

文章编号: 1004 - 0609(2006)04 - 0606 - 06

# 稀土 Ce 对 Al-Cu4.5% 合金热疲劳性能的影响<sup>①</sup>

司乃潮, 郭毅, 李国强

(江苏大学材料科学与工程学院, 镇江 212013)

**摘要:** 在接近材料实际工况的实验条件下, 以铝铜合金(Cu4.5%)为研究对象, 用自约束型热疲劳实验机对铈加入量不同的合金, 进行了热疲劳实验以及热疲劳裂纹萌生及扩展规律的研究。结果表明: 在裂纹萌生阶段, 不加铈的铝铜合金的裂纹萌生速度明显大于加铈的合金; 在裂纹扩展阶段, 不加铈的铝铜合金裂纹扩展速度仍是最快。加入 0.5% Ce 的合金在裂纹形成后期扩展速度明显加快, 这是因为合金中出现针状富稀土相, 这种针状相割裂了基体, 使得合金力学性能降低、热疲劳抗力下降。加入 0.3% Ce 的合金不论在裂纹萌生阶段还是裂纹扩展阶段, 其热疲劳抗力都优于其它成分的合金。

**关键词:** 铈; 铝铜合金; 热疲劳性能; 晶粒细化; 裂纹扩展

中图分类号: TG 142.1

文献标识码: A

## Effect of RE cerium on thermal fatigue property of Al-4.5% Cu alloy

SI Nai-chao, GUO Yi, LI Guo-qiang

(School of Materials Science and Engineering,  
Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

**Abstract:** Under the experimental condition similar to practical working environment, thermal fatigue test of Al-4.5% Cu alloy with different Ce additions was carried out on self-restrict thermal fatigue experimental machine. And the initiation and propagation of thermal fatigue crack were studied. The results show that during the initiation of thermal fatigue crack, the velocity of crack initiation of Al-4.5% Cu alloy without Ce addition is obviously greater than that of alloy with Ce addition, and during the period of crack propagating, the largest propagation velocity occurs under the former condition. After the initiation of crack, the crack propagating of alloys with 0.5% Ce addition is accelerated evidently because of the appearance of needle rear earth rich phases which diserver the matrix and lead to the decrease of mechanical properties and thermal fatigue resistance. The thermal fatigue resistance of alloy with 0.3% Ce addition is superior to that of other alloys, during crack initiating and propagating.

**Key words:** Ce; AlCu alloy; thermal fatigue property; grain refinement; crack propagation

目前对合金热疲劳性能的研究主要以耐热钢和高温合金为研究重点<sup>[1, 2]</sup>, 而对铝基合金的研究相对较少<sup>[3, 4]</sup>。铸造铝合金由于其密度小、比强度高特点, 广泛应用于航空、航天、汽车、机械等行业。稀土元素在黑色金属中的应用, 国内外在这方面已经做了大量工作, 并且成熟的运用于钢铁工业中<sup>[5-7]</sup>。在铝合金中稀土的应用也已越来越广泛,

近年来人们发现稀土能在铝合金中形成金属间化合物, 使晶界强化, 并明显提高合金的耐热性。对铝铜合金的大量研究表明, 通过加入微量元素合金化(如铈、钛等), 能够缩小结晶温度间隔, 增加热脆区的强度和塑性, 细化晶粒, 改善合金铸造性能等, 均可在一定程度上提高合金的热疲劳性能。热疲劳性能与合金在凝固过程中的力学行为、晶界状

① 收稿日期: 2005 - 10 - 08; 修订日期: 2006 - 01 - 12

通讯作者: 司乃潮, 教授; 电话: 0511 - 8780194; E-mail: snc@ujs.edu.cn

态以及合金在凝固过程的自身特点有密切关系。然而直到现在, 人们对热疲劳的认识仍不很全面, 国内热疲劳的研究还比较落后, 生产实践中的热疲劳问题也没有得到彻底解决<sup>[8-10]</sup>。

