• 试验研究 Experimental Research •
DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2020.03.001

变形及热处理对 Al–Sc 二元合金力学性能与导电性能的影响

谷立东[1],应 韬[1],杨剑英[2],李德江[1],曾小勤[1]
(1.上海交通大学 材料科学与工程学院,上海 200240;2 上海交通大学 包头材料研究院,内蒙古 包头 014000)

摘 要:研究了 Al-xSc(x=0、0.10%、0.45%、0.70%)合金在挤压变形、拉拔变形和热处理过程中的力学性能和导电性能的变化。结果表明,铸态 Al-Sc 二元合金的强度都随 Sc 含量的增加而增加,而电导率逐渐降低。挤压变形后,Al-Sc 合金的晶粒均有所细化,屈服和抗拉强度大幅提升,塑性略有下降;拉拔变形后,加工硬化使各 Al-Sc 合金的强度进一步提高,伸长率大幅降至 1%左右;经过 400 ℃保温 2 min+300 ℃保温 150 min 的热处理后,Al-Sc 合金的伸长率大幅提升,纯铝和 Al-0.1%Sc 合金的强度降低,然而添加 0.45%和 0.70%Sc 的合金强度却有所升高,这主要是由于热处理后含 Sc 第二相析出导致的。两种变形过程对 Al-Sc 合金电导率的影响很小,热处理可通过分解铝钪固溶体大幅提高 Al-Sc 合金的电导率。最终制备的 Al-0.45%Sc 合金屈服强度,伸长率和电导率分别为 210 MPa,7.2%,34.8×10^6 S/m,兼具良好的力学性能和导电性能。

关键词:Al-Sc 合金;挤压变形;拉拔变形;热处理;力学性能;电导率
中图分类号:TG113 **文献标识码**:A **文章编号**:1000-8365(2020)03-0197-06

Effect of Deformation and Heat Treatment on Mechanical and Electrical Properties of Al–Sc Binary Alloy

GU Lidong[1], YING Tao[1], YANG Jianying[2], LI Dejiang[1], ZENG Xiaoqin[1]
(1. School of Materials Science and Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China; 2. Shanghai Jiao Tong University Baotou Institute of Material Research, Baotou 014000, China)

Abstract: The mechanical properties and electrical conductivity of Al-xSc (x=0, 0.1, 0.45, 0.7 wt.%) alloy during extrusion deformation, drawing deformation and heat treatment were investigated. The results show that with increase of Sc content, the strength of as-casting Al-Sc binary alloy increases while the conductivity decreases. After extrusion deformation, the grains are refined and the strength of Al-Sc alloy is greatly improved, also the plasticity decreased slightly. Due to the effect of work hardening, the strength of as-drawn alloys are further increased and the elongation decreases to about 1%. After heat treatment at 400 ℃ for 2 min and at 300 ℃ for 150 min, the elongation of Al-Sc alloy is greatly improved. In addition, the strength of pure Al and Al-0.1%Sc alloy decrease, but strength of Al-0.45%Sc and Al-0.7%Sc alloy increase, which is mainly due to the precipitation of the second phase contained Sc after heat treatment. The two deformation processes have little influence on the conductivity of Al-Sc alloys. Heat treatment can greatly improve conductivity of Al-Sc alloys by decomposition of solid solution. Finally, the yield strength, elongation and conductivity of Al-0.45% Sc alloy prepared are 210 MPa, 7.2% and 34.8×10^6 S/m, respectively, which has good mechanical properties and electrical conductivity properties.

Key words: Al-Sc alloy; extrusion; drawing; heat treatment; mechanical properties; conductivity

收稿日期:2019-12-03
基金项目:内蒙古自治区重大专项(ZDZX2016022);上海市科委科研计划项目(18511109302),国家自然科学基金(51601111);上海交通大学包头研究院创新引导资金(SA0500621)
作者简介:谷立东(1993-),黑龙江绥化人,硕士生.研究方向:铝合金加工技术研究.电话:15821928725,E-mail:gldong5@sjtu.edu.cn
通讯作者:应 韬(1985-),浙江金华人,助理研究员,博士.研究方向:高性能镁合金和铝合金研究.E-mail: yingtao85@sjtu.edu.cn

