

挤压铸造 Al-5Zn-2Mg-1Cu-0.2Sc 合金的组织与性能

张亮¹ 王一笑¹ 袁松阳¹ 刘文才¹ 吴国华¹ 涂季冰²

[1.上海交通大学轻合金精密成型国家工程研究中心; 2.鼎镁(昆山)新材料科技有限公司]

摘要 采用流变挤压铸造制备了 Al-5Zn-2Mg-1Cu-0.2Sc 合金,通过拉伸试验、SEM 和 TEM 等方法研究了浇注温度对半固态浆料、流变挤压铸造合金组织和力学性能的影响。结果表明,随着浇注温度降低,半固态浆料和流变挤压铸造合金初生 α -Al 相形貌逐渐转变为近球形,在晶界附近析出的第二相分布越来越均匀,平均晶粒尺寸减小,圆整度增加。当浇注温度为 700 ℃时,半固态浆料初生相尺寸最小,约为 35 μm ,平均形状因子约为 0.49,流变挤压铸造后合金平均晶粒尺寸约为 43 μm 。流变挤压铸造合金的力学性能随着浇注温度的降低逐渐提升。合金经过 470 ℃ $\times$ 10 h+500 ℃ $\times$ 2 h 双级固溶后,大部分第二相溶于基体中。120 ℃ $\times$ 24 h 时效处理后,合金的屈服强度为 539 MPa,抗拉强度为 612 MPa,伸长率为 11%。

关键词 流变挤压铸造; Al-5Zn-2Mg-1Cu-0.2Sc 合金; 微观组织; 力学性能

中图分类号 TG249.2;TG146.21 **文献标志码** A

DOI:10.15980/j.tzzz.2021.05.002

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Microstructure and Properties of Al-5Zn-2Mg-1Cu-0.2Sc Alloy by Squeeze Casting

Zhang Liang¹, Wang Yixiao¹, Yuan Songyang¹, Liu Wencai¹, Wu Guohua², Tu Jibing²

[1.The National Engineering Research Center of Light Alloy and Net Forming, Shanghai Jiatong University;
2.Dingmei (Kunshan) New Material Technology Co., Ltd.]

Abstract: Al-5Zn-2Mg-1Cu-0.2Sc alloy was fabricated by rheo-squeeze casting. The effects of pouring temperature on the microstructure and mechanical properties of semi-solid slurry and rheo-squeeze casting alloy were investigated by tensile test, SEM and TEM. The results reveal that with the decrease of pouring temperature, the morphology of the primary α -Al phases in semi-solid slurry and rheo-squeeze casting alloy is gradually converted to the nearly equiaxed ones, and the second phase near the grain boundaries is more evenly distributed, with the average grain size decrease and the roundness increase. When the pouring temperature is 700 ℃, the size of the primary phase in the semi-solid slurry reaches about 35 μm with the average shape factor around 0.49, and the average grain size of the rheo-squeezecasting alloy is about 43 μm . The mechanical properties of rheo-squeeze casting alloy are enhanced with the decrease of pouring temperature. After 470 ℃ $\times$ 10 h+500 ℃ $\times$ 2 h solution treatment, most of the second phase is dissolved in the matrix. After 120 ℃ $\times$ 24 h aging treatment, the yield strength, tensile strength and elongation of Al-5Zn-2Mg-1Cu-0.2Sc alloy reach 539 MPa, 612 MPa and 11%, respectively.

Key Words: Rheo-squeeze Casting, Al-5Zn-2Mg-1Cu-0.2Sc Alloy, Microstructure, Mechanical Properties

Al-Zn-Mg-Cu 系(7xxx 系)高强铝合金具有比强度高、塑性和耐腐蚀性好、易于机械加工等特点,被广泛应

收稿日期:2020-12-30
基金项目:国家重点研发计划资助项目(2016YFB0301003);国家自然科学基金资助项目(51871148,51821001)
第一作者简介:张亮,男,1983 年出生,副研究员,上海(200240),E-mail:liangzhang08@sjtu.edu.cn
引用格式:张亮,王一笑,袁松阳,等. 挤压铸造 Al-5Zn-2Mg-1Cu-0.2Sc 合金的组织与性能[J]. 特种铸造及有色合金,2021,41(5):533-538.
ZHANG L, WANG Y X, YUAN S Y, et al. Microstructure and properties of Al-5Zn-2Mg-1Cu-0.2Sc alloy by squeeze casting[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2021, 41(5):533-538.

[5] 韩双. Ti55531 钛合金热变形行为研究[D].河北秦皇岛:燕山大学,2018.

[6] 刘少飞,屈银虎,王崇楼,等.金属和合金高温变形过程本构模型的研究进展[J].材料导报,2018,32(13):2 241-2 251,2 277.

