DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2020.03.003

Zn与Mg质量比对热挤压Al-Zn-Mg-Sc显微组织及力学性能的影响

汤晓漪[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:制备了Al-2Mg-0.4Sc、Al-5Mg-0.4Sc、Al-5Mg-2Zn-0.4Sc和Al-5Zn-2Mg-0.4Sc等4种合金并在350 ℃进行热挤压,通过光学显微镜(OM),X射线衍射(XRD),扫描电子显微镜(SEM)、室温拉伸测试,研究了Zn/Mg比对于Al-Zn-Mg-Sc合金组织与力学性能的影响。结果表明,Zn/Mg比的提高对于铸态晶粒具有细化作用,挤压后发生动态再结晶,晶粒尺寸显著减小,但挤压态晶粒尺寸并未随Zn/Mg比的提高而减小。另一方面,Zn/Mg比的提高使$Mg_{32}(Al,Zn)_{49}$第二相数量增加,且呈现更明显的网状结构。挤压态Al-Zn-Mg-Sc合金屈服强度随Zn/Mg比的提高而提升,主要由于大量Al_3Sc粒子与碎化的第二相呈网状分布于晶界,使第二相强化起到主导作用。

关键词:Al-Zn-Mg-Sc合金;Zn/Mg比;热挤压;显微组织;力学性能

中图分类号:TG113　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-8365(2020)03-0208-06

Effect of Mass Ratio of Zn to Mg on Microstructure and Mechanical Properties of Hot-extruded Al-Zn-Mg-Sc Alloys

TANG Xiaoyi[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 effect of Zn/Mg ratio on the microstructure and mechanical properties of Al-2Mg-0.4Sc, Al-5Mg-0.4Sc, Al-5Mg-2Zn-0.4Sc, Al-5Zn-2Mg-0.4Sc alloys extruded at 350 ℃ were investigated by optical microscopy (OM), X-ray diffraction (XRD), scanning electron microscopy (SEM) and tensile testing under room temperature. The results show that the increase of Zn/Mg ratio had a refining effect on the as-cast grains. Dynamic recrystallization occurred after extrusion, and the grain size significantly decreased. However, the grain size of extruded do not decrease with the increase of Zn/Mg ratio. On the other hand, the increase of Zn/Mg ratio makes the number of the second phase of Mg_{32} $(Al,Zn)_{49}$ increase and shows a more obvious network structure. The yield strength of the extruded Al-Zn-Mg-Sc alloy increases with the increase of Zn/Mg ratio, mainly because of a large number of Al_3Sc particles and the second phase of fragmentation are distributed in the grain boundary in a network, so the second phase strengthening plays a leading role.

Key words: Al-Zn-Mg-Sc alloy; Zn/Mg ratio; hot extrusion; microstructure; mechanical properties

Al-Zn-Mg合金作为高强度且加工焊接性能良好的可时效强化合金,在航空、航天、石油、化工、电子、汽车和机械制造中应用前景广泛,但传统Al-Zn-Mg合金具有抗应力腐蚀性能较差以及高温易软化等明显不足[1]。为改善Al-Zn-Mg系合金的缺点,前苏联学者首先发现在铝合金中添加微量Sc元素可大幅提升合金综合性能,开发了一系列含钪Al-Zn-Mg合金,通过形成细小弥散的含钪粒子显著改善合金力学性能与抗应力腐蚀性能[2,3]。作为目前发现的对改善铝合金性能最为有效的合金元素,Sc元素能够显著细化铸态组织,在基体中均匀析出共格Al_3Sc粒子,产生沉淀强化并强烈钉扎位错,以及抑制合金再结晶,从而产生显著亚结构强化[4-6]。随航天事业的发展,对高强高韧结构材料的要求越来越高,众多学者投入到新型Al-Zn-Mg-Sc合金开发及其加工及热处理工艺的研究中,比如Wu等[7]提出在475 ℃下进行24 h均匀化处理可以产生最佳的Al_3Sc分布,从而调控Al-Zn-Mg-Sc-Zr合金的再结

收稿日期:2019-12-18

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:汤晓漪(1996-),女,上海金山人,硕士生.研究方向:铝合金加工技术研究.电话:18116214109,
E-mail:txyuanz@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

晶行为和最终的显微组织，Deng 等[8]研究了 Sc 的添加对于峰值时效的 Al-Zn-Mg-Sc-Zr 板的影响，指出含钪合金中晶粒细化和抗再结晶作用显著，并且量化了 Sc 元素对于屈服强度的提升作用。Sc 在 Al-Zn-Mg 体系中的作用机制已有较多研究成果[9]，而 Zn/Mg 比对于 Al-Zn-Mg-Sc 合金显微组织、力学性能的影响规律还缺少系统性研究。因此，本文以不同 Zn/Mg 比对热挤压 Al-Zn-Mg-Sc 显微组织及力学性能的影响为研究内容，以进一步完善 Al-Zn-Mg -Sc 体系的强韧化研究。

