DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2024.4001

流变压铸 Al-15Cu 合金的组织与力学性能

赵君文[1],王海波[1],杨　涛[1],韩　靖[1],郑云志[2],何振波[3]

(1. 西南交通大学 材料科学与工程学院 材料先进技术教育部重点实验室,成都 610031; 2. 山东省高端铝共同体管理运营有限公司,滨州 256603; 3. 航桥新材料科技(滨州)有限公司,滨州 256606)

摘　要:Al-Cu 合金因其高的强度、硬度及高温力学性能,在交通领域具有重要应用。为探明高 Cu 含量铝合金力学性能特点,本文采用流变压铸成形 Al-15Cu 合金,研究浇注温度等参数对该合金流变压铸件力学性能的影响。结果表明,随着浇注温度的增加,初生 α-Al 晶粒平均等效直径由 55 μm 降低到 30 μm,而平均形状系数随浇注温度变化不明显;施加电磁搅拌对初生 α-Al 晶粒有一定的细化作用。Al-15Cu 合金流变压铸件的强度和塑性随浇注温度先增加后降低。浇注温度为 610 ℃和施加电磁搅拌条件下的拉伸试样密度、抗拉强度和伸长率最高, 分别为 2.961 g/cm^3、260 MPa 和 2%。在 300 ℃拉伸条件下,流变铸件性能随浇注温度变化的规律与常温时一致,抗拉强度和伸长率分别可达 118 MPa 和 8%。

关键词:Al-15Cu;流变压铸;组织;高温力学性能

中图分类号: TG146.2+1　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-8365(2024)05-0459-07

Microstructure and Mechanical Properties of the Rheo-diecast Al-15Cu Alloy

ZHAO Junwen[1], WANG Haibo[1], YANG Tao[1], HAN Jing[1], ZHENG Yunzhi[2], HE Zhenbo[3]

(1. Key Lab of Advanced Technologies of Materials (Ministry of Education), School of Materials Science and Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu, 610031; 2. Shandong Advanced Aluminum Community Management and Operation Co., Ltd., Binzhou 256603; 3. Hangqiao New Material(Binzhou) Science Technology Ltd., Binzhou 256606)

Abstract: Al-Cu alloys have important applications in the transportation field due to their high strength, hardness, and high-temperature mechanical properties. To clarify the mechanical characteristics of Al alloy with high Cu content, rheo-diecast Al-15Cu alloy was investigated to determine the influence of factors such as pouring temperature on the mechanical properties of rheo-diecast parts. The results show that with increasing casting temperature, the average equivalent diameter of the primary α-Al grains decreases from 55 μm to 30 μm, while no apparent change is shown in the average shape factor with respect to the casting temperature. The application of electromagnetic stirring has some effect on the refinement of the primary α-Al grains. The strength and elongation of the rheo-diecast Al-15Cu alloy parts increase and then decrease with increasing casting temperature. The density, tensile strength and elongation of the tensile specimens with a pouring temperature of 610 ℃ and electromagnetic stirring reach the highest values, which are 2.961 g/cm^3, 260 MPa and 2%, respectively. At 300 ℃, the variation in the tensile properties of the rheo-diecast alloy with increasing pouring temperature is consistent with that at room temperature, and the highest tensile strength and elongation reach 118 MPa and 8%, respectively.

Key words: Al-15Cu; rheo-diecasting; microstructure; high-temperature mechanical properties

Al-Cu 合金相比于其他铝合金拥有较高的强度、硬度和耐磨性,具有良好的高温和低温力学性能[1-2]。但 Al-Cu 合金的结晶温度范围比较大,铸造性能差,采用常规铸造工艺成形时,铸件易产生缩孔、缩松、裂纹、氧化夹渣等缺陷[3-4]。与常规压铸件相比,半固态铸造零件组织致密,在经过热处理后能够获得高的力学性能[5-7]。同时,半固态铸造对合金中共晶组织也有细化作用[8-9]。半固态流变铸造因其工艺流程短,成本低等优势,近年来成为半固态铸造领域的研究热点[10-13]。

收稿日期:2024-01-01

基金项目:四川省科技计划重点研发项目(2023YFG0195, 2023YFG0234);山东省应用创新创业共同体项目(BZGDL-XM-2022-03)

作者简介:赵君文,1982 年生,副教授,博士.研究方向为先进交通金属材料. Email: swjtuzjw@swjtu.edu.cn.

