文章编号: 1004-0609(2008)12-2145-06

微量 Sc 对 AA7085 铝合金组织与性能的影响

肖代红,巢 宏,陈康华,黄伯云

(中南大学 粉末冶金国家重点实验室,长沙 410083)

摘 要:通过铸锭冶金工艺,制备含微量Sc的AA7085铝合金。采用金相观察、力学性能测试、扫描电镜及透射电镜分析,研究添加0.3%Sc对基体合金的铸态及锻造态的显微组织和力学性能的影响。结果表明,添加0.3%Sc能细化铸态合金的晶粒,抑制锻造态合金的再结晶,最终提高基体合金的强度和断裂韧性;含0.3%Sc的合金抗拉强度达到562 MPa,断裂韧性 $K_{\rm IC}(S-L)$ 达到34 MPa·m $^{1/2}$ 。含Sc的AA7085合金的强化机制主要是Al $_3(Sc,Zr)$ 相引起的细晶强化、亚结构强化和沉淀强化。

关键词: AA7085 铝合金; Sc; 再结晶; 显微组织; 力学性能

中图分类号: TG 146.2+1 文献标识码: A

Effect of minor Sc addition on microstructure and properties of AA7085 alloy

XIAO Dai-hong, CHAO Hong, CHEN Kang-hua, HUANG Bai-yun

(State Key Laboratory of Powder Metallurgy, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: AA7085 alloys with minor Sc content were prepared by ingot metallurgy method. The effect of Sc addition on the microstructure and mechanical properties of the based alloys was investigated using optical microscope, mechanical properties testing, scanning electron microscopy (SEM) and transmission electron microscopy (TEM). The results show that 0.3%Sc addition refines the grains of the casting alloys, and inhibits the recrystallization of the forged alloy. AA7085 alloy with 0.3%Sc content has higher strength and fracture toughness, and σ_b and K_{IC} (S-L) are 562 MPa and 34 MPa·m^{1/2}, respectively. The strengthening mechanisms of AA7085 alloy with Sc element are mainly the sub-structure strengthening, precipitation strengthening and refiner grain strengthening of Al₃(Sc, Zr) phase.

Key words: AA7085 alloy; scandium; recystallization; microstructure; mechanical property

Al-Zn-Mg-Cu系合金因具有高强度与高比刚度、易于加工、耐腐蚀性能好以及韧性比较高,被广泛用作航空航天工业的结构材料及各类车船体的结构件 $^{[1-2]}$ 。AA7085铝合金是美国铝业公司开发的一种新型的Al-Zn-Mg-Cu高强铝合金 $^{[3-4]}$,主要用作锻件,其合金成分为:Zn 7.0%~8.0%、Mg 1.2%~1.8%、Cu 1.3%~2.0%、0.08%~0.15Zr%。相对于AA7050-T7451铝合金而言,AA7085-T7451具有高强度、高抗疲劳性能、高抗应力腐蚀性能与剥落性能等优点,该合金目前已被用作空客A380大型飞机的机翼大梁和翼肋。

近年来,为了进一步提高 Al-Zn-Mg-Cu 合金的综合性能,人们通过采用微合金化的途径,在该系合金中添加 Zr、Cr、Mn、Ti、Er、Ag 和 Sc 等微量元素^[5-13],有效地改善了该系合金的强度与韧性。例如,贺永东等^[6]采用复合添加研究了微量 Cr、Mn、Ti 和 Zr 对 7A55合金铸锭组织的影响,表明复合添加 0.04%Ti+0.17%Zr 能在一定程度上细化 7A55合金铸锭组织,而复合添加微量 0.04%Cr+0.04%Mn+0.03%Ti+0.18%Zr产生了极强烈的晶粒细化效果,并认为其细化机理为含有 Cr 和 Mn 的原子团簇作为 Al₃Ti 和 Al₃Zr 共同形

