂纹会出现在铝合金铸锭的表面和芯部, 是铸造过程

中最重要的缺陷, 对于任何铸造过程都是致命的灾难^[2].

迄今为止, 在大量研究钢和铝合金的基础上, 总结得到的一致看法是: 热裂纹是在凝固温度范围内、临近固相线时形成的. 目前较为成熟并被人们认可的热裂纹形成机理主要有: 液膜理论^[3]、强度理论^[4]、晶间搭桥理论^[5]和凝固收缩补偿理论^[6].

收稿日期: 2014-04-04

基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目(2013CB632203).

作者简介: 乐启炽(1968-), 男, 福建大田人, 东北大学教授, 博士生导师.

关于合金热裂倾向性的理论评定方法主要有 Clyne 和 Davies^[5] 提出的 CSC 判据和 Suyitno 等^[7] 提出的 HCS 判据. 热裂倾向性的实验评定方法主要有热裂环法^[8]、临界尺寸法(临界长度法^[9]和临界直径法^[10])、临界载荷法^[11]. 理论判据虽可以判断合金热裂倾向性的大小,但由于其计算过程的复杂性,导致其在实际应用中存在很多局限性;实验评定方法多采用定性指标,部分方法重复性差,且多针对二元合金,对多元合金的研究较少.

本文自行设计了适用于研究铝合金热裂行为的装置及测试系统,精确记录合金凝固过程中的温度、自由收缩位移及受阻收缩应力变化,并结合热力学计算对合金凝固收缩过程中的热裂行为进行研究,提出了评价合金热裂倾向性大小的指标,探索出研究铝合金热裂行为和热裂机理的新途径.

1 实验材料及方法

1.1 实验合金及浇注工艺

本实验为了研究不同铝合金的热裂倾向性,选取 5083, 6061, 7075 三种商业铝合金为实验合金.

熔炼在井式电阻炉中进行,每种合金取约 300 g,在黏土-石墨坩埚中熔化,熔化过程中对熔体进行 3 次充分搅拌并用六氯乙烷除气剂(占熔体质量的 1%)对熔体进行简单的除气处理,当熔体温度达到 720 °C 时做扒渣处理,静止 15 到 20 min 后出炉浇注.刚开始浇注时坩埚倾角不能过大,否则合金液易在型腔中流动过快而将滑块冲出.

1.2 实验装置及数据采集

本文采用的热裂实验装置由自由收缩位移测试模块和受阻收缩应力测试模块两部分组成.实验装置与之前的报道相同^[12].铸型浇槽上下覆盖保温材料,两侧为金属材料,并在中间区域加入保温材料,保证其与连铸过程凝固方式对应.本实验采用 Schavitz DC-SE-250 位移传感器及 NTS LRK-5KN 应力传感器.实验过程中的数据通过高灵敏度高精度的 HIOKI 数据采集器采集并记录.

2 实验结果及分析

2.1 合金自由收缩凝固过程分析

本实验利用热力学计算软件 JMatPro 计算实

验合金的固相率,结果如图 1 所示,下文对凝固过程的分析中将用到固相率数据.

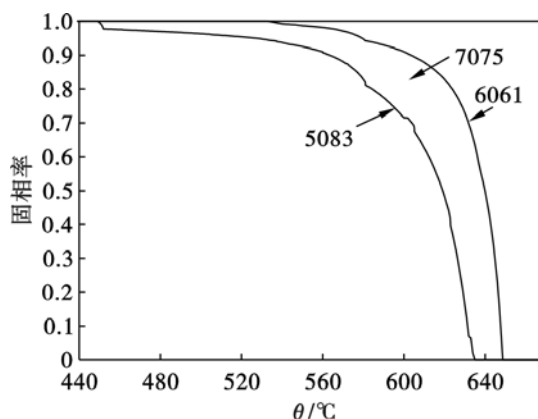


图1 合金温度-固相率曲线
Fig. 1 Temperature-solid fraction curve of tested alloys

根据自由收缩模块记录的数据作出合金凝固过程中的时间-温度/位移曲线如图 2 所示(以 7075 铝合金为例).根据曲线可将合金的凝固过程分为 4 个阶段,各阶段凝固过程示意图如图 3 所示^[13].

