

# Cr 元素对 Al-Mg-Si-Cu 铝合金组织与性能的影响

Effects of Cr on Microstructure and Properties  
of Al-Mg-Si-Cu Aluminum Alloy

张新明<sup>1,2</sup>, 周志乐<sup>1,2</sup>, 唐建国<sup>1,2</sup>, 柯彬<sup>1,2</sup>, 胡继龙<sup>1,2</sup>, 欧阳惠<sup>1,2</sup>

(1 中南大学 材料科学与工程学院, 长沙 410083;

2 有色金属材料科学与工程教育部重点实验室, 长沙 410083)

ZHANG Xin-ming<sup>1,2</sup>, ZHOU Zhi-le<sup>1,2</sup>, TANG Jian-guo<sup>1,2</sup>,

KE Bin<sup>1,2</sup>, HU Ji-long<sup>1,2</sup>, OUYANG Hui<sup>1,2</sup>

(1 School of Materials Science and Engineering, Central South University, Changsha 410083, China; 2 Key Laboratory of Nonferrous Metal Materials Science and Engineering (Ministry of Education), Changsha 410083, China)

**摘要:** 采用光学显微镜、扫描电镜、透射电镜、硬度测试、拉伸测试等方法研究 Cr 元素对 Al-Mg-Si-Cu 铝合金组织与性能的影响。结果表明: Cr 元素可以细化合金的铸态组织, 促进  $\beta$ -AlFeSi 相向  $\alpha$ -AlFeSi 相转变, 并与基体结合形成  $\text{Al}_7\text{Cr}$  化合物等弥散相, 显著抑制合金再结晶的产生及其晶粒长大。随着 Cr 含量的增加, 合金的强度与塑性得到了显著的提高。当 Cr 含量超过 0.20% (质量分数) 时, 合金的强度和塑性却出现了一定程度的降低。这主要是由于 Cr 元素与 Fe、Si 元素结合形成大量的 AlFeCrSi 相, 减少了合金中  $\text{Mg}_2\text{Si}$  相的析出, 减弱了合金的时效强化效果。

**关键词:** Al-Mg-Si-Cu 铝合金; Cr 含量; 组织; 力学性能

**doi:** 10.3969/j.issn.1001-4381.2013.12.009

**中图分类号:** TG146.2    **文献标识码:** A    **文章编号:** 1001-4381(2013)12-0049-05

**Abstract:** The effects of Cr on the microstructures and properties of Al-Mg-Si-Cu aluminum alloy were studied by hardness test, tensile test, TEM, SEM and energy spectrum analysis. The results show that Cr addition promotes the phase transition from  $\beta$ -AlFeSi to  $\alpha$ -AlFeSi. The formation of  $\text{Al}_7\text{Cr}$  dispersion phase inhibits the generation and growth of recrystallization. However, Cr and Fe, Si element prior form the combination of AlFeCrSi phase, make the main limitation precipitated phase ( $\text{Mg}_2\text{Si}$ ) reduce, weaken the strengthening effect. With the increasing of Cr content, the strength and plasticity of the alloy increase, when the Cr content is more than 0.20% (mass fraction), the strength and the plasticity of the alloy reduce in a certain degree. It is mainly due to the combination of Cr, Fe and Si elements and formation large number of AlFeCrSi phase, which reduces the precipitation of  $\text{Mg}_2\text{Si}$  phase in the alloy and weakens the ageing treatment effects.

**Key words:** Al-Mg-Si-Cu aluminum alloy; Cr content; microstructure; mechanical property

作为可热处理强化合金, Al-Mg-Si-Cu 系铝合金具有中等的强度, 易焊接、易成型, 加工成本低以及优异的耐腐蚀性能等优点, 广泛应用于汽车、建筑、机械等民用领域<sup>[1-3]</sup>。很多铝合金 (2A02, 6A02, 6061 等) 热挤压制品在淬火时效后, 会在断面周边形成粗大的再结晶区, 称为“粗晶环”。它是铝合金挤压制品中常见的缺陷, 使铝合金材料的强度、硬度降低, 阳极氧化型材表面出现花斑, 着色色差明显, 深浅不一致, 材料的使用性能下降, 严重地制约着铝合金在型材中的应

