添加 Sc 对 7055 铝合金微观结构和 力学性能的影响

滕广标1 刘崇宇1 李 剑2 马宗义3 周文标2 向 晶2

1 桂林理工大学 广西有色金属及特色材料加工教育部重点实验室 桂林 541004 2 广西南南铝加工有限公司 南宁 530031 3 中国科学院金属研究所 沈阳材料科学国家(联合)实验室 沈阳 110016

摘要研究了添加Sc元素对7055铝合金铸造、均匀化处理、轧制和固溶时效过程的微观结构演化以及力学性能的影响。结果表明,向7055溶液中添加质量分数为0.25%的Sc导致在铸造过程中形成初生Al₄(Sc,Zr)相。这个相能促使合金发生非均质形核,显著细化合金的铸造组织。在7055-Sc铝合金的均匀化处理过程中析出高密度纳米Al₄(Sc,Zr)相,不但能抑制晶粒粗化,而且在后期轧制变形和固溶时效处理过程中还起钉扎晶界、抑制回复与再结晶、保留纤维组织的作用。与7055铝合金相比,7055-Sc铝合金的晶粒尺寸更小,因此具有更有效的细晶强化效应。添加Sc的时效处理态7055铝合金的最大抗拉强度和显微硬度,分别提高到642 MPa和218 HV。 关键词 金属材料,轧制变形,热处理,力学性能,微观组织,铝合金 中图分类号 TG146.2 文章编号 1005-3093(2018)02-0112-07

Effect of Sc on Microstructure and Mechanical Property of 7055 Al-alloy

TENG Guangbiao¹, LIU Chongyu¹, LI Jian², MA Zongyi³, ZHOU Wenbiao², XIANG Jing²

1 Key Laboratory of New Processing Technology for Nonferrous Metal & Materials, Ministry of Education, Guilin University of Technology, Guilin 541004, China

2 Alnan Aluminium Co., Ltd., Nanning 530031, China

3 Shenyang National Laboratory for Materials Science, Institute of Metal Research, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China

Correspondent: LIU Chongyu, Tel: (0773)5896436, E-mail: lcy261@glut.edu.cn; MA Zongyi, Tel: (024)83978908, E-mail: zyma@imr.ac.cn

Supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51601045), Research Program of Science and Technology of Guangxi (No. GKAB16380021), and Guangxi "Bagui" Teams for Innovation and Research

Manuscript received 2017-04-05; in revised form 2017-08-23

ABSTRACT The effect of Sc addition on the microstructure and mechanical properties of 7055 Al-alloy as-cast, as well as after homogenization-, rolling-, solution- and aging-treatment was investigated. The addition of 0.25% (mass fraction) Sc could lead to the formation of Al₃(Sc, Zr) phase, which can promote the heterogeneous nucleation during casting. Therefore, the microstructure of the as cast 7055 Al-alloy was refined. The precipitation of nano-sized Al₃(Sc, Zr) phase occurred during the homogenization treatment of the 7055-Sc Al-alloy, and this nano-sized Al₃(Sc, Zr) phase could effectively inhibit the coarsen-

DOI 10.11901/1005.3093.2017.233

资助项目 国家自然科学基金(51601045),广西重点研发计划(桂科AB16380021),广西八桂学者创新团队项目

收稿日期 2017-04-05 定稿日期 2017-08-23

作者简介 滕广标,男,1994年生,硕士生

通讯作者 刘崇宇, lcy261@glut.edu.cn, 研究方向为铝合金塑性加工; 马宗义, 研究员, zyma@imr.ac.cn, 研究方向为复合材料及搅拌摩擦焊接 与加工

ing of AI grains during homogenization treatment, and play a role in pinning the grain boundaries, therewith inhibiting the recovery and recrystallization, thus retaining the fiber-like structure during subsequent rolling and solution treatments. Compared to the plain 7055 AI-alloy, the 7055-Sc AI alloy exhibited much higher fine grain strengthening effect due to finer grain size and showed higher tensile strength and hardness as high as 642 MPa and 218 HV, respectively.

