· 今日铸造 Today Foundry ·
DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2021.01.015

钪对铝合金组织性能影响的研究现状与趋势

刘晓涛,白 杰,张海涛,南云飞,何 昊
(东北大学 材料电磁过程研究教育重点实验室,辽宁 沈阳 110819)

摘 要:综述了微量钪对铝合金的显微组织和性能影响的研究现状。Sc 可以细化铝合金晶粒、抑制再结晶,对其力学性能、焊接性能和耐蚀性能的提高均有重要的影响。结合国内外研究,对 Sc 改性铝合金的研究和未来应用提出了一些看法。

关键词:铝合金;钪;组织;性能
中图分类号: TG146.2 **文献标识码**:A **文章编号**:1000-8365(2021)01-0048-05

Research Status and Trend of Sc Influence on Microstructure and Properties of Aluminum Alloy

LIU Xiaotao, BAI Jie, ZHANG Haitao, NAN Yunfei, HE Hao
(Key Lab of Electromagnetic Processing of Materials, Ministry of Education, Northeastern University, Shenyang 110819, China)

Abstract: The research status of influence of scandium on microstructure and properties of aluminum alloy was reviewed. Sc can refine the grain size of aluminum alloy and inhibit recrystallization, which had an important influence on the improvement of mechanical properties, welding properties and corrosion resistance. Combined with the research at home and abroad, the research and future application of Sc modified aluminum alloy are prospected.

Key words: aluminum alloys; Sc; microstructure; properties

Sc既是稀土元素又是3d型过渡族元素,不仅兼有两者的优点还比同族其他元素作用效果更佳[1,2]。Sc多以中间合金的形式引入到铝合金,以提高合金性能。此研究领域在起初阶段就受到了研究者的广泛关注,主要包括成分和工艺设计、组织与性能改善、改性机理以及三者间的关系。20世纪60年代,前苏联开始研究铝合金中的“Sc效应”。1971年,美国的一篇专利文献中指出:微量Sc对铝合金具有显著强化效果。此后,美、日、德等国陆续开展大量研究且成果可喜。俄罗斯在苏联基础上进行更加深入的研究,形成了含钪铝合金从规模化生产到工业化应用的完备体系[2,5]。然而,国内对含Sc铝合金的开发尚处在初步试用研究阶段,研究多集中在性能提升和显微组织结构改善等方面。

Sc对铝合金的作用包括铸造或焊接过程中的晶粒细化;强烈的沉淀强化效果;抑制再结晶等。Sc能显著地改善铝合金的力学性能、耐高温性、抗腐蚀及焊接性能。Sc改性后的铝合金是航空航天、兵器、舰船、汽车轻量化及高铁等领域的理想合金材料[2,6,7]。分析了Sc对铝合金改性的研究进展,并指出含钪铝合金在制备和应用方面可能遇到的困难和未来的发展趋势。

1 Sc在铝合金中的作用机制

1.1 晶粒细化和组织改善

Sc是铝合金铸造晶粒结构中最强的孕育剂。如图1,Sc在铝中的极限固溶度约为0.4%,共晶成分为0.55%。平衡凝固条件下,Sc含量大于0.55%且铸造温度降至655 ℃时能发生共晶反应(L→α-Al+Al_3Sc)。从α-Al的过饱和固溶体中最先析出微

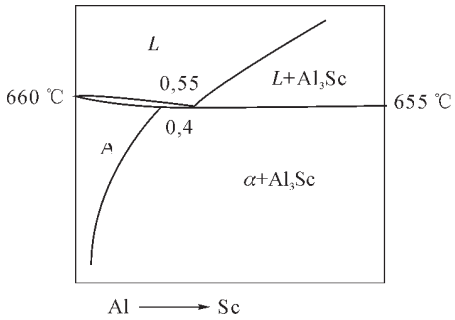

图 1 Al-Sc 系合金平衡相图
Fig.1 Equilibrium phase diagram for Al-Sc system

收稿日期:2020-10-31
基金项目:国家自然科学基金资助项目(U1864209)
作者简介:刘晓涛(1972-),辽宁辽阳人,博士,副教授.研究方向:轻合金组织与性能.电话:18809819088,E-mail:liuxt@epm.neu.edu.cn