我国对电线电缆的需求量巨大,随着铜价格迅猛提升及资源的日益匮乏,近年来铝合金导体的研发和产业化发展备受关注,铝合金因其比强度高,塑性和加工性能佳,同时具有优良的导电性和抗蚀性,已发展成为在输电线路上最有望代替铜的金属导体材料[1,2]。但部分铝合金导体存在的质量问题不容回避,使用中发现有铝线容易折断,强度不够高,电导率低,输电容量小,使得电能损失大。因此开发具备高强度、高韧性与高电导率结合的铝合金导体材料,

是实现国内“以铝代铜”的迫切途径。

在所有铝导体材料中，纯铝的导电性最好，但强度低，合金化是提高其强度的常用手段。根据金属导电理论，晶体缺陷会使得传导电子增加电子散射[3]，固溶强化效应对于铝合金电导率的影响是不利的，因此合金化元素应在铝基体中有尽量小的固溶度，且微量就足以对铝合金起较强的变质作用，以保证显著提高合金的力学性能。Sc是迄今所发现对铝合金最为有效的合金化元素[4]，它在铝中最大固溶度只有0.35%。我国Sc资源丰富，将其恰当应用于铝合金导体材料中，可使得强度、塑性、导电性、耐腐蚀性等性能全面提高，有助于资源优势转化为技术优势。现有一些研究表明，低Sc含量的Al-Sc合金具有优异的导电性能和力学性能。李金文[5]等发现，挤压态Al-0.2Sc-0.04Zr合金经330 ℃热处理后，抗拉强度可达160 MPa，室温导电率为63%IACS。RZ Chao等[6]通过连续流变挤压的方法制备了Al-0.16%Sc合金，经热处理后最终强度为110 MPa，室温导电率为63.5%IACS。现有的研究主要针对的是特定成分的Al-Sc合金力学和导电性能测定，对于Al-Sc二元合金在挤压、拉拔、热处理全流程的组织与性能演变并没有系统地研究，因此本文将以Al-xSc（x=0、0.10%、0.45%、0.70%）合金为研究对象，系统分析各材料在挤压变形、拉拔变形和热处理的过程中显微组织、力学性能和电导率的变化，从而为Sc在铝合金导体材料上的应用提供参考。

1 试验方法

试验选取的原材料为99.996%的高纯铝和Al-2%Sc中间合金，其成分见表1。通过金属型重力铸造、热挤压变形、拉拔变形，制备了Al-xSc（x=0、0.10%、0.45%、0.70%）合金导线。具体制备过程如下，按配比量，将纯铝锭置于中频感应加热的石墨坩埚中熔化，当铝液温度为670 ℃，加入Al-2%Sc中间合金，升温至730 ℃充分搅拌，然后静置20 min在720 ℃精炼除气，熔体除渣后再静置20 min，在700 ℃浇注到金属型中，室温冷却制得铸锭；将铸锭表面处理光亮，预热后按挤压比25进行热挤压，挤压温度为300 ℃；对挤压得到的棒材在铝合金拉丝机上进行拉丝，经过12道次得到直径为ϕ3mm的铝线。取拉拔态合金试样，在热处理炉内进行时效处理后取出水淬。选择典型合金状态，对合金导电性与力学性能进行研究。

表 1 纯 Al、Al–Sc 中间合金的成分 w(%)
Tab.1 Composition of pure Al and Al–Sc intermediate alloy

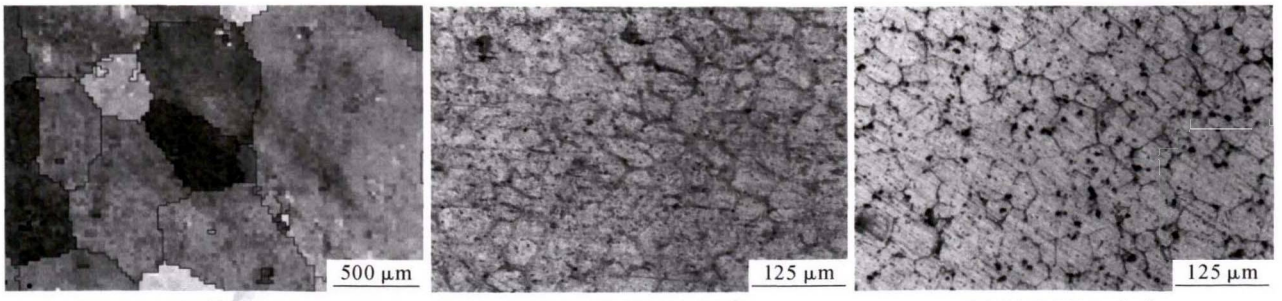
合金	ω_B							
	Sc	Fe	Si	Ca	C	Na	Cu	Al
纯 Al	-	0.001	0.002	-	-	-	0.001	余量
Al-Sc	2.010	0.037	0.010	0.005	0.030	0.003 6	0.003	余量