[7] LIN Y C, DONG W Y, ZHOU M, et al. A unified constitutive model based on dislocation density for an Al-Zn-Mg-Cu alloy at time-variant hot deformation conditions[J]. Materials Science and Engineering,2018, A718:165-172.

[8] VOYIADJIS G Z, ABED F H. Microstructural based models for bcc and fcc metals with temperature and strain rate dependency[J]. Mechanics of Materials,2005,37(2-3):335-378.

[9] 陈荣创. 300M 钢大型锻件模锻全流程宏微耦合建模与模拟[D].武汉:华中科技大学,2018.

[10] 欧阳德来,鲁世强,崔霞,等. TB6 钛合金 β 区变形的动态再结晶动力学[J]. 材料研究学报,2019, 33(12):918-926.

(编辑:彭瑾)

用于航空航天、交通运输、机电仪表等领域^[1]。7xxx 系铝合金是一类典型的变形铝合金,在实际生产中通常采用挤压、轧制和锻造等方法成形。由于合金元素含量高、凝固温度范围宽,铸造过程中易出现热裂、偏析和组织粗大等缺陷,难以通过传统液态成形方法制备复杂结构零部件,这严重限制了该类高性能铝合金的应用范围^[2]。随着我国新能源汽车的发展,对结构件轻量化、高性能、高可靠性的需求越来越迫切,而采用 7xxx 系高强铝合金“以铝代钢”制备底盘与动力系统等关键复杂结构件是实现汽车轻量化的重要途径,开发 7xxx 系铝合金“以铸代锻”的新型液态/半固态成形技术也越来越受到研究者的关注^[3]。

流变挤压铸造技术具有成形温度低、凝固收缩小、组织致密度高、铸造缺陷少等优势,可制备形状复杂、内部品质和尺寸精度要求高的金属零件,该技术在 7xxx 系高强铝合金上的应用有望解决其铸造成形性差的难题,实现“以铸代锻”的目标^[4]。近年来,国内外对于 7xxx 系铝合金的流变挤压铸造研究主要集中于熔体的细化与均匀化处理^[5]、半固态浆料的制备方法 & 工艺参数^[6,7]、合金强化机制^[8,9]、流变铸造工艺与数值模拟^[10]等方面。目前,相关研究主要通过改变制浆方法、添加复合细化剂制备高熔体质量浆料,研究成形压力、保压时间等工艺参数对 7xxx 系铝合金组织的影响^[11~14],但流变成形 7xxx 系合金的力学性能普遍不如锻造成形和触变成形。另一方面,在 7xxx 系铝合金中复合添加 Mn、Ti、Cr、Sc、Zr 等元素,虽然可以提高流变成形合金的强度,但其塑性相对较低,限制了其工业化应用^[11,15,16]。

本课题从 Sc 微合金化、成形温度控制和热处理 3 方面出发,提高流变挤压铸造 7xxx 系合金的强韧性。采用滚筒机械搅拌装置制备了 Al-5Zn-2Mg-1Cu-0.2Sc 合金半固态浆料,研究浇注温度对合金半固态浆料、流变挤压铸造和热处理组织性能的影响,旨在为 7xxx 系铝合金流变成形技术的开发与应用提供参考。

1 试验材料与方法

将 Al-50Cu、Al-10Mn、Al-10Cr、Al-5Ti-B、Al-2Sc 中间合金,纯铝锭(99.99%,质量分数,下同),纯锌锭(99.99%)、纯镁锭(99.95%)等加入井式电阻炉进行熔炼、精炼制备 Al-5Zn-2Mg-1Cu-0.2Sc 合金。通过 YC27-63 800KN 立式油压机对合金进行流变挤压铸造,模具预热温度为 250℃,压力为 120 MPa,保压时间为 30 s,浇注温度为 700~740℃。

采用机械搅拌设备制备半固态浆料,包括机械搅拌系统和超敏温度测量系统,见图 1。机械搅拌系统可调

节筒体转速、预热温度和倾角,超敏测温系统可以对流出桶外的浆料快速测温。试验参数如下:机械搅拌圆筒预热温度为 250℃,转速为 60 r/min,倾角为 30°,制浆浇注温度为 700~760℃,浆料通过铜模冷却。

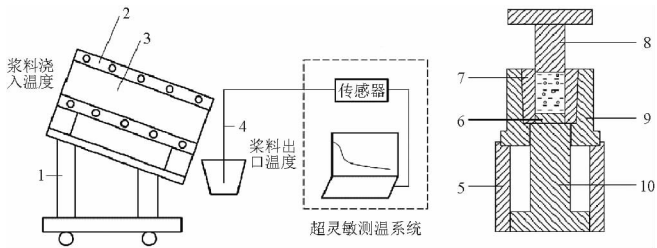


图 1 机械旋转滚筒与流变挤压铸造示意图
Fig.1 Illustration of mechanical rotary barrel and rheo-squeeze casting