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

米级初生Al_3Sc粒子且不经历任何亚稳相阶段[10]，在后期凝固过程中作为α-Al结晶的形核质点[11]。初生Al_3Sc相呈球状且密度高，弥散分布在铝基体中并与之保持共格关系[12]。它的$Ll_2(AuCu_3)$型结构与基体同属于FCC晶格，点阵常数接近，错配度很低[13]。晶内和晶界分布着的Al_3Sc相在400～500 ℃甚至是平衡状态下仍然同α-Al维持共格关系[14]。如此，Sc能有效细化合金晶粒或改善其组织。

文献[15]显示0.3%～0.5% Sc使Al-Cu-Mg-Ag-Zr合金铸态晶粒平均尺寸由300 μm降至60 μm。0.1% Sc就能使铸态Al-11.6% Si合金中针状β-Al_5FeSi相转变为细小球状α-Al(Fe，Sc)Si相[16]。Xu[17]等利用0～0.81% Sc改性铸态Al-Si-Mg(F357)合金：细化了组织晶粒；缩短了α-Al二次枝晶臂间距；棒状共晶Si变为球状；针状有害相(β-Al_5FeSi)消失。

Sc与稀土或Zr、V、Ti、Cr等过渡元素复合比单独改性的效果更佳[18,19]。上述元素(X)与Sc微量存于铝熔体时，由于其扩散系数小于Sc[20]，铸造凝固时可能首先析出Al_3Sc。随着Al_3Sc晶粒的长大，Al_3Sc中部分Sc原子的点阵位置被X替代，析出“核/壳”式的$Al_3(Sc,X)$相[19,21]。这种相内层为Al_3Sc外层是Al_3X，其结构仍为Ll_2型与铝基体在结构和晶格尺寸上匹配度比Al_3Sc更高[13,19,22]。

0.2% Sc和Ti与0.2% Sc相比，对工业纯铝晶粒的细化效果更理想：组织全被细化为等轴晶，平均尺寸是90 μm[23]。继续添加0.2% Zr后，其等轴晶组织分布更均匀、平均尺寸降至62 μm[24]。

1.2　沉淀强化

含Sc铝合金熔体凝固时快速冷却，易获得Sc较高的过饱和度。250～350 ℃时，从过饱和固溶体中会析出出纳米级次生Al_3Sc粒子[25]。该粒子在晶内与晶界上均匀析出是合金具有显著沉淀强化效果的主因。Al_3Sc沉淀硬化的温度范围与可热处理铝合金沉淀硬化的温度范围不重合(见图2)，很难通过普通热处理工艺温度从可热处理合金中获得Al_3Sc相的完全沉淀硬化[26]。同时，在不可热处理铝合金中添加Sc元素使其具备了与可热处理铝合金类似的时效硬化效应。

Sc在α-Al中固溶度和扩散系数[9,27]很小。因此，高温下Al_3Sc颗粒在基体中能稳定存在并阻碍晶界迁移和位错运动。资料[28]表明，Al-(0.1%～0.3%)Sc二元合金在275～350 ℃下时效，有大量球状纳米级(约1.4～9.6 nm)Al_3Sc粒子析出并弥散分布于基体之中，促使其强度比纯铝高120～180 MPa。过时效条件下，Al_3Sc颗粒随时间延长或持续升温而粗化不利于合金强化。文献[14]显示，二元Al-0.2%Sc合金

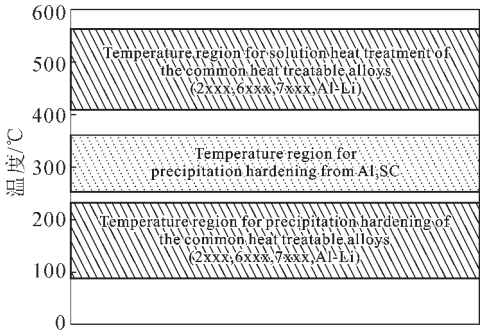

图 2　可热处理铝合金固溶热处理和沉淀硬化的典型温度区域以及 Al_3Sc 沉淀硬化的典型温度区域[26]

Fig.2　Typical temperature regions for solution heat treatment and precipitation hardening of the common heat treatable alloys, and for precipitation hardening from Al_3Sc

