



微量 Sc 对 6005A 合金微观组织与 拉伸性能的影响

潘德聪¹, 刘 竝¹, 于庆斌³, 李国良³, 王维裔², 邓 英², 潘清林^{1,2}

- (1. 中南大学 轻合金研究院, 长沙 410083;
2. 中南大学 材料科学与工程学院, 长沙 410083;
3. 中车长春轨道客车股份有限公司, 长春 130062)

摘 要: 采用铸锭冶金法制备出不同 Sc 含量的 6005A 合金铸锭, 合金铸锭经均匀化、热轧、中间退火、冷轧成 2.5 mm 厚的薄板, 研究 Sc 含量对 6005A 合金拉伸性能、晶粒大小、金相组织及其相组成的影响。结果表明: 微量 Sc 可提高 6005A 合金的强度, 其中含 0.07%Sc 的合金具有最佳的拉伸性能, 其抗拉强度、屈服强度分别提高 19 MPa、47 MPa, 伸长率也提高 1.2%; 添加微量 Sc 的合金晶粒得到细化, 且随着 Sc 含量的增加, 细化效果越明显; 添加微量 Sc 减合金中枝晶的偏析, 形成弥散的 Al_3Sc 相, 抑制合金的再结晶; 随着 Sc 含量的增加, 晶内弥散的 Mg_2Si 相得到细化。

关键词: 6005A 合金; Sc; 微合金化; Al_3Sc 相

文章编号: 1004-0609(2022)-07-1855-08

中图分类号: TG146.2

文献标志码: A

引文格式: 潘德聪, 刘 竝, 于庆斌, 等. 微量 Sc 对 6005A 合金微观组织与拉伸性能的影响[J]. 中国有色金属学报, 2022, 32(7): 1855–1862. DOI: 10.11817/j.ysxb.1004.0609.2021-42002

PAN De-cong, LIU Bing, YU Qing-bin, et al. Effect of trace Sc on microstructure and tensile properties of 6005A alloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2022, 32(7): 1855 – 1862. DOI: 10.11817/j.ysxb.1004.0609.2021-42002

6005A 合金属于 Al-Mg-Si 系铝合金, 具有中等强度、优良的抗应力腐蚀能力和焊接性能、良好的挤压、锻造、轧制等成型性能, 主要用于轨道交通、汽车车身等领域^[1-4]。

在轨道交通领域, 拟将高铁时速从 300 km/h 提高到 400 km/h^[5-6], 这将对作为高铁动车组车用车材 6005A 提出更高的要求, 使其强度和塑性进一步提高。鉴于目前铸锭冶金法(IM)相比于其他方法具有操作简单、成本低廉的优点, 以及微合金化具有显著改变合金性能的作用, 希望在现有的 IM 法基础上通过添加微量元素使 6005A 合金的强度和塑性

得到进一步提高^[7]。Sc 既属于过渡金属(TE)又是稀土元素(RE), 大量研究表明^[8-11], Sc 添加到铝合金中同时具有 TE 的细化晶粒、抑制再结晶的作用和 RE 的净化作用。VERMA 等^[8]的研究表明, 与添加等量的 Al-5Ti-1B 晶粒细化剂相比, 在纯 Al 中添加微量 Sc 晶粒细化效果明显优于前者。此外, Sc 原子和 Al 原子可以形成共格的 Al_3Sc 强化相, 可以进一步提高 Al 合金的强度。目前 Al 合金中 Sc 元素的微合金化主要集中在纯 Al 系、Al-Mg 系、Al-Si 系、Al-Zn-Mg 系^[9-11], Sc 的添加对上述合金体系的组织 and 性能都有较大的改善, 但 Sc 在 Al-Mg-Si 合金中

基金项目: 中车长客科技计划资助项目(9600006518)

收稿日期: 2021-07-08; **修订日期:** 2021-09-24

通信作者: 刘 竝, 讲师, 博士; 电话: 0731-88830933; E-mail: pdc1997@126.com

的作用研究还很不充分。

本文基于 6005A 合金，分别添加 0.07%Sc、0.12%Sc、0.25%Sc，研究 Sc 元素的添加对 6005A 合金拉伸性能和微观组织的影响。

1 实验

以工业纯铝(99.7%，质量分数，下同)、纯 Mg、Al-12Si、Al-50Cu、Al-10Mn、Al-4Cr 和 Al-2Sc 中间合金为原料制备了 Al-0.55Mg-0.7Si-0.2Cu-0.3Mn-0.1Cr-xSc 合金铸锭，其实际化学成分见表 1。

在井式电阻炉中进行熔炼，采用高纯石墨坩埚。炉温升到 720 ℃时，待坩埚赤红后加入铝块；待纯铝全部熔化后，依次加入中间合金，随后加入少量覆盖剂，升温到 740~760 ℃保温约 40 min。当中间合金全部熔化后，进行精炼、除气、扒渣后加入纯 Mg；静置 10~15 min 后，对合金进行二次除气、搅拌、扒渣、静置处理。然后在 720~730 ℃将合金熔液浇入水冷铜模中，得到厚度为 20 mm 的长方形铸锭。切头去尾后，进行铣面，然后进行均匀化处理(545~560 ℃，12 h)、热轧、中间退火(350~400 ℃，2 h)、冷轧成 2.5 mm 厚的板材。将冷轧板线切割成长为 160 mm，宽为 32 mm 的长条状试样，之后进行固溶-时效处理，其制度为(520 ℃，1 h)+(WQ+175 ℃，8 h)。