引用格式:赵君文,王海波,杨涛,韩靖,郑云志,何振波.流变压铸 Al-15Cu 合金的组织与力学性能[J].铸造技术,2024, 45(5): 459-465.
ZHAO J W, WANG H B, YANG T, HAN J, ZHENG Y Z, HE Z B. Microstructure and mechanical properties of the rheo-diecast Al-15Cu alloy[J]. Foundry Technology, 2024, 45(5): 459-465.

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

Bahl 等[14-15]研究了 Cu 含量为 6%~9%的 Al-Cu 系合金，结果表明 Cu 元素可以显著提高合金的强度，但塑性变差，而合金的低周疲劳与 Cu 含量没有明显的相关性。王海波等[16]研究了 5%~20%Cu 含量的 Al-Cu 合金磨损行为，研究发现高 Cu 含量的试样摩擦系数较大且波动较大，Al-Cu 试样的比磨损率随 Cu 含量增加先急剧降低后趋于平缓。潘志勇[17]对 Cu 含量超过 10%的半固态组织形成机制进行了研究。但迄今为止，对流变铸造高 Cu 含量铝合金的力学性能、特别是高温力学性能的研究则鲜有报道。因此，本文以 Al-15Cu 合金为研究对象，采用半固态流变压铸制样并探究其室温和高温力学性能变化规律及机理。

1 实验材料与方法

1.1 压铸实验

研究使用的合金均为本课题组内设备自行熔炼调制而成，熔炼合金所用的原材料为纯度 99.7%以上的工业纯 Al 和纯 Cu (尺寸为 ϕ5 mm×20 mm 的棒材)。合金的熔炼过程为：将铸铁坩埚预热至 200 ℃，在坩埚壁上刷涂层，再将纯 Al 放入坩埚中，随炉升温至 780 ℃，随后加入提前烘干的纯 Cu，纯 Cu 溶解，保温 2 h 以上，以确保 Cu 充分扩散，之后降温至 720 ℃，对合金熔体进行除气精炼，得到 Al-15Cu 合金熔体。

压铸试样均由卧式冷室压铸机(DCC280 型，力劲集团)制备。压铸采用的压射速度为 0.4 m/s，压射比压 106 MPa，保压时间 5 s。模具预热温度为 200 ℃。压铸制备的试样形状及尺寸如图 1 所示。压铸出的 A 型力学性能试样(图 1a 右边 2 个试样)进行拉伸性能测试，拉伸试样的具体尺寸如图 1b 所示。

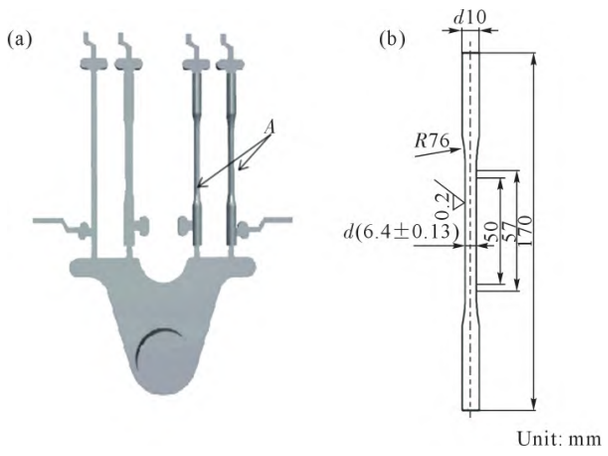

图 1 压铸 A 型拉伸试样及尺寸：(a) 压铸试样图；(b) 尺寸
Fig.1 Schematic diagrams of the diecasting and dimensions of the A-type parts: (a) diecasting sample; (b) dimension