- 1.旋转杆 2.空心管式炉 3.搅拌筒 4.热电偶 5.底座
6.垫块 7.内模 8.压头 9.外模 10.顶出杆

对 Al-5Zn-2Mg-1Cu-0.2Sc 合金进行组织与性能分析。采用全谱直读型电感耦合等离子体发射光谱仪(ICP-AES)分析其化学成分,结果见表 1。试样经打磨抛光至镜面后使用 keller 试剂(5 mL 的 HNO₃+3 mL 的 HCl+2 mL 的 HF+190 mL 的 H₂O)进行腐蚀。采用光学显微镜(ZEISS Axio observer A1)和扫描电镜(Phenom XL)进行组织观察,采用 JEM2100 透射电镜观察合金的高倍显微组织并分析合金中相的结构。采用 Rigaku D/max-2550V 型衍射仪进行 X 射线分析,扫描角度范围为 10°~90°,扫描速度为 10°/min。室温拉伸试验在 Zwick/Roell Z100 电子力学性能万能试验机上进行测试,拉伸速率为 1 mm/min。

Tab.1 Chemical composition of Al-5Zn-2Mg-1Cu-0.2Sc alloys %								
w _B								
Zn	Mg	Cu	Mn	Ti	Cr	Sc	Fe	Al
4.89	1.78	1.04	0.27	0.14	0.11	0.23	0.2	余量

2 试验结果与分析

2.1 入口温度与出口温度的关系

图2为合金浆料浇注温度(浆料入口温度)和浆料

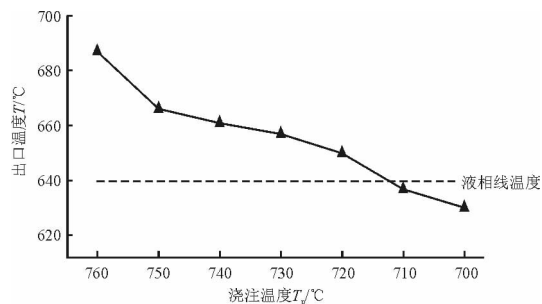


图 2 Al-5Zn-2Mg-1Cu-0.2Sc 合金浆料的浇注温度
和出口温度关系图

Fig.2 Relationship between pouring temperature and outlet temperature of Al-5Zn-2Mg-1Cu-0.2Sc alloy slurry

出口温度的关系。可以看出,当浇注温度从 760 ℃降至 750 ℃时,浆料出口温度降幅较大。随着浇注温度继续降低至 720 ℃,浆料出口温度基本上呈线性下降的趋势,但仍高于液相线。当浇注温度降至 710 ℃时,浆料出口温度开始低于液相线温度。当浇注温度进一步降



图 3 浇注温度为 690 ℃时,浆料在滚筒筒壁上形成的凝固壳
Fig.3 Solidified shell formed by slurry on the wall of barrel at the pouring temperature of 690 ℃

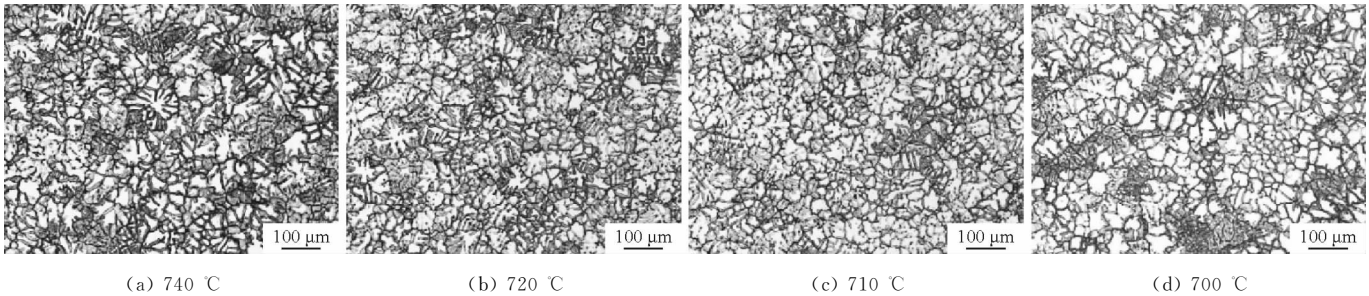


图 4 不同浇注温度下 Al-5Zn-2Mg-1Cu-0.2Sc 合金浆料的金相组织

Fig.4 Metallographic structure of Al-5Zn-2Mg-1Cu-0.2Sc alloy slurry at different pouring temperature