1　材料与试验方法

试验制备 Al-Mg-Sc 和 Al-Zn-Mg-Sc 体系的合金，其实际成分通过等离子体发射光谱(ICP-AES)测定如表 1 所示，所用原材料为 99.99%纯铝，99.99%纯锌，99.99%纯镁和 Al-2%Sc 中间合金，熔炼在电阻炉中于 CO_2 和 SF_6 气氛下进行，按配比依次加入原料熔化后，将熔体加热到 730 ℃保温静置 20 min，随后于 720 ℃进行精炼除渣，以700~710 ℃的浇铸温度浇入预热的钢模中。将圆锭表面车削光洁，预热后在 350 ℃下进行热挤压后水淬，挤压比为 25:1，挤压速度为 200 mm/s。选取挤压棒中间部分作为典型合金状态，进行显微组织表征及力学性能测试。

表1 Al–Mg–Sc及Al–Zn–Mg–Sc合金实际成分 w(%)
Tab.1 Measured chemical composition of Al–Mg–Sc and Al–Zn–Mg–Sc alloys

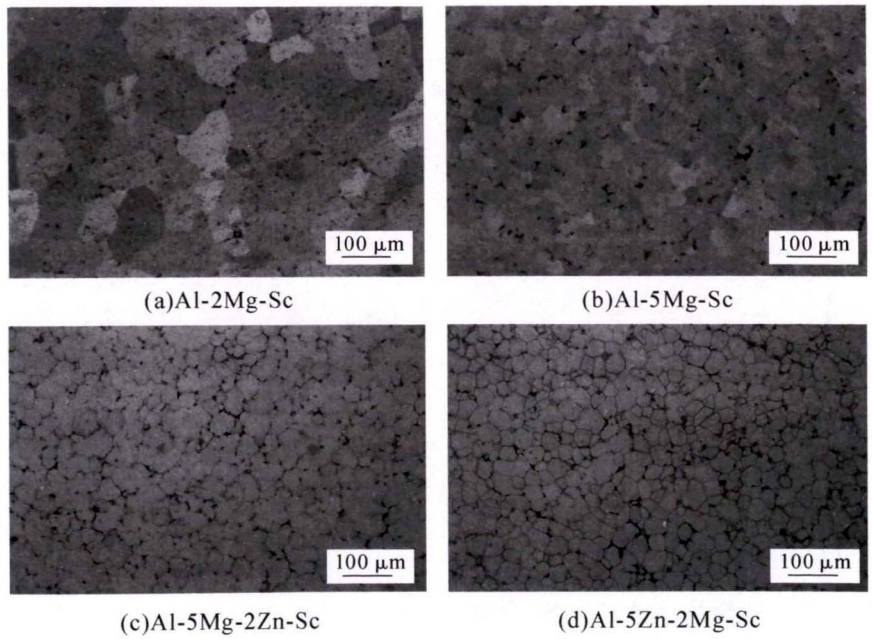
合金	Zn	Mg	Sc	Fe	Si	Al
Al-2Mg-Sc	-	1.887	0.38	0.033	0.009	余量
Al-5Mg-Sc	-	4.606	0.45	0.030	0.009	余量
Al-5Mg-2Zn-Sc	1.890	3.993	0.45	0.065	0.008	余量
Al-5Zn-2Mg-Sc	4.736	1.945	0.42	0.046	0.009	余量

合金显微组织表征和物相分析通过光学显微镜(OM)，X 射线衍射(XRD)，扫描电子显微镜(SEM)进行。铸态及挤压态 Al-Zn-Mg-Sc 金相试样经机械抛光后使用标准 Keller 试剂蚀刻 10~15 s，Al-Mg-Sc 金相试样经机械抛光后使用 2.5vol%氟硼酸在直流17 V，0.05 A 下进行阳极覆膜，使用 Zeiss 光学显微镜进行金相观察。XRD 试样预磨至表面光洁后在 Rigaku Smart Lab X 射线衍射仪中用 CuKα1 以 5°/ min 扫描速度进行 XRD 物相分析。SEM 试样经机械抛光后，在 Phenom-Pro SEM 设备中进行扫描电子显微表征和 EDS 能谱分析。使用 Zwick Roell 万能试验机进行拉伸性能测试，拉伸试样标距长度为 18 mm，标距宽度为 3.4 mm，拉伸速度为 1 mm/min，对至少 3 个试样进行测试。