用<sup>[4,5]</sup>。现在一般认为粗晶环是挤压过程中发生再结晶而产生的。因此如何来抑制再结晶, 阻碍晶粒的长大成为解决粗晶环问题的关键。合金化是提高 Al-Mg-Si-Cu 铝合金性能的重要手段, 大量研究表明<sup>[6-10]</sup>, 采用 Mn, Cr, Nd, Zr, Sr 等元素进行微合金化有利于改善 Al-Zn-Mg-Cu 铝合金的微观组织, 抑制再结晶晶粒的长大, 从而提高合金的性能。而关于 Al-Mg-Si-Cu 铝合金微合金化的研究较少。本工作选取 Cr 元素为微合金化元素, 研究其对 Al-Mg-Si-Cu 铝合

金组织和性能的影响规律,为解决 6XXX 铝合金容易产生粗晶环的问题提供参考。

1 实验

1.1 样品制备

实验合金经中频感应炉熔炼铸造成形,主要合金成分 Mg, Si 和 Cu 的含量与 6463 合金相同,按 Cr 含量(质量分数/% ,下同)分别简称为 1<sup>#</sup> (0% Cr), 2<sup>#</sup> (0.10% Cr), 3<sup>#</sup> (0.20% Cr) 和 4<sup>#</sup> (0.30% Cr) 合金,化学成分如表 1 所示。合金配制的原材料采用 99.7% 的纯铝、99.99% 的高纯铜、99.97% 的工业纯镁, Si 和 Cr 分别以中间合金 Al-20% Si 和 Al-10% Cr 的形式加入,浇注温度 720℃,成形尺寸为  $\phi 38.5\text{mm} \times 25\text{mm}$  的圆棒。铸锭经过 550℃/8h 均匀化处理后制备成  $\phi 31\text{mm}$  的棒材,然后热挤压成  $\phi 8.5\text{mm}$  的棒材,挤压比为 13.3,水冷至室温。挤压试样经过 535℃/60min 固溶处理(水淬)+175℃峰时效处理(T6)。

1.2 组织观察和性能测试

采用 7501 涡流电导仪测试铸态测试样品的电导率,每个样品测试 5 次取平均值;用 HV-10B 小负荷维氏硬度计测试时效后样品硬度,每个样品测试 5 个点,然后取平均值;用 MTS810 型材料拉伸机测试时效后样品的抗拉强度和塑性,每种合金测试 3 个试样取平均值。

在 XJP-6A 光学显微镜下观察样品铸态和固溶组织的组织形貌;并用 GENESIS60S 能谱仪进行能谱分

析;在 TecnaiG<sup>2</sup>20 透射电子显微镜上观察时效后样品析出相,加速电压为 200kV,将样品先磨成厚度为 0.1mm 的薄片,冲成直径为 3mm 圆片后进行双喷减薄,电解液为 30% HNO<sub>3</sub> + 70% CH<sub>3</sub>OH(体积分数),温度控制在 -30℃ 左右。

表 1 实验合金的化学成分(质量分数/%)  
Table 1 Chemical composition of the experimental alloys(mass fraction/%)

Alloy	Cu	Mg	Si	Cr	Fe	Al
1 <sup>#</sup>	0.22	0.66	0.40	0.00	0.12	Bal
2 <sup>#</sup>	0.21	0.68	0.38	0.10	0.14	Bal
3 <sup>#</sup>	0.20	0.66	0.41	0.21	0.14	Bal
4 <sup>#</sup>	0.21	0.69	0.40	0.29	0.14	Bal

2 结果与分析

2.1 合金显微组织

图 1 所示为合金的铸态显微组织。可知,随着 Cr 含量的增加,合金的铸态组织先减小后增大;当 Cr 元素的含量为 0.20% 时,合金的晶粒尺寸最小,约为 30~150 $\mu\text{m}$ 。这主要是由于 Cr 元素与 Al 基体发生反应生成大量高熔点的 Al<sub>7</sub>Cr 化合物,在合金熔体凝固的过程中起到异质形核的作用,从而细化了合金的铸态组织。然而,当 Cr 含量超过 0.20% 时,过量的 Cr 元素会显著降低熔体凝固前沿液相的成分过冷度,增大合金熔体的结晶范围,最终导致合金的晶粒出现了长大的现象。