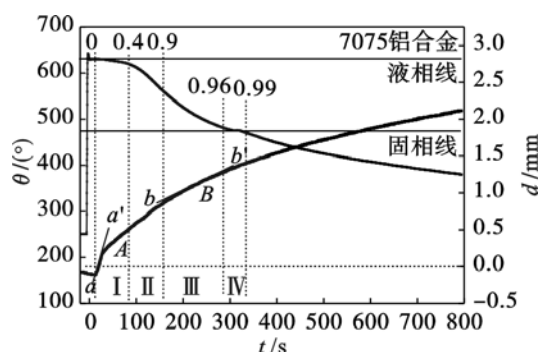


图2 7075 铝合金自由收缩时间-温度/位移曲线
Fig. 2 Free contraction time-temperature/displacement curve of 7075 aluminum alloy

第 1 阶段(Ⅰ固相形核阶段):这个阶段固相率低于 0.4,液相和固相均可自由运动.图 2 中Ⅰ段表示此阶段已凝固的合金中不存在热应力.

第 2 阶段(Ⅱ板晶填充阶段):这一阶段固相率为 0.4~0.9,生长的枝晶相互接触而形成固相骨架,剩余的液相在枝晶骨架间流动,两相区体积的热收缩伴随着液相的填充,合金继续收缩但收缩速率变小.

第 3 阶段(Ⅲ晶间隔裂阶段):在这一阶段固相率大于 0.9,金属骨架将金属液分隔开,液体被隔离在一些小区域或者被表面张力作用而固定不动.当固相骨架的可渗透性小到不允许液体流动,进一步的收缩会导致孔洞或微裂纹产生.

第 4 阶段(IV 枝晶搭桥阶段):在这一阶段接近凝固末期,铸件具有一定的强度,并且固态蠕变可以补偿进一步的收缩.处于高固相率阶段的合金凝固形成的枝晶会互相搭接、交错,与上一阶段不同,这时候已凝固的合金铸件内部有应力产生.

如果这个搭接的区域比较完整,那么铸件的强度应该远高于阻止枝晶分离所要求的强度,晶界间的结合力很高,凝固收缩所产生的应力不会对晶界造成影响,从而阻止晶间微裂纹的产生.

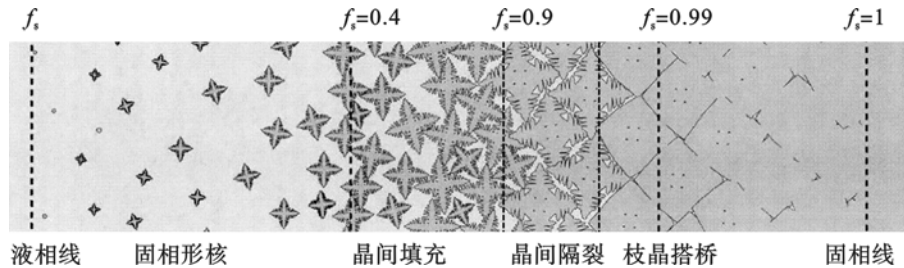


图 3 合金凝固过程示意图

Fig. 3 Schematic diagram of solidification process

合金的收缩总是在液相线以下某一温度开始,这一温度标志着连续固相骨架的形成,此后合金对外表现出收缩现象.从图 2 可以看出,曲线在第一阶段 A 点处切线 aa' 的斜率明显大于第三阶段 B 点处切线 bb' 的斜率,位移量的斜率代表的是合金铸件的平均热收缩系数 n .斜率越大则收缩系数越大,收缩越快.因此可以看出第一阶段的热收缩系数大于第三阶段的热收缩系数 n .合金的平均热收缩系数可以通过 JMatPro 软件计算获得,如图 4 所示.

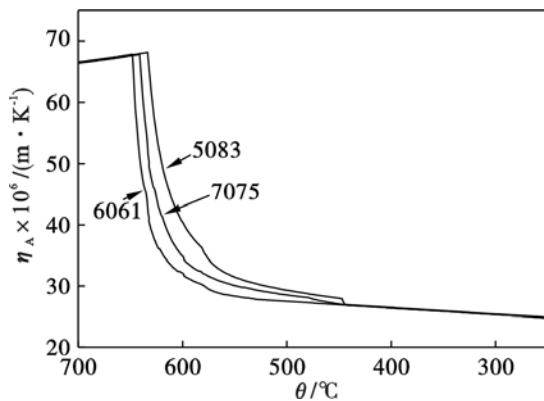


图 4 实验合金平均热收缩系数曲线

Fig. 4 Average thermal contract coefficient of tested alloys

从图 4 可看出,合金的平均热收缩系数大小顺序为 $n(5083) > n(7075) > n(6061)$,即在相同的温度区间内,平均热收缩系数大的其热应力积累也较大,则发生热裂的几率越大.