将精炼过的 Al-15Cu 熔体冷却至 650 ℃，转移熔体至可控温型电磁搅拌炉(EMS-05SM 型，石家庄爱迪尔电气有限公司)的石墨坩埚中，该设备主要由电磁搅拌加热炉、升降装置和控制箱 3 部分构成，电磁搅拌力来源于加热炉周围的感应线圈，炉内温度、电磁搅拌强度和频率等参数可以在控制箱上进行调节。在转移熔体之前，电磁搅拌炉提前加热到 600 ℃，转移完熔体后静置冷却，待熔体冷却至 620 ℃后，在电磁搅拌(electromagnetic stirrer, EMS)和非电磁搅拌两种条件下，金属熔体进一步冷却至 600~615 ℃，其中电磁搅拌参数为：电磁搅拌频率 20 Hz，电磁搅拌时间 1 min，电磁搅拌功率 4 kW。随后在 615、610、605 和 600 ℃温度处将熔体倾倒入冷室压铸机压室中，进行压铸，以获得流变压铸试样。

1.2 性能测试及分析

在拉伸试样的夹持端(尺寸较大部位)取 10 mm 左右的长度进行金相制备，使用 VHX-1000 型激光共聚焦显微镜对其进行组织观察和拍摄，并利用 ImagePro 软件对流变压铸 Al-15Cu 合金拉伸试样组织的初生 α-Al 平均等效直径 D 和形状因子 F 进行测定，其计算公式见式(1~2)，形状因子 F 的值在 0~1 范围内，数字越大，颗粒的形状越接近圆形；为保障数据的准确性，每个试样统计 3 张图片。

$$D=2\times\sqrt{\frac{A}{\pi}} \tag{1}$$

$$F=\frac{4\pi A}{P_m^2} \tag{2}$$

式中，A 为初生 α-Al 晶粒的平均面积，μm²；P_m 为初生 α-Al 晶粒的平均周长，μm。

利用阿基米德原理对拉伸试样进行密度测试，计算公式如下：

$$\rho=\frac{m_1\rho_{水}}{m_1-m_2} \tag{3}$$

式中，m_1、m_2 为拉伸试样在空气中、水中的质量，g；$\rho_{水}$为水的密度，g/cm³。

拉伸试验在 CMT5305 万能试验机上进行，温度控制设备为 MTS 高低温环境试验箱。对于Al-15Cu 流变压铸拉伸试样在室温(25 ℃)下和 300 ℃条件下进行拉伸试验。在进行拉伸试验前，试样在高低温环境试验箱达到预定温度后，需保温 15 min 左右[18]。拉伸试验机设置为位移控制，速率为 1 mm/min。