本文作者通过分组实验, 研究铈加入量不同时对铝铜合金热疲劳性能的影响, 并探讨其影响机制, 通过实验确定铈的最佳加入量。通过测定在热疲劳过程中不同循环次数下不同成分合金的裂纹的萌生和扩展, 对热疲劳裂纹的形貌、萌生位置和扩展方向进行研究, 探讨影响热疲劳抗力的微观机制。

## 1 实验

实验用合金材料是铝铜合金 (Cu 4.5%), 在 SG2-5-10 型坩埚电阻炉中熔炼, 采用石墨制坩埚, 在坩埚中依次放入铝铜合金及其他元素, 加热至熔化, 铈的加入量为 0.1%~0.7%, 除气精炼, 约 5 min 后扒渣浇注, 在空冷后制取金属试样。采用同一炉浇注的楔形试样的同一位置切取试样。试样尺寸为 40 mm×20 mm×5 mm, 热疲劳试样为测试热疲劳裂纹萌生寿命及扩展速率是有预制裂纹的 V 型缺口试样, V 型缺口长 3 mm, 形状如图 1 所示。

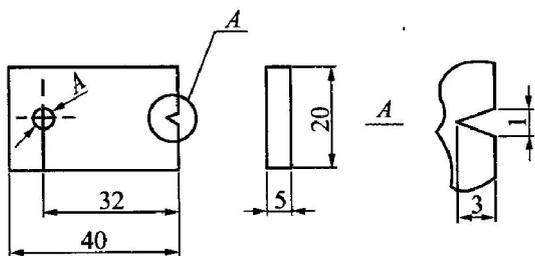


图 1 热疲劳试样图

Fig. 1 Sketch map of thermal fatigue test sample (mm)

采用电阻炉加热自约束热疲劳实验机进行热疲劳实验。板状试样装卡在立方卡具的 4 个侧面, 保证每块试样的加热与冷却位置一致。通过传动装置上下垂直运动, 从而达到试样加热以及冷却的自动化完成。采用设时自控, 热电偶测量并控制温度。试样在室温 25 °C 至 300 °C 之间进行加热与冷却的热循环。采用计数器进行自动计数。

## 2 结果与分析

### 2.1 稀土 Ce 加入量不同时材料热疲劳裂纹的形貌

选定 Ce 加入量 0.1%~0.7% (质量分数) 和

加入 Ce 的铝铜合金作为研究对象, 从 1 000 次到 6 000 次热循环时各组织的热疲劳裂纹的扩展形貌进行研究, 结果见图 2、图 3 和表 1。

从图 2 可见, 在 4 000 次循环后, 裂纹已经开始非常少量的萌生, 而未加稀土的合金裂纹的扩展速率已经很快了。从图 3 可见, 在进行到 6 000 次循环时, 各试样的热疲劳裂纹在长度、宽度及深度等方面发展较快, 裂纹变得粗大清晰。0.1% Ce、0.5% Ce 的合金裂纹变得非常粗大 (特别是 0.5% Ce 的合金), 裂纹尖端的分枝继续择优扩展, 其附近出现一些不连续、不规则的微裂纹, 且裂纹的缝隙内出现明显的氧化迹象。0.3% Ce 的合金主裂纹也形成可扩展裂纹, 但较为均衡的扩展, 主裂纹相对其他成分的合金扩展较慢, 但裂纹的缝隙也出现氧化迹象。比较每种组织的裂纹情况, 发现 0.1% Ce、0.5% Ce 的合金裂纹长且粗, 0.3% Ce 的合金裂纹短而细。

热疲劳裂纹一般在晶界处形成, 热疲劳裂纹之所以容易在晶界处萌生、扩展, 主要是晶界为合金薄弱环节, 在高温空气环境下, 由于氧在晶界上的削弱作用, 使材料表现为高脆性, 从而加剧了热疲劳裂纹形成、扩展。裂纹在晶界杂质相区中形成的同时, 铝基体相内虽无裂纹产生, 但会发生明显的塑性变形, 在 V 型缺口边缘上出现凹坑, 故缺口边缘凹凸不平。随着循环次数的增加, 塑性变形增大, 当达到某一极限值后又逐渐减慢, 最后停止, 而随之在凹坑底部萌生出裂纹 (见图 3)。由于各个试样的铝基体相显微组织不同 (Ce 加入量不同), 在相同循环次数下, 所出现的凹坑数目及尺寸大小也不相同, 即塑性变形的程度不同, 凹坑底部出现裂纹的早晚及数目、大小各不相同。但是, 裂纹优先选择在晶界杂质相区内形成这一点是相同的, 其中有一条成为能使试样最终断裂的主裂纹。