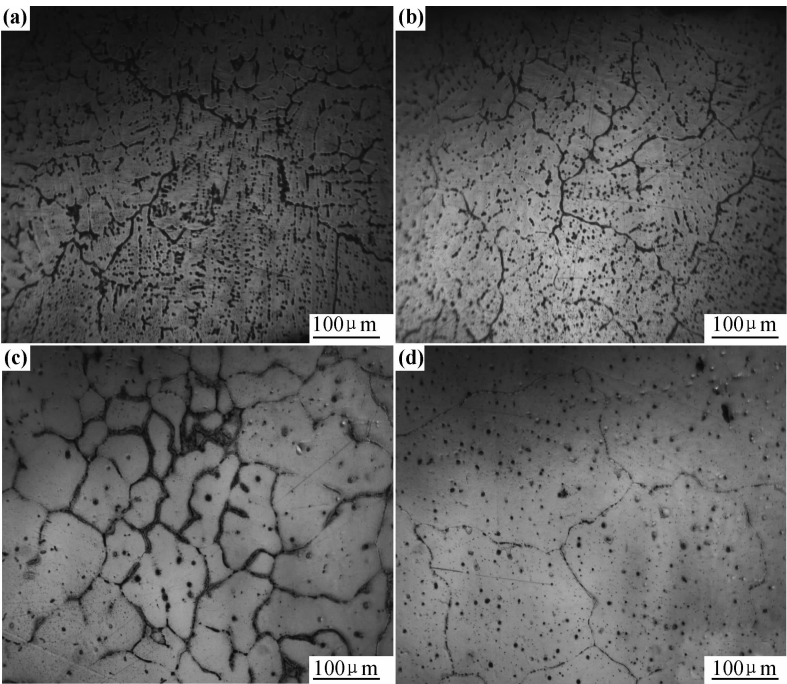


图 1 合金的铸态显微组织 (a)1<sup>#</sup> 合金;(b)2<sup>#</sup> 合金;(c)3<sup>#</sup> 合金;(d)4<sup>#</sup> 合金  
Fig. 1 Microstructure of the as-cast alloys (a)1<sup>#</sup> alloy;(b)2<sup>#</sup> alloy;(c)3<sup>#</sup> alloy;(d)4<sup>#</sup> alloy

图 2 所示为合金铸态的扫描照片。可知,随着 Cr 含量的增加,合金第二相粒子逐渐增多,且粒子的形状发生改变。LIU Hong 等<sup>[11,12]</sup>研究发现,在熔体凝固过程中 Cr 元素会替代 AlFeSi 相中的 Fe 元素生成 Al(FeCr)Si 相。由能谱分析结果(表 2)的 Fe/Si 比可

知,合金中主要存在两种类型的 AlFeSi 相,一种是如图 2(a)所示的 A 相,呈针状,另一种是如图 2(d)所示 B 相,呈粒状。有研究表明<sup>[13]</sup>:A 相为  $\beta$ -AlFeSi,B 相(白色)为  $\alpha$ -AlFeSi,B 相周围的灰色区域经能谱分析确定为 AlSiMgCu 相。

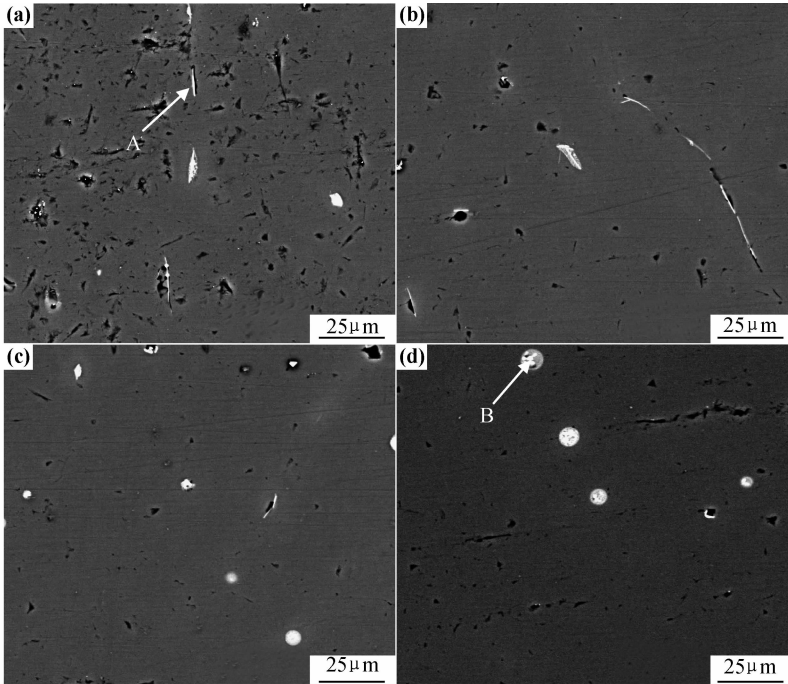


图 2 合金铸态 SEM 照片 (a)1# 合金;(b)2# 合金;(c)3# 合金;(d)4# 合金  
Fig. 2 SEM images of the as-cast alloys (a)1# alloy;(b)2# alloy;(c)3# alloy;(d)4# alloy