2　实验结果与分析

2.1　显微组织

图 1 为铸态 Al-Mg-Sc 及 Al-Zn-Mg-Sc 金相显微组织，其均为等轴晶组织，且于晶界及晶粒内部存在微米级第二相。从 Al-Sc 二元相图可知，Sc 在 Al 中的极限固溶度约 0.33%，本实验中合金 Sc 含量约为 0.40%，由于 Sc 元素在凝固过程中会形成初生 Al_3Sc 粒子，可作为非均质形核质点，因此形成等轴铸态组织[10]。经截线法统计，铸态 Al-2Mg-Sc 与 Al-5Mg-Sc 平均晶粒尺寸为 93、35 μm，



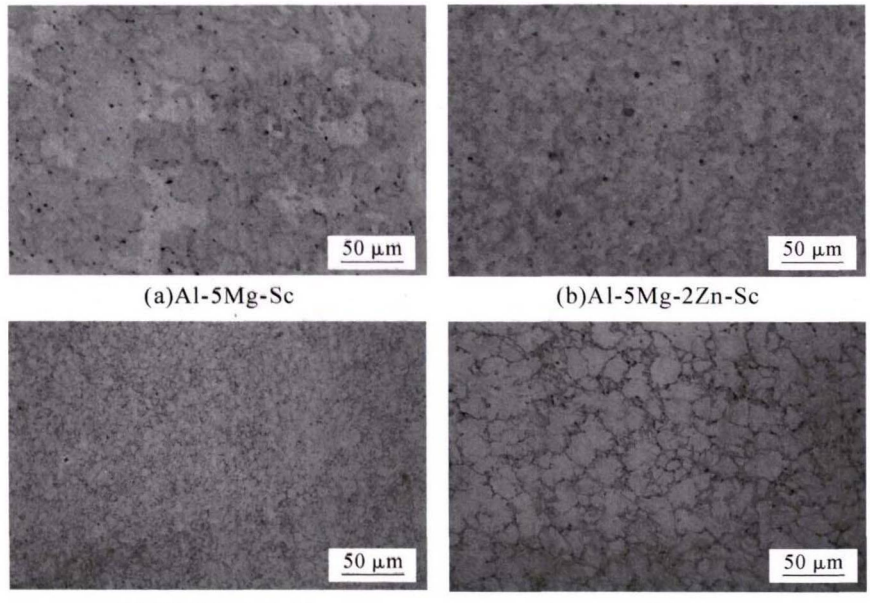
(a)Al-2Mg-Sc　(b)Al-5Mg-Sc

(c)Al-5Mg-2Zn-Sc　(d)Al-5Zn-2Mg-Sc

图 1 铸态 Al-Mg-Sc 及 Al-Zn-Mg-Sc 合金显微组织
Fig.1 Microstructure of as-cast Al-Mg-Sc and Al-Zn-Mg-Sc alloys

Al-5Mg-2Zn-Sc 与 Al-5Zn-2Mg-Sc 平均晶粒尺寸为 33、28 μm。在 Al-Mg-Sc 合金中，随着 Mg 含量的提升，晶粒显著细化，在加入 Zn 元素后，晶粒尺寸随着 Zn/Mg 比的提高进一步减小，其中铸态 Al-5Zn-2Mg-Sc 晶粒尺寸最小。

图 2 为挤压态 Al-Mg-Sc 及 Al-Zn-Mg-Sc 金相组织，经挤压变形后晶粒尺寸均显著减小，并且出现细小的等轴晶组织，说明在 350 ℃挤压后合金产生动态再结晶。经截线法统计，挤压态 Al-2Mg-Sc 与 Al-5Mg-Sc 平均尺寸晶粒为 42、14 μm，Al-5Mg-2Zn-Sc 与 Al-2Mg -5Zn-Sc 平均尺寸晶粒为 5.2、19.0 μm。挤压后晶粒尺寸不随 Zn/Mg 比的提高而依次减小，而是在 Al-5Mg-2Zn-Sc 合金中具有最细小的显微组织。



(a)Al-5Mg-Sc　(b)Al-5Mg-2Zn-Sc

(c) Al-5Zn-2Mg-Sc　(d)

图 2 350 ℃挤压态 Al-Mg-Sc 及 Al-Zn-Mg -Sc 合金显微组织(垂直挤压方向)

Fig.2 Microstructure of 350 ℃ as-extruded Al-Mg-Sc and Al-Zn-Mg-Sc alloys (Vertical to the extrusion direction)