对固溶-时效处理后的试样，按照国家标准 GB/T 228.1—2010 线切割成拉伸试样，采用 WDW-100 型万能试验机对试样进行拉伸性能测试，拉伸速度为 2 mm/min，测试完成后，对三个试样数据取平均值。

对每种状态下的试样截取 20 mm×20 mm 的小块试样，经过粗磨、精磨、机械抛光、电解抛光

(电解抛光液的组成为高氯酸与无水乙醇的体积比 1:9)、阳极覆膜(覆膜液成分为 30 mL 的氟硼酸+100 mL 的蒸馏水)，用 LEICA DMILMLED DFC295 型倒置光学显微镜对合金试样进行金相组织观察。通过 Tecnai G2 20 型透射电子显微镜观察析出相的特性。通过 JSM-IT200 型扫描电子显微镜观察铸态试样中第二相分布情况，通过能谱分析确定相的组成元素。

2 结果与分析

2.1 微量 Sc 对 6005A 合金拉伸性能的影响

不同 Sc 含量的 6005A 合金拉伸性能如图 1 所示。由图 1 可知，与未添加 Sc 的合金 1[#]相比，添加 0.07%Sc 的合金 2[#]抗拉强度提高了 19 MPa，屈服强度提高了 47 MPa，伸长率也提高 1.2%；添加 0.12%Sc 的合金 3[#]强度提高幅度不大，而添加 0.25%Sc 的合金 4[#]的抗拉强度下降 6 MPa。这表明 0.07%Sc 的合金 2[#]具有最佳的综合拉伸性能，其抗拉强度、屈服强度、伸长率分别为 390 MPa、361 MPa、14.2%。

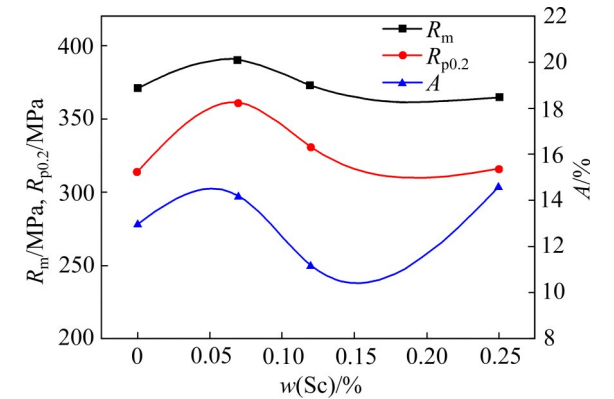


图 1 不同 Sc 含量对合金力学性能的影响
Fig. 1 Effect of different Sc content on mechanical properties of alloy

表 1 实验合金的化学成分

Table 1 Chemical composition of experimental alloy

Alloy No.	Mass fraction/%						
	Mg	Si	Cu	Mn	Cr	Sc	Al
1 [#]	0.5570	0.7060	0.2060	0.3086	0.1113	—	Bal.
2 [#]	0.5420	0.7100	0.2109	0.3107	0.1098	0.0720	Bal.
3 [#]	0.5540	0.7090	0.2057	0.3125	0.1101	0.1246	Bal.
4 [#]	0.5620	0.7130	0.2029	0.3109	0.1083	0.2509	Bal.

2.2 微量 Sc 对 6005A 合金微观组织的影响

图 2 和 3 所示分别为不同 Sc 含量合金铸态和均匀化态金相组织。由图 2 和 3 可知, 与未加 Sc 合金相比, 添加微量 Sc 合金晶粒被细化, 且随着 Sc 含

量增加细化效果越明显; 与未添加 Sc 合金相比, 添加 0.25%Sc 合金铸态晶粒尺寸最小, 约为 201 μm ; 与未添加 Sc 合金相比, 添加 0.07%Sc 合金枝晶得到部分消除; 经 545~560 $^{\circ}\text{C}$, 12 h 均匀化处理