表 2 合金铸态相成分扫描电镜能谱分析结果(原子分数/%)  
Table 2 EDS analysis results of the phase composition in the as-cast alloys(atom fraction/%)

Spot	Al	Fe	Si	Cr	(Fe+Cr)/Si	Phase
A phase	82.36	8.77	8.87	0.00	0.99	$\beta$ -AlFeSi
B phase	79.10	12.65	7.12	1.13	1.94	$\alpha$ -AlFeSi

统计发现  $\beta$ -AlFeSi 相向  $\alpha$ -AlFeSi 相转变具有一定的规律。图 3 为固溶态合金 AlFeSi 相的转化。可知, $\alpha$ -AlFeSi 相的数量随 Cr 含量的增加而逐渐增加。1# 合金仅有 11% 的 AlFeSi 相为  $\alpha$ -AlFeSi 颗粒,2# 合金  $\beta$ -AlFeSi 相 $\rightarrow$  $\alpha$ -AlFeSi 相转变趋势不是很明显,3# 合金  $\beta$ -AlFeSi 相大量减少,而  $\alpha$ -AlFeSi 相急剧增多,4# 合金有 80% 的 AlFeSi 相为  $\alpha$ -AlFeSi 相。这说明 Cr 和 Mn,Zr 一样都可以促使  $\beta$ -AlFeSi 相向  $\alpha$ -AlFeSi 相转变。

同时,进一步观察发现  $\beta$ -AlFeSi $\rightarrow$  $\alpha$ -AlFeSi 转变还涉及相颗粒形状的改变,从板条状的  $\beta$  相颗粒转变为细小的圆形  $\alpha$  相颗粒,形状因子平均值由  $\pi d_{\max}^2/4A$  来表示<sup>[3]</sup>(其中  $d_{\max}$  为颗粒的最大尺寸,A 为颗粒面

积)。图 4 为固溶态合金 AlFeSi 的形状因子的变化曲线。可知,随 Cr 含量的增加,AlFeSi 相颗粒的形状因子逐渐降低,说明相颗粒在逐渐球化,当 Cr 含量大于 0.20% 后,Cr 含量对相颗粒的形状因子影响不大。这些变化与图 3 的结果一致,Cr 含量显著影响 AlFeSi 的形状因子。