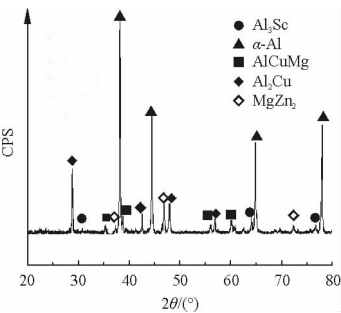


图 5 Al-5Zn-2Mg-1Cu-0.2Sc 合金的 XRD 图
Fig.5 XRD patterns of Al-5Zn-2Mg-1Cu-0.2Sc alloys

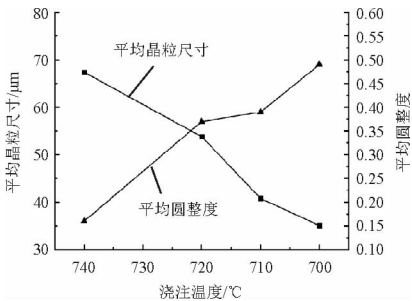


图 6 浇注温度对 Al-5Zn-2Mg-1Cu-0.2Sc 合金浆料初生 α-Al 的影响
Fig.6 Effects of pouring temperature on primary α-Al phase in Al-5Zn-2Mg-1Cu-0.2Sc alloy slurry

低至 690 ℃时,浆料会在滚筒中直接凝固,见图 3。基于此,浇注温度范围设定为 700~760 ℃。

2.2 浇注温度对浆料组织的影响

图 4 和图 5 分别为不同浇注温度下浆料的金相组织和 XRD 图谱。可以看出,合金主要由初生 α-Al、Mg-Zn₂、AlCuMg、Al₂Cu 和 Al₃Sc 等第二相组成。随着浇注温度降低,浆料中的初生 α-Al 枝晶逐渐减少,近等轴状初生相逐渐增加,晶粒尺寸减小,平均圆整度增加,见图 6。当浇注温度为 740 ℃时,初生 α-Al 晶粒平均尺寸为 67.4 μm,平均圆整度为 0.16,晶粒主要呈现出两种不同的形态:尺寸较大的蔷薇状和尺寸较小的近等轴晶粒,其圆整度较低,见图 4a 和图 6。当浇注温度降低到 720 ℃时,开始出现尺寸较小的近球形晶粒。随着温度进一步降低到 700 ℃,蔷薇状晶粒基本消失,且 α-Al 平均晶粒尺寸降低到 35.1 μm,圆整度提升至 0.49,此时半固态浆料质量最佳。

2.3 流变挤压铸造合金

2.3.1 微观组织

图 7 和图 8 分别为不同浇注温度下流变挤压铸造 Al-5Zn-2Mg-1Cu-0.2Sc 合金的金相组织与 SEM。可以看出,铸态组织主要由初生 α-Al 相与第二相组成,初生 α-Al 晶粒呈近球形或树枝状。随着浇注温度降低,浆料中的初生 α-Al 枝晶逐渐减少,近球形初生 α-Al 相逐渐增加,晶粒尺寸减小,平均圆整度增加。另一方面,受浇注温度影响,第二相在晶界附近呈团聚状分布。随着浇注温度降低至 700 ℃,第二相的分布越来越均匀,尺寸逐渐减小。

当浇注温度为 740 ℃和 760 ℃时,α-Al 相以枝晶状为主,粗大的第二相在晶界附近呈团聚状析出,分布不均匀,降低合金的性能。当浇注温度降低至 720 ℃和 710 ℃时,枝晶状晶粒减少,近等轴状晶粒增加,第二相仍存在少量偏聚。当浇注温度为 700 ℃时,α-Al 晶粒大部分为近球状,晶粒尺寸相差不大,第二相分布均匀,平均晶粒尺寸约为 43 μm。