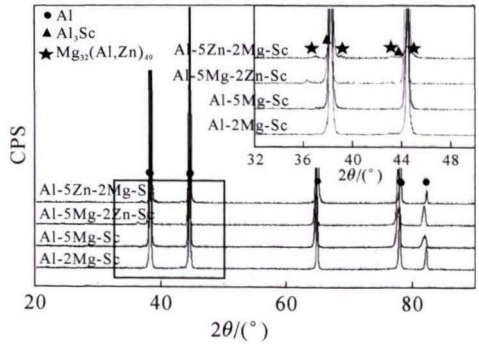


图 3 Al-Mg-Sc 及 Al-Zn-Mg-Sc 合金 XRD 图谱

Fig.3 XRD patterns of Al-Mg-Sc and Al-Zn-Mg-Sc alloys

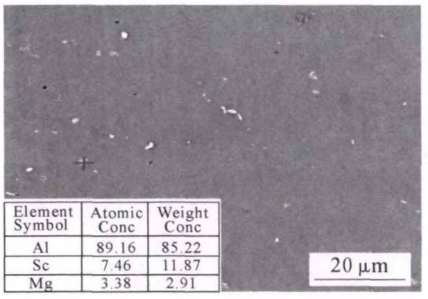
及 $Mg_{32}(Al,Zn)_{49}$ 相对应。在挤压态 Al-Mg-Sc 合金中，第二相数量较少，主要为 Al_3Sc，而在 Al-Zn-Mg-Sc 合金中第二相较多，主要为挤压后碎

图 3 为 Al-Mg-Sc 及 Al-Zn-Mg-Sc 合金的 XRD 图谱，可以看到，在 Al-Zn-Mg-Sc 合金中存在 $Mg_{32}(Al,Zn)_{49}$ 衍射峰，且 Al-Mg-Sc 及 Al-Zn-Mg-Sc 合金中均可观察到 Al_3Sc 第二相的细小衍射峰，说明 Al-Mg-Sc 合金中第二相以 Al_3Sc 为主，而 Al-Zn-Mg-Sc 合金中第二相由 $Mg_{32}(Al,Zn)_{49}$ 及 Al_3Sc 构成[11,12]。

进一步通过 SEM 及 EDS 分析挤压态 Al-Mg-Sc 及 Al-Zn-Mg-Sc 合金中的第二相形貌及成分，结果如图 4 所示。可见 Al-Mg-Sc 合金挤压后存在含 Sc 第二相，与 XRD 结果中的 Al_3Sc 衍射峰一致，在扫描图像中主要呈现为球状，而 Al-Zn-Mg-Sc 合金在挤压后存在球状含 Sc 第二相及文字状富 Mg、Zn 相，与 XRD 结果显示的 Al_3Sc 化的残余晶界相 $Mg_{32}(Al,Zn)_{49}$ 及在基体中弥散分布的 Al_3Sc 第二相[13]。随 Zn/Mg 比的提高，挤压态组织中的第二相总量增加且逐渐呈网络状分布。

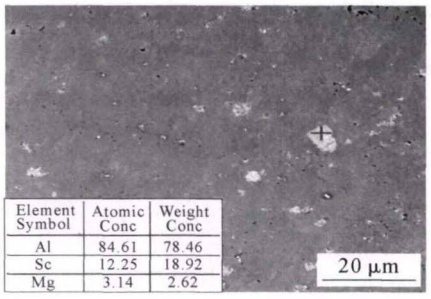
图 5 为挤压态 Al-Mg-Sc 及 Al-Zn-Mg-Sc 合金中 Sc 元素分布的 EDS 面扫图像，可以看到，含 Sc 第二相 Al_3Sc 在合金中多呈现为微米级球状粒子，在 Zn/Mg 较高的 Al-5Zn-2Mg-Sc 合金中，Al_3Sc 粒子多数沿晶界呈网络状分布。

图 6 及图 7 分别为挤压态 Al-Mg-Sc 及 Al-Zn-Mg-Sc 合金中 Mg 元素分布及 Al-Zn-Mg-Sc 合金中 Zn 元素分布 EDS 面扫图像。可见在 Al-Mg-Sc 合金中 Mg 元素分布较均匀，而对于 Al-Zn-Mg-Sc 合金，Mg 元素在 Al-5Mg-2Zn-Sc 中少量集中分布于图 4(c) SEM 图像中的第二相位置，而



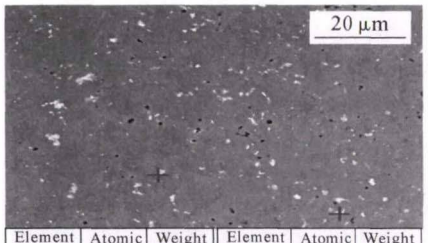
Element Symbol	Atomic Conc	Weight Conc
Al	89.16	85.22
Sc	7.46	11.87
Mg	3.38	2.91

(a)Al-2Mg-Sc



Element Symbol	Atomic Conc	Weight Conc
Al	84.61	78.46
Sc	12.25	18.92
Mg	3.14	2.62