在400～490 ℃时效析出的Al_3Sc粒子大致历经3个阶段：晶粒平均尺寸r<15 nm，几乎都与基体共格；r为15～40 nm，与基体保持共格和半共格关系；r>40 nm，几乎都与基体半共格。

1.3　抑制再结晶

含钪铝合金中的第二相粒子如Al_3Sc和$Al_3(Sc,X)$等热稳定性高，难以聚集、回溶和长大，在通常的再结晶温度下，强烈地“钉扎”亚晶界、晶界和位错，使之难以迁移和运动，抑制了合金形变组织晶粒形核与长大。Rφyset [29] 发现Sc可以提高冷加工态Al-4Mg合金起始和终了再结晶温度。Roumina[30]等认为经70%和90%冷轧变形的Al-2.90% Mg-0.16% Sc合金在430 ℃退火时，再结晶与Al_3Sc相的析出同时发生，起始和终了再结晶温度几乎与退火时间无关。外加应变通过增加晶界上Al_3Sc形核质点的数量影响再结晶动力学。

$Al_3(Sc,X)$粒子的热稳定性比Al_3Sc粒子更强[3,19]，对再结晶的抑制作用更强。Ocenasek[31]等引入Sc和Zr元素制备了与AA5754合金成分相近的合金并进行冷加工和退火实验。标准AA5754合金在360 ℃下退火5 min可完全再结晶。含0.25% Sc和0.08% Zr的相似合金在520 ℃退火6 h也未明显再结晶直至接近固相线温度时才会明显再结晶。Senkova [32]等发现某种Al-Zn-Mg-Cu-Sc-Zr合金析出的细小弥散Al3(Sc，Zr)相将其使用温度范围拓宽为-196～205 ℃。

Sc还能抑制铝合金在变形过程中的动态再结晶。某含0.12% Sc的7N01合金，经470 ℃/24 h均匀化处理、热挤压和时效处理析出了大量的$Al_3(Sc,Zr,Ti)$粒子[33]。这种粒子与普通7N01合金均匀化后析出的$Al_3(Zr,Ti)$粒子相比，对晶界的钉扎能提高了19倍[33]。新型合金挤压后的组织几乎都呈纤维状。均匀化处理后7N01合金中析出相的数密度、平均直径和体积分数[33]见 表1。

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

表 1 均匀化处理后 7N01 合金中析出相的数密度、平均直径和体积分数
Tab.1 Number density, mean radius and volume fraction of precipitates in N701 alloys after homogenization treatment

Alloys	Precipitates	Number density/m^{-3}	Mean radius/nm	Volume fraction
7N01	$Al_3(Zr,Ti)$	6.8×10^{19}	32	1.2×10^{-3}
7N01 with 0.12%Sc	$Al_3(Sc,Zr,Ti)$	1.5×10^{21}	28	1.9×10^{-2}

2 钪对铝合金性能的影响

2.1 对力学性能的影响

Al_3Sc和$Al_3(Sc,X)$等粒子能够阻碍位错运动、稳定晶界和亚晶结构[19,34]在合金变形过程中保留非再结晶组织，发挥亚结构强化作用。Sc的强化还涉及细晶强化和位错强化等，这对提升铝合金综合力学性能十分有效。

Sc和Zr以合理比例[3,19]复合不仅显著提升铝合金强度，还能最大程度削减因钪加入带来的高昂生产成本。俄罗斯牌号的Al-5Mg和Al-6Mg合金的屈服强度分别由170 MPa和180 MPa提高到290 MPa和300 MPa（见表2）[35]。微量Sc和Zr等元素结合适当热处理或变形工艺还能够提升Al-Mg系合金的超塑性能[36]。Smolej[37]认为Sc增强Al-Mg系合金超塑性的能力可能比Zr更强即在较宽的温度范围内表现出更佳的超塑性能。Al-Mg合金与Al-Mg-Sc合金力学性能比较[35]见表2。

表 2 Al–Mg 合金与 Al–Mg–Sc 合金力学性能比较
Tab.2 Mechanical properties of Al–Mg–Sc alloys and traditional Al–Mg alloys