Al-Sc合金金相试样经机械抛光和Keller试剂腐蚀，纯铝经电解抛光和阳极覆膜，然后利用蔡司光学显微镜观察。采用Channel5型EBSD系统测定Al-Sc合金导线的微观织构，EBSD 样品测试面平行于拉拔方向（DD）。铸态及挤压态合金拉伸试验采用GB6397-86标准拉伸试样，导线拉伸试样选取标距100 mm，在Zwick/Roell Z100万能材料试验机上进行，拉伸速率为1 mm/min。铸态和挤压态试样电阻采用国产Sigma2008B涡流金属导电仪测量，每个样品测量7次取平均值。拉拔导线电阻测量试样长度为200 mm，在PPMS（综合物性测量系统）上利用四端法测量其电阻，再由试样尺寸得到电导率。

2 试验结果及讨论

2.1 Al–Sc二元合金的显微组织

图1为铸态纯铝和Al-Sc合金的金相组织。从图中可以看出，纯铝的晶粒十分粗大且不均匀，平均尺寸约为515 μm；而Al-0.45%Sc的组织由等轴晶组成，晶粒平均尺寸仅约为50 μm，继续增加Sc含量到0.7%后细化效果没有显著增加，平均晶粒尺寸为45 μm，但晶粒的圆整度更好。Sc的加入使铝合金晶粒显著细化，其作用机理普遍认为是由于凝固时析出的初生Al_3Sc粒子[4]。由于Al_3Sc相（fcc，a=0.410 nm）



(a)纯Al　(b)Al-0.45%Sc合金　(c)Al-0.7%Sc合金

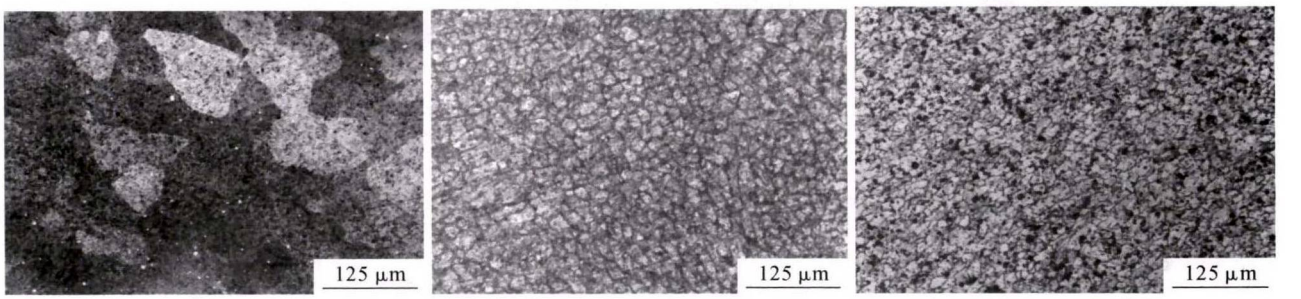
图 1 铸态纯铝和 Al-Sc 合金的金相组织
Fig.1 Microstructures of as-casting pure Al and Al-Sc alloy

和基体铝(fcc，a=0.405 nm)的点阵结构极为接近，能够形成共格，当合金凝固时，初生的Al_3Sc质点便可作为结晶核心，使熔体发生非均质形核[7]，因此导致形成细小化的非枝晶组织。

图2为挤压态纯铝和Al-Sc合金的金相组织，可以看到，挤压后晶粒均产生细化。Al-0.45%Sc合金在变形后仍呈现等轴晶粒相貌，表明热挤压变形使它发生了比较完全的动态再结晶，晶粒的平均尺寸只有20 μm左右；而Al-0.7%Sc合金的组织中保留有变形的痕迹，晶粒有轻微拉长相貌，表明热挤压变形过程中动态再结晶进行地不完全。Sc含量越高，表现出对铝合金动态再结晶的抑制作用越强[4]，变形过程产生的应变储能越多。