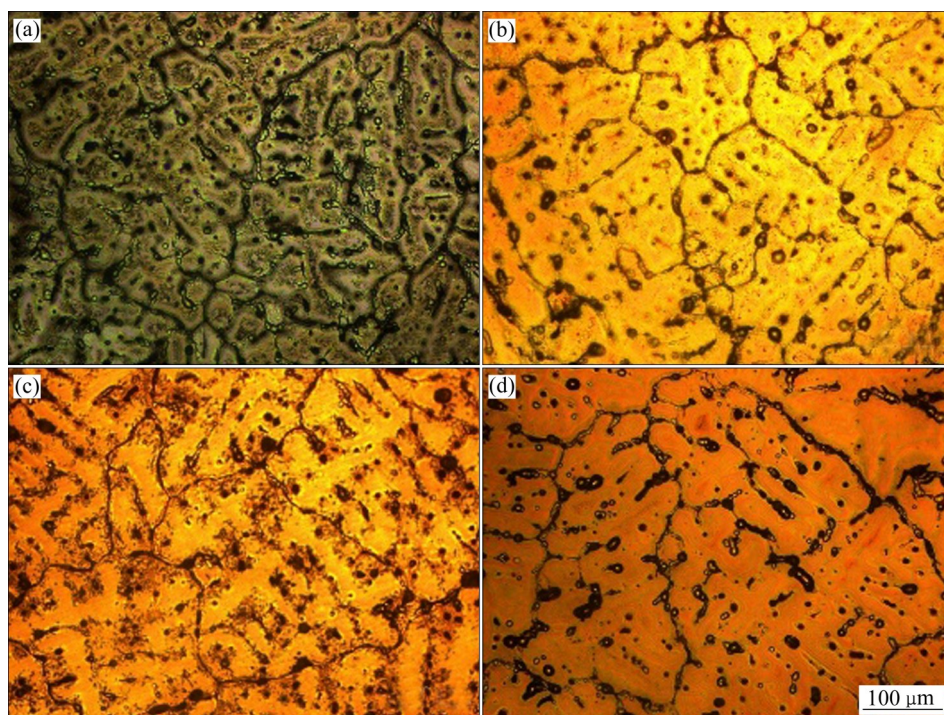


图 2 不同 Sc 含量 6005A 合金铸态金相组织

Fig. 2 As-cast metallographs of 6005A alloy with different Sc contents: (a) Alloy 1[#]; (b) Alloy 2[#]; (c) Alloy 3[#]; (d) Alloy 4[#]

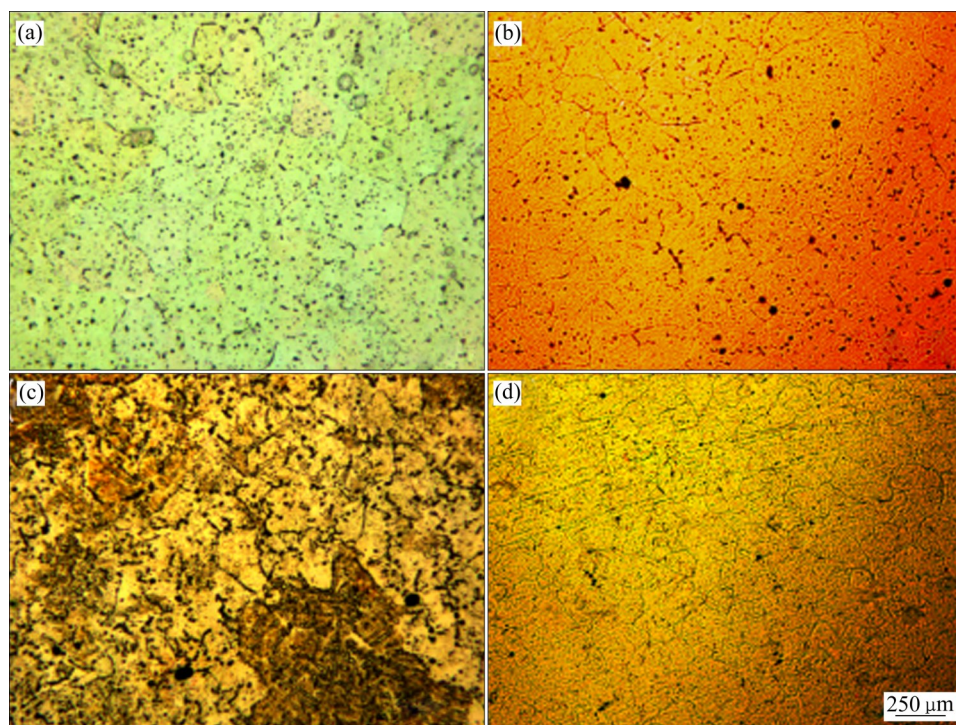


图 3 不同 Sc 含量 6005A 合金均匀化态金相组织

Fig. 3 Homogenization metallographs of 6005A alloy with different Sc contents: (a) Alloy 1[#]; (b) Alloy 2[#]; (c) Alloy 3[#]; (d) Alloy 4[#]

后, 含 Sc 与未含 Sc 合金枝晶均得到完全消除。

图 4 和 5 所示分别为不同 Sc 含量合金冷轧态和固溶-时效态金相组织。由图 4 可知, 与未加 Sc 合

金相比, 添加微量 Sc 合金纤维组织更加细小, 且随着 Sc 含量增加纤维组织不断得到细化; 经 (520 °C, 1 h)+(WQ+175 °C, 8 h) 固溶-时效后, 4 种