热疲劳裂纹扩展趋势列于表 1。表 1 中的裂纹长度为试样表面裂纹的总长度。可以看出 Ce 加入量不同对裂纹扩展的影响。

### 2.2 含 Ce 合金的微观组织对裂纹萌生与扩展的影响

微量元素对合金晶粒细化程度的影响如图 4 所示。当加入 0.3% Ce 时, 组织明显细化; 加入 0.1% Ce 和加入 0.5% Ce 时, 组织细化效果不是很明显, 部分枝晶还很粗大。

用电子探针对合金进行微区和面分布分析, 发现 Ce 主要富集在枝晶间晶界处。由于 Ce 在 AlCu 合金中的溶解度很低, 合金在凝固过程中, 使 Ce

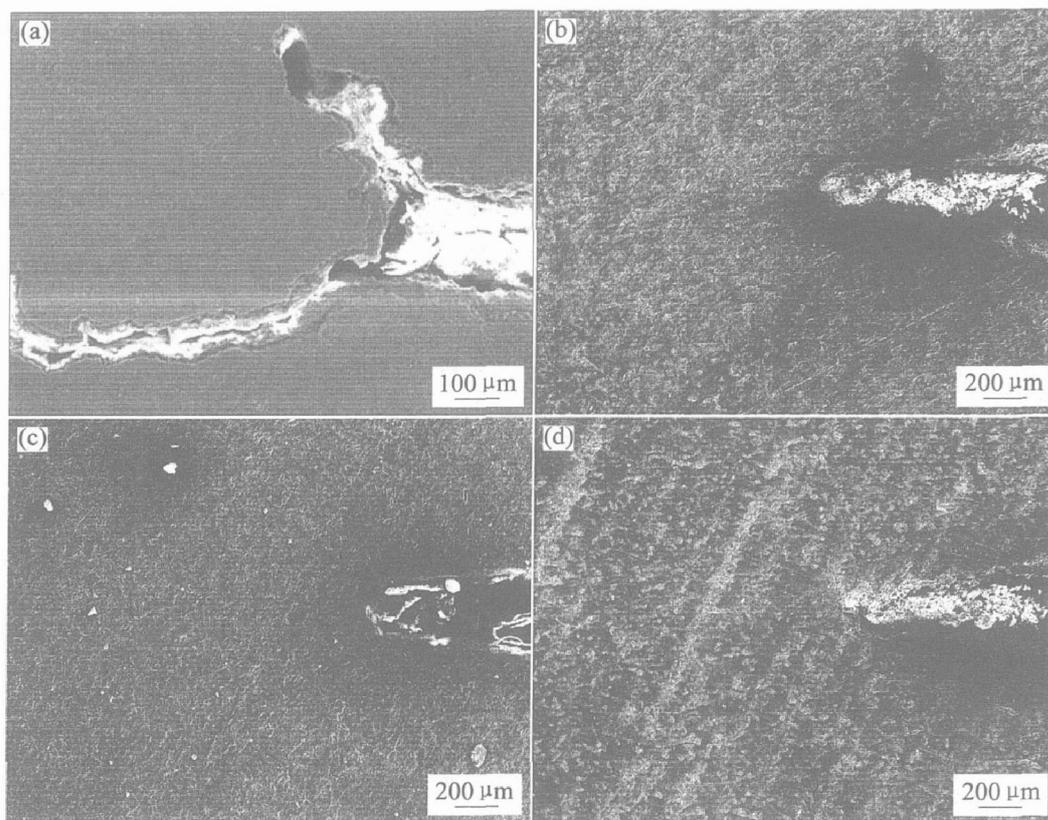


图 2 铈含量不同的合金热疲劳裂纹的扩展形貌

Fig. 2 Morphologies of thermal fatigue crack of alloy with different Ce contents (4 000 times)  
(a) 0% Ce; (b) 0.1% Ce; (c) 0.3% Ce; (d) 0.5% Ce