Alloys	Mean content of base alloying components(%)	σ_b/MPa	$\sigma_{0.2}$/MPa	δ_4(%)
Al-Mg5	Al-5.3Mg-0.55Mn-0.06Ti	300	170	20
01545	Al-5.2Mg-0.3Sc-0.1Zr	380	290	16
Al-Mg6	Al-6.3Mg-0.65Mn-0.06Ti	340	180	20
01571	Al-6.3Mg-0.35Sc-0.1Cr-0.1Zr	400	300	15

某些含Cu铝合金或Al-Li合金通过Sc与热处理制度合理配合能够增强、增塑和耐高温。如高强Al-Zn-Mg-Cu合金添加适量的Sc，经挤压和T6热处理后不仅强度稍有提高还大幅提升了伸长率[38]。孙军[39]等人在Al-Cu系合金中添加0.1%～0.5% Sc，通过特殊热处理工艺使两种原本不共存的时效强化相Al_2Cu和Al_3Sc有效结合，提高了普通Al-Cu合金常温综合力学性能与高温力学性能，使其在严苛高温蠕变条件下仍能安全工作。0.3% Sc可使某种含的Al-Cu合金晶粒尺寸小于1 μm，屈服强度提高了150 MPa，伸长率提高了280%[40]。

2.2 可焊性、抗热裂性和耐蚀性能的影响

微量Sc能有效提高铝合金母材或填充合金的可焊性和抗热裂性。Al_3Sc、$Al_3(Sc,X)$相在热能大量输入的焊接过程中不易长大、粗化和再结晶，保障热影响区母材不软化和焊缝强度[41,42]，甚至愈合热裂纹[43]。Sc的变质作用包括：细化焊缝区的晶粒组织，将粗大枝晶转变为细小等轴晶；改变低熔点脆性共晶化合物的连续状态[36]以降低焊接区的热裂性倾向[40]；

含Sc铝合金高强、轻质且抗热裂性好，是航空航天领域的良好材料。表3[44]展示了焊丝焊接的Al-Li-Sc合金接头的力学性能情况。1420和1421合金被含Sc焊丝焊接后获得了更好的退火效果：接头单位时间内承受的临界变形由9.1 mm/min增至14.5 mm/min[44]。铝锂焊丝焊接铝锂合金性能对比情况[44]见表3。

Al-Zn-Mg系合金可焊接[45]，增加其Zn、Mg含量虽然提高了强度但也降低了抗应力腐蚀性[38]。Sc能够解决这一弊端。Reddy[45]等发现7010合金经0. 25% Sc改性后焊缝处晶粒结构细小且Sc引起的晶界凝固产物不连续，合金的抗热裂性、强度和延展性均明显提高。

耐蚀性涵盖抗应力腐蚀性能、晶间腐蚀性能以

表 3 铝锂焊丝焊接铝锂合金性能对比情况
Tab.3 Comparison of properties of using welding wire to joint Al–Li alloy

Alloys	Welding wire	Postweld treatment	σ_b/MPa	bending angle/°	Impact toughness/J·cm^{-2}
1 420 (without Sc)	C^B-AMr 63 (without Sc)	Without heat treatment	310	70	17
			350	47	4.5
	C^B-01597 (with Sc)	400 ℃/20 min Stable treatment	340	65	19
			400	50	9.5
1 421 (with Sc)	C^B-AMr 63 (without Sc)	400 ℃/20 min Stable treatment	330	65	15
			360	40	5.5
	C^B-01597 (with Sc)		340	65	17
			390	40	10

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

及剥落腐蚀性能等。杂质元素易偏聚在晶界表面致使此处形成电位差并成为腐蚀的首发地，合金便从内部变软、开裂和应力缺失[46]。

Sc通过改变晶界上某些脆性沉淀相的连续态而提升合金耐蚀性：Al_3Sc和$Al_3(Sc,Zr)$等粒子在后续热处理阶段能保持合金变形晶粒组织形态，应力开裂将失去沿再结晶晶粒萌发的“媒介”[47]。Mukhopadhyay[48]等指出均匀分布的$Al_3Sc_xZr_{1-x}$粒子对再结晶的抑制是Al-Zn-Mg-Cu-Sc合金板材在峰值时效时抗应力腐蚀性能达到最佳效果的重要原因。