KEY WORDS metallic materials, rolling, heat treatments, mechanical properties, microstructure, Al alloys

Al-Zn-Mg-Cu-Zr合金体系具有超高强度,已广 泛应用在航天、航空、轨道交通及国防等领域^[1-5]。 随着工业的发展,对结构材料的力学性能和密度的 要求越来越高。因此,需要进一步提高Al-Zn-Mg-Cu-Zr合金的强度,以满足一些关键领域对高性能、 低密度结构材料的要求^[1]。

人们发现,添加微量稀土元素钪(Sc)能细化铝 合金的微观组织,优化其力学性能^[6-18]。关于含 Sc 铝合金的研究与工程应用,大多集中在5 系(Al-Mg) 和7系(Al-Zn-Mg)合金。近年来,关于 Sc 对含 Cu、Zr 的超高强7系铝合金微观结构及力学性能影响的研 究,受到普遍的关注^[10-18]。

与非超高强度7系铝合金相比,超高强度7系合 金中除含有大量的Cu元素外,还含有Zr元素作为 晶粒细化剂。与单独添加Sc相比,同时添加Sc和Zr 可生成Al₃(Sc, Zr)弥散粒子,更有利于细化铝合金的 组织^[19,20]和提高热稳定性^[21,22]。但是学者们在研究Sc 对Al-Cu系合金影响时发现,添加Sc和Cu能形成粗 大的Al_{8-x}Cu_{4+x}Sc化合物,使Al-Cu-Sc合金的力学性 能显著降低^[23,24]。

超高强7系铝合金的Cu含量通常高达2.5%, 还不清楚Cu是否与Sc发生反应生成恶化材料性 能的Al_{8-x}Cu_{4+x}Sc相。此外,关于添加Sc对超高强 Al-Zn-Mg-Cu-Zr合金微观结构及力学性能影响的 研究,大多局限于铸造^[9,13,15]或热处理^[10,11,14,16-18]等单 一过程中。这使人们无法系统地认识在超高强 Al-Zn-Mg-Cu-Zr合金的整个生产环节中,添加Sc 对其微观结构及力学性能的影响。本文制备7055 (Al-Zn-Mg-Cu-Zr体系合金)和含Sc7055铝合金, 研究添加微量的Sc元素对7055铝合金铸造、均匀 化处理、轧制变形及固溶时效过程中微观结构及 力学性能的影响,探索Sc与主要合金元素Cu之间 的相互作用。

1 实验方法

采用熔炼铸造工艺分别制备7055(Al-7.82Zn-1.95Mg-2.24Cu-0.16Zr,质量分数,%,下同)和7055-0.25Sc合金。对铸锭进行465℃/24h均匀化热处理, 然后进行多道次465℃热轧(总变形为50%)和多道次 室温冷轧(总变形量为50%),最终得到厚度为3 mm 的板材。对铝合金板材进行470℃/1h固溶处理,水冷 至室温后立即进行120℃/12h人工时效处理。

分别用光学显微镜(OM)、S-4800型扫描电子显 微镜(SEM)和JEM-2100F透射电子显微镜(TEM)观 测各处理状态样品的微观组织。对固溶时效后板材 进行拉伸实验,拉伸试样平行于轧制方向,拉伸速率 为4×10⁴ s⁻¹。用SEM观察拉伸断口的形貌。

2 结果和讨论

图1给出了铸态7055和7055-Sc合金的OM照 片。加入0.25Sc的7055合金,其铸态组织由树枝晶 转化为等轴晶,并且晶粒尺寸明显细化。图1b表 明,在7055-Sc合金的晶粒中心处生成了菱状颗 粒。根据文献报道,这种颗粒为初生Al₃(Sc, Zr)相^[6]。