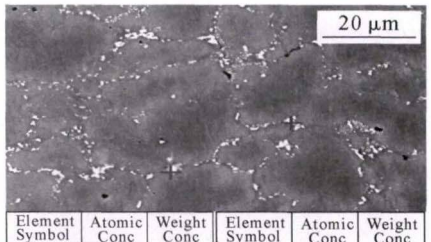
(b)Al-5Mg-Sc



Element Symbol	Atomic Conc	Weight Conc
Al	87.68	84.41
Sc	6.66	10.69
Mg	5.65	4.90

Element Symbol	Atomic Conc	Weight Conc
Al	85.28	82.54
Sc	11.58	10.09
Mg	3.14	7.36

(c)Al-5Mg-2Zn-Sc



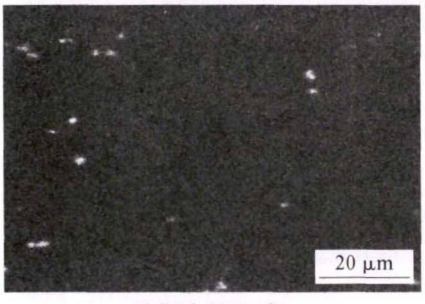
Element Symbol	Atomic Conc	Weight Conc
Al	85.69	78.76
Sc	11.01	16.86
Mg	2.13	1.76
Zn	1.17	2.61

Element Symbol	Atomic Conc	Weight Conc
Al	79.84	71.51
Mg	11.19	9.03
Zn	8.97	19.46

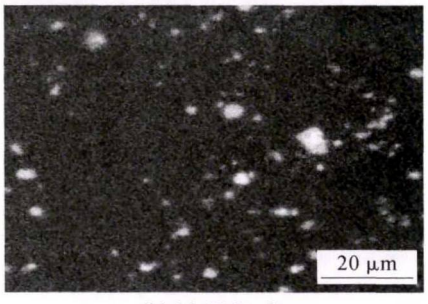
(d)Al-5Zn-2Mg-Sc

图 4 350 ℃挤压态 Al-Mg-Sc 及 Al-Zn-Mg-Sc 合金 SEM 扫描图像

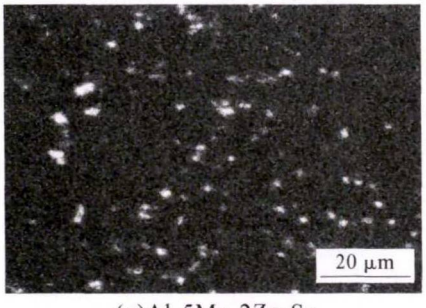
Fig.4 SEM images of 350 ℃ as-extruded Al-Mg-Sc and Al-Zn-Mg-Sc alloys



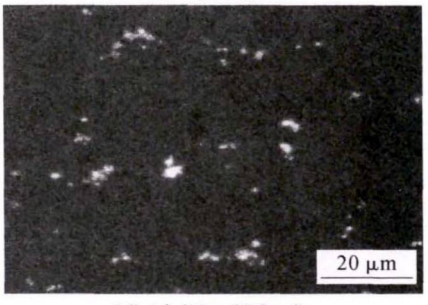
(a)Al-2Mg-Sc



(b)Al-5Mg-Sc



(c)Al-5Mg-2Zn-Sc



(d)Al-5Zn-2Mg-Sc

图 5 350 ℃挤压态 Al-Mg-Sc 及 Al-Zn-Mg-Sc 合金中 Sc 元素分布 EDS 面扫图像

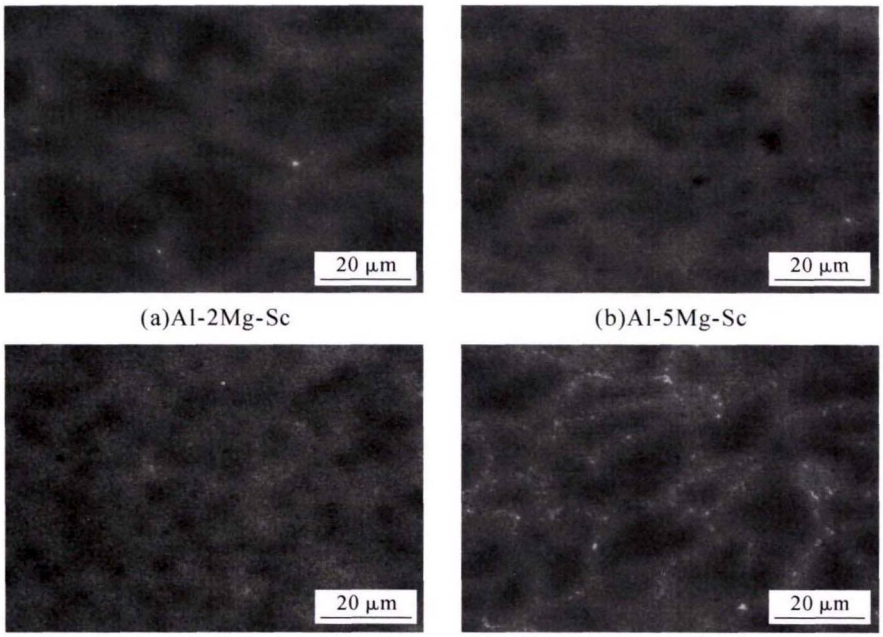
Fig.5 EDS surface scan images of Mg distribution in 350℃ as-extruded Al-Mg-Sc and Al-Zn-Mg-Sc alloys