Sc通过降低空位浓度，限制溶质原子扩散来减小或消除时效处理后合金的“晶间无沉淀析出带”(PFZ)[49]。PFZ的电位较低，易腐蚀，PFZ的消失缩小了晶间电极电位差便提高了铝合金抗晶间腐蚀性能[49-51]。

Sc能缩小Al-Mg系合金与基体的电位差，增强其抗剥落腐蚀性能。彭勇宜[52]等人发现微量Sc和Zr能够降低Al-Mg-Mn合金中Mn的含量。合金经350 ℃退火1 h后其力学性能和抗剥落腐蚀性能达最佳结合。

Sc还能够改变铝合金某些成分的含量来提高其耐蚀性。Wu 等[53]发现0.6% Sc在T7处理后A201合金中形成了固溶处理过程中的难溶相—W($Al_{8-5.4}Cu_{6.6-4}Sc$)相，降低了对耐蚀性不利的Cu元素的含量从而提高合金耐蚀性。

3　结语与展望

近年来不断有新型含钪铝合金材料推出，如超高强高韧性的Al-Zn-Mg-(Cu)-Sc系合金、航天航空领域常用的高强耐蚀可焊Al-Li-Sc系合金、新型高温铝合金和汽车和船舶上应用的耐蚀中强Al-Mg-(Mn)-Sc系合金等。含钪铝合金加工制备生产工艺等方面研究促进了具有优良综合性能的铝合金在不同领域的应用。由此，可以预见：①未来研发更多高性能且大规模应用的铝合金，其研究重点可能会放在Sc与其他相对廉价元素复合合金化上；②探寻含钪强化相与其他有益第二相的最佳结合工艺也是未来研究工作的难点，并因此产生更多铝合金方面的新型生产工艺。

参考文献：

[1] 王祝堂，张燕，江斌. 钪-铝合金的新型微量合金元素[J]. 轻合金加工技术，2000，28(1): 31-32.

[2] 尹志民，潘清林，姜锋，等.钪和含钪合金[M]. 第1版.长沙：中南大学出版社，2007.

[3] Zakharov V V. Prospects of creation of aluminum alloys sparingly alloyed with scandium [J]. Metal Science and Heat Treatment, 2018, 60(3-4): 172-176.

[4] Parker B A, Zhou Z F, Nolle P. The effect of small additions of scandium on the properties of aluminium alloys[J]. Journal of Materials Science, 1995, 30(2): 452-458.

[5] 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 [C]//2019年中国铝加工产业年度大会暨铝加工产业发展高峰论坛论文集. 山东邹平:2018: 886-899.

[6] Vladimir B, Sergey S, Evgeny Z, et al. Study of strength properties of semi-finished products from economically alloyed high-strength aluminium-scandium alloys for application in automobile transport and shipbuilding[J]. Open Engineering, 2018, 8(1): 69-76.

[7] 孙军，刘云龙，崔滔. 我国钪矿资源概况及产业发展建议[J]. 资源与产业，2019，21(2):74-79.

[8] Zakharov V V. Effect of scandium on the structure and properties of aluminum alloys[J]. Metal Science & Heat Treatment, 2003, 45 (7): 246-253.

[9] Davydov V G, Rostova T D, Zakharov V V, et al. Scientific principles of making an alloying addition of scandium to aluminium alloys[J]. Materials Science & Engineering A, 2000, 280(1): 30-36.

[10] Fazeli F, Poole W J, Sinclair C W. Modeling the effect of Al_3Sc precipitates on the yield stress and work hardening of an Al-Mg-Sc alloy[J]. Acta Materialia, 2008, 56(9): 1909-1918.

[11] Norman A F, Prangnell P B, Mcewen R S. The solidification behaviour of dilute aluminium-scandium alloys [J]. Acta Materialia, 1998, 46(16): 5715-5732.

[12] Williams C, Wood T, Sanders P, et al. Effect of Mg content on Al_3Sc-Dispersoid formation in cast billets of Al-Mg-Sc alloys[J]. Light Metals, 2019, 77(1): 1469-1471.