由于在Sc含量较低的合金中Al_3Sc相常以纳米级大小的尺寸存在[8, 9]，因此仅在Sc含量足够高时，部分Al_3Sc沉淀相发生聚集后才可在SEM下观察到。图3（a）、(b）为Al-0.7%Sc合金在铸态与挤压态的SEM显微组织，组织中的白色块状相即为Al_3Sc相。在挤压过程中，粗大的块状Al_3Sc相被破碎，以更细小的状态均匀分布于基体中。进一步拉拔变形后，可以从图3(c)的SEM照片中观察到纤维状条纹，是晶粒沿拉拔方向被拉长，第二相也被破碎得更加细小、弥散分布。当导线经过400 ℃保温2 min+300 ℃保温150 min的热处理后，如图3(d)中所示，组织中的第二相显著增多，固溶在Al基体中的Sc以Al_3Sc第二相形式发生析出，但基本没有发生聚集。

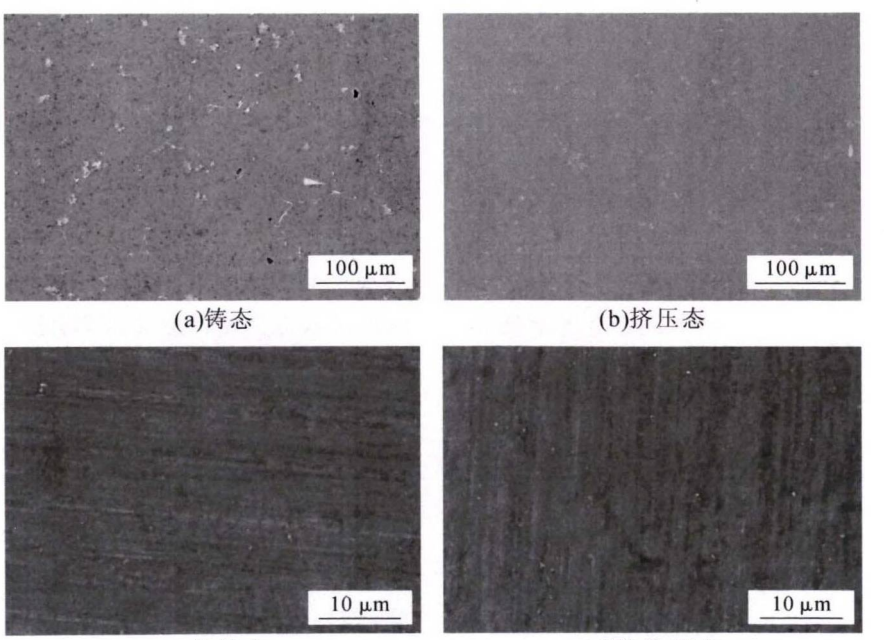
图4是通过EBSD分析得到的拉拔态Al-0.45%Sc合金在热处理前后的晶粒取向成像图、极图及晶粒尺寸分布图，图中DD代表拉拔方向。拉拔态Al-0.45%Sc合金具有纤维化的晶粒组织，经热处理后材料的组织类型无明显改变，由(e)和(f)晶粒统计分布可知，其平均晶粒尺寸由3.68 μm变为8.53 μm，发生轻微长大，这与中温回复导致位错密度降低有关。图4(a)和(c)中可以看到，拉拔态下呈现的大多数晶粒取向为<001>和<111>，即(001)基面和(111)锥面平行于拉拔方向。在热处理后如图4



(a)纯Al　　(b)Al-0.45%Sc合金　　(c)Al-0.7%Sc合金

图 2 挤压态纯铝和 Al-Sc 合金的金相组织(垂直于挤压方向)

Fig.2 Microstructures of as-extruded pure Al and Al-Sc alloy(TD)