基金项目: 国家重点基础研究发展计划资助项目(G2005CB623704); 中国博士后科学基金特别资助项目(200801348); 中南大学博士后科学基金资助项目(2007年)

收稿日期: 2008-04-09; 修订日期: 2008-08-25

通讯作者: 肖代红,副研究员; 电话: 0731-8877880; E-mail: daihongx@mail.csu.edu.cn

核的基底使 Al₃(Ti_xZr_{1-x})形核。杨磊等^[10]认为在 Al-Zn-Mg 铝合金中添加微量 Sc 或同时添加 Sc 和 Zr 能产生多重强化作用:添加微量 Sc 和 Zr 可明显细化合金的铸态晶粒,并显著提高合金的力学性能,其作用机理主要为 Al₃(Sc, Zr)造成的细晶强化、亚结构强化和弥散强化。COSTELLO等^[12]通过在铸态的 7055 铝合金中添加 Sc,发现当 Sc 含量达到一定值时,能产生明显的晶粒细化作用,而且这种细化效果能通过调整合金中的 Zn、Mg 与 Cu 的含量进一步提高。本文作者在 AA7085 铝合金的基础上,添加微量 Sc 元素,探讨其在该合金中的作用与存在形式,为进一步提高该合金的强韧化综合性能提供参考。

1 实验

以 AA7085 铝合金(成分为: Al-7.5Zn-1.5Mg-1.6Cu-0.2Zr)为基础,分别添加 0%Sc(合金 AA7085) 与 0.3%Sc(合金 AA7085Sc),原材料以 A00 纯铝、工业纯镁、纯锌、Al-Cu 合金、Al-Zr 合金及 Al-Sc 合金等形式加入。合金熔炼在电阻炉中进行,熔体在

720 ℃时浇入铁模中。铸锭在 450 ℃进行均匀化处理 24 h,然后在 430 ℃以自由锻的方式锻造成厚度 15 mm 的锻件,高度方向锻造变形量为 90%。锻造后的合金采用分步加热方式进行固溶处理,工艺为: (200 ℃, 24 h)+(450 ℃, 1 h)+(470 ℃, 1 h),合金固溶处理后室温水淬,在 130 ℃时效处理。

在 LEICA MEF4A/M 显微镜上进行金相观察。在 JSM-6360 型扫描电镜、JEM-100CX 型透射电镜及 TecnaiG220 透射电镜上进行显微组织分析。透射电镜 薄膜试样采用电解双喷减薄,电解液为 30%硝酸和70%甲醇混合液。在 CS-41100 拉伸机上进行拉伸实验,采用悬臂梁方法测试材料的断裂韧性 $K_{\rm IC}((S-L)$ 。所有测试数据均为 3 个试样的平均值。采用 7501 型涡流导电仪测量合金在不同状态下的电导率,每个试样测量 5 次并取平均值。

2 实验结果

2.1 铸态组织

图 1 所示为 2 种合金铸态及均匀化处理后的显微

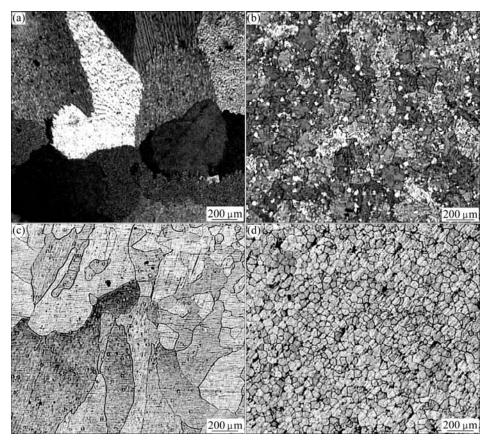


图 1 合金 AA7085 与 AA7085Sc 在铸态及均匀化态时的显微组织

Fig.1 Microstructures of alloys AA7085 and AA7085Sc at different states: (a) As-cast alloys; (b) As-cast alloys AA7085 Sc; (c) Homogenization alloy AA7085; (d) Homogenization alloy AA7085 Sc