[13] Zhang C M, Jiang Y, Cao F H, et al. Formation of coherent, core-shelled nano-particles in dilute Al-Sc-Zr alloys from the first-principles [J]. Journal of Materials Science & Technology, 2019, 35(5): 930-938.

[14] Iwamura S, Miura Y. Loss in coherency and coarsening behavior of Al_3Sc precipitates[J]. Acta Materialia, 2004, 52(3): 591-600.

[15] 肖代红，宋旼，张福勤，等. 钪对铸态Al-Cu-Mg-Ag-Zr合金组织与性能影响[J]. 中国科技论文，2009，4(4): 239-242.

[16] Tzeng Y C, Jian S Y. Effects of the addition of trace amounts of Sc on the microstructure and mechanical properties of Al-11.6Si alloys [J]. Materials Science & Engineering A, 2018, 723(apr.18): 22-28.

[17] Xu C, Xiao W, Hanada S, et al. The effect of scandium addition on microstructure and mechanical properties of Al-Si-Mg alloy: A multi-refinement modifier [J]. Materials Characterization, 2015, 110(2015): 160-169.

[18] Zhou W B, Liu C Y, Yu P F, et al. Effect of scandium on microstructure and mechanical properties of high zinc concentration aluminum alloys [J]. Materials Characterization, 2017, 127: 371-378.

[19] Zakharov V V, Fisenko I A. Some principles of alloying of aluminum alloys with scandium and zirconium in ingot production of deformed semiproducts [J]. Metal Science and Heat Treatment, 2019, 61(3-4):217-221.

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

[20] Saumitra S, Todorova T Z, Zwanziger J W. Temperature dependent lattice misfit and coherency of Al_3X (X=Sc, Zr, Ti and Nb) particles in an Al matrix [J]. Acta Materialia, 2015, 89(2015): 109-115.

[21] Popova E A, Kotenkov P V, Pastukhov E A, et al. Master alloys Al-Sc-Zr, Al-Sc-Ti, and Al-Ti-Zr: Their manufacture, composition, and structure [J]. Russian Metallurgy (Metally), 2013 (8): 590-594.

[22] 杜元元，苏学宽，邹景霞，等. Al-Sc合金中Al_3Sc析出相的研究进展[J]. 金属热处理，2007，32(2): 12-15.

[23] 余爱武，杨成刚，顾丹，等. Sc、Ti对纯铝组织和力学性能的影响[J]. 热加工工艺，2016，45(10): 100-102.

[24] 方三明，杨成刚，余爱武，等. Sc, Zr和Ti复合合金化对纯铝组织和力学性能的影响[J]. 热加工工艺，2015，44(10): 87-89.

[25] Marquis E A, Seidman D N. Nanoscale structural evolution of Al_3Sc precipitates in Al (Sc) alloys [J]. Acta Materialia, 2001, 49 (11): 1909-1919.

[26] Rϕyset J. Scandium in aluminium alloys overview: physical metallurgy, properties and applications [J]. Metallurgical Science and Technology, 2013, 25(2): 11-21.

[27] Kerkove M A, Wood T D, Sanders P G, et al. The diffusion coefficient of scandium in dilute aluminum-scandium alloys [J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2014, 45(9): 3800-3805.

[28] 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.

[29] Rϕyset J, Ryum N. Precipitation and recrystallization of an Al-Mg-Sc alloy[C]//The 4th International Conference on Aluminium Alloys. The Norwegian Institute of Technology in Norway: 1994: 194-201.

[30] Roumina R, Sinclair C W, Fazeli F. Precipitation and Recrystallization in an Al-Mg-Sc Alloy [J]. Materials Science Forum, 2006,519-521(2006): 1647-1652.

[31] Ocenasek V, Slamova M. Resistance to recrystallization due to Sc and Zr addition to Al-Mg alloys [J]. Materials Characterization, 2001, 47(2): 157-162.

[32] Senkova S V, Senkov O N, Miracle D B. Cryogenic and elevated temperature strengths of an Al-Zn-Mg-Cu alloy modified with Sc and Zr [J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2006, 37 (12): 3569-3575.

[33] 李召明，姜海昌，王昀立，等. 含钪7N01铝合金中Al_3(Sc,Zr,Ti)相的析出及其作用机制[J]. 中国材料进展，2019，38(8): 787-792.