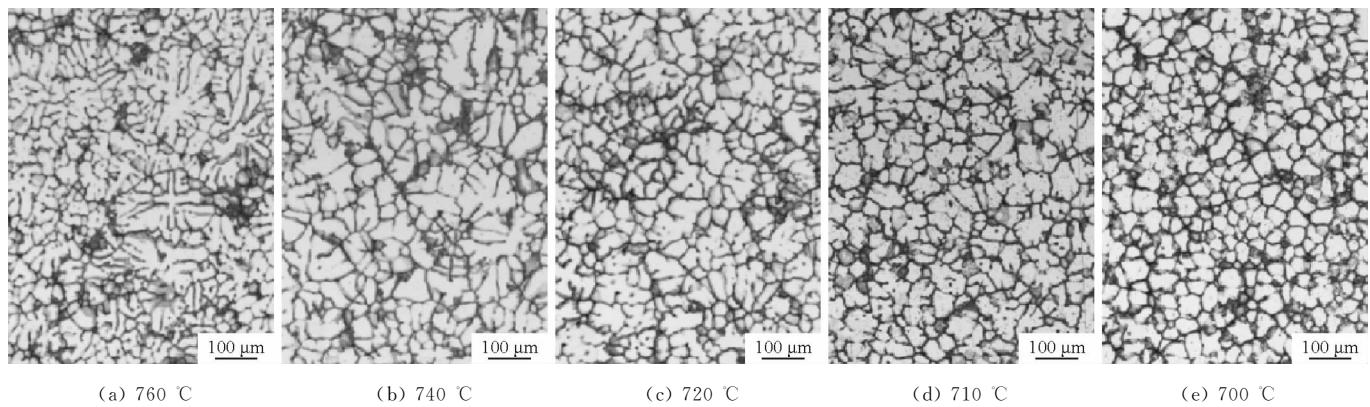


图 7 不同浇注温度下流变挤压铸造合金的金相组织

Fig.7 Metallographic structure of rheo-squeeze casting alloy at different pouring temperatures

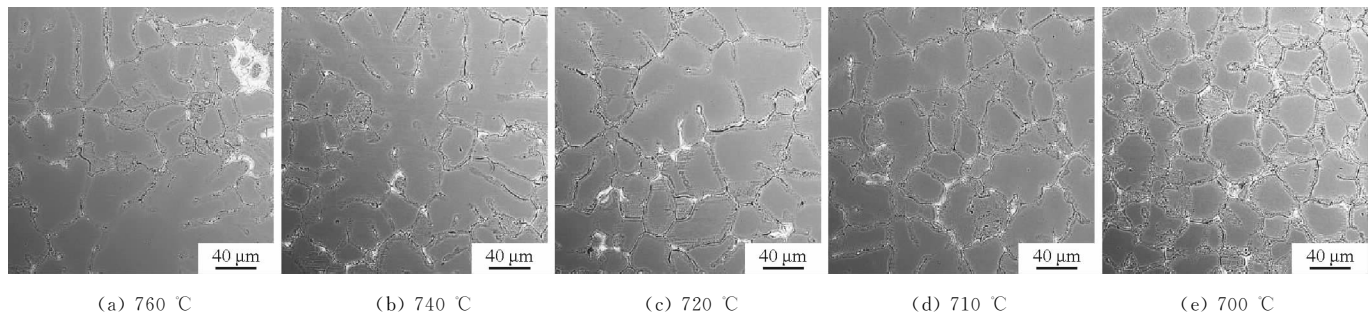


图 8 不同浇注温度下流变挤压铸造合金的 SEM 组织

Fig.8 SEM microstructure of rheo-squeeze casting alloy at different pouring temperatures

2.3.2 力学性能

不同浇注温度下流变挤压铸造合金的力学性能见图 9。可以看出,随浇注温度降低,合金的力学性能提高。当浇注温度为 700 °C 时,铸态合金的力学性能最佳,其屈服强度、抗拉强度和伸长率分别为 277 MPa、357 MPa 和 4.5%。

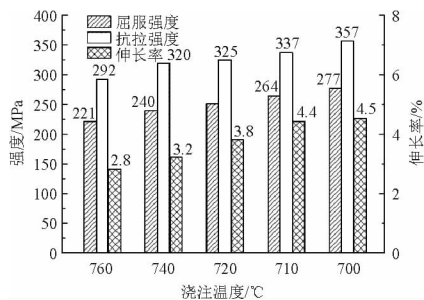


图 9 浇注温度对流变挤压铸造 Al-5Zn-2Mg-1Cu-0.2Sc 合金力学性能的影响

Fig.9 Effects of pouring temperature on the mechanical properties of rheo-squeeze casting Al-5Zn-2Mg-1Cu-0.2Sc alloy

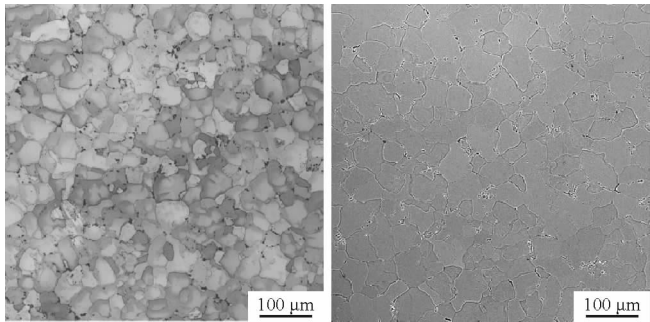
随着浇注温度降低,半固态浆料和挤压合金铸态组织在 700 °C 时晶粒尺寸最小,圆整度最大,力学性能最佳。这主要是因为,熔体进入滚筒后,不断的接触滚筒内壁,增加了形核冷却的有效面积和形核衬底面积,形核核心数目增加,在滚筒搅拌作用下,内壁生成的形核核心转移到熔体内部,起到细化晶粒的作用。当浇注温