组织。AA7085 合金晶粒粗大,晶粒大小不均匀,晶粒粒径在 200~250 μm 之间(图 1(a)),为明显树枝晶组织;AA7085Sc 合金铸造组织明显细化(图 1(b)),晶粒大小均匀,晶粒粒径约 30~40 μm,看不到树枝晶组织。450 ℃均匀化处理后(图 1(c)与(d)),2 种合金的晶界上的非平衡相大部分溶解,晶粒变得更为明显,与铸态合金相比,晶粒大小并没有发生明显的变化。但对AA7085Sc 合金进行背散射扫描电镜分析可见(图 2),在晶粒中间有细小的方块状、三角形状或多边形状的第二相粒子,该相粒子尺寸为 3~5 μm,经 EDAX 能

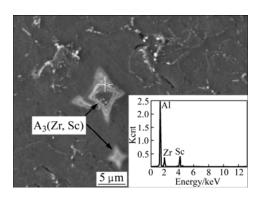


图 2 铸态合金 AA7085Sc 中 Al₃(Zr, Sc)粒子形貌及能谱 **Fig.2** SEM graph and EDAX spectra of Al₃(Zr, Sc) particle in as-cast alloy AA7085Sc

谱分析证实该第二相粒子为从合金熔体中凝固析出的一次 Al₃(Sc, Zr)粒子。

2.2 锻造态合金的组织

2 种合金经过相同的锻造工艺变形后的显微组织 如图 3 所示。AA7085 合金经过锻造变形后,截面金相显示(图 3(b)),其组织为典型的纤维状组织,而锻造面显示晶粒也较为粗大(图 3(a))。AA7085Sc 合金经过变形后,截面也显示纤维状组织(图 3(e)),但尺寸明显比基体合金小;而锻造面显示出晶粒为等轴状(图 3(d))。经过分步固溶及130℃时效处理20 h后,AA7085合金发生明显的再结晶(图 3(c)),而 AA7085Sc 合金在相同的固溶处理及淬火时效后,再结晶并不明显(图 3(f)),仍保持纤维组织。另外,2 种合金组织存在的某些析出物经固溶后消失,固溶进α(Al)基体,但Al₃(Sc, Zr) 没有消失,仍然存在。

对 AA7085Sc 合金经过固溶及 130 ℃时效 20 h 后进行 TEM 分析,结果显示,在晶界上有 Al₃(Sc, Zr) 粒子(图 4(a)),其尺寸为 0.5~5 μm;而晶内也析出了细小的二次 Al₃(Sc, Zr)粒子(图 4(b)),其平均尺寸为 10 nm。同时,TEM 分析也显示合金晶内有均匀细密分布的析出相,根据合金的时效状态和文献[2, 5],可以

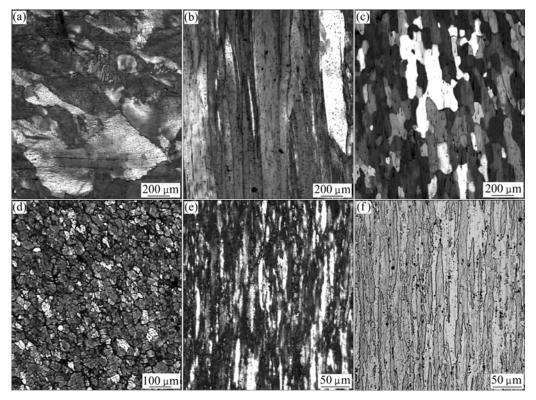


图 3 锻造态合金 AA7085 与 AA7085Sc 的显微组织

Fig.3 Microstructures of forged alloys AA7085 and AA7085Sc: (a), (b) Forging treatment, alloy AA7085; (c) Aging treatment, alloy AA7085; (d), (e) Forging treatment, alloy AA7085 Sc; (f) Aging treatment, alloy AA7085