2 实验结果及讨论

2.1 流变压铸 Al–Cu 合金试样的微观组织

图 2 所示为 Al-15Cu 合金流变压铸拉伸试样在不同浆料浇注温度下的微观组织，流变压铸拉伸试样组织主要由尺寸较大的的初生相、细小的的二次

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

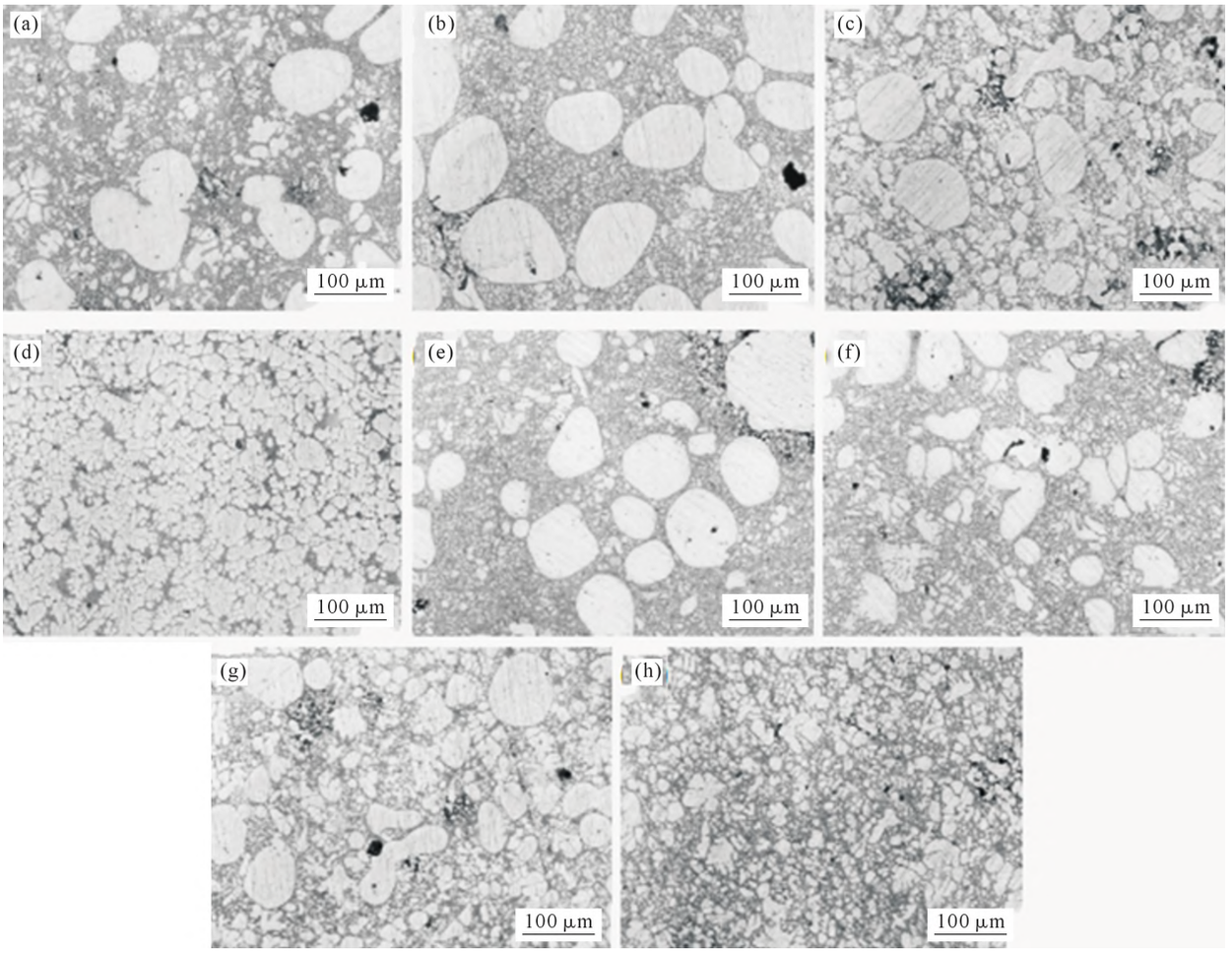

图 2 不同浆料浇注温度下的 Al-15Cu 合金流变压铸拉伸试样微观组织：(a) 未电磁搅拌 -600 ℃；(b) 未电磁搅拌 -605 ℃；(c) 未电磁搅拌 -610 ℃；(d) 未电磁搅拌 -615 ℃；(e) 电磁搅拌 -600 ℃；(f) 电磁搅拌 -605 ℃；(g) 电磁搅拌 -610 ℃；(h) 电磁搅拌 -615 ℃

Fig.2 Microstructures of tensile samples of the rheo-diecast Al-15Cu alloy at different slurry temperatures: (a) without EMS-600 ℃; (b) without EMS-605 ℃; (c) without EMS-610 ℃; (d) without EMS-615 ℃; (e) with EMS-600 ℃; (f) with EMS-605 ℃; (g) with EMS-610 ℃; (h) with EMS-615 ℃

凝固相和暗色的伪共晶组织组成，在未电磁搅拌条件下，初生 α-Al 相为非枝晶组织和蔷薇晶；在电磁搅拌条件下，初生 α-Al 相为非枝晶、蔷薇晶和近球晶。此外，在相同浆料浇注温度下，电磁搅拌下的初生 α-Al 晶粒尺寸比未电磁搅拌条件下的小。