度在 760 °C 时,熔体内部温度过高,部分初生晶核重新熔化,降低了熔体内部自由晶的数量。随着浇注温度降低,浆料出口温度低于合金液相线温度,熔体中保存了大量初生晶核,初生 α -Al 相依附初生晶核或 Al_3Sc 相生长。当浇注温度降至 700 °C 时,熔体内部的凝固潜热减小,在滚筒的搅拌作用下,熔体在滚筒内壁异质形核增加,使得晶粒尺寸进一步减小,通过凝固初期的局部激冷和搅拌混合快速散去合金熔体的结晶潜热,实现了合金熔体中大量形核与晶粒游离,导致晶粒尺寸减小,圆整度增加。因此,随着浇注温度降低,初生 α -Al 相逐渐圆整化、细化,第二相尺寸减小、分布更加均匀,使拉伸过程中局部应力集中减弱,流变挤压铸造合金的屈服强度和抗拉强度增加^[16,17]。

2.4 热处理对合金组织与性能的影响

2.4.1 固溶处理

在 470 °C × 10 h + 500 °C × 2 h 双级固溶处理后,合金的微观组织与 XRD 分别见图 10 和图 11。与流变挤压铸造合金相比,晶界附近析出的第二相等微观偏析减少,大量溶入到基体中。XRD 结果显示,流变挤压铸造固溶态合金中的 MgZn_2 、 AlCuMg 、 Al_2Cu 和 Al_3Sc 等第二相的衍射峰基本消失。经过双级固溶后,溶质分布更加均匀。



(a) 金相组织 (b) SEM 组织

图 10 在 470 ℃×10 h+500 ℃×2 h 双级固溶后 Al-5Zn-2Mg-1Cu-0.2Sc 合金的显微组织

Fig.10 Microstructure of Al-5Zn-2Mg-1Cu-0.2Sc alloy after 470 ℃×10 h+500 ℃×2 h two-stage solution

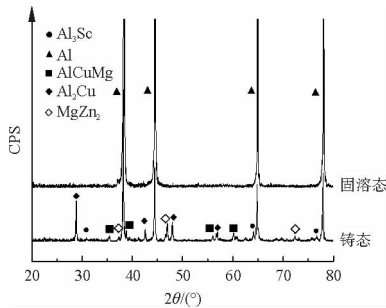
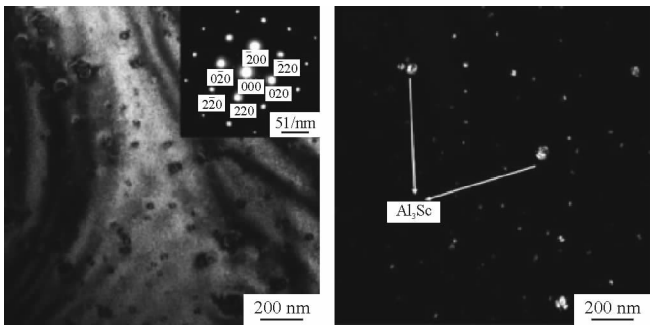


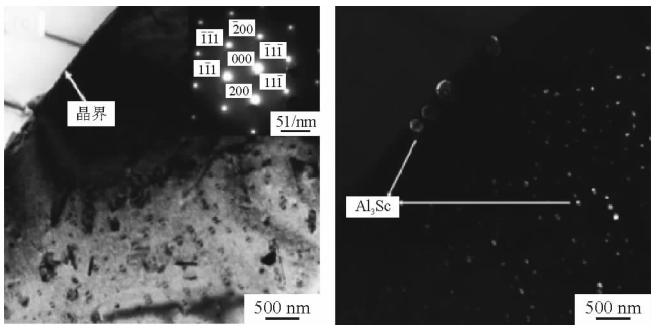
图 11 Al-5Zn-2Mg-1Cu-0.2Sc 合金固溶态和铸态 XRD 图