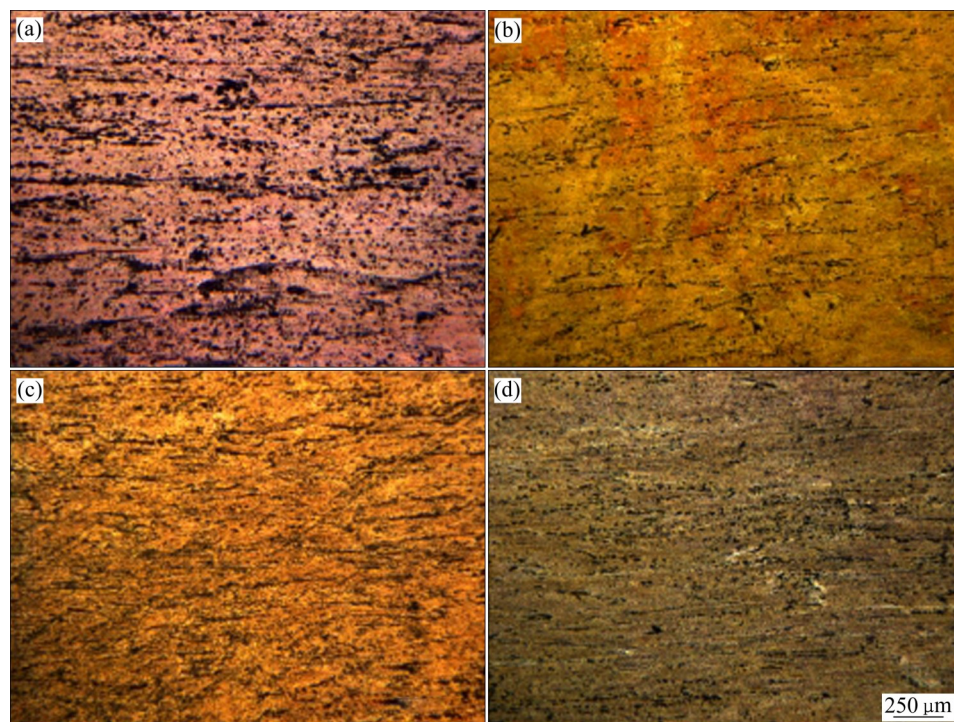


图 4 不同 Sc 含量 6005A 合金冷轧态金相组织

Fig. 4 Cold-rolled metallographs of 6005A alloy with different Sc contents: (a) Alloy 1[#]; (b) Alloy 2[#]; (c) Alloy 3[#]; (d) Alloy 4[#]

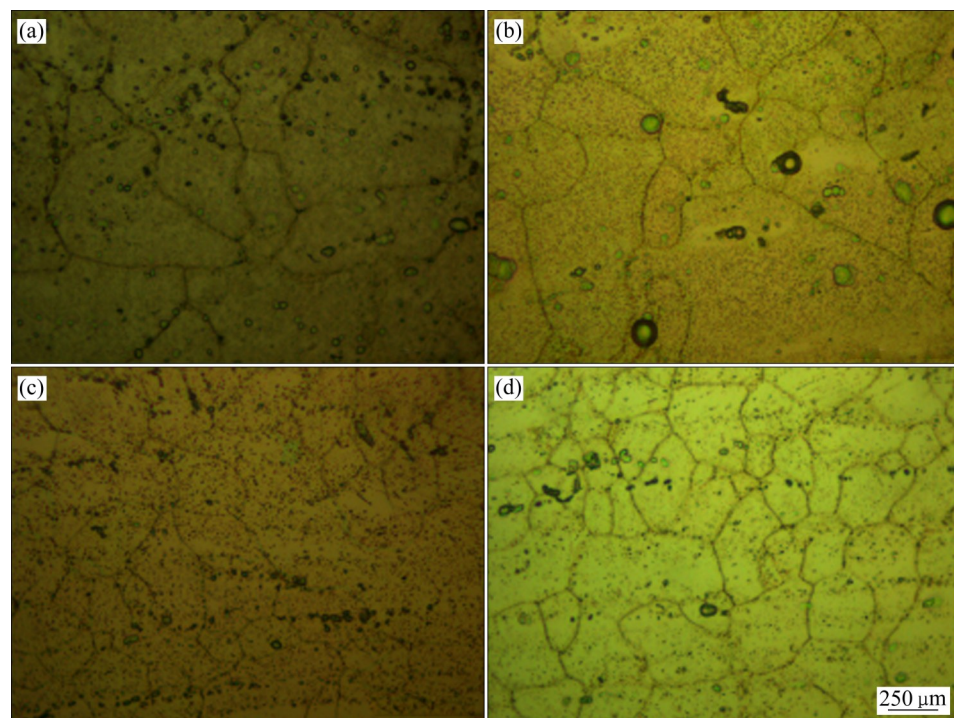


图 5 不同 Sc 含量 6005A 合金固溶-时效态金相组织

Fig. 5 Solid solution-aging metallographs of 6005A alloy with different Sc contents: (a) Alloy 1[#]; (b) Alloy 2[#]; (c) Alloy 3[#]; (d) Alloy 4[#]