图 3 为不同浆料浇注温度的 Al-Cu 合金流变压铸拉伸试样组织定量分析统计图，图中统计的晶粒尺寸与平均形状因子均为初生 α-Al 晶粒。如图 3 所示，随着浇注温度由 600 ℃增加到 615 ℃，电磁搅拌和未电磁搅拌两种条件下的平均晶粒等效直径均减小，电磁搅拌条件下的初生 α-Al 晶粒由 50 μm 降低到 23 μm，未电磁搅拌的初生 α-Al 晶粒由 55 μm 降低到 30 μm。此外，在同一浇注温度下，电磁搅拌条件下的晶粒平均形状因子要略高于未电磁搅拌的；电磁搅拌条件下的平均形状因子在 0.46～0.54 范围内波动，浇注温度为 610 ℃时平均形状因子最大；未电磁搅拌条件下的平均形状因子在 0.41～0.44 范围内波动，随温度变化较小。

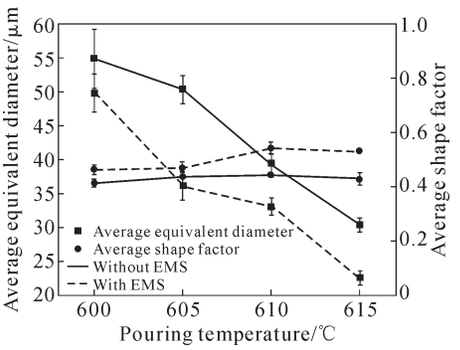

图 3 不同浇注温度下的 Al-Cu 合金流变压铸拉伸试样组织的统计结果

Fig.3 Statistical results of the microstructure of tensile samples of the rheo-diecast Al-15Cu alloy at different pouring temperatures

在半固态区间内，浇注温度对于合金的晶粒尺寸有着较大的影响，而对平均形状因子的影响则不大。温度降低，在半固态浆料内会形成尺寸较大的初生 α-Al 晶粒，在浇注过程中，浆料通过浇口时，虽然有一定的剪切力作用，但是仍有部分较大尺寸的初

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

生 α-Al 晶粒未被剪切破碎，进入型腔中并在试样中保留下来。在半固态区间内形成的初生 α-Al 在电磁搅拌的作用下，晶粒被打碎、磨圆，初生 α-Al 的形状趋于圆整，所以平均形状因子增加，初生 α-Al 晶粒尺寸小于未施加电磁搅拌条件下的晶粒尺寸[19-20]。

2.2 流变压铸 Al–Cu 拉伸试样的密度

Al-15Cu 合金流变压铸拉伸试样在电磁搅拌和未电磁搅拌 2 种条件下的密度与浇注温度关系如图 4 所示，由图 4 可见，在电磁搅拌条件下，浇注温度由 600 ℃增加到 610 ℃，拉伸试样的密度由 2.941 g/cm³ 增加到 2.961 g/cm³，当浇注温度由 610 ℃增加到 615 ℃时，拉伸试样的密度由 2.961 g/cm³ 降低到 2.942 g/cm³。未电磁搅拌条件下，拉伸试样的密度变化趋势基本与电磁搅拌条件下的一致，浇注温度由 600 ℃增加到 610 ℃，拉伸试样的密度由 2.937 g/cm³ 增加到 2.953 g/cm³，当浇注温度由610℃增加到 615 ℃时，拉伸试样的密度由 2.953 g/cm³ 降低到 2.938 g/cm³。相同浇注温度压铸的拉伸试样，施加电磁搅拌的密度要高于未施加电磁搅拌的试样密度。

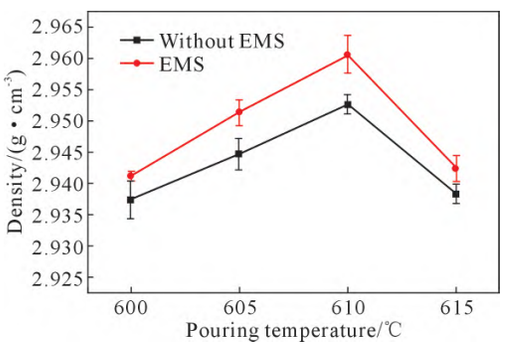

图 4 Al-15Cu 合金流变压铸拉伸试样密度与浇注温度的关系图

Fig.4 Density of tensile samples of the rheo-diecast Al-15Cu alloy at various pouring temperatures