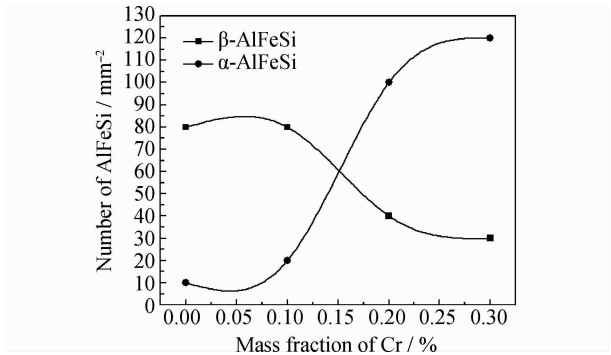


图 3 固溶态合金 AlFeSi 相的转化  
Fig. 3 Changes of AlFeSi of the solution alloys

图 5 为合金固溶淬火后组织。可知,合金组织中均由等轴状的再结晶晶粒以及沿挤压方向呈流线分布

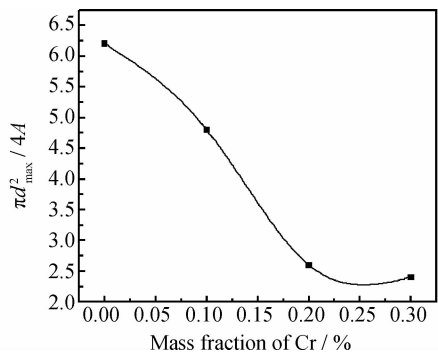


图 4 固态合金 AlFeSi 形状因子的变化曲线

Fig. 4 AlFeSi shape factor change curve of the solution alloys

的黑色第二相粒子组成。

其中,1#合金的晶粒尺寸最大,约为 $50\sim150\mu\text{m}$ ,4#合金的晶粒尺寸最小,约为 $3\sim15\mu\text{m}$ ,表明合金再结晶晶粒长大过程受到强烈抑制。铝合金所添加的Cr,除了在凝固过程中参与形成结晶相化合物之外,还有部分将溶解于基体中形成过饱和固溶体。铸锭在随后热处理和热加工过程中发生过饱和固溶体分解,析出细小 $\text{Al}_7\text{Cr}$ 化合物等弥散相。这些弥散相具有高密度和高热稳定性,在合金热处理和热变形过程中钉扎位错和晶界,阻碍位错重排及晶界迁移,起到抑制变形晶粒再结晶及再结晶晶粒长大的作用<sup>[14,15]</sup>。通过分析图5中合金固溶淬火的晶粒尺寸及再结晶程度,Cr有抑制合金再结晶和晶粒长大的作用,并且抑制作用随Cr含量的增加而逐渐增强。

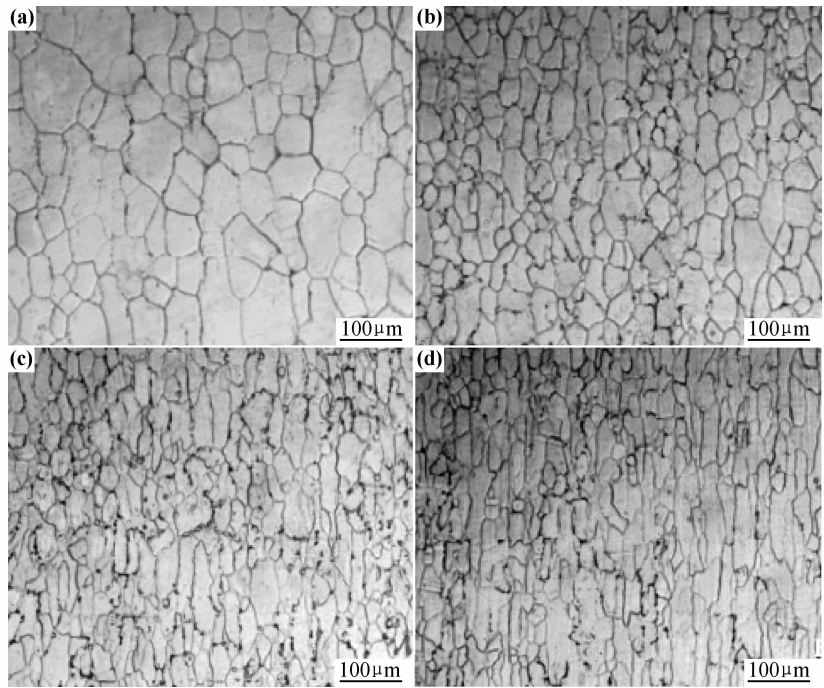


图 5 合金固溶淬火后组织 (a)1#合金;(b)2#合金;(c)3#合金;(d)4#合金

Fig. 5 Microstructure of alloys after solution and water-quenching (a)1# alloy;(b)2# alloy;(c)3# alloy;(d)4# alloy

2.2 合金时效硬化行为

图6为合金175℃时效硬化曲线。可知,合金的时效硬化曲线呈现先上升后下降的趋势。而且随着Cr含量的增加,合金的峰值硬度得到了显著的提高,其中,当Cr含量为0.20%时合金峰值硬度最高,为121。此外,1#,2#,3#,4#合金达到峰值的时间分别为8,10,12h和14h,这说明Cr含量添加延长了合金达到峰值时效的时间。

2.3 拉伸性能

合金峰时效室温拉伸性能如图7所示。可知,随着Cr含量的增加,合金的抗拉强度 $\sigma_b$ 、屈服强度 $\sigma_{0.2}$ 和伸长率 $\delta$ 得到了显著的提高,当Cr含量为0.20%