Fig.11 XRD patterns of as-solid solution and as-cast

Al-5Zn-2Mg-1Cu-0.2Sc alloy



(a) 晶粒内部明场像([001]_a晶带轴) (b) 晶粒内部暗场像



(c) 晶界明场像([011]_a晶带轴) (d) 晶界暗场像

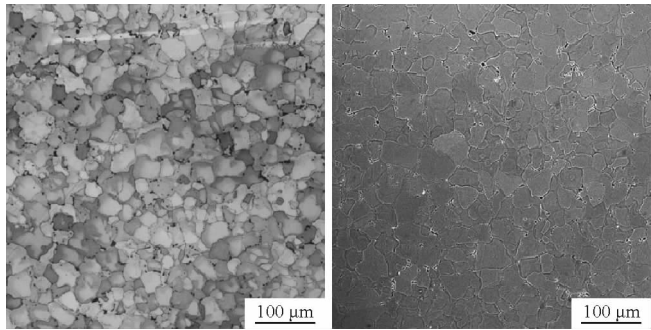
图 13 120 ℃×24 h 时效后合金的 TEM 明场和暗场分析

Fig.13 TEM bright field and dark field images of the as-aged alloy

通过在[001]轴获取的该区域的超点阵衍射斑点,经过软件计算出其晶格常数 $a=0.417\ 2\ \text{nm}$,为面心立方结构(FCC), Al_3Sc 的晶格常数为 $0.410\ \text{nm}$,铝基体的晶格常数为 $0.405\ \text{nm}$,可确定这些颗粒为 Al_3Sc 相^[13,20,21]。图 10a 中, Al_3Sc 相的平均晶粒尺寸较小。从图 13c 和图 13d 可以发现,在晶界处有一些尺寸较大的第二相,通过分析在[011]轴获取的该区域的超点阵衍射斑点,确定这些第二相为 Al_3Sc ^[8,22,23]。根据第二相粒子强化机制,这些细小弥散的 Al_3Sc 粒子均匀分布在基体中,通过对位错运动的阻碍作用可以起到显著的强化效果,这是含 Sc 合金强度提高的主要原因之一。

2.4.2 时效处理

对双级固溶处理后的试样进行 120 ℃×24 h 时效处理,合金微观组织见图 12。可以看出,时效处理与固溶态组织相差不大。7xxx 系铝合金在时效过程中的沉淀相析出顺序主要为: $\alpha\text{-Al}$ (过饱和固溶体)→共格 GP 区→半共格可相(亚稳态 MgZn_2)→非共格相(平衡相 MgZn_2)^[18,19]。为进一步解析结构特征,对时效合金进行高分辨电镜分析,见图 13。



(a) 金相组织 (b) SEM 组织

图 12 Al-5Zn-2Mg-1Cu-0.2Sc 合金 120 ℃×24 h 时效的金相与 SEM 组织

Fig.12 Optical microstructure and SEM of Al-5Zn-2Mg-1Cu-0.2Sc alloy aging at 120 ℃ for 24 h

从图 13a 和图 13b 中可以发现,在晶粒内部除 GP 区和少量 $\eta'\text{-MgZn}_2$ 相外,还均匀分布许多细小的颗粒。

2.4.3 力学性能

图 14 为铸态与热处理合金的力学性能对比。对合

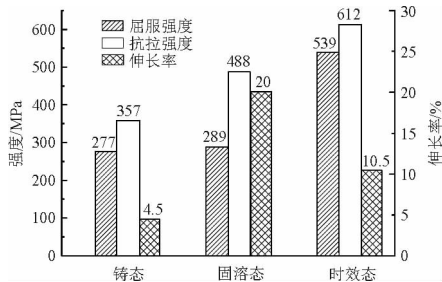


图 14 铸态与热处理态合金的力学性能

Fig.14 Mechanical properties of as-cast and heat-treated alloy

金进行时效处理后,其屈服强度、抗拉强度和伸长率可达 539 MPa、612 MPa 和 10.5%,与 7075-T651 变形合金性能相当。

固溶和时效处理后合金强度提升的主要原因是在晶内析出了 GP 强化区,同时,Al₃Sc 粒子发挥出了细晶强化和弥散强化的双重作用。对合金进行时效处理,析出相主要以弥散的共格纳米级富集原子 GP 区为主,同时晶粒内部也存在少量的短棒状 η' -MgZn₂ 相。GP 区异类原子引起的晶格畸变、MgZn₂ 相和含 Sc 化合物相产生的晶格畸变提高了合金的强韧性。

3 结 论

(1)在滚筒搅拌制浆过程中,随着浇注温度降低,初生 α -Al 相由树枝状转变为近球状,晶粒尺寸减小,圆整度增加,浇注温度为 700 ℃时,初生 α -Al 相的平均晶粒尺寸约为 35 μm ,平均圆整度约为 0.49,半固态浆料质量最佳。

(2)随着浇注温度降低,流变挤压铸造 Al-5Zn-2Mg-1Cu-0.2Sc 合金晶粒逐渐减小,浇注温度为 700 ℃时, α -Al 相为近球形,平均晶粒尺寸约为 43 μm 。经双级固溶(470 ℃ $\times$ 10 h+500 ℃ $\times$ 2 h)处理后,大部分第二相溶解于基体中,屈服强度、抗拉强度和伸长率分别为 289 MPa、488 MPa 和 20%。