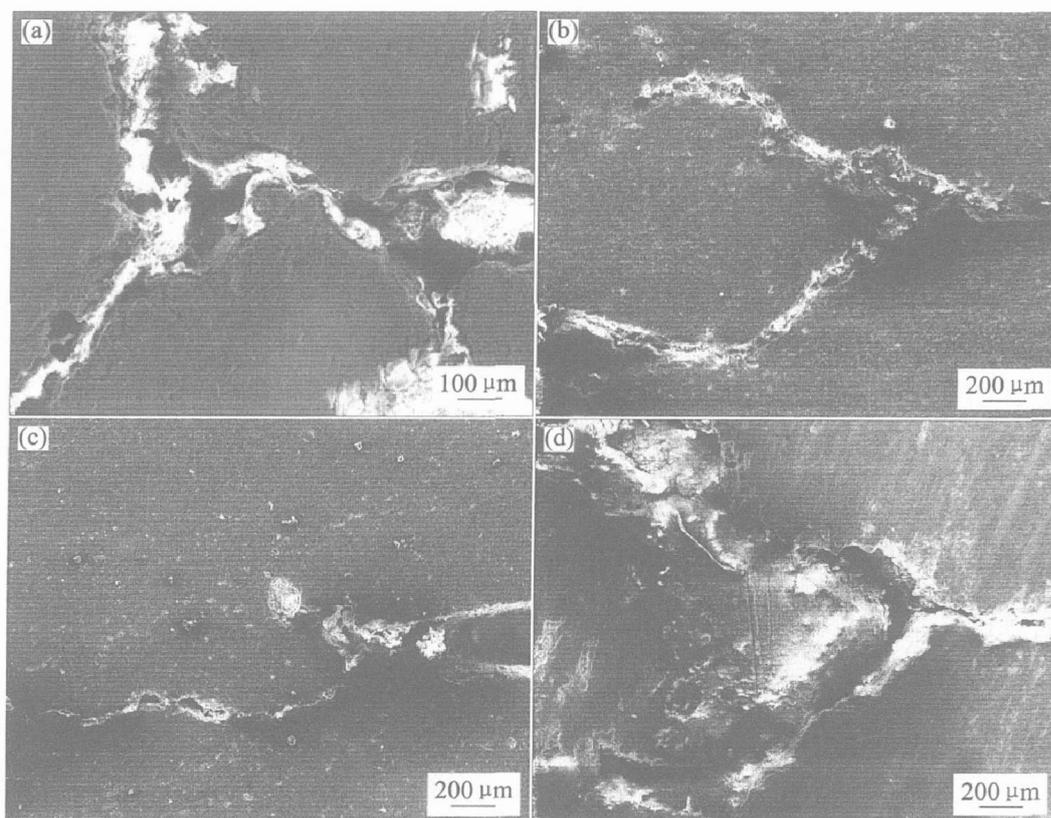


图 3 铈含量不同的合金热疲劳裂纹的扩展形貌

Fig. 3 Morphologies of thermal fatigue crack of alloy with different Ce contents (6 000 times)  
(a) 0% Ce; (b) 0.1% Ce; (c) 0.3% Ce; (d) 0.5% Ce

表 1 铈含量不同的合金热疲劳裂纹扩展数据

Table 1 Data of thermal fatigue crack propagation with different Ce contents after different thermal cycles (mm)

$w(\text{Ce})/\%$	1 000 times	2 000 times	3 000 times	3 500 times	4 000 times	4 500 times	5 000 times	5 500 times	6 000 times
0.1	0	0	0.55	1.53	2.65	4.15	8.241	4.46	20.32
0.2	0	0	0	0.72	1.76	3.58	7.36	13.23	18.64
0.3	0	0	0	0	1.14	2.36	4.54	7.14	13.41
0.4	0	0	0	0.87	1.85	3.15	6.56	9.97	15.15
0.5	0	0	0.96	2.02	3.18	5.36	10.84	16.47	22.84
0.6	0	0	1.26	2.65	4.82	6.28	12.05	17.96	24.75
0.7	0	0	1.85	3.85	5.65	7.85	13.95	18.45	25.06