合金均发生了完全再结晶(见图 5)。与未添加 Sc 合金相比, 添加微量 Sc 合金晶粒都得到了细化, 添加 0.25%Sc 合金细化效果最佳, 从未添加 Sc 时的 76 μm 左右细化到添加 0.25%Sc 时的 33 μm 左右。

对含 0.07%Sc 和 0.25%Sc 铸态合金进行扫描电镜观察和能谱分析, 其背散射图如图 6(a)和(b)所示, 图中第二相的化学成分见表 2。图 6 中亮白色的棒状第二相主要含有 Al、Si、Mn、Fe 元素, 并且含有少量 Cr 元素, 由于 Mn 和 Cr 元素可以替换部分 Fe 元素, 且 Mg_2Si 相为 AlFeSi 相的形成提供非均匀形核位点^[12-13], 因此, AlFeSi 相中往往含有少量的 Mg、Cr、Mn 元素, 推测该相为 $\beta\text{-AlFeSi}(\text{MnCr})$ 相。图 6 中黑色棒状第二相主要含有 Al、Mg、Si 元素, 且 Mg 与 Si 摩尔比约为 2, 推测该相为 Mg_2Si 相。图 6 中暗灰色棒状第二相主要含有 Al、Mg、Si 元素, 且 Si 与 Mg 的摩尔比约为 2, 推测该相为 MgAl_5Si_2 相。图中灰色的球状第二相主要含有 Al、Mg、Si 元素以及少量的 Sc、Cu、Fe 元素, ZENG 等^[14]在 Al-7Si-0.6Mg 中添加 0.04Sc 也发现了类似的球状相, 认为该球状相为 $\text{AlFeSi}(\text{Mg,Sc})$ 相, 根据图 6 中球状相的成分, 可判定该相为 $\text{AlFeSi}(\text{Mg,Sc,Cu})$ 相。

Cu)相。

图 7(a)和(b)所示分别为 0.07%Sc 和 0.25%Sc 合金固溶时-效态的 TEM 像。图 7(c)和(d)所示为 0.25%Sc 合金铸态 TEM 像。图 7(e)所示为图 7(d)中马蹄状相选取电子衍射像。从图 7(a)和(b)中可看到大量弥散分布的 Mg_2Si 相, 且随着 Sc 含量的增加, Mg_2Si 相不断细小, 但其与基体的共格关系被破坏。从图 7(c)和(d)可以看到, 少量球形第二相对位错的钉扎, 对图 7(d)中马蹄状第二相进行选取电子衍射(见图 7(e)), 可推测该相为 Al_3Sc 相。

2.3 讨论

微量 Sc 除了少量固溶于合金基体中以外, 主要存在形态由 Al-Sc 二元相图(见图 8)可知, 应为 Al_3Sc 相, 初生 Al_3Sc 相通常在合金凝固过程中形成, 可明显细化晶粒, 主要原因如下: 1) Al_3Sc 相晶体结构($L12$ 型, $a=0.4103\text{nm}$)与 Al 基体(FCC, $a=0.4059\text{nm}$)极为相近, 且两相之间的错配度小于 1.25%; 2) Sc 元素与 Al 元素之间的亲和力远大于其他元素, 因此, 在合金凝固过程中往往优先形成 Al_3Sc 相; 3) Al_3Sc 相的熔点高($1320\text{ }^\circ\text{C}$)、稳定、分布均匀(见图 7(c)和(d))。因此, Al_3Sc 相可作为其他

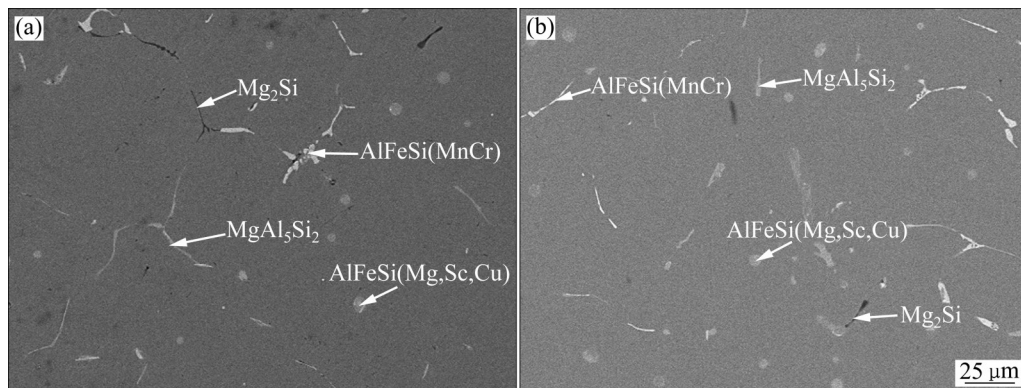


图 6 合金铸锭的 SEM 像

Fig. 6 SEM images of cast alloy: (a) 0.07%Sc; (b) 0.25%Sc

表 2 合金铸锭中第二相的化学成分表

Table 2 Chemical composition table of second phase in alloy ingot

Phase	Mass fraction/%							
	Al	Mg	Si	Sc	Cr	Mn	Fe	Cu
Mg_2Si	53.91	31.3	14.5	0.1	0.00	0.00	0.00	0.19
$\text{AlFeSi}(\text{Mg,Sc,Cu})$	73.19	11.06	12.44	1.40	0.00	0.00	1.02	0.89
$\text{AlFeSi}(\text{MnCr})$	75.56	0.72	7.62	0.00	0.80	7.00	8.10	0.20
MgAl_5Si_2	69.19	10.35	16.68	0.82	0.00	0.93	2.03	0.00