大量研究表明,含Sc、Zr原子的铝合金熔体,在 凝固过程中优先生成L12型亚稳态Al₃Zr相。在大 约659℃,Sc原子向L1₂型Al₃Zr相扩散并替代部分 Zr原子形成L12型Al₃(Sc,Zr)相。这个反应过程为: L+Al₃Zr→a(Al)+Al₃(Sc,Zr)²⁵。由于Al₃(Sc,Zr)相晶 格参数(a=0.398 nm)与Al基体晶格参数(a=0.404 nm) 极为相近,在凝固过程中初生Al₃(Sc,Zr)相促使Al 合金液体发生非均质形核,进而显著细化铸态合金 晶粒,并使树枝晶向等轴晶转化。

图2给出了铸态7055-Sc合金的SEM及能谱元 素分布照片。由图2可见,在铸造过程中在合金的 晶界处发生了明显的Cu原子偏析。

图 3 给出了均匀化处理后 7055 和 7055-Sc 合金 的 OM 照片。均匀化处理使 7055 合金的树枝晶组 织消失,且长时间高温热处理导致该合金晶粒严重 粗化(图 3a)。对比图 1b 和图 3b 可见,添加 0.25Sc 可 明显抑制合金在均匀化处理过程中晶粒粗化,使其 具有更高的热稳定性。均匀化处理后,其平均晶粒 尺寸约为100 μm。

图4给出了均匀化处理后7055-Sc合金的SEM 及能谱元素分布照片。对比图2可见,在465℃均匀 化处理24h可消除7055-Sc合金的Cu元素偏析,使 晶内与晶界的元素分布较为均匀。

图5给出了均匀化处理后7055和7055-Sc合金的 TEM照片。均匀化处理后,7055合金出现低密度的等 轴状纳米相(图5a)。由于添加了Zr元素,高温长时间保 温可促使Al与Zr反应,产生纳米尺寸的Al₃Zr相^[26]。因 此,7055合金中的纳米颗粒为Al₃Zr相。加入0.25Sc 的7055合金经过均匀化处理后,可析出高密度的等 轴状颗粒,其平均尺寸约为30 nm(图5b)。根据衍射 光斑可确定颗粒为具有Al₃M相的Ll₂结构,根据该合 金的成分及文献结果可知该颗粒为Al₃(Sc, Zr)相。

465℃的高温使7055-Sc合金析出Al₃(Sc, Zr)纳米



图1 铸态 AA 7055 和 7055-Sc 合金的 OM 照片 Fig.1 OM micrographs of as-cast AA 7055(a) and 7055-Sc alloys (b)



图2 铸态 7055-Sc 合金的 SEM 和能谱元素分布照片 Fig.2 SEM micrograph (a) and EDS maps (b~f) of as-cast 7055-Sc alloy



图3均匀化处理后7055和7055-Sc合金的OM照片 Fig.3 OM micrographs of (a) AA 7055 and (b) 7055-Sc alloys after homogenizing treatment

弥散相,而且这个相在高温条件下可长时间保持纳米尺寸。Al₃(Sc, Zr)纳米相对晶界具有强钉扎作用,因此在热处理过程中Al₃(Sc, Zr)纳米相可显著地抑制铝基体晶粒粗化,使7055-Sc合金具有更优异的高温稳定性。

图6给出了轧制态7055和7055-Sc合金的OM 照片。轧制变形导致两种合金晶粒均明显沿轧制方 向拉长。7055合金的晶粒短轴方向大约为50 µm 左右 (图6a),而7055-Sc合金的晶粒短轴方向仅为10 µm 左右(图6b)。

添加 0.25Sc 可明显 细化轧制态 7055 合金晶 粒。其原因有:轧制前,添加 Sc 后的合金就具有更 细小的晶粒;在轧制过程中纳米 Al₃(Sc, Zr)相对晶界 具有强钉扎作用,可抑制变形过程中的动态回复与 动态再结晶,进而生成更多的纤维组织。

图7给出了固溶时效态7055和7055-Sc合金的

OM照片。经过固溶时效处理后7055合金出现大量等 轴状再结晶晶粒,表现为不完全再结晶结构(图7a)。而 7055-Sc合金在固溶时效处理过程中的再结晶行为明 显受到抑制,在OM下未观察到再结晶晶粒,由轧制导 致的纤维组织得以保留,且未发生明显粗化(图7b)。