2.2 基于 Clyne - Davies 模型的热裂敏感性预测

Clyne 和 Davies^[5]认为,当固相率在 0.4 到 0.9 之间时,由于存在较多的液相,枝晶间的凝固收缩和补缩随时都可能出现,此阶段属于应力松

弛阶段,将在此范围内的凝固时间定义为 t_R .随着凝固时间的增加,凝固温度逐渐降低,固相率逐渐增大,合金对裂纹的敏感性也随之加大.将固相率在 0.9 到 0.99 之间的区域称为易脆弱区域,将此范围所对应的凝固时间定义为 t_V .热裂敏感系数 CSC (cracking susceptibility coefficient) 定义为不可补缩区凝固时间分数(t_V)和可补缩区凝固时间分数(t_R)的比值.其表达式为

$$CSC = \frac{t_V}{t_R} = \frac{t_{0.99} - t_{0.9}}{t_{0.9} - t_{0.4}} \quad (1)$$

式中: $t_{0.99}$ 为固相率为 0.99 时的时间; $t_{0.9}$ 为固相率为 0.9 时的时间; $t_{0.4}$ 为固相率为 0.4 时的时间.

由图 1 合金凝固过程中的温度 - 固相率曲线和图 2 合金凝固的温度变化曲线的数据按式(1)可以计算得出 3 种合金的 CSC 参数.图 5 所示为根据 Clyne - Davies 模型,以 CSC 参数评定的 3 种铝合金的热裂敏感性.3 种合金的 CSC 参数从大到小的顺序为: $CSC(5083) > CSC(7075) > CSC(6061)$,即通过 CSC 参数评定,预测 5083 铝合金热裂倾向最大,6061 铝合金热裂倾向最小.

2.3 合金受阻收缩凝固过程分析

图 6 为受阻收缩应力测试模块记录的数据做出的 7075 铝合金热分析曲线.由图可见 7075 铝合金在温度冷却至 553 °C 时实验装置开始测得收缩应力,此时处于凝固过程的枝晶间隔裂阶段,固相骨架基本成形,但是强度很低,收缩应力很小;继续凝固当温度降至 482 °C 时收缩应力突然上升,对应的固相率为 97.03%,此时合金铸件内部处于凝固过程的枝晶搭桥阶段,晶间结合力提高,晶界处出现不连续的微裂纹;同时相邻枝晶的迅速搭接使得铸件急剧收缩,应力增加速率很大,应力

的迅速累积易导致铸件内部出现应力集中, 由于合金铸件内部的液相很少且被搭接的枝晶隔离成小区域, 进一步收缩便形成孔洞或微裂纹, 无法对因凝固受阻被拉断的枝晶形成有效的补缩, 在应力集中的作用下孔洞或微裂纹扩展成宏观热裂纹. 因此在枝晶搭桥阶段的应力增加速率越大, 孔洞或微裂纹扩展的倾向性就越大, 热裂越容易发生.