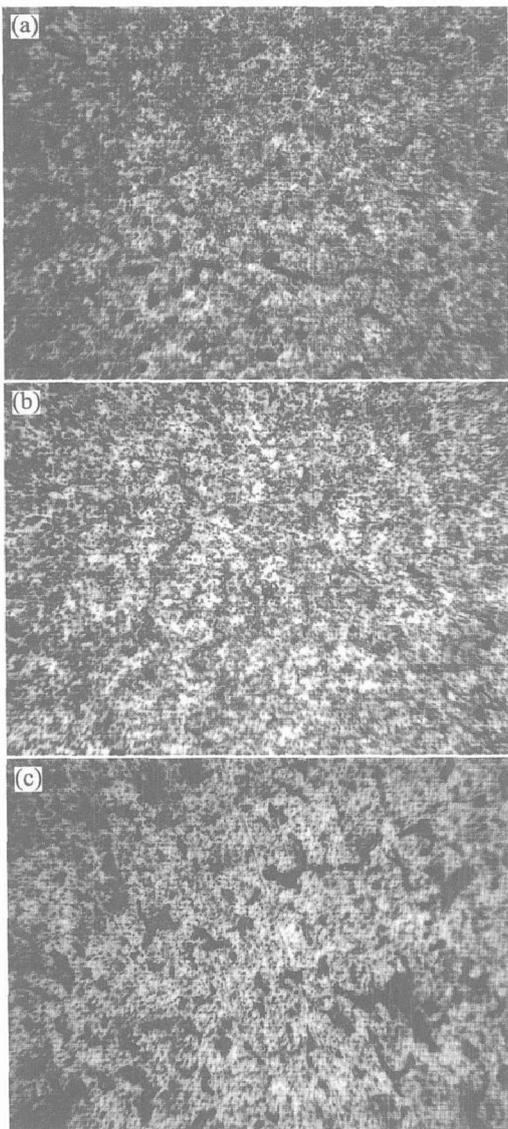


图 4 不同铈含量合金的微观组织

Fig. 4 Microstructures of Al-4.5% Cu alloy with different Ce contents

(a) —0.1% Ce; (b) —0.3% Ce; (c) —0.5% Ce

富集在枝晶的凝固前沿, 增大了合金的成分过冷, 使枝晶细化。未加入 Ce 的合金, 枝晶粗大, 断裂主要是沿枝晶间进行; 加入 Ce 后枝晶明显变得细小,

使枝晶联成骨架的温度推迟, 凝固相线下降。加入 Ce 既能使枝晶分枝和细化<sup>[11]</sup>, 又使凝固后期的枝晶间的联系增强。

另外晶粒细化, 可使合金强度、塑性和韧性得到提高。因为晶粒愈细, 在一定体积内的晶粒数目越多, 则在同样的变形量下, 变形分散在更多的晶粒内进行。这样, 变形的不均匀性越小, 相对来说引起的应力集中也越小, 开裂的机会也就相应的减少了。而且, 晶粒越细, 晶界的曲折越多, 更不利于裂纹的传播, 从而使其在断裂前可以承受较大的塑性变形, 即表现出较高的塑性。由于在细晶粒金属中, 裂纹不宜产生也不宜扩展, 因而在断裂过程中吸收了更多的能量, 既表现出较高的韧性<sup>[12]</sup>。