图 8 给出了固溶时效态 7055 和 7055-Sc 合金的 TEM 照片。在两种合金中均出现高密度棒状纳米 相(图 8b 和 c 中箭头所指)。在 7 系铝合金中该析出 相为可显著强化铝基体的η或η相。加入 0.25Sc 的 7055 合金过固溶时效处理后纳米 Al₃(Sc, Zr)相得以 保留,且部分钉扎在晶界处(图 8d)。正是由于纳米 Al₃(Sc, Zr)相对晶界的强钉扎作用,7055-Sc 合金在 固溶时效过程中的再结晶得以有效地抑制,进而保 留了细晶组织。

Al-Cu-Sc体系合金中常见的粗大Als-xCu4+xSc化



图 4 均匀化处理后 7055-Sc 合金的 SEM 及能谱元素分布 Fig.4 SEM micrograph (a), and EDS maps (b~f) of 7055-Sc alloy after homogenizing treatment



图5均匀化处理后7055和7055-Sc合金的TEM照片(箭头为Al₃(Sc, Zr)相的(110)及(001)) Fig.5 TEM micrographs of AA 7055(a) and AA 7055-0.25Sc alloys (b) after homogenizing treatment (the arrows in panel (b) denote the (110) and (001) planes)

115



图 6 轧制态 7055 和 7055-Sc 合金的 OM 照片 Fig.6 OM micrographs of AA 7055 (a) and AA 7055-0.25Sc (b) alloys after rolling



图7 固溶时效态7055和7055-Sc 合金的OM照片 Fig.7 OM micrographs of AA 7055 (a) and AA 7055-0.25Sc (b) alloys after solution treatment



图 8 固溶时效态 7055 合金和 7055-Sc 合金的低倍和高倍 TEM 照片 Fig.8 TEM micrographs of AA 7055(a, b), and AA 7055-0.25Sc (c, d) alloys after aging

表1 固溶时效后 7055和 7055-Sc 合金的力学性能 Table 1 Mechanical properties of the AA 7055 and AA 7055-0.25Sc alloys after aging

Alloy	σ₀/MPa	σ₀.₂/MPa	σ'^{0}_{0}	Microhardness (HV)
7055	624	552	11	209
7055-Sc	642	556	8	218

合物不但不能优化铝合金的力学性能,而且Sc、Cu 原子的大量消耗减少了Al₂Cu和Al₃(Sc,Zr)等纳米析 出相数量,从而极大地恶化了铝合金力学性能^[23,24]。 本文的结果表明,在含Cu超高强7系铝合金中添加 Sc元素并没有产生恶化合金性能的Al_{8-x}Cu_{4+x}Sc相 (图5b、8c和8d),因此Al₃(Sc,Zr)相的析出没有受到 明显的影响。

表1给出了两种合金固溶时效后的力学性能对 比。表1表明,添加0.25Sc可提高7055合金的最大抗拉 强度、屈服强度及显微硬度,数值分别增至642 MPa、 556 MPa和218 HV。但是添加0.25Sc使该合金的 延伸率有所下降。

7055合金的主要强化机制为η或η相析出强化, 添加0.25Sc后晶粒尺寸明显下降。因此,该合金除 了具备析出强化以外还具有更强的细晶强化效应, 且表现出更高的强度与硬度。

大量研究结果表明,对于较为单一且强度较低的 Al-Mg 系合金^[27-30],添加微量 Sc 元素可优化强化机制。而本文研究的 7055 合金强化机制较为复杂,强化因子较多。由 Sc 添加所导致的细晶强化并不是该体系的最主要强化方式。因此 Sc 添加并未大幅提高超高强7系铝合金强度。

Sc添加导致的晶粒细化弱化了拉伸过程中晶 粒对位错的储存能力,进而使铝合金在变形过程中 容易发生应力集中。因此与7055合金相比,7055-Sc合金的塑性有所下降。