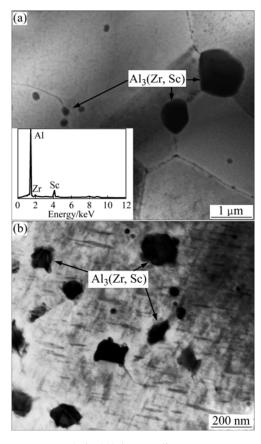


图 4 AA7085Sc 合金时效态 TEM 像

Fig.4 TEM images of alloy AA7085Sc after aging for 20 h at 130 $\,^{\circ}\mathrm{C}$

认为该析出相为 η' 相。晶界上的粒子起钉扎作用,延缓再结晶的发生,提高再结晶温度;而晶粒中的析出粒子能起到弥散强化与时效强化作用。

2.3 锻造态合金的性能

对经过分步固溶处理后的合金室温水淬,在130 ℃人工时效处理,分别测试其硬度与电导率(图5)。AA7085 合金中添加 0.3%Sc 后,合金的硬度得到提高(图 5(a)),其最大硬度从 HRB90 提高到 HRB95,提高了 5.5%,达到峰值的时间也从 18 h 降为 15 h。峰时效后继续时效时,AA7085 与 AA7085Sc 合金的硬度并没有发生很明显的变化,分别保持在 HRB87与 HRB92 左右。

由于应力腐蚀与电导率是紧密相关的,电导率越高,抗应力腐蚀性能越好,因此,常用电导率来间接反映材料的抗应力腐蚀性能。对不同时效态合金的电导率测试显示(图 5(b)),基体合金中添加微量 Sc 后,电导率也得到提高。在时效 18 h 后, AA7085 合金的电导率为 32.5%IACS,而 AA7085Sc 合金的电导率达

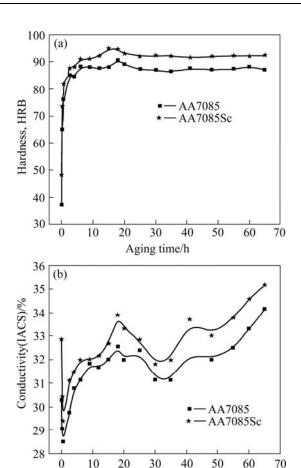


图 5 AA7085 合金与 AA7085Sc 合金在 130 ℃的时效曲线 **Fig.5** Aging curves of alloys AA7085 and AA7085Sc after aging at 130 ℃: (a) Hardness curves; (b) Conductivity curves

Aging time/h

到 33.9%IACS。此后继续时效时,电导率先下降,时效 32 h 时达到最小,之后又开始增大。

对 2 种合金经过 130 °C 时效处理 20 h 后,测试其力学性能(表 1)。AA7085 合金的抗拉强度为 525 MPa,而 AA7085Sc 合金的为 562 MPa,提高了 37 MPa; AA7085 合金的屈服强度为 472 MPa,AA7085Sc 合金的为 515 MPa;而 2 种合金的伸长率也保持在 15%以上。对合金的断裂韧性 $K_{IC}(S-L)$ 测定显示,在基体合金中添加 0.3%Sc 后,合金断裂韧性从 30 MPa·m^{1/2} 提高到 34 MPa·m^{1/2},增加了 13%。上述结果表明,Sc 的添加有助于提高 AA7085 合金的拉伸性能与断裂韧性。

表1 合金的力学性能

 Table 1
 Mechanical properties of alloys

Alloy	Tensile strength/MPa	Yield strength/MPa	Elongation	$K_{\rm IC}(\text{S-L})/$ (MPa·m ^{1/2})
AA7085	525	472	17.6	30
AA7085Sc	562	515	18.4	34