热疲劳抗力是合金组织敏感性指标, 与合金的显微组织结构关系密切<sup>[13]</sup>。热疲劳试样中的 V 型缺口是有目的造成的一个应力集中区, 在热循环过程中, 它又是热应力集中区, 缩短了热疲劳裂纹在合金中的孕育期, 故经过数次循环后, 裂纹首先在 V 型缺口边缘上萌生。热疲劳裂纹是沿晶界边界扩展的, 主要裂纹源于晶界, 即试件应变集中区边缘有晶界露头, 疲劳裂纹在该处形成, 沿晶界向内扩展, 内部二次裂纹也萌生在晶界, 且沿晶界扩展和主裂纹连接。因此合金组织中晶界越是细小, 裂纹扩展所受到的阻力越大, 热疲劳抗力增加, 所以合金中加入铈会明显增加合金的热疲劳抗力。

### 2.3 Ce 对铝铜合金力学性能影响的机理分析

合金成分不同, 材料的力学性能也不同。不同 Ce 含量合金的力学性能如图 5 所示。

抗拉强度及屈服强度随着 Ce 含量的增加表现出先升高, 后下降的趋势。这主要是以下几方面造成的:

1) Ce 元素的加入, 增大了成分过冷区, 减小

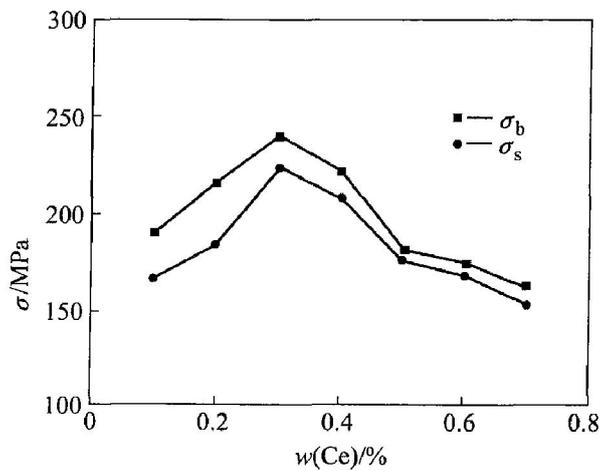


图5 铈含量对合金力学性能的影响

Fig. 5 Effects of Ce contents on mechanical properties of alloy

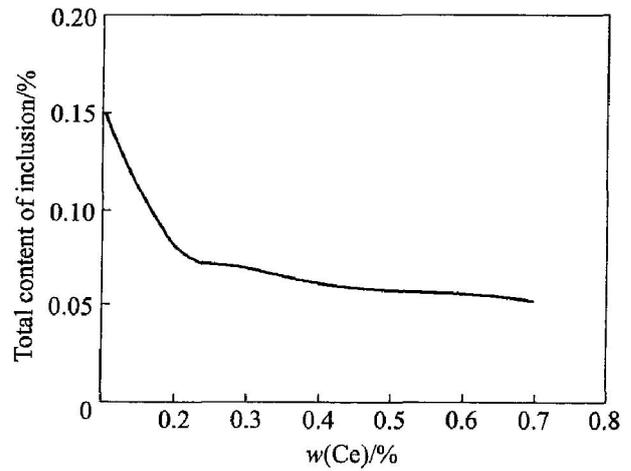


图6 铈含量对铝合金夹杂物数量的影响

Fig. 6 Effects of Ce content on inclusion amount of Al alloy

了二次枝晶间距,使组织更加细密,降低了铝熔体形核时所需的表面张力,继而细化晶粒,提高了机械强度。铝合金的晶界为网络状(铝+针状物),而在加稀土的铝中,这种晶界逐渐消失,代之的沿晶界分布的断续长条相;同时铝晶粒内出现短柄状及球状颗粒相,产生晶界强化作用,而杂质相细小均匀分布也有利于提高延伸率。

2) 虽然Ce元素在铝中的溶解度极小,但铸造条件下,稀土铝是在非平衡状态下结晶,冷却速度较快,Ce在铝中的溶解度是过饱和的。因此,稀土元素在铝合金中的固溶强化作用是不可忽视的。

3) 稀土元素与铝合金中不同合金元素的交互作用不同,对于与稀土元素交互作用大的元素,如铁、硅,稀土元素的加入将产生强烈的交互作用,减少其固容量,增大化合物形成的趋势和能力。而这些高熔点的难熔金属间化合物相强度较高,分布在Al组织中,起到了强化作用<sup>[14, 15]</sup>。