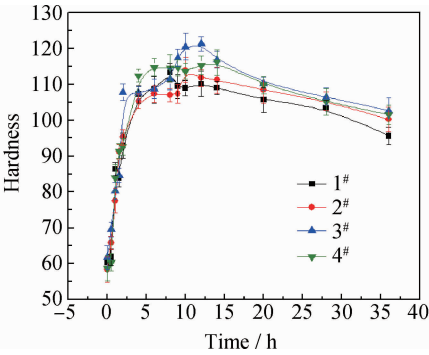


图 6 合金 175℃时效硬化曲线

Fig. 6 Age-hardening curves of alloys at 175℃

时最高,分别为 $\sigma_b=295.5\text{MPa}$ , $\sigma_{0.2}=262.9\text{MPa}$ 和 $\delta=$

21.8%。但当 Cr 含量超过 0.20% 时,合金的强度和伸长率均出现了一定程度的降低。因此,添加适量的 Cr 元素可以达到显著提高 6463 合金力学性能的目的。

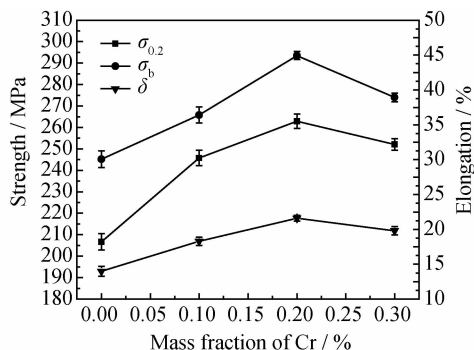


图 7 合金峰时效室温拉伸性能

Fig. 7 Tensile properties of peak aged alloys at room temperature

Cr 作为合金化元素添加到 Al 合金中,还具有以下 3 个方面的强化作用<sup>[16]</sup>:首先,Cr 作为溶质原子溶于 Al 基体中时,能够对合金产生固溶强化作用;其次,Cr 可以促使 AlFeSi 相由针状的  $\beta$ -AlFeSi 相向球状的  $\alpha$ -AlFeSi 相转变,在这种转变过程中,AlFeSi 相的数目增多,在合金变形过程中, $\alpha$ -AlFeSi 相和  $Al_7Cr$  等弥散相能够阻碍位错滑移,从而产生弥散强化作用;最后, $\alpha$ -AlFeSi 相和  $Al_7Cr$  相等弥散相在形变加工及热处理过程中能够强烈地钉扎位错和晶界,阻碍位错滑移以及晶界迁移,抑制变形晶粒再结晶及晶粒长大,从而在合金固溶处理后仍能获得细小的晶粒尺寸及纤维状未再结晶晶粒,这对合金能起到细晶强化和层状强化作用(图 5)。同时,由于 Cr 在铝基体中的扩散速度很慢,且热稳定性高,游离的 Cr 原子优先与 Si 结合形成 AlFeCrSi 相,消耗了一部分固溶 Si,造成  $Mg_2Si$  相数量减少。图 8 为合金-T6 态的 TEM 照片。可知,4<sup>#</sup>合金中  $Mg_2Si$  相数量少于 3<sup>#</sup>合金,而  $Mg_2Si$  相的强化作用要强于 AlFeCrSi 相和  $Al_7Cr$  等弥散相<sup>[17]</sup>,所以当 Cr 含量大于 0.20% 时,合金的力学性能反而下降。

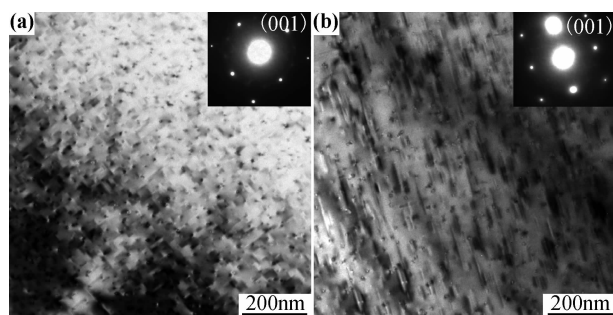


图 8 合金-T6 态的 TEM 照片 (a)3<sup>#</sup>合金;(b)4<sup>#</sup>合金

Fig. 8 TEM images of the T6-treated alloys (a)3<sup>#</sup> alloy;(b)4<sup>#</sup> alloy

### 3 结论

(1)Cr 元素可以细化合金的铸态组织,当 Cr 含量为 0.20% 时,细化效果最好。

(2)Cr 元素可以促使 6463 铝合金的针状  $\beta$ -AlFeSi 相向球状  $\alpha$ -AlFeSi 相转变,并与 Al 基体结合形成  $Al_7Cr$  等弥散相,显著抑制再结晶产生及其晶粒长大,具有细晶强化和弥散强化作用。