(3)流变挤压铸造 Al-5Zn-2Mg-1Cu-0.2Sc 合金经 120 ℃ $\times$ 24 h 时效处理后,屈服强度、抗拉强度和伸长率分别达到 539 MPa、612 MPa 和 10.5%,与 7075-T651 变形合金性能相当。

参 考 文 献

- [1] 杨守杰,戴圣龙. 航空铝合金的发展回顾与展望[J]. 材料导报, 2005(2): 76-80.
- [2] 王涛,尹志民. 高强变形铝合金的研究现状和发展趋势[J]. 稀有金属, 2006, 30(2): 197-202.
- [3] 侯世忠. 汽车用铝合金的研究与应用[J]. 铝加工, 2019(6): 8-13.
- [4] 王志刚,徐骏,李豹,等. 7075 铝合金流变挤压铸造研究[J]. 特种铸造及有色合金, 2014, 34(1): 54-57.
- [5] 赵君文,李微,罗庆来,等. 细化剂对高强铝合金半固态浆料组织的影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2015, 35(2): 134-137.
- [6] ZHOU B, KANG Y L, ZHU G M, et al. Forced convection rheoforming process for preparation of 7075 aluminum alloy semisolid slurry and its numerical simulation[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2014, 24(4): 1 109-1 116.
- [7] ZHU W Z, MAO W M, TU Q. Preparation of semi-solid 7075 aluminum alloy slurry by serpentine pouring channel[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2014, 24(4): 954-960.
- [8] SUN F F, NASH G L, LI Q Y, et al. Effect of Sc and Zr additions on microstructures and corrosion behavior of Al-Cu-Mg-Sc-Zr alloys[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2017, 33(9): 1 015-1 022.

- [9] 杨凯,黄新民,华明凯,等. 微量钪对经不同工艺时效处理的 7075 铝合金组织和性能的影响[J]. 热处理, 2016, 31(2): 12-17.
- [10] 徐蕾,张志峰,徐骏,等. 复合添加 Sc、Zr 的 Al-Zn-Mg-Cu 合金挤压铸造数值模拟[J]. 特种铸造及有色合金, 2014, 34(4): 397-400.
- [11] 郭洪民,张力文,杨湘杰. 流变成形的两个本质问题[J]. 中国有色金属学报, 2016, 26(3): 516-525.
- [12] GUO H M, YANG X J, WANG J, et al. Effects of rheoforming on microstructures and mechanical properties of 7075 wrought aluminum alloy[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2010, 20(3): 355-360.
- [13] SENKOV O N, SENKOVA S V, SHAGIEV M R. Effect of Sc on aging kinetics in a direct chill cast Al-Zn-Mg-Cu alloy[J]. Metallurgical and Materials Transactions, 2008, A39(5): 1 034-1 053.
- [14] 谭建波,刘雪萍,李立新. 压头温度对挤压铸造 7075 半固态组织均匀性的影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2016, 36(10): 1 054-1 056.
- [15] 张树国,杨湘杰,郭洪民,等. 流变挤压铸造成形技术与装备研究[J]. 特种铸造及有色合金, 2017, 37(10): 1 074-1 077.
- [16] 何敏,李豹,高志华,等. Sc 对 Al-Zn-Mg-Cu-Zr 合金挤压铸造组织性能的影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2016, 36(6): 597-600.
- [17] 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): 197-202.
- [18] CHEN B A, LIU G, WANG R H, et al. Effect of interfacial solute segregation on ductile fracture of Al-Cu-Sc alloys[J]. Acta Materialia, 2013, 61(5): 1 676-1 690.
- [19] 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 and Engineering, 2000, A280(1): 30-36.
- [20] BERG L K, GJØNNES J, HANSEN V, et al. GP-zones in Al-Zn-Mg alloys and their role in artificial aging[J]. Acta Materialia, 2001, 49(17): 3 443-3 451.
- [21] SENKOV O N, SHAGIEV M R, SENKOVA S V, et al. Precipitation of Al₃(Sc,Zr) particles in an Al-Zn-Mg-Cu-Sc-Zr alloy during conventional solution heat treatment and its effect on tensile properties[J]. Acta Materialia, 2008, 56(15): 3 723-3 738.
- [22] WU L M, SEYRING M, RETTENMAYR M, et al. Characterization of precipitate evolution in an artificially aged Al-Zn-Mg-Sc-Zr alloy[J]. Materials Science and Engineering, 2010, A527(4-5): 1 068-1 073.
- [23] YANG W C, JI S X, WANG M P, et al. Precipitation behaviour of Al-Zn-Mg-Cu alloy and diffraction analysis from η' precipitates in four variants[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2014, 610: 623-629.

(编辑:彭瑾)

欢迎使用在线稿件处理系统

投稿、查稿、审稿

敬请登录 www.special-cast.com