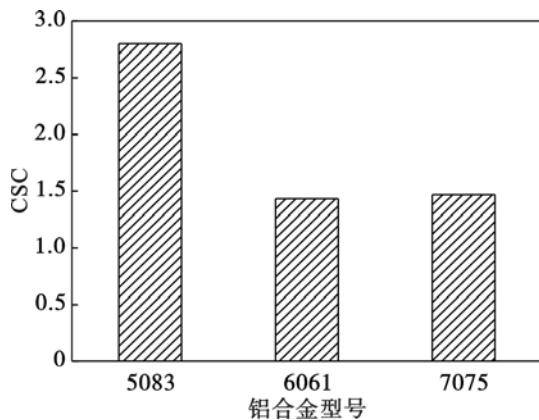


图5 铝合金的热裂敏感性 CSC 值

Fig. 5 Hot tearing susceptibility of aluminium alloys

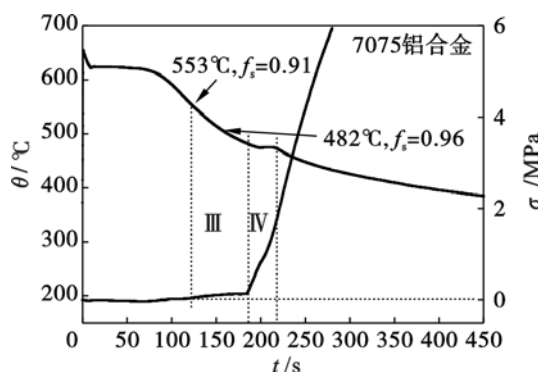


图6 7075 铝合金受阻收缩时间-温度/应力曲线

Fig. 6 Blocked contraction time-temperature/stress curve of 7075 aluminium alloy

由图6中的应力值对时间求微分, 可得图7所示的温度-应力/应力变化速率曲线. 在应力急剧上升过程中, 应力增加速率出现一个明显的波峰. 此波峰上升阶段的斜率可以表征这段时间内应力累积的程度, 其值越大, 表明合金的热裂倾向性就越大, 其表达式为

$$k = (\sigma_2 - \sigma_1) / (\theta_1 - \theta_2) = \Delta(d\sigma/dt) / \Delta\theta \quad (2)$$

式中: k 为应力累积系数; σ_2 为波峰的最高点所对应的应力增加速率值; σ_1 为波峰的最低点所对应的应力增加速率值; θ_2 为波峰的最高点对应的温度值; θ_1 为波峰的最低点对应的温度值.

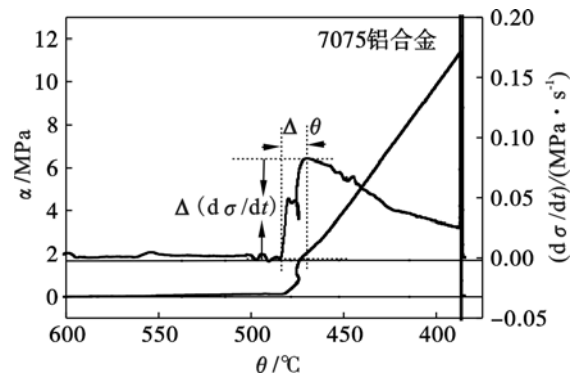


图7 7075 铝合金受阻收缩温度-应力/应力变化速率曲线

Fig. 7 Blocked contraction temperature-stress/stress change rate curve of 7075 aluminium alloy

根据实验数据做出的合金受阻收缩过程中的热分析曲线按式(2)求出3种实验合金在枝晶搭桥阶段的应力累积系数 k 值, 如图8所示. 可以看出3种实验合金的 k 值明显不同, 其中5083合金的 k 值最大, 约为 $10.75 \times 10^{-3} \text{ MPa}/(\text{s} \cdot ^\circ\text{C})$, 7075合金次之约为 $5.57 \times 10^{-3} \text{ MPa}/(\text{s} \cdot ^\circ\text{C})$, 6061合金的 k 值最小约为 $2.60 \times 10^{-3} \text{ MPa}/(\text{s} \cdot ^\circ\text{C})$.

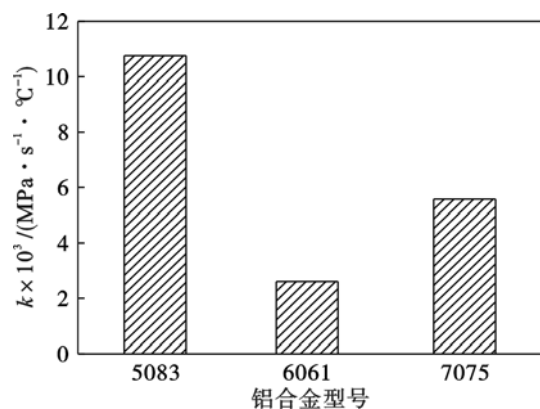


图8 实验合金的应力累积系数 k 值

Fig. 8 Accumulating stress coefficient (k) of tested alloys

由此可知, 6061合金在合金凝固的枝晶搭桥阶段应力迅速累积的程度最小, 因此其铸件在凝固末期内部孔洞或微裂纹扩展成为宏观热裂纹的倾向性最小; 而7075合金与5083合金在此阶段应力的累积程度较大, 铸件内部的应力集中很容易超过此状态下枝晶间的结合力, 使得铸件出现宏观可见的热裂纹.