(3)随着 Cr 含量的增加,合金的强度与塑性得到了显著的提高,当 Cr 含量超过 0.20% 时,合金的强度和塑性却出现了一定程度的降低。

### 参考文献

- [1] PANIGRAHI S K, JAYAGANTHAN R. Development of ultra-fine grained Al-Mg-Si alloy with enhanced strength and ductility [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2009, 470(1): 285-288.
- [2] EISAABADI B G, DAVAMI P, KIM S K, et al. Effect of oxide films, inclusions and Fe on reproducibility of tensile properties in cast Al-Si-Mg alloys: statistical and image analysis[J]. Materials Science and Engineering: A, 2012, 558: 134-143.
- [3] 何立子,陈彦博,崔建忠. 均匀化对 Al-Mg-Si-Cu 合金组织和性能的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2008, 37(9): 1637-1641.  
HE L Z, CHEN Y B, CUI J Z. Effects of homogenization on microstructure and properties of Al-Mg-Si-Cu alloy[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2008, 37(9): 1637-1641.
- [4] 张洪梅,苏玉洁,黄桂杰,等. 6061-T6 铝合金棒材尾端中心大晶粒的研究[J]. 轻合金加工技术, 2005, 33(8): 34-39.  
ZHANG H M, SU Y J, HUANG G J, et al. Study on 6061-T6 rod centre large grain of aluminium alloy[J]. Light Alloy Fabrication Technology, 2005, 33(8): 34-39.
- [5] 文方,李铁. 2A02 铝合金挤压棒材粗晶环的消除方法[J]. 轻合金加工技术, 2003, 31(3): 33-38.  
WEN F, LI T. Extrusion methods to eliminate the bar coarse grain ring of 2A02 aluminum alloy[J]. Light Alloy Fabrication Technology, 2003, 31(3): 33-38.
- [6] SHABEST S G, MAHMUDI T, EMAMY M, et al. Effect of Mn and Sr on intermetallics in Fe-rich eutectic Al-Si alloy[J]. International Journal of Cast Metals Research, 2002, 15(1): 17-24.
- [7] 贺永东,张新明. 微量 Cr、Mn、Ti、Zr 细化 7A55 铝合金铸锭组织的效果与机理[J]. 中国有色金属学报, 2005, 15(10): 1594-1601.  
HE Y D, ZHANG X M. Refinement mechanism of trace Cr, Mn, Ti and Zr as cast 7A55 alloys[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2005, 15(10): 1594-1601.
- [8] ONURLU S, TEKIN A. Effect of heat treatment on the insoluble intermetallic phases present in an AA6063 alloy[J]. Journal of Materials Science, 1994, 29(6): 1652-1655.
- [9] LEE D H, PARK J H, NAM S W. Enhancement of mechanical properties of Al-Mg-Si alloys by means of manganese dispersoids [J]. Materials Science and Technology, 1999, 15(4): 450-455.