压铸试样的密度主要与试样中的孔洞、缩松和浇不足等缺陷有关。当浇注温度较高时，浆料的流动性较好，在充型过程中，以紊流形式充满型腔，浆料流动过程中容易卷气和吸气，在铸件中形成气孔。当浇注温度较低时，浆料内的固相率较高，浆料的流动性较差，以层流的形式充满型腔；浆料在型腔内凝固过快，在凝固过程中形成的缩孔难以得到补缩，甚至远离浇口的型腔中未能充满浆料，导致试样中存在着缩松和浇不足的缺陷。

相同浇注温度下，电磁搅拌条件下的试样密度高于未施加电磁搅拌的主要原因是，电磁力的作用下，浆料内的尺寸大的晶粒被打碎，分散成细小的晶粒，悬浮在剩余液相中，使浆料保持较好的流动性，同时变形阻力和凝固收缩也减小，能够有效减少孔洞、缩松和浇不足等缺陷，增加试样的密度。

2.3 流变压铸 Al–Cu 拉伸试样常温力学性能

图 5 为 Al-15Cu 合金在电磁搅拌和未电磁搅拌条件下，流变压铸拉伸试样在不同浇注温度下的力–位移曲线，与图 5 中液态压铸的 Al-15Cu 拉伸试样力–位移曲线类似，均在力达到最大值时断裂，在施加电磁搅拌和未施加电磁搅拌条件下，流变压铸的拉伸试样最大位移量和最大力均优于液态拉伸试样。此外，在电磁搅拌和未电磁搅拌条件下，不同浇注温度流变压铸的拉伸试样最大力和最大位移量均有所不同。

图 6 为 Al-15Cu 合金拉伸试样在电磁搅拌和未电磁搅拌 2 种条件下，拉伸性能与浇注温度的关系图。由图 6 可知，电磁搅拌和未电磁搅拌 2 种条件下，拉伸试样的抗拉强度和伸长率随温度变化的趋势一致。在电磁搅拌条件下，浇注温度由 600 ℃增加到 610 ℃，拉伸试样的抗拉强度由 225 MPa 增加到 260 MPa，伸长率由 1.5%增加到 2.0%；当浇注温度由 610 ℃增加到 615 ℃时，拉伸试样的抗拉强度和伸长率都降低，分别由 260 MPa 和 2.0 %降低到 220 MPa 和 1.7%。Al-15Cu 合金拉伸试样的抗拉强度在 220~260 MPa 范围内变化，增幅为 18.2%；伸长

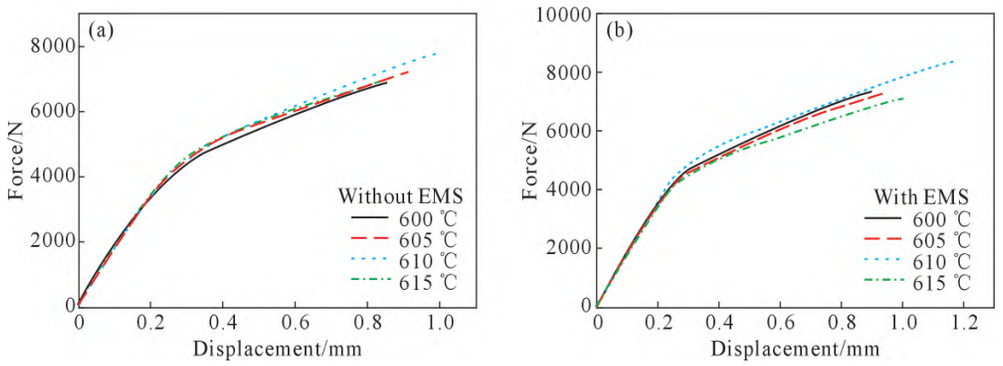

图 5 Al-15Cu 合金流变压铸拉伸试样在不同浇注温度下的力–位移曲线：(a) 未电磁搅拌；(b) 电磁搅拌

Fig.5 Force-displacement curves of tensile samples of the rheo-diecast Al-15Cu alloy at various pouring temperatures: (a) without EMS; (b) with EMS