在 Al-5Zn-2Mg-Sc 合金中明显呈现网状分布，且集中分布于图 4 (d) SEM 图像中的大量晶界文字状第二相处。Zn 元素在 Al-5Mg-2Zn-Sc 合金中的分布较为弥散，集中分布区域与 Mg 元素集中区域对应，在 Al-5Zn-2Mg-Sc 合金中 Zn 元素同样呈现网状分布。

2.2 力学性能

图 8 为铸态及挤压态 Al-Mg-Sc 及 Al-Zn-Mg-Sc 合金室温拉伸曲线，挤压后合金屈服强度及抗拉强度显著提升，且保持较高塑性。Al-Zn-Mg-Sc 合金力学性能整体高于 Al-Mg-Sc 合金，Al-Mg-Sc 体系中，铸态及挤压态屈服强度随 Mg 含量的增大而提升，而 Al-Zn-Mg-Sc 体系中屈服强度随 Zn/Mg 比的增大而提升。

由图 8(a)可见铸态合金中，Mg 含量的提高可提升 Al-Mg-Sc 合金屈服强度，铸态 Al-5Mg-Sc 屈服强度 145 MPa，相比 Al-2Mg-Sc 提升约 20 MPa，主要由于 Mg 含量提高可以细化铸态晶粒，并增加固溶在铝基体中的 Mg 原子，增大基体晶格畸变从而提升固溶强化作用。在相同 Mg 含量条件下，Zn 的加入可进一步提高铸态性能，Al-5Mg-2Zn-Sc 合金相

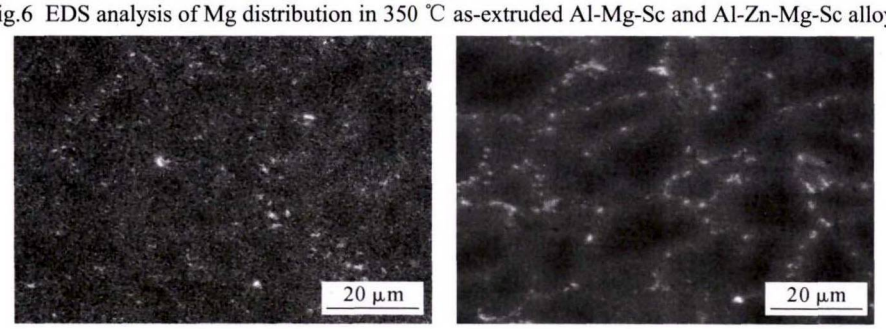


(a)Al-2Mg-Sc (b)Al-5Mg-Sc

(c)Al-5Mg-2Zn-Sc (d)Al-5Zn-2Mg-Sc

图 6 350 ℃挤压态 Al-Mg-Sc 及 Al-Zn-Mg-Sc 合金中 Mg 元素分布 EDS 面扫图像

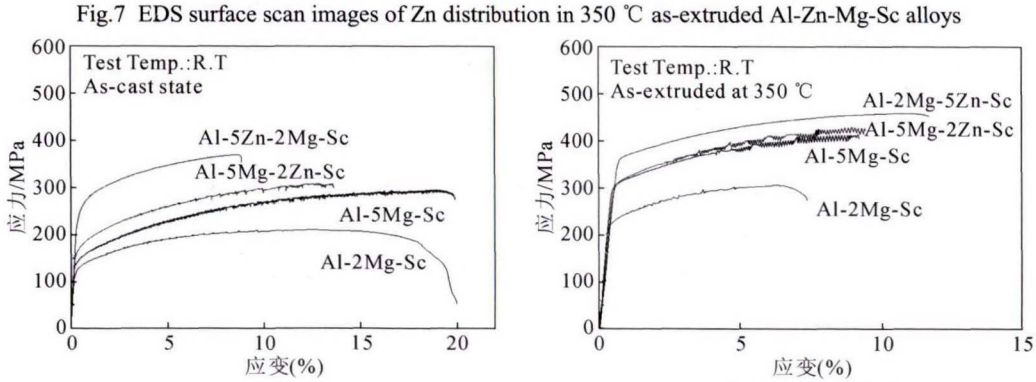
Fig.6 EDS analysis of Mg distribution in 350 ℃ as-extruded Al-Mg-Sc and Al-Zn-Mg-Sc alloys