[34] Kodetová V, Vlach M, Kudrnová H, et al. Phase transformations in commercial cold-rolled Al-Zn-Mg-Cu alloys with Sc and Zr addition [J]. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry (2020), https://doi.org/10.1007/s10973-020-09862-x.

[35] Filatov Y A, Yelagin V I, Zakharov V V, et al. New Al-Mg-Sc alloys[J]. Materials Science & Engineering A, 2000, 280(1): 97-101.

[36] Kaibyshev R, Avtokratova E, Apollonov A, et al. High strain rate superplasticity in an Al-Mg-Sc-Zr alloy subjected to simple thermomechanical processing [J]. Scripta Materialia, 2006,54 (12): 2119-2124.

[37] Smolej A, Skaza B, Markoli B, et al. Superplastic behaviour of AA5083 aluminium alloy with scandium and zirconium[J]. Materials Science Forum, 2012, 706-709(2012): 395-401.

[38] 戴晓元，夏长清，吴安如，等. 含钪超高强铝合金的研究现状及发展趋势[J]. 材料导报，2006，20(5): 104-107.

[39] 孙军，刘刚，杨冲，等. 高强抗蠕变含钪Al-Cu系铝合金及铸造和热处理工艺: 201810074489.5[P]. 2018-5-18.

[40] Jiang L, Li J K, Liu G, et al. Length-scale dependent microalloying effects on precipitation behaviors and mechanical properties of Al-Cu alloys with minor Sc addition[J]. Materials Science & Engineering A, 2015, 637(2015): 139-154.

[41] Norman A F, Hyde K, Costello F, et al. Examination of the effect of Sc on 2 000 and 7 000 series aluminium alloy castings: for improvements in fusion welding[J]. Materials Science & Engineering A, 2003, 354(1-2): 188-198.

[42] Kah P, Suoranta R, Martikainen J. Advanced gas metal arc welding processes [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2013, 67(1-4): 655-674.

[43] Ca N, Qbau N, Nam N D, Hien N T. The crack healing effect of scandium in aluminum alloys during laser additive manufacturing [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2020, 50(2020): 241-246.

[44] 王新宇，潘青林，周昌荣，等. 含钪铝锂合金的研究与发展[J]. 稀土，2005，26(6): 70-75.

[45] Reddy G M, Mukhopadhyay A K, Rao A S. Influence of scandium on weldability of 7010 aluminium alloy[J]. Science and Technology of Welding & Joining, 2005, 10(4): 432-441.

[46] Cui T F, Liu D X, Shi P A, et al. Effect of stress and galvanic factors on the corrosion behave of aluminum alloy [J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2018, 33(3): 688-696.

[47] Argade G R, Kumar N, Mishra R S. Stress corrosion cracking susceptibility of ultrafine grained Al-Mg-Sc alloy [J]. Materials Science & Engineering A, 2013, 565(Mar.10): 80-89.

[48] Mukhopadhyay A K, Prasad K S, Kumar V, et al. Key microstructural features responsible for improved stress corrosion cracking resistance and weldability in 7xxx series Al alloys containing micro/ trace alloying additions [J]. Materials Science Forum, 2006, 519(2006): 315-320.

[49] Joh C H, Yamada K, Miura Y. The effect of Sc on the formation and growth of PFZ in Al-Li alloys [J]. Materials Science Forum, 2000, 331-337(2-3): 1037-1042.

[50] 刘贵立，方戈亮. Sc在Al-Zn-Mg-Cu超高强铝合金中作用机理的电子理论研究[J]. 物理学报，2009，58(7): 509-514.

[51] Liu X Y, Li M J, Gao F, et al. Effects of aging treatment on the intergranular corrosion behavior of Al-Cu-Mg-Ag alloy [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2015, 639(2015):263-267.

[52] 彭勇宜，尹志民. Sc与Zr对Al-Mg-Mn合金力学性能和剥落腐蚀性能的影响[J]. 中国稀土学报，2006，24(2): 217-222.

[53] Wu C T. Effects of Scandium Addition and T7 Heat Treatment on Thermal Stability and Corrosion Properties of A201 Alloy[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2017, 27(1): 1-11.

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net