(a)铸态　　(b)挤压态

(c)拉拔态　　(d)热处理态

图 3 Al-0.7%Sc 合金在不同状态下的 SEM 图像

Fig.3 SEM images of Al-0.7%Sc alloy under different conditions

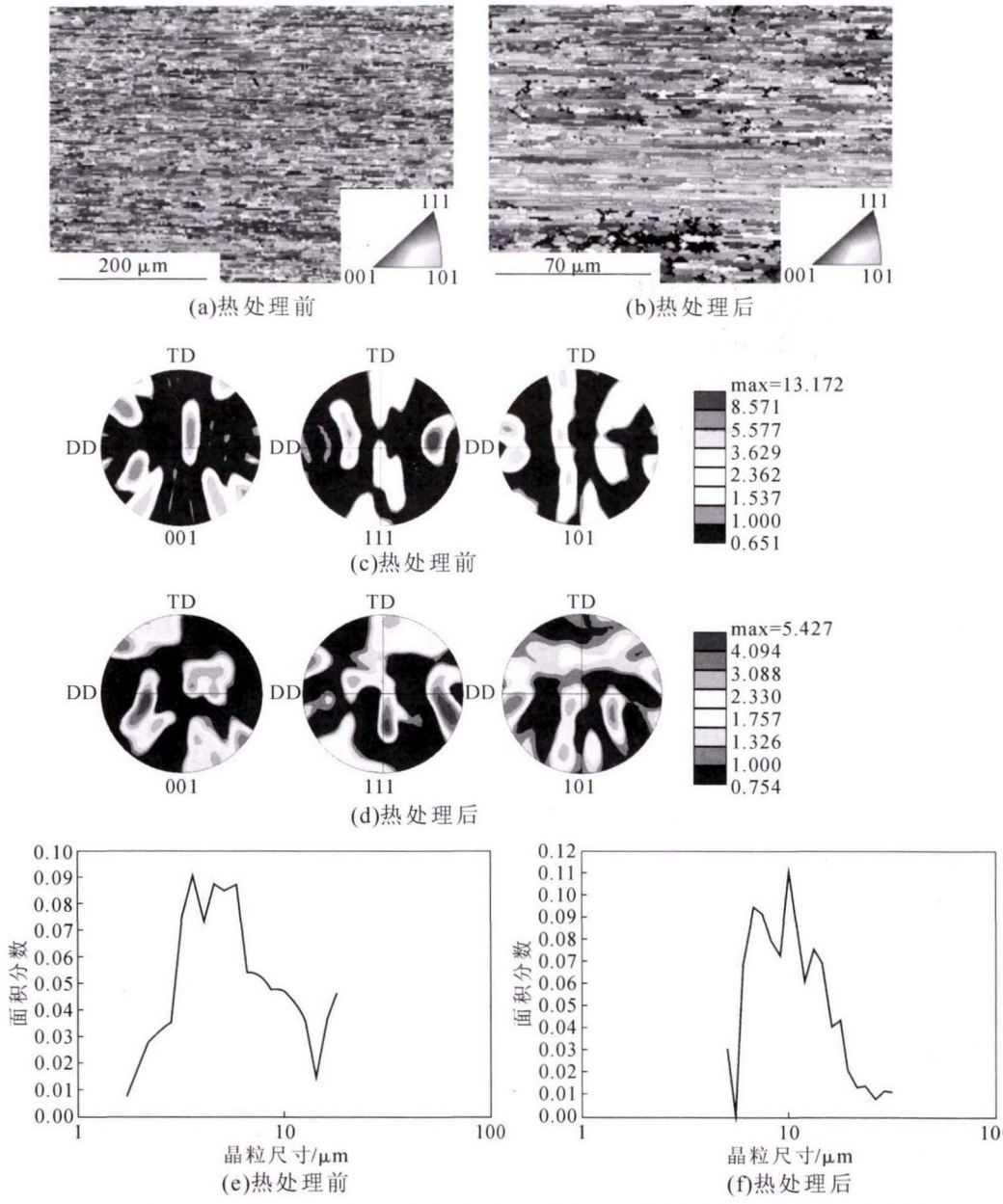


图 4 拉拔态 Al-0.45%Sc 合金热处理前后的晶粒取向成像图、极图及晶粒尺寸分布图

Fig.4 The orientationdistributionmaps, pole figures and grain size distribution of as-drawn Al-0.45wt.%Sc alloy before and after heat treatment