3 结论

(1) 向 7055 合金中添加 0.25Sc 后,在铸造过程 中生成的初生 Al₃(Sc,Zr)相促进非均质形核和细化 铸造组织。

(2) 在含 Sc 7055 合金的均匀化处理过程中析出 了高密度能够抑制再结晶晶粒长大的纳米 Al₃(Sc,Zr) 沉淀相,使其热稳定性提高。

(3)由于纳米尺寸Al₃(Sc,Zr)沉淀相的晶界钉扎 作用,轧制更有效地细化添加Sc的7055合金的组 织,使固溶时效过程中的再结晶受到抑制,纤维状组 织得以保留。 (4)由于更有效的细晶强化效应,添加含Sc7055 合金表现出更高的强度及硬度,其最大抗拉强度、屈 服强度和显微硬度分别达到642 MPa、556 MPa和 218 HV。

参考文献

[1] Zhang X M, Deng Y L, Zhang Y. Development of high strength aluminum alloys and processing techniques for the materials[J]. Acta Metall. Sin., 2015, 51: 257

(张新明, 邓运来, 张 勇. 高强铝合金的发展及其材料的制备加工 技术[J]. 金属学报, 2015, 51: 257)

- [2] Li G F, Zhang X M, Zhu H F. Effect of minor Er and Y additions to Al-Zn-Mg-Cu-Zr alloy on homogenizing behavior[J]. J. Aeronaut. Mater., 2010, 30(6): 1 (李国锋,张新明,朱航飞. 微量Er,Y对Al-Zn-Mg-Cu-Zr合金均匀)
- 化的影响[J]. 航空材料学报, 2010, 30(6): 1)
 [3] Li P, Liu D X, Guan Y Y, et al. Effects of shot peening on fatigue property of new aluminum alloy 7055- T7751[J]. Mater. Mech. Eng., 2015, 39(1): 86
 (李 鹏, 刘道新, 关艳英等. 喷丸强化对新型 7055-T7751 铝合金

疲劳性能的影响[J]. 机械工程材料, 2015, 39(1): 86)

- [4] Li C M, Chen Z Q, Cheng N P, et al. Mechanical properties of 7055 ultrahigh-strength and ultrahigh-ductility aluminum alloy[J]. Heat Treat. Met., 2008, 33(1): 100
 (李春梅, 陈志谦, 程南璞等. 7055超高强、超高韧铝合金力学性能 分析[J]. 金属热处理, 2008, 33(1): 100)
- [5] Yan L M, Wang Z Q, Shen J, et al. Research status and expectation of 7055 aluminium alloy[J]. Mater. Rev., 2005, 23(5): 69
 (闫亮明, 王志强, 沈 健等. 7055 铝合金的研究现状及展望[J]. 材料导报, 2005, 23(5): 69)
- [6] Jia Z H, Røyset J, Solberg J K, et al. Formation of precipitates and recrystallization resistance in Al-Sc-Zr alloys[J]. Trans. Nonferrous Met. Soc. China, 2012, 22: 1866
- [7] Jiang X J, Li Y Y, Gui Q H, et al. Effect of Sc on microstructure and properties of Al-Li-Cu-Mg-Zr alloy[J]. Acta Metall. Sin., 1994, 30: A 355

(蒋晓军,李依依,桂全红等. Sc对Al-Li-Cu-Mg-Zr合金组织与性能的影响[J]. 金属学报, 1994, 30: A 355)

- [8] Xiao D H, Huang B Y, Chen K H. Microstructure and corrosion properties of Al-Cu-Mg-Ag-(Sc) alloys[J]. J. Central South Univ. (Sci. Technol.), 2009, 40: 1252
 (肖代红,黄伯云,陈康华. Al-Cu-Mg-Ag-(Sc)合金的显微组织与腐蚀性能[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2009, 40: 1252)
- [9] Gang J W, Han X L, Li Z H, et al. Solution and aging treatment of Al- 6.6Zn- 2.3Mg- 2.1Cu- 0.12Zr aluminum alloy[J]. Chin. J. Rare Met., 2012, 36: 523