## 参考文献

- [1] 周玉. 陶瓷材料学[M]. 北京: 科学出版社, 2004.
- [2] DAVIDGE R W. Mechanical Behavior of Ceramics[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1980.
- [3] 郭景坤. 关于陶瓷材料的脆性问题[J]. 复旦学报: 自然科学版, 2003, 42(6): 822—827.
- GUO J K. The brittleness problem of ceramic material[J]. Journal of Fudan University (Natural Science), 2003, 42(6): 822—827.
- [4] 贺福, 王茂章. 碳纤维及其复合材料[M]. 北京: 科学出版社, 1995.
- [5] YANG F Y, ZHANG X H, HAN J C, et al. Characterization of hot-pressed short carbon fiber reinforced ZrB<sub>2</sub>-SiC ultra-high temperature ceramic composites[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2009, 472(1—2): 395—399.
- [6] 张玉娣, 周新贵, 张长瑞. C<sub>f</sub>/SiC 陶瓷基复合材料的发展与应用现状[J]. 材料工程, 2005, (4): 60—63.
- ZHANG Y D, ZHOU X G, ZHANG C R. Development and application of C<sub>f</sub>/SiC ceramic matrix composites[J]. Journal of Materials Engineering, 2005, (4): 60—63.
- [7] CAO H C, BISCHOFF E, SBAIZERO O, et al. Effect of interface on the properties of fiber-reinforced ceramics[J]. Journal of the American Ceramics Society, 1990, 73(9): 1691—1699.
- [8] MEI H, CHENG L F, ZHANG L T, et al. Thermal shock behavior of two-dimensional C/SiC composites in controlled atmospheres[J]. Journal of Materials Science, 2005, 40: 4261—4265.
- [9] YANG F Y, ZHANG X H, HAN J C, et al. Mechanical properties of short carbon fiber reinforces ZrB<sub>2</sub>-SiC ceramic matrix composites[J]. Material Letter, 2008, 62: 2925—2927.
- [10] SANTI M, PAVEENA L, JUTHARATANA K, et al. Carbon nanofiber-reinforced alumina nanocomposites: fabrication and mechanical properties[J]. Material Science and Engineering: A, 2007, 447(1—2): 44—50.
- [11] 高占峰. 原位生成碳纤维增韧氧化铝陶瓷的制备及其性能研究[D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2010.
- [12] 龚江宏. 陶瓷材料断裂力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 2001. 109—121.
- [13] 顾皓, 吕珺, 黄丽芳, 等. MgO-MnO<sub>2</sub>-TiO<sub>2</sub>-SiO<sub>2</sub> 烧结助剂中 SiO<sub>2</sub> 的量对低温烧结氧化铝陶瓷材料性能的影响[J]. 硅酸盐通报, 2009, 28(3): 479—484.
- GU H, LV J, HUANG L F, et al. The effect of SiO<sub>2</sub> amount in MgO-MnO<sub>2</sub>-TiO<sub>2</sub>-SiO<sub>2</sub> on properties of alumina ceramic sintered by low-temperature[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2009, 28(3): 479—484.
- 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51275516)
- 收稿日期: 2012-10-30; 修订日期: 2013-08-11
- 作者简介: 曹晶晶(1982—), 女, 博士研究生, 从事专业: 复合材料及其增韧技术研究, 联系地址: 北京市海淀区学院路丁 11 号中国矿业大学(北京)机电与信息工程学院材料系(100083), E-mail: caojingjing1105@163.com
- \*\*\*\*\*
- (上接第 53 页)
- [10] LODGAARD L, RYUM N. Precipitation of chromium containing dispersoids in Al-Mg-Si alloys[J]. Materials Science and Technology, 2000, 16(6): 599—604.
- [11] LIU H, ZHAO G, LIU C M, et al. Effects of magnesium content on phase constituents of Al-Mg-Si-Cu alloys[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2006, 16(2): 376—381.
- [12] 刘宏, 刘艳华, 赵刚, 等. Mn 对 Al-Mg-Si-Cu 铝合金结晶相的影响[J]. 中国有色金属学报, 2004, 14(11): 1906—1911.
- LIU H, LIU Y H, ZHAO G, et al. Effects of manganese content on phase constituents of Al-Mg-Si-Cu alloys[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2004, 14(11): 1906—1911.
- [13] PARK D S, NAM S W. Effects of manganese dispersoid on the mechanical properties in Al-Zn-Mg alloys[J]. Journal of Materials Science, 1995, 30(5): 1313—1320.
- [14] LODGAARD L, RYUM N. Precipitation of dispersoids containing Mn and Cr in Al-Mg-Si alloys[J]. Materials Science and Engineering: A, 2000, 283(1—2): 144—152.
- [15] JENISKI R A. Effects of Cr addition on the microstructure and mechanical behavior of 6061-T6 continuously cast and rolled re-draw rod[J]. Materials Science and Engineering: A, 1997, 237(1—2): 52—64.
- [16] 杜鹏, 闫晓东, 李彦利, 等. 6061 铝合金中富铁相在均匀化过程中的相变机理[J]. 中国有色金属学报, 2011, 21(5): 981—987.
- DU P, YAN X D, LI Y L, et al. Transformation mechanism of iron-rich phase in 6061 aluminum alloy during homogenization[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2011, 21(5): 981—987.
- [17] LEE D H, NAM S W. Role of Mn-dispersoid in the fracture toughness enhancement of Al-Zn-Mg-(Mn) alloys[J]. Metals and Materials International, 1995, 1(1): 71—76.
- 基金项目: 国家重大基础研究项目资助(2012CB615900); 广东省产学研项目资助(2010A090200078)
- 收稿日期: 2013-02-24; 修订日期: 2013-08-03
- 作者简介: 张新明(1945—), 男, 教授, 博士, 从事铝及铝合金的组织、织构理论与塑性加工技术方面研究, 联系地址: 长沙市中南大学本部特治楼 416 室(410083), E-mail: xmzhang\_cn@yahoo. cn