4) Ce对去除杂质的作用及对夹杂物数量的影响。事实上,材料的机械性能不仅与组织晶粒的大小有关,而与枝晶间距及气孔、夹杂物、偏析等组织缺陷也有关。所以,Ce可以通过去除夹杂物提高其机械性能。铝合金的夹杂物主要是Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>等非金属夹杂物,其存在不仅使合金的加工性能降低,而且使铸造性能恶化。相关研究表明<sup>[16, 17]</sup>,经稀土处理后的合金,金属夹杂物的数量可明显降低,其尺寸也有所降低,夹杂物形状也趋于圆球状。图6表明,在铝铜合金中,当Ce含量小于0.7%时,随着稀土含量的增加,夹杂物的含量减少,稀土添加量在0.3%左右时,使夹杂物量下降的幅度最大。

5) Ce具有一定的变质作用。在铝合金中,添

加适量Ce<0.5%,可使α铝晶粒细化。

6) 加入Ce过多时反而使力学性能有所降低,其原因是由于偏析造成的。因为铝与Ce元素密度偏差较大(Ce为6.81 g/cm<sup>3</sup>,铝合金液约为2.7 g/cm<sup>3</sup>),而Ce元素在铝液中的扩散系数很小。采用恒电位法测量时,Ce在Al-Ce合金液中的扩散系数,当T=973 K时, $\overline{D}_{ce} = (1.2 \pm 0.1) \times 10^{-5} \text{ cm}^2$ 。由于Ce元素在铝液中扩散能力有限,尤其向上扩散困难,因此,合金中存在Ce元素的偏析。特别是Ce含量大于0.4%以后,随着Ce含量的增加,组织中存在着宏观偏析和微观组织。这种宏观、微观的偏析导致组织不均匀,从而使力学性能下降。

合理的方法使材料的强度和韧性得到最佳的配合,使材料的不均匀性及局部应力得以降低和消除,因此能够保证材料的显微组织热循环稳定性达到最佳<sup>[18]</sup>。所以说当材料的强度和韧性得到最佳的配合时,合金的热疲劳抗力可以达到较高的程度,而晶粒细化正是使合金得到较好的综合力学性能。

## REFERENCES

[1] 王泓. 材料疲劳裂纹扩展和断裂定量规律的研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2002.  
WANG Hong. Quantitative Assessment of Fatigue and Fracture Properties of Materials [D]. Xi'an: Northwest Industrial University, 2002.

[2] 江红. 微观组织对热锻模具钢热疲劳性能的影响[D]. 长春: 吉林大学, 2001.