(刚建伟,韩小磊,李志辉等.固溶时效处理对Al-6.6Zn-2.3Mg-2.1Cu-0.12Zr合金组织性能的影响[J].稀有金属,2012,36:523)

[10] Dai X Y, Xia C Q, Long C G, et al. Morphology of primary Al₃(Sc, Zr) of As-cast Al-Zn-Mg-Cu-Zr-Sc alloys[J]. Rare Met. Mater. Eng., 2011, 40: 265 (戴晓元,夏长清,龙春光等. Al-Zn-Mg-Cu-Zr-Sc 合金铸态 Al₃

(C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

(Sc, Zr)相形貌的研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2011, 40: 265)

[11] Dai X Y, Li N, Xiong L, et al. Quenching sensitivity of Al-Zn-Mg-Cu-Zr-0.2Sc alloy[J]. Trans. Mater. Heat Treatment, 2014, 35(12):
 62

(戴晓元,李 妮,熊 亮等. Al-Zn-Mg-Cu-Zr-0.2Sc 合金的淬火敏 感性[J]. 材料热处理学报, 2014, 35(12): 62)

[12] Tu Q, Yang F B, Xu J, et al. Study on heat treatment process of cast Al-Zn-Mg-Cu-Zr-Sc alloy[J]. Hot Work. Technol., 2011, 40 (12): 155

(涂 强,杨福宝,徐 骏等.挤压铸造超高强 Al-Zn-Mg-Cu-Zr-Sc 合金的热处理工艺研究[J]. 热加工工艺, 2011, 40(12): 155)

- [13] Li W B, Pan Q L, Zou L, et al. Intergranular and exfoliation corrosion behaviour of high strength Al-Zn-Cu-Mg-Zr alloy containing Sc[J]. J. Aeronaut. Mater., 2008, 28(1): 53
 (李文斌, 潘清林, 邹 亮等. 含 Sc 的超高强 Al-Zn-Cu-Mg-Zr 合金的晶间腐蚀和剥落腐蚀行为[J]. 航空材料学报, 2008, 28(1): 53)
- [14] Wang Z G, Xu J, Zhang Z F, et al. Effect of Sc and Zr compound addition on microstructures and properties of the squeeze cast Al-Zn-Mg-Cu alloy[J]. Spec. Cast. Nonferrous Alloys, 2013, 33: 797 (王志刚, 徐 骏, 张志峰等. Sc、Zr对Al-Zn-Mg-Cu合金挤压铸造 组织性能的影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2013, 33: 797)
- [15] Li W B, Pan Q L, Xiao Y P, et al. Effect of aging processes on microstructure and properties of Al-Zn-Cu-Mg-Sc-Zr alloy[J]. Trans. Mater. Heat Treatment, 2011, 32(8): 47 (李文斌, 潘清林, 肖艳苹等. 时效工艺对 Al-Zn-Cu-Mg-Sc-Zr 合 金组织与性能的影响[J]. 材料热处理学报, 2011, 32(8): 47)
- [16] Dai X Y, Xia C Q, Long C G, et al. As-cast microstructures and properties of Al-9.0Zn-2.5Mg-1.2Cu-0.15Zr alloys adding Sc[J]. Foundry, 2007, 56: 991
 (戴晓元,夏长清,龙春光等. 含钪 Al-9.0Zn-2.5Mg-1.2Cu-0.15Zr 合金铸态组织与力学性能[J]. 铸造, 2007, 56: 991)
- [17] Liu H, Luo B H, Bo Z H. Effects of Sc and Zr addition on microstructures and properties of Al-Zn-Mg-Cu alloys[J]. Light Alloy Fabr. Technol., 2006, 34(2): 43
 (刘 黄, 罗兵辉, 柏振海. Sc、Zr 对 Al-Zn-Mg-Cu 合金组织与性能 的影响[J]. 轻合金加工技术, 2006, 34(2): 43)
- [18] Dai X Y, Xia C Q, Sun Z Q, et al. Effect of strengthening solution treatment on microstructure and mechanical properties of Al-7.6Zn-2.1Mg-1.30Cu-0.15Zr-0.30Sc alloys[J]. Rare Met. Mater. Eng., 2007, 36(S3): 195