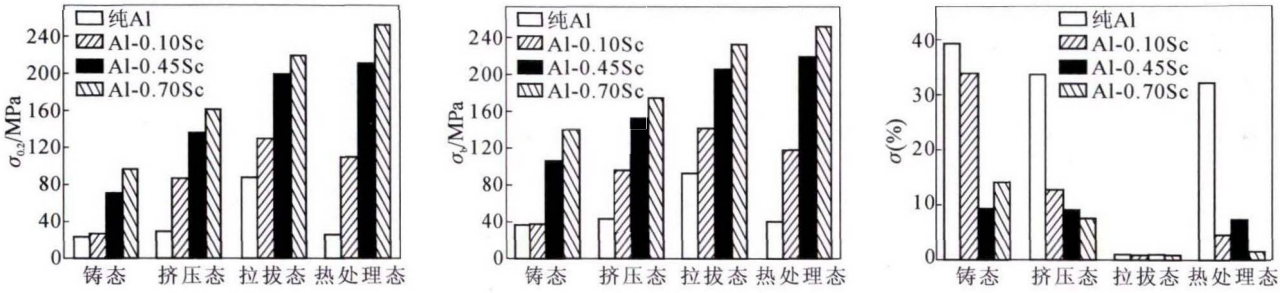
(b)和(d),晶粒取向发生转动,更多表现为<101>取向,且织构整体强度明显降低,意味着基面织构显著减弱[16]。J.P. Hou等人在纯铝拉拔过程中,观察到随拉拔道次的增加,<101>取向的晶粒是逐渐转向<001>和<111>取向[10],与本实验的织构转变过程刚好相反,即拉拔产生的织构可以通过热处理调控恢复。

2.2 力学性能

图5比较了纯铝和Al-Sc二元合金在铸态、挤压态、拉拔态及热处理后等不同状态下的拉伸力学性能。

在铸态,纯铝的强度最低,随加入Sc含量的增加,Al-Sc二元合金的屈服强度与抗拉强度逐渐增高,当Sc含量为0.70%时,合金屈服强度达到纯铝的4倍。在塑性方面,纯铝的室温伸长率最大,达到39.5%,Al-Sc合金的伸长率均低于纯铝,即使0.10% Sc的加入也会使合金伸长率有所下降。

相比铸态,纯铝经过热挤压变形后,屈服强度和抗拉强度小幅提升,伸长率下降15%,晶粒细化对纯铝强度的提高作用不大。而Al-0.1%Sc合金经过挤压后,力学性能则发生明显变化,其屈服强度提高至近3倍,抗拉强度达到95 MPa。随着Sc含量的增加,挤压态Al-Sc二元合金强度逐渐增高,伸长率逐渐下降,但幅度逐渐减小,这与Al-Sc合金在热挤压过程中的强化机制有关。热挤压后Al-Sc合金强度大幅提高的原因有两点:首先,挤压变形使合金发生动态再



(a)屈服强度　(b)抗拉强度　(c)伸长率

图 5 纯 Al 和 Al-Sc 二元合金在铸态、挤压态、拉拔态及热处理态下的力学性能对比

Fig.5 Comparison of mechanical properties of pure Al and Al-Sc alloys under different conditions

结晶，使晶粒显著细化，增强晶界对位错滑移的阻碍从而提高强度；其次，在挤压过程中，组织中大块的Al_3Sc粒子碎化，形成更多细小弥散分布的第二相颗粒，可有效有效阻挡位错运动及动态再结晶过程[11]，提高了合金的屈服强度和抗拉强度。

经过冷拉拔变形后，纯铝和Al-Sc二元合金的屈服强度和抗拉强度都在挤压态的基础上进一步提高，伸长率则均降至1%左右。拉拔过程中位错的产生和塞积远多于挤压态[12]，是各合金强化的主要原因，也是导致伸长率较低的原因，位错进一步运动困难。之后经过400 ℃保温2 min+300 ℃保温150 min的热处理，纯铝导线的强度回复到铸态水平，即热处理使塞积的位错发生了回复和再结晶，合金中的应力集中缓解；Al-0.1%Sc合金的强度也发生下降，但仍远高于铸态，再次表明微量Sc就可以显著阻碍铝合金的回复与再结晶。相比之下，加入0.45%、0.70%Sc的合金经过热处理后，强度反而升高，Al-0.45%Sc合金的屈服强度达到210 MPa，伸长率也提高至7.2%。这是因为在热处理过程中，一方面，当合金含Sc量较高时，从显微组织(图3)中可以看出，固溶在基体中的Sc以细小Al_3Sc相的形式弥散析出较多，从而增强抵抗变形能力，也能够越有效地抑制再结晶，产生强化效果[14]；另一方面，加热过程使合金发生一定的回复甚至再结晶，Al-0.45%Sc合金在保持晶粒轻微长大的情况下，基面织构发生弱化(图4)，变形储能得到合适的释放，从而塑性得到提高。