- JIANG Hong. Effects of Microstructure on Thermal Fatigue Property of Hot Working Die Steel [D]. Changchun: Jilin University, 2001.
- [3] Samrout H, Elabdi R. Fatigue behavior of 28CrMoV5 steel under thermo mechanical loading [J]. *Int J Fatigue*, 1998, 20(8): 555 - 563.
- [4] 胡海云, 鲁长宏. 金属热疲劳的非平衡统计理论研究 [J]. 北京理工大学学报, 2001, 4(2): 146 - 150.  
HU Haiyun, LU Changhong. Non-equilibrium statistical theory for the thermal fatigue of metals [J]. *Journal of Beijing Institute of Technology*, 2001, 4(2): 146 - 150.
- [5] 王龙妹. 稀土元素在新一代高强韧钢中的作用和应用前景 [J]. 中国稀土学报, 2004, 22(1): 48 - 54.  
WANG Longmei. Application prospects and behavior of RE in new generation high strength steels with superior toughness [J]. *Journal of The Chinese Rare Earth Society*, 2004, 22(1): 48 - 54.
- [6] Yang Q X, Liao B, Liu J H. Effect of rare earth elements on austenite growth dynamics of steel 60GrMnMo [J]. *Journal of Rare Earths*, 1998, 16(3): 274 - 277.
- [7] Son Y W, Luo Q S, Chen Q D. Effect of RE-B modification on the strength and toughness of 30GrMn2Si cast steel [J]. *Journal of Material Science*, 1994, 29(6): 1492 - 1496.
- [8] 李元元, 郭国文, 张卫文, 等. 合金元素对 AlCu 合金热裂倾向的影响 [J]. 中国有色金属学报, 2001, 11(5): 791 - 795.  
LI Yuan-yuan, GUO Guo-wen, ZHANG Wei-wen, et al. Effects of alloying elements on hot tearing trends of AlCu alloy [J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2001, 11(5): 791 - 795.
- [9] 王光国. 材料特性对铝铸件热疲劳强度的影响 [J]. 内燃机, 1999, 3: 32 - 36.  
WANG Guang-guo. The effect of material property on thermal fatigue intensity of Al casting [J]. *Journal of Internal Combustion*, 1999, 3: 32 - 36.
- [10] 张文孝, 郭成璧. 铝合金的热疲劳特性及断裂力学计算分析 [J]. 固体力学学报, 2002, 9(3): 361 - 365.  
ZHANG Wen-xiao, GUO Cheng-bi. Thermal fatigue and fracture mechanics analysis of aluminum alloy [J]. *Acta Mechanica Solida Sinica*, 2002, 9(3): 361 - 365.
- [11] Saccone A E. Phase equilibria in the rare earth metals (R)-rich regions of the R-Al systems (R = La, Ce, Pr, Nd) [J]. *Z Metallkunde*, 1996, 87(2): 82 - 87.
- [12] 于升学, 邵力, 蔡大勇, 等. 稀土元素对半钢冲击疲劳性能的影响 [J]. 中国稀土学报, 2002, 20(4): 339 - 341.  
YU Sheng-xue, SHAO Li, CAI Da-yong, et al. Effect of rare earths on impact fatigue property of cast semi-steel [J]. *Journal of the Chinese Rare Earth Society*, 2002, 20(4): 339 - 341.
- [13] 尤显卿. 显微组织结构对 GJW35 钢结硬质合金热疲劳性能的影响 [J]. 稀有金属与硬质合金, 1999, 6: 22 - 27.  
YOU Xian-qing. Influence of the microstructure on the thermal fatigue properties of steel bonded carbide GJW35 [J]. *Journal of Rare Metal and Nonferrous Alloy*, 1999, 6: 22 - 27.
- [14] 廖恒成, 孙瑜, 孙国雄, 等. 混合稀土对 Sr 变质近共晶 AlSi 合金组织的影响 [J]. 中国有色金属学报, 2000, 10(5): 640 - 644.  
LIAO Heng-cheng, SUN Yu, SUN Guo-xiong, et al. Effect of mischmetal on microstructures of near-eutectic AlSi alloy modified with Sr [J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2000, 10(5): 640 - 644.
- [15] 王迎新, 关绍康, 王建强. RE 对 Mg-8Zr-4Al-0.3Mn 合金组织的影响 [J]. 中国有色金属学报, 2003, 13(3): 616 - 621.  
WANG Ying-xin, GUAN Shao-kang, WANG Jian-qiang. Effects of RE on microstructures of Mg-8Zr-4Al-0.3Mn magnesium alloys [J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2003, 13(3): 616 - 621.
- [16] 郭旭涛, 李培杰, 曾大本, 等. 混合稀土去除再生镁合金中的夹杂 [J]. 中国有色金属学报, 2004, 14(8): 1295 - 1300.  
GUO Xu-tao, LI Pei-jie, ZENG Da-ben, et al. Inclusions decrease in recycling magnesium alloy with rare earths [J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2004, 14(8): 1295 - 1300.
- [17] ZENG Xiao-qin, WANG Qu-dong, et al. Influence of beryllium and rare earth additions on ignition proof magnesium alloys [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2001, 112(1): 16 - 23.
- [18] 雷廷权, 李全友. 金属热处理工艺方法 500 种 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1998. 102 - 117.  
LEI Ting-quan, LI Quan-you. 500 Techniques for Thermal Treatment of Metal [M]. Beijing: China Machine Industry Press, 1998. 102 - 117.

(编辑 陈爱华)