(戴晓元,夏长清,孙振起等.强化固溶对 Al-7.6Zn-2.1Mg-1.30Cu-0.15Zr-0.30Sc合金组织与性能的影响[J].稀有金属材料 与工程,2007,36(S3):195)

- [19] Song M, He Y H, Fang S F. Effects of Zr content on the yield strength of an Al-Sc alloy[J]. J. Mater. Eng. Per., 2011, 20: 377
- [20] Liu Z X, Li Z J, Wang M X, et al. Effect of complex alloying of Sc, Zr and Ti on the microstructure and mechanical properties of Al-5Mg alloys[J]. Mater. Sci. Eng., 2008, 483-484A: 120
- [21] Riddle Y W, Sanders T H Jr. A study of coarsening, recrystallization, and morphology of microstructure in Al- Sc- (Zr)- (Mg) alloys[J]. Metall. Mater. Trans., 2004, 35A: 341
- [22] Van Dalen M E, Seidman D N, Dunand D C. Creep and coarsening properties of Al-0.06 at.% Sc-0.06 at.% Ti at 300-450°C[J]. Acta Mater., 2008, 56: 4369
- [23] Røyset J, Ryum N. Scandium in aluminium alloys[J]. Int. Mater. Rev., 2005, 50: 19
- [24] Kharakterova M L, Eskin D G, Toropova L S. Precipitation hardening in ternary alloys of the Al-Sc-Cu and Al-Sc-Si systems[J]. Acta Metall. Mater., 1994, 42: 2285
- [25] Milman Y V, Sirko A I, Lotsko D V, et al. Microstructure and mechanical properties of cast and wrought Al-Zn-Mg-Cu alloys modified with Zr and Sc[J]. Mater. Sci. Forum, 2002, 396-402: 1217
- [26] Lv X Y, Guo E J, Rometsch P, et al. Effect of one-step and twostep homogenization treatments on distribution of Al₃Zr dispersoids in commercial AA 7150 aluminium alloy[J]. Trans. Nonferrous Met. Soc. China, 2012, 22: 2645
- [27] Zhang X F, Zhou T G. Recrystallization of Al-Mg-Sc alloy produced by continuous casting-extrusion technology[J]. Light Alloy Fabr. Technol., 2010, 38(9): 49 (张雪飞, 周天国. 连续铸挤成形 Al-Mg-Sc 合金的再结晶[J]. 轻 合金加工技术, 2010, 38(9): 49)
- [28] Fu L, Yin Z M, Huang J W, et al. Effect of Sc content on microstructure and properties of Al-Mg-Sc alloy[J]. Light Alloy Fabr. Technol., 2012, 40(9): 64
 (傅 乐, 尹志民, 黄继武等. Sc 含量对 Al-Mg-Mn 合金板材组织 与性能的影响[J]. 轻合金加工技术, 2012, 40(9): 64)
- [29] Zhang X F, Li J P, Wen J L. Effect of aging treatment on property of Al-1.5Mg-0.3Sc alloy wire formed by SCR technology[J]. Chin. J. Mater. Res., 2006, 20: 281 (张雪飞, 李俊鹏, 温景林. 热处理对 SCR 成形 Al-1.5Mg-0.3Sc 合 金线材性能的影响[J]. 材料研究学报, 2006, 20: 281)
- [30] Chen X M, Pan Q L, Luo C P, et al. Effect of micro-alloying with Sc and Ti on the microstructure and mechanical property of Al-Mg based alloys[J]. Chin. J. Mater. Res., 2005, 19: 419 (陈显明, 潘青林, 罗承萍等. 复合微合金化对 Al-Mg 合金组织与 性能的影响[J]. 材料研究学报, 2005, 19: 419)

(责任编辑:吴 岩)