(a)Al-5Mg-2Zn-Sc (b)Al-5Zn-2Mg-Sc

图 7 350 ℃挤压态 Al-Zn-Mg-Sc 合金中 Zn 元素分布 EDS 面扫图像

Fig.7 EDS surface scan images of Zn distribution in 350 ℃ as-extruded Al-Zn-Mg-Sc alloys



(a)铸态 (b)350 ℃挤压态

图 8 Al-Mg-Sc 及 Al-Zn-Mg-Sc 合金室温拉伸曲线

Fig.8 Stress-strain curves of Al-Mg-Sc and Al-Zn-Mg-Sc alloys at room temperature

比 Al-5Mg-Sc 屈服强度提升约 20 MPa，而 Al-5Zn-2Mg-Sc 合金相比 Al-2Mg-Sc 合金提升约 120 MPa。一方面，Al-Zn-Mg-Sc 合金相比 Al-Mg-Sc 具有更多形核位点，晶粒进一步细化，产生晶界强化作用；另一方面，Zn 与 Mg 在合金中形成的 $Mg_{32}(Al,Zn)_{49}$ 相可以起到第二相强化作用。对于较高 Zn/Mg 比的 Al-5Zn-2Mg-Sc，其铸态屈服强度高于 Al-5Mg-2Zn-Sc 合金 80 MPa，Zn/Mg 比的提高对于 Al-Zn-Mg-Sc 合金晶粒组织具有细化作用，使 Al-Zn-Mg-Sc 合金铸态性能进一步提升。

由图 8(b)可见，经过挤压变形后，Al-Mg-Sc 及 Al-Zn-Mg-Sc 合金强度均显著提升，屈服强度提升 100~200 MPa，其中挤压态 Al-5Zn-2Mg-Sc 合金屈服强度达到 364 MPa。挤压变形后 Al-Mg-Sc 及 Al-Zn-Mg-Sc 合金强度大幅提高的原因有两点：一方面，变形使合金发生动态再结晶，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；另一方面，在热变形后存在大量 Al_3Sc 粒子及碎化的晶界第二相，在基体中细小弥散分布，可有效有效阻挡位错运动及动态再结晶过程，提高合金的屈服强度 [14,15]。对于 Al-Mg-Sc 合金，经过挤压变形后 Al-5Mg-Sc 晶粒尺寸依然小于 Al-2Mg-Sc 合金，其屈服强度高于 Al-2Mg-Sc 合金约 80 MPa；而对于 Al-Zn-Mg-Sc 合金，具有较高 Zn/Mg 比的合金的屈服强度达到 364 MPa，高于低 Zn/Mg 比合金约 50 MPa。Al-Mg-Sc 及 Al-Zn-Mg-Sc 体系中，挤压态屈服强度随 Zn/Mg 比变化规律与铸态相似，从显微组织上看，较低 Zn/Mg 比的 Al-5Mg-2Zn-Sc 合金具有更细小的晶粒组织，而较高 Zn/Mg 比的 Al-5Zn-2Mg-Sc 中第二相数量显著多于 Zn/Mg 比较低的 Al-5Mg-2Zn-Sc 合金。Zn/Mg 比的提升主要影响了第二相的数量与分布，使第二相呈网状分布于晶界，能够阻碍位错运动以及晶界的迁移，起到显著第二相强化，在挤压态 Al-Zn-Mg-Sc 合金中起主导强化作用。

铸态及挤压态 Al-Mg-Sc 及 Al-Zn-Mg-Sc 合金的室温屈服强度、抗拉强度、伸长率数据列于表 2中。

表 2 铸态及挤压态 Al–Mg–Sc 及 Al–Zn–Mg–Sc 合金室温力学性能

Tab.2 Mechanical properties of Al–Mg–Sc and Al–Zn–Mg–Sc alloys at room temperature

	合金状态	YS0/MPa	UTS/MPa	EL(%)
Al-2Mg-Sc	铸态	128	212	19.9
	350 ℃挤压	226	306	7.4
Al-5Mg-Sc	铸态	145	296	19.6
	350 ℃挤压	308	413	9.2
Al-5Mg-2Zn-Sc	铸态	167	309	13.4
	350 ℃挤压	311	429	9.4
Al-5Zn-2Mg-Sc	铸态	247	371	8.5
	350 ℃挤压	364	458	11.7