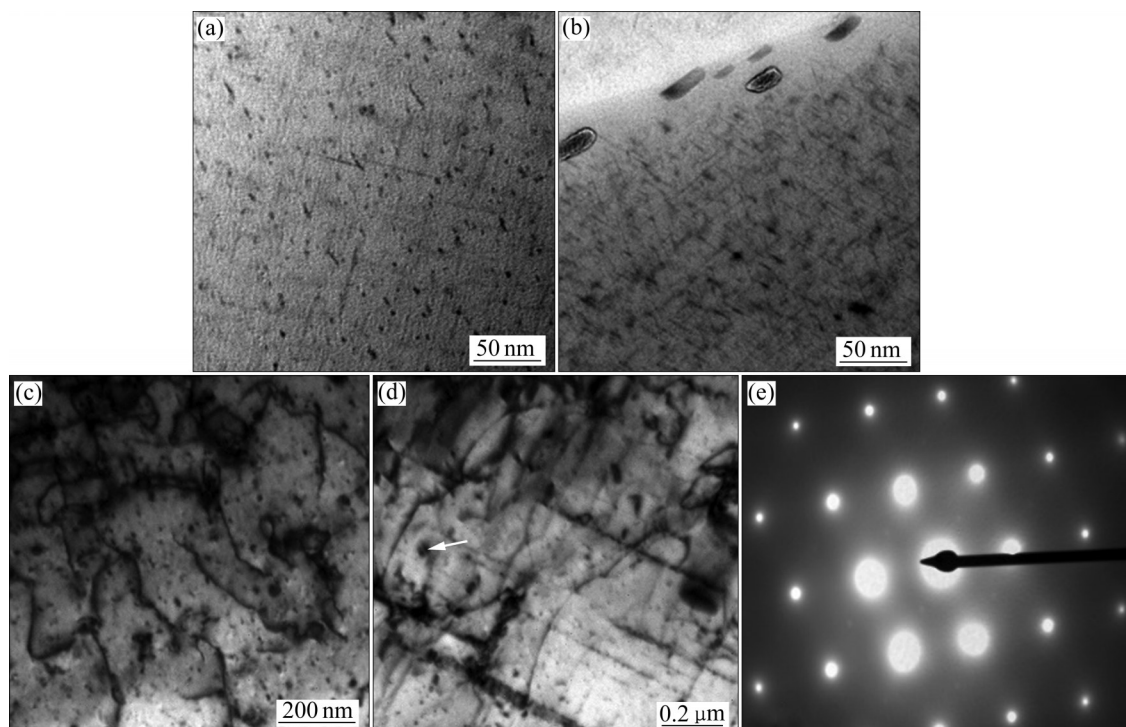


图7 不同Sc含量6005A合金TEM像

Fig. 7 TEM images of 6005A alloy with different Sc contents: (a) Solid solution aged alloy 2[#]; (b) Solid solution aged alloy 4[#]; (c) As-cast alloy 4[#]; (d) As-cast alloy 4[#]; (e) Selected electron diffraction along with $\langle 110 \rangle$ Al

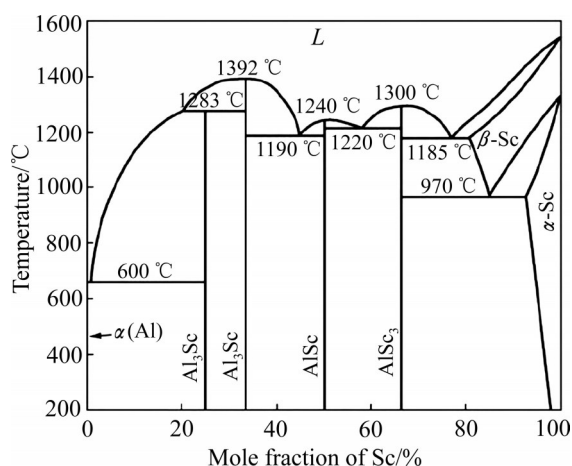


图8 Al-Sc二元合金相图

Fig. 8 Phase diagram of Al-Sc binary alloy

相的形核位置, 大大降低形核功, 使晶粒快速形核^[15-17], 从而达到细化晶粒效果(见图3、4和5)。

次生 Al_3Sc 相是在均匀化或热加工过程中从基体中析出来的, 其形貌细小、弥散、均匀, 主要对合金起再结晶抑制作用, 文献认为^[18-20]: 由于 Sc 在 Al 中的固溶度极小(0.23%, 600 °C), 在随后热处理过程中, 从基体中析出了大量弥散分布的 Al_3Sc 颗粒(见图7(c)和(d)), 这些颗粒可以有效地阻