2.3 导电性

图6比较了纯铝和Al-Sc二元合金在铸态、挤压态、拉拔态及热处理后等不同状态下的电导率。铸态纯铝电导率为37.1×10^6 S/m，与理论值相符。可以看到，在各个状态下，电导率都随加入Sc的增加而降低。挤压和拉拔变形对于纯铝和Al-Sc合金电导率的影响不大，变形产生的空位、位错等缺陷引起的晶格畸变对电子造成的散射作用很小。只有经过热处理后，4种导线的电导率才得到提高，且Sc含量越高的合金，电导率提升幅度越大。退火过程中铝钪固溶体只需经过很短的孕育期，就开始以极快的速度进行分解，而且温度越高，分解越快[15]。所以Al-Sc合金在经过400 ℃保温2 min和300 ℃保温150 min后，原本固溶在基体中的Sc元素以第二相的形式析出，从而有效降低Al基体的畸变，减小电子波的散射[13]，且热处理后仅有轻微的晶粒长大，晶界对于电子的散射作用并无明显增强，所以Al-Sc合金总体的电导率大幅提升。

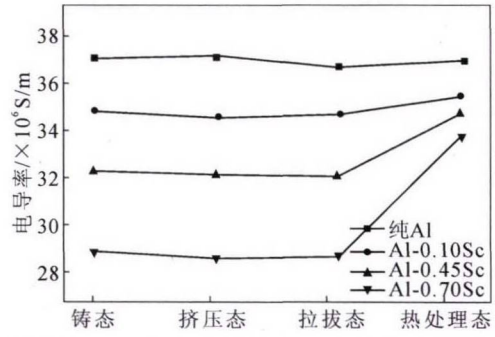


图 6 纯铝和 Al-Sc 二元合金在铸态、挤压态、拉拔态及热处理态下的电导率对比

Fig.6 Comparison of electrical conductivity of pure Al and Al-Sc alloys under different conditions

3 结论

(1)铸态Al-Sc合金中加入Sc为0.45%时，晶粒尺寸约为50 μm且不再细化，经热挤压后发生动态再结晶，晶粒细化，但Al-0.7%Sc合金抑制再结晶作用强，组织中保留有变形相貌，原来大块的Al_3Sc相被变形不断破碎。

(2)在铸态、挤压态和拉拔态，Al-Sc合金的强度指标都随Sc含量的增加而增加。在挤压态，含有0.1%Sc即体现出显著的强化作用，Al-0.7%Sc合金的抗拉强度达到174 MPa，挤压后强度大幅提升，塑性有所下降。在拉拔态，加工硬化使各合金强度在挤压态基础上进一步提高，伸长率却均降至1%

左右。

(3)导线经过400 ℃保温2 min+300 ℃保温15 min的热处理后，纯铝的强度回复到铸态水平，Al-0.1%Sc合金强度也降低；而加入0.45%和0.70%Sc的合金强度升高，Sc的抑制再结晶作用显著。最终Al-0.45%Sc合金的屈服强度达到210 MPa，伸长率为7.2%，热处理一方面使第二相析出导致强度提高，另一方面使织构弱化导致塑性提高。

(4)在各个状态下，电导率都随加入Sc的增加而降低。挤压和拉拔变形对于纯铝和Al-Sc合金的电导率的影响很小，热处理导致铝钪固溶体分解是决定电导率提高的主要因素，且Sc含量越高，电导率提升幅度越大。综合来看，Al-0.45%Sc合金导线最终的电导率为34.8×10^6 S/m，具备优异的力学性能和导电性。

参考文献：

[1] 黄崇祺. 电工用铝和铝合金在电缆工业中的应用与前景 [J]. 电线电缆, 2013(2): 4-9.