3　结论

(1)铸态下 Zn/Mg 比的提高对于Al-Zn-Mg-Sc 合金具有细化作用，热挤压后晶粒尺寸显著减小，但挤压态晶粒尺寸并未随 Zn/Mg 比的提高而减小，而在 Al-5Mg-2Zn-Sc 合金中具有最细小的晶粒组织。

(2)挤压态 Al-Zn-Mg-Sc 合金中第二相组成以 Al_3Sc 及 $Mg_{32}(Al,Zn)_{49}$ 为主，Zn/Mg 比的提高使挤压态组织中 $Mg_{32}(Al,Zn)_{49}$ 第二相的数量增加，且呈现更明显的网状结构，主合金元素 Zn 与 Mg 随 Zn/Mg 比提高由弥散分布转变为集中分布于第二相中。

(3)经过挤压后 Al-Zn-Mg-Sc 合金屈服强度提升大于 100 MPa，其中 Al-5Zn-2Mg-Sc 挤压态合金的屈服强度达到 364 MPa，主要由于挤压过程中发生动态再结晶而形成的细小晶粒产生晶界强化作用，以及挤压态组织中 Al_3Sc 粒子与碎化的晶界第二相产生强化作用。

(4)挤压态 Al-Zn-Mg-Sc 合金的屈服强度随 Zn/Mg 比的提高而提升，Zn/Mg 比的提升主要影响了第二相的数量与分布，使第二相呈网状分布于晶界，更有效地阻碍位错运动以及晶界的迁移，起到显著第二相强化，在挤压态 Al-Zn-Mg-Sc 合金中起主导强化作用。

参考文献：

[1] 林肇琦，孙贵经，许海峰. 高强可焊 A1-Zn-Mg 合金研制中几个问题的探讨[J]. 东北工学院学报, 1981(2):23-35.

[2] Huang X, Pan Q, Li B, et al. Microstructure, mechanical properties and stress corrosion cracking of Al-Zn-Mg-Zr alloy sheet with trace amount of Sc [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2015, 650: 805-820.

[3] 张志野，潘清林，李波，等. 含 Sc 的 Al-Zn-Mg-Zr 合金应力腐蚀开裂敏感性研究[J]. 轻合金加工技术, 2012, 40(12):44-48.

[4] Jones M J, Humphreys F J. Interaction of recrystallization and precipitation: The effect of Al_3Sc on the recrystallization behaviour of deformed aluminium[J]. Acta Materialia, 2003, 51(8): 2149-2159.

[5] Rϕyset J, Ryum N. Kinetics and mechanisms of precipitation in an Al-0.2wt.% Sc alloy [J]. Materials Science and Engineering: A, 2005, 396(1-2): 409-422.

[6] Zakharov V V, Rostova T D. Hardening of Aluminum Alloys Due to Scandium Alloying[J]. Metal Science and Heat Treatment, 2014, 55(11-12): 660-664.

[7] Wu L, Wang W, Hsu Y, et al. Effects of homogenization treatment on recrystallization behavior and dispersoid distribution in an Al-Zn-Mg-Sc-Zr alloy [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2008, 456(1-2): 163-169.

[8] Deng Y, Yin Z, Zhao K, et al. Effects of Sc and Zr microalloying additions on the microstructure and mechanical properties of new Al-Zn-Mg alloys[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2012, 530: 71-80.

[9] 徐国富，彭小燕，段雨露，等. 新型 Al-Mg-Sc-Zr 和 Al-Zn-Mg-Sc-Zr 合金的研究进展[J]. 中国有色金属学报,2016, 26(8):1577-1587.

[10] 朱大鹏，尹志民，滕浩，等. 微量 Sc 和 Zr 对 Al-Mg-Mn 合金组织和性能的影响[J]. 宇航材料工艺, 2004(6):45-49.

[11] 邓英，何振波，尹志民，等. 均匀化处理对铝 - 锌 - 镁 - 钪铸态合金硬度和电导率的影响[J]. 轻合金加工技术, 2009, 37(11):51-55.

[12] 徐燕萍. A1-2Sc 合金中析出粒子形态及形成机制的研究 [D]. 长沙:中南大学, 2013.

[13] Deng Y, Yin Z, Duan J, et al. Evolution of microstructure and properties in a new type 2 mm Al-Zn-Mg-Sc-Zr alloy sheet [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2012, 517: 118-126.

[14] 杨磊，潘青林，尹志民，等. 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.

[15] He Z, Yin Z, Lin S, et al. Preparation, microstructure and properties of Al-Zn-Mg-Sc alloy tubes[J]. Journal of Rare Earths, 2010, 28(4): 641-646.