3 分析与讨论

如图 1 所示, 在 AA7085 合金中添加 0.3%Sc, 铸 态合金的晶粒明显发生细化,同时也出现细小的块状 Al₃(Sc, Zr)粒子。在非平衡凝固条件下,微量 Sc 在 Al-Zn-Mg-Cu 合金中,一部分固溶于基体 α (Al)中,另 一部分以一次 Al₃(Sc, Zr)质点的形式存在[11, 14-16]。 Al-Mg-Sc-Zr 系相图研究指出[17-18], 铝合金中 Sc 和 Zr 含量分别大于 0.05%时, 合金成分位于 $\alpha(Al)$ + Al₃(Sc, Zr)+Al₃(Zr, Sc)三相区。根据非均匀形核理论, 铸态晶粒的细化程度取决于添加剂的两种作用,即单 位熔体中形核粒子数和粒子的有效形核作用。而粒子 的有效形核作用依赖形核粒子与 α(Al)基体的晶格常 数和晶格类型,晶体结构相似是引起晶粒细化的主要 原因。 $Al_3(Sc, Zr)$ 相晶体结构为面心结构,与 $\alpha(Al)$ 基 体相同, Al₃(Sc, Zr)晶格常数为 0.4103 nm, 非常接近 α(Al) 晶体晶格常数 0.4048 nm, 其晶格点阵和晶体结 构与 $\alpha(Al)$ 相近, 晶格常数差异为 1.5%, $Al_3(Sc, Zr)$ 一 次粒子成为 $\alpha(Al)$ 凝固结晶的晶核。同时含 Sc 铝合金 熔体单位体积内形成大量 Al₃(Sc, Zr)粒子, 这些粒子 具有高效形核作用, 使合金晶粒细化, 因而 Sc 在铝合 金中具有明显细化晶粒的作用。Al₃(Sc, Zr)粒子呈现出 正方形、长方形和三角形等不同形状,是金相磨面与 非均质晶核交截的结果。若非均晶核刚好处在磨面上, 则依据其与磨面的交截部位不同而呈现不同的形状。

如图 3 所示,AA7085Sc 合金经锻造变形及 T6 热处理后仍为纤维状变形组织。这是由于 Sc 在铝合金中的固溶体很不稳定,在加热到 250 $^{\circ}$ C以及更高温度时迅速分解。YIN 和 KENDIG 等[14-15]认为,含 Sc 和 Zr 铝合金在加热或热加工过程中会从基体中析出细小弥散分布的二次 Al₃(Sc, Zr)粒子,与 α (Al)基体共格,与母相之间有着极小的共格错配度,共格应变能大,而界面能低,热稳定性较高。Al₃(Sc, Zr)对位错及亚晶界、晶界具有极强烈的钉扎作用,可以稳定变形组织的亚结构,阻碍位错重新排列成亚晶界及随后发展成大角度晶界的过程,从而阻碍再结晶晶粒的形核和长大。铝合金的再结晶起始温度一般在 300 $^{\circ}$ C左右。而 Sc和 Zr 复合微合金化能显著提高合金的再结晶温度。

Al-Zn-Mg-Cu 合金中的主要强化相为 η' ,其沉淀顺序大致相同: SSSS(过饱和固溶体) \rightarrow GP 区 \rightarrow η' (MgZn₂ 过渡相) \rightarrow η (MgZn₂ 平衡相)。在 Al-Zn-Mg-Cu-Zr 合金中添加微量 Sc,可以提高 Zn 和 Mg 在 α (Al)固溶体中的溶解度^[13],增大合金由 GP 区

向 η' 相转变的相变驱动力。含 Sc 的 AA7085 铝合金 强度的增加主要是由二次析出的 $Al_3(Sc, Zr)$ 粒子引起的,其原因是: 1) 该粒子与基体完全共格,会在二者间产生方向相反、大小相等的共格力,由于在该粒子的基体周围存在较大的共格应变能,因而产生共格强化; 2) 该粒子的显微硬度高达 2 250 MPa^[13],对合金产生直接析出强化作用; 3) 该粒子较小,粒径约为10 nm(见图 4(b)),Orowan 强化机制起作用。因此,细小的 $Al_3(Sc, Zr)$ 沉淀析出相将产生一个很大的阻碍位错运动^[19]和亚晶界迁移的力,提高合金的再结晶温度,甚至使合金保持加工状态的纤维组织结构,产生亚结构强化。另外,在合金凝固过程中析出的一次 $Al_3(Sc, Zr)$ 粒子细化了合金的铸态组织,也使合金得到细晶强化。