止亚晶界的迁移和合并, 钉扎位错(见图7(c)和(d)), 阻碍位错的迁移, 提高合金的再结晶温度, 从而抑制了合金再结晶(见图5)。

由图6可知: 在合金中加入一部分 Sc 主要形成 Al_3Sc 相, 有晶粒细化和抑制再结晶作用, 但同时还形成 $\text{AlFeSi}(\text{Mg}, \text{Sc}, \text{Cu})$ 相, 消耗了一定量的 Si, 减少了主强化相 Mg_2Si 的量, 且 0.25%Sc 合金中 $\text{AlFeSi}(\text{Mg}, \text{Sc}, \text{Cu})$ 相的数量远高于 0.07%Sc 合金中的, 这可能是 Sc 含量越高合金强度反而没有增加的原因。

根据固溶-时效态 TEM 组织(见 7(a)和(b)), 分析可知, 随着 Sc 含量增加, 主强化相 Mg_2Si 由低 Sc 下与基体共格的关系(见图 7(a)), 转变为高 Sc 下与基体非共格关系(见图 7(b)), 使部分 Mg_2Si 相失去强化作用, 降低了含 Sc 合金强度。

综上所述, 在 6005A 合金中添加微量 Sc, 主要生成初生 Al_3Sc 相与次生 Al_3Sc 相, 均对 6005A 合金起强化作用, 这是 6005A 合金强度最初增加的主要原因。但同时也生成了 $\text{AlFeSi}(\text{Mg}, \text{Sc}, \text{Cu})$ 相, 消耗了一定量的 Si, 使主强化相 Mg_2Si 的含量减少, 且当 Sc 增加到一定量时 Mg_2Si 析出相与基体共格关系

被破坏,这是6005A合金强度后来降低的主要原因。

3 结论

1) 添加微量Sc可提高6005A合金强度,含0.07%Sc的6005A合金具有最好的综合拉伸性能,其抗拉强度、屈服强度、伸长率分别为390 MPa、361 MPa、14.2%。

2) 添加微量Sc可细化晶粒,减小枝晶偏析,其中0.07%Sc合金枝晶最小,均质化后,枝晶得到完全消除。

3) 添加微量Sc,合金纤维组织得到细化,固溶-时效后,合金发生了完全再结晶。

4) 铸态合金中存在球状的 α -AlFeSi(Mg,Sc,Cu)相;固溶-时效态含Sc合金中存在大量弥散 Mg_2Si 相,且随着Sc含量增加, Mg_2Si 相的数量不断增多,但其共格关系被破坏。

REFERENCES

- [1] 韩再旭,武子原,潘明升,等.生产地铁车体材料用的6005A铝合金扁锭熔铸工艺[J].轻合金加工技术,2016,44(6):13-17.
HAN Zai-xu, WU Zi-yuan, PAN Ming-sheng, et al. Melting & casting technology of 6005A Al-alloy slabs for metro vehicle body[J]. Light Alloy Fabrication Technology, 2016, 44(6): 13-17.
- [2] 贾志宏,丁立鹏,吴赛楠,等.汽车车身用6000系铝合金板材微观组织与热处理工艺的研究进展[J].材料工程,2014,42(12):104-113.
JIA Zhi-hong, DING Li-peng, WU Sai-nan, et al. Research progress on microstructure and heat treatment of 6000 series aluminum alloys sheet for automotive body[J]. Journal of Materials Engineering, 2014, 42(12): 104-113.
- [3] LEE W G, KIM J S, SUN S J, et al. Characteristics of dissimilar materials Al alloy(A6005)-Mg alloy(AZ61) under friction stir welding for railway vehicle[J]. Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society, 2016, 17(8): 706-713.
- [4] DING X F, SUN J, YING J, et al. Influences of aging temperature and time on microstructure and mechanical properties of 6005A aluminum alloy extrusions[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2012, 22: s14-s20.
- [5] SYAIFUDIN A, NURFADILLAH E M, FARID A R, WINDHARTO A. Strength consideration on car body of light rail transit making from aluminum extrusion[C]// IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Indonesia: IOP Publishing, 2021, 1034(1): 012025.
- [6] 王雷,于东明,丁勇.动车组运营速度由350 km/h提升至400 km/h可行性研究[J].机车电传动,2020(2):17-22.
WANG Lei, YU Dong-ming, DING Yong. Feasibility study on raising the operation speed of EMU from 350 km/h to 400 km/h[J]. Electric Drive for Locomotives, 2020(2): 17-22.
- [7] ZHANG J Y, GAO Y H, YANG C, et al. Microalloying Al alloys with Sc: a review[J]. Rare Metals, 2020, 39(6): 636-650.
- [8] 王国军,路丽英,丛福官.含Sc变形铝合金的研究现状及其发展趋势探讨,2019年中国铝加工产业年度大会暨中国(邹平)铝加工产业发展高峰论坛,邹平:[s.n.],2019:732-747.
WANG Guo-jun, LU Li-ying, CONG Fu-guan. Research status of deformed aluminum alloys containing Sc and its development trend discussion, 2019 China Aluminum Processing Industry Annual Conference and China (Zouping) Aluminum Processing Industry Development Summit, Zouping: [s.n.], 2019: 732-747.
- [9] COSTA S, PUGA H, BARBOSA J, et al. The effect of Sc additions on the microstructure and age hardening behaviour of as cast Al-Sc alloys[J]. Materials & Design, 2012, 42: 347-352.
- [10] PAN D, ZHOU S, ZHANG Z, et al. Effects of Sc(Zr) on the microstructure and mechanical properties of as-cast Al-Mg alloys[J]. Materials Science and Technology, 2017, 33(6): 751-757.
- [11] HUANG K, FENG Q, ZHOU W B, et al. Effects of Sc addition on microstructure, mechanical and corrosion resistance properties of 7055 Al alloy[J]. Materials Research Express, 2021, 8(4): 046534.
- [12] BAYAT N, CARLBERG T, CIESLAR M. In-situ study of phase transformations during homogenization of 6005 and 6082 Al alloys[J]. Journal of Alloys & Compounds, 2017, 725: 504-509.
- [13] QUE Z P, MENDIS C L. Heterogeneous nucleation and phase transformation of Fe-rich intermetallic compounds in Al-Mg-Si alloys[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2020, 836: 155515.
- [14] ZENG Y C, WU C T, YANG C H. Effects of trace Be and Sc addition on the thermal stability of Al-7Si-0.6Mg alloys[J]. Materials Science and Engineering A, 2014, 614: 54-61.