综上所述, 热裂纹形成的原因在于晶间收缩得不到补偿. 在凝固末期, 晶间液相收缩形成孔洞或微裂纹, 外力作用如果造成枝晶搭桥的破断, 这些孔洞或微裂纹将连接而扩展为热裂纹. 相比于 Clyne-Davies 模型的热裂敏感性系数 (CSC), 合

金凝固末期的 k 值可以综合反映出此时合金铸件内部的应力累积及液相补缩的情况,从而比较不同合金的热裂倾向性大小,且 k 值计算所用数据均为实验装置在实际凝固过程中测得,能够客观准确地反映合金的凝固过程。

3 结 论

1) 相比于现有的铝合金热裂研究方法,本实验装置可以记录铝合金凝固过程中温度、收缩位移和收缩应力的细微变化,总结出铝合金凝固过程不同阶段的特征,为深入研究铝合金的热裂行为和热裂形成机理创造了条件。

2) 利用热力学软件 JMatPro 计算得到了实验合金凝固过程中的固相率和平均热收缩系数,利用固相率数据结合实验装置测得的合金凝固温度变化曲线按 Clyne - Davies 模型计算出合金的热裂敏感性系数(CSC),预测铝合金的热裂敏感性大小为 $CSC(5083) > CSC(7075) > CSC(6061)$ 。

3) 提出了衡量合金热裂倾向性大小的应力累积系数(k),得出 3 种铝合金的热裂倾向性大小顺序为 $k(5083) > k(7075) > k(6061)$,实验结果与实际铸造过程及 CSC 值预测的结果相符,表明采用 k 值衡量合金的热裂倾向性具有可行性,且相比于 CSC 值更客观准确。

参考文献:

- [1] 潘复生,张丁非. 铝合金及应用[M]. 北京:化学工业出版社,2006:347-386.
(Pan Fu-sheng, Zhang Ding-fei. Aluminum alloy and its application [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2006: 347-386.)
- [2] 彭学仕,王嵩茹,匡永详. 半连续铸锭缺陷及其预防措施(1)[J]. 铝加工,1993(3):2-10.
(Peng Xue-shi, Wang Ai-ru, Kuang Yong-xiang. The defect and preventive measures of semi-continuous casting(1)[J]. *Aluminium Fabrication*, 1993(3):2-10.)
- [3] Borland J C. Fundamentals of solidification cracking in welds, part 2[J]. *Welding and Metal Fabrication*, 1979, 3:99-107.
- [4] 李庆春. 铸件形成理论基础[M]. 北京:机械工业出版社,1982:252-253.
(Li Qing-chun. Mechanism of casting formation [M]. Beijing: China Machine Press, 1982:252-253.)
- [5] Clyne T W, Davies G J. The influence of composition on solidification cracking susceptibility in binary alloy systems [J]. *The British Foundryman*, 1981, 74:65-73.
- [6] 丁浩,傅恒志,刘忠元. 凝固收缩补偿与合金的热裂倾向[J]. 金属学报,1997,33(9):921-926.
(Ding Hao, Fu Heng-zhi, Liu Zhong-yuan. Solidification contraction compensation and hot cracking tendency of alloys [J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 1997, 33(9):921-926.)
- [7] Suyitno S T, Kool W, Katgerman L. Integrated approach for prediction of hot tearing [J]. *Metallurgical and Material Transactions A*, 2009; 40:2388-2400.
- [8] Novikov I I, Novik F S. Mechanism of plastic deformation of alloys in the range of melting temperatures [J]. *Doklady Akademii Nauk SSSR*, 1963, 7:1153-1155.
- [9] Novikov I I, Grushko O E. Hot cracking susceptibility of Al-Cu-Li and Al-Cu-Li-Mn alloys [J]. *Material Science Technology*, 1995, 11:926-932.
- [10] Cao G, Kou S. Hot cracking of binary Mg-Al alloy castings [J]. *Materials Science and Engineering A*, 2006, 417:230-238.
- [11] Ding H, Fu H Z. Effect of grain boundary's state on the hot cracking tendency of directionally solidified Al-Cu and rene 125 alloys [J]. *Rear Metal Materials and Engineering*, 2000, 9(4):228-230.
- [12] 李浩宇,柏媛媛,张海涛,等. Mn 对 Mg-6.5Zn 合金热裂倾向性的影响[J]. 金属学报,2014,50(10):1237-1243.
(Li Hao-yu, Bai Yuan-yuan, Zhang Hai-tao, et al. Effect of Mn on hot cracking tendency of Mg-6.5Zn alloys [J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2014, 50(10):1237-1243.)
- [13] 周乐. Mg-Zn-(Al)系合金热裂敏感性及其微观机理研究[D]. 沈阳:沈阳工业大学,2011.
(Zhou Le. Investigations on hot tearing susceptibility and mechanism for Mg-Zn-(Al) alloys [D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2011.)