从表 1 可知, Sc 的添加能显著提高 AA7085 合金的断裂韧性, 因为合金中的 Al₃(Sc, Zr)粒子可抑制基体再结晶、保持形变回复组织和亚晶间小角度晶界。由于小角度晶界能量比大角度晶界低, 时效析出相在小角度晶界上的富集程度低于大角度晶界, 不易优先开裂, 因而减少沿晶界和亚晶界分布的二次裂纹, 提高合金的断裂韧性。同时, 晶内形成的 Al₃(Sc, Zr)粒子减少了共面滑移, 避免位错在晶界塞积, 减少晶界的应力集中, 提高合金的断裂韧性。

4 结论

- 1) 在 AA7085 铝合金中添加 0.3%Sc, 有助于细 化铸态合金的晶粒, 其晶粒大小为 30~40 μm。
- 2) 在 AA7085 铝合金中添加 Sc 所形成的二次析出 Al₃(Sc, Zr)弥散相可以抑制基体合金的再结晶,保持其形变回复组织。
- 3) 在 AA7085 铝合金中添加 0.3%Sc 后,合金的 抗拉强度达到 562~MPa,屈服强度达到 515~MPa,断 裂韧性达到 34~MPa·m $^{1/2}$ 。
- 4) 含 Sc 铝合金的主要强化机制是一次析出 $Al_3(Sc, Zr)$ 弥散相所引起的细晶强化、二次析出 $Al_3(Sc, Zr)$ 相所引起的亚结构强化及 η' 引起的沉淀强化共同作用的结果。

REFERENCES

[1] IMAMURA T. Current status and trend of applicable material technology for aerospace structure[J]. Journal of Japan of Light Metals, 1999, 49(7): 302–3.5.

- [2] 陈昌麒. 超高强度铝合金的发展[J]. 中国有色金属学报, 2002, 12(铝合金专辑): 22-27.

 CHEN Chang-qi. Development of ultrahigh-strength aluminum alloys[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2002, 12(Al Special): 22-27.
- [3] DHRUBA J C, JONH L, JAY H G, GREGORY B V, RALPH R S, CYNTHIA M K. Aluminum alloy products having improved property combinations and method for artificially aging same[P]. US 6972110B2[P]. 2005–12–06.
- [4] CHAKRABARTI D J, LIU J, SAWTELL R R, VENAMA G B. New generation high strength high damage tolerance 7085 thick alloy product with low quench sensitivity[J]. Materials Forum, 2004, 28: 969–974.

杨守杰, 谢优华, 陆 政, 苏 彬, 戴圣龙, 颜鸣皋. Zr 对超

- 高强铝合金时效过程的影响[J]. 中国有色金属学报, 2002, 12(2): 226-230.

 YANG Shou-jie, XIE You-hua, LU Zhen, SU Bin, DAI Shen-long, YAN Ming-gao. Influence of zirconium on ageing process in super-high strength aluminum alloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2002, 12(2): 226-230.
- [6] 贺永东, 张新明. 微量 Cr、Mn、Ti 和 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 Yong-dong, ZHANG Xin-ming. 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.

赵中魁, 周铁涛, 刘培英, 陈昌麒. Al-Zn-Mg-Cu-Li-Er 合金

- 时效组织中 Er 相的 TEM 观察[J]. 稀有金属材料与工程, 2004, 33(10): 1108-1111.

 ZHAO Zhong-kui, ZHOU Tie-tao, LIU Pei-ying, CHEN Chang-qi. Observation of formed Er phase in Al-Zn-Mg-Cu-Li alloys by TEM[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2004, 33(10): 1108-1111.
- 微观组织和力学性能的影响[J]. 中国有色金属学报, 2005, 15(1): 116-122.