- [15] JONES M J, HUMPHREYS F J. Interaction of recrystallization and precipitation: The effect of Al_3Sc on the recrystallization behavior of deformed aluminum[J]. *Acta Materialia*, 2003, 51(8): 2149–2159.
- [16] XU P, JIANG F, TONG M M, et al. Precipitation characteristics and morphological transitions of Al_3Sc precipitates[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2019, 790: 509–516.
- [17] WANG R H, JIANG S Y, CHEN B A, et al. Size effect in the Al_3Sc dispersoid-mediated precipitation and mechanical/electrical properties of Al-Mg-Si-Sc alloys[J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2020, 57: 78–84.
- [18] SEIDMAN D N, MARQUIS E A, DUNAND D C. Precipitation strengthening at ambient and elevated temperatures of heat-treatable Al(Sc) alloys[J]. *Acta Materialia*, 2002, 50(16): 4021–4035.
- [19] 张雅, 杜晓东, 李玉坤, 等. Sc对Al-Si-Mg-Cu-Ti合金铸态组织和力学性能的影响[J]. *轻金属*, 2018(3): 49–52.
- ZHANG Ya, DU Xiao-dong, LI Yu-kun, et al. Effect of Sc on as-cast microstructures and mechanical properties of Al-Si-Mg-Cu-Ti alloys [J]. *Light Metals*, 2018(3): 49–52.
- [20] DUMBRE J, KAIRY S K, ANBER E, et al. Understanding the formation of $(\text{Al}, \text{Si})_3\text{Sc}$ and V-phase $(\text{AlSc}_2\text{Si}_2)$ in Al-Si-Sc alloys via ex situ heat treatments and in situ transmission electron microscopy studies[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2021, 861: 158511.

Effect of trace Sc on microstructure and tensile properties of 6005A alloy

PAN De-cong¹, LIU Bing¹, YU Qing-bin³, LI Guo-liang³, WANG Wei-yi², DEN Ying², PAN Qing-lin^{1, 2}

(1. Research Institute of Light Alloy, Central South University, Changsha 410083, China;

2. College of Materials Science and Engineering, Central South University, Changsha 410083, China;

3. CRRC Changchun Railway Vehicles Co., Ltd., Changchun 130062, China)

Abstract: The 6005A alloy ingots with different Sc contents were prepared by ingot metallurgy (IM). And the alloy ingots were homogenized, hot rolled, intermediate annealed and cold rolled into 2.5 mm thick sheets. The effects of Sc content on the tensile properties, grain size, metallographic structure and phase composition of 6005A alloy were studied. The results show that the strength of 6005A alloy can be improved by trace Sc, and the alloy containing 0.07% Sc has the best tensile properties. The tensile strength and yield strength are increased by 19 MPa and 47 MPa, respectively, and the elongation is also increased by 1.2%. The grain of the alloy with trace Sc is refined, and the refining effect is better with the increase of Sc content. The addition of trace Sc reduces the segregation of dendrite in the alloy, forms dispersed Al_3Sc phase, and inhibits the recrystallization of the alloy. With the increase of Sc content, the dispersed Mg_2Si phase is refined.

Key words: 6005A alloy; Sc; microalloying; Al_3Sc phase

Foundation item: Project(9600006518) supported by the China Railway Changke Science and Technology Program

Received date: 2021-07-08; **Accepted date:** 2021-09-24

Corresponding author: LIU Bing, Tel: +86-731-88830933, E-mail: pdc1997@126.com

(编辑 龙怀中)