[2] 燕来荣. 铝代铜或开辟线缆材料行业新市场[J]. 电器工业, 2013 (6): 18-24.

[3] 李志华，蔡彬，刘强，等. Al-xSc-0.04Zr合金时效强化和导电性研究[J]. 特种铸造及有色合金, 2010, 30 (5): 476-480.

[4] 尹志民，潘清林，姜锋. 钪和含钪合金[M]. 湖南：中南大学出版社，2007.

[5] 李金文，蔡彬，周伟伟. Al-0.2Sc-0.04Zr(0.01B)合金的时效行为和导电性[J]. 特种铸造及有色合金, 2011, 31(11):1070-1073.

[6] Chao R Z, Guan X H, Guan R G, et al. Effect of Zr and Sc on mechanical properties and electrical conductivities of Al wires [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2014, 24(10): 3164-3169.

[7] 郑开云，花传平，姚真裔，等. 钪在铝中的合金化机制及其对力学性能的影响[J]. 铸造工程, 2009, 33(4): 30-34.

[8] 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.

[9] 叶益聪，李培杰，何良菊，等. Al-Sc二元合金中次生Al3Sc的析出和长大行为[J]. 特种铸造及有色合金, 2012, 32(3): 4-9.

[10] Hou J P, Zhang Z F. Microstructure evolution and strengthening mechanisms of cold-drawn commercially pure aluminum wire[J]. Materials Science and Engineering A, 2015, 639: 103-106.

[11] 肖代红，巢宏，陈康华，等. 微量Sc对AA7085铝合金组织与性能的影响[J]. 中国有色金属学报, 2008, 18(12): 2145-2150.

[12] 祁小红，邓运来，等. 微量Sc对7085铝合金淬火敏感性的影响[J]. 中国有色金属学报, 2013(3): 666-672.

[13] 熊光新，张晓燕，侯循，等. 拉拔工艺对铝合金电工圆杆性能的影响[J]. 有色金属工程, 2017, 7 (1): 5-8.

[14] 李波，潘清林，张志野，等. 含钪Al-Zn-Mg合金的热变形行为和显微组织[J]. 材料工程, 2013 (11):6-11.

[15] 华明凯. 钪对高强高导铝合金导线材料组织性能的影响 [D]. 合肥: 合肥工业大学, 2016.

[16] 杨中玉，张津. 铝合金的织构及测试分析研究进展[J]. 精密成形工程, 2013, 5 (6): 1-6.

2020年《铸造技术》杂志征订启事

《铸造技术》杂志，月刊，1979年创刊，中国铸造协会会刊，国内外公开发行，国内邮发代号：52-64，国外发行号：M855，中国标准刊号：ISSN1000-8365/CN61-1134/TG。

报道范围：报道国内外铸造领域的先进科技成果、应用技术、生产管理经验及信息和铸造设备，覆盖铸铁、铸钢和有色合金等铸造领域，包括砂型铸造以及熔模铸造、金属型铸造、消失模铸造和压铸等特种铸造技术。

主要栏目：试验研究、工艺技术、生产技术、特种铸造、装备技术、实用成型技术、材料改性、材料开发、材料保护及表面工程、材料失效分析、应力控制与理化测试技术、今日铸造等。

发行对象：国内外铸造企业，科研院所，高等学校，铸造原辅材料厂商，设备、仪器厂商，铸件采购商等。

广告范围：刊登铸造原辅材料、铸造设备、熔炼设备、热处理设备、环保设备、检测仪器以及铸件生产、科研成果转让、企业形象宣传等相关广告。

订阅方式及价格：

请从当地邮局订阅，也可以直接从铸造技术杂志社订阅。全年12期，每期定价25元，平寄全年300元（含邮费），挂号全年336元，快递全年420元。

海外：每期定价25美元，全年300美元。

银行汇款：

户　名：陕西铸造技术杂志社有限责任公司

账　号：3700 0235 0920 0091 309

开户行：中国工商银行西安市互助路支行

邮购地址：西安市金花南路5号西安理工大学608信箱（710048）

联系人：李巧凤　　电话/传真：029-83222071

网址：www.zhuzaojishu.net　　E-mail：zzjs@263.net.cn

微信扫一扫 信息快知道