 ZHANG Kun, LIU Zhi-yi, FENG Chun. Effect of small addition of silver on microstructure and mechanical properties of high-zinc super-high strength aluminum alloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2005, 15(1): 116-122.

张 坤, 刘志义, 冯 春. 添加微量 Ag 对高 Zn 超高强铝合金

- [9] 贺永东,张新明,游江海.复合添加微量 Sc, Zr 对 Al-Zn-Mg-Cu 合金组织性能的影响[J].稀有金属材料与工程, 2007, 36(4): 665-670.
 - HE Rong-dong, ZHANG Xin-ming, YOU Jiang-hai. Effects of minor contents of Sc and Zr on microstructure and mechanical

- properties of Al-Zn-Mg-Cu alloy[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2007, 36(4): 665–670.
- [10] 杨 磊, 潘青林, 尹志民, 吴建生. 微量 Sc 和 Zr 对 Al-Zn-Mg 合金组织与性能的影响[J]. 材料工程, 2001, 7: 29-32. YANG Lei, PAN Qing-lin, YIN Zhi-ming, WU Jian-sheng. Effects of minor Sc and Zr on microstructure and properties of Al-Zn-Mg alloy[J]. Journal of Materials Engineering, 2001, 7: 29-32.
- [11] 戴晓元,夏长清,刘昌斌.加钪对 Al-Zn-Mg-Cu-Zr 合金组织性能的影响[J].稀有金属材料及工程,2006,35(6):913-915.

 DAI Xiao-yuan, XIA Chang-qing, LIU Chang-bin. Effect of Sc addition on microstructures and mechanical properties of Al-Zn-Mg-Cu-Zr alloys[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2006, 35(6):913-915.
- [12] 贺永东,张新明,陈健美,陈建国. 微量 Sc 和 Zr 对 7A55 合金铸锭组织的细化机理[J]. 中南大学学报:自然科学版,2005,36(6):919-923.
 HE Yong-dong, ZHANG Xin-ming, CHEN Jian-mei, CEHN Jian-guo. Refinement mechanism of trace Sc and Zr as-cast 7A55 alloys[J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2005, 36(6):919-923.
- [13] COSTELLO F A, ROBSON J D, PRANGNELL P B. The effect of small scandium additions to AA7050 on the as-cast and homogenized microstructure[J]. Mater Science Forum, 2002, 396/402: 757-762.
- [14] YIN Zhi-min, PAN Qing-lin, ZHANG Yong-hong, et al. Effect of minor Sc and Zr on the microstructure and mechanical properties of Al-Mg based alloys[J]. Mater Sci Eng A, 2000, 280: 151–155.
- [15] KENDIG K L, MIRACLE D B. Strengthening mechanisms of Al-Mg-Sc-Zr alloy[J]. Acta Materialia, 2002, 50: 4165–4175.
- [16] OCENASEK V, SLAMOVA M. Resistance to recrystallization due to Sc and Zr addition to Al-Mg alloys[J]. Materials Characterization, 2001, 47: 157–162.
- [17] ZENG Fan-hao, XIA Chang-qing; GU Yi. The 430 °C isothermal section of the Al-4Mg-Sc-Zr quaternary system in the Al-rich range[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2004, 363(1/2): 175–181.
- [18] XIA Chang-qing, ZENG Fan-hao, GU Yi. Phase relations of Al-4Mg-Sc-Zr quaternary system in Al-rich range at 430 °C[J]. Trans Nonferrous Met Soc China, 2003, 13 (3): 546-552.
- [19] YU Kun, LI Wen-xian, LI Song-rui, et al. Mechanical properties and microstructure of aluminum alloy 2618 with Al₃(Sc, Zr) phases[J]. Mater Sci Eng A, 2004, 368: 88–93.

(编辑 陈爱华)