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

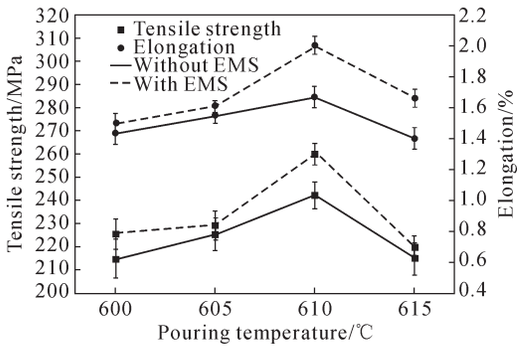

图 6 Al-15Cu 合金流变压铸拉伸试样拉伸性能与浇注温度的关系图

Fig.6 Tensile properties of tensile samples of the rheo-diecast Al-15Cu alloy at various pouring temperatures

率在 1.5%~2.0%范围内变化，增幅为 33.3%。在未电磁搅拌条件下，浇注温度由 600 ℃增加到 610 ℃，拉伸试样的抗拉强度由 214 MPa 提升到 242 MPa，伸长率也由 1.4 %提升至 1.7%；当浇注温度由 610 ℃继续增加到 615 ℃时，拉伸试样的抗拉强度和伸长率则分别由 242 MPa 和 1.7%减小至 215 MPa 和1.4%。Al-15Cu 合金拉伸试样的抗拉强度在 214~242 MPa 范围内变化，增幅为 13.1%；伸长率在 1.4%~1.7%范围内变化，增幅为 21.4%。

同时，从图 6 可以看出，在相同浇注温度下，电磁搅拌条件下制备的拉伸试样的抗拉强度和伸长率要高于未施加电磁搅拌的拉伸试样，在浇注温度为 610 ℃时二者相差最大，电磁搅拌条件的抗拉强度和伸长率比未施加电磁搅拌的高 18 MPa 和 0.3%。

2.4 流变压铸 Al–Cu 拉伸试样高温力学性能

图 7 所示为 Al-15Cu 合金流变压铸拉伸试样在不同浇注温度下的高温拉伸力–位移曲线，拉伸温度为 300 ℃，图 9a~b 分别为未施加电磁搅拌和施加电磁搅拌的力–位移曲线。相比图 5 中常温拉伸力–位移曲线，300 ℃下的力–位移曲线有明显的屈服阶段，在拉伸力达到最大值时，力虽然逐渐衰减，但是并未直接断裂，表现出一定的塑韧性。另外，由图 7可以看出，在相同的温度下，施加电磁搅拌条件下的最大位移量和最大力均要高于未施加电磁搅拌的试样。

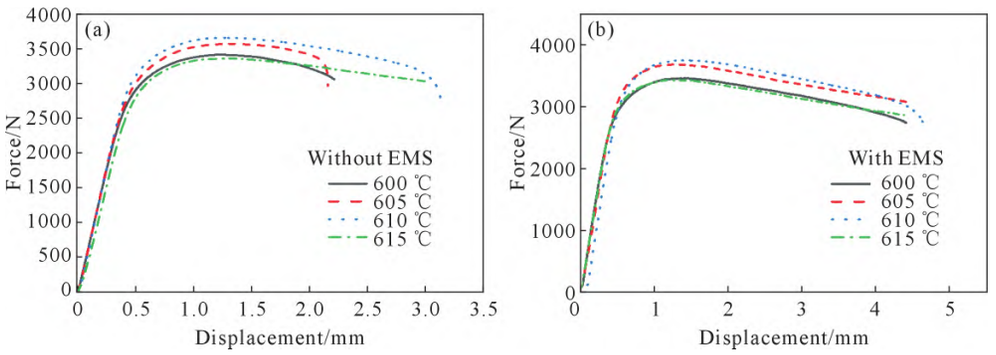

图 7 Al-15Cu 合金流变压铸拉伸试样在不同浇注温度下的高温拉伸力–位移曲线：(a) 未电磁搅拌；(b) 电磁搅拌

Fig.7 High temperature force-displacement curves of tensile samples of the rheo-diecast Al-15Cu alloy at various pouring temperatures: (a) without EMS; (b) with EMS

图 8 为浇注温度与拉伸试样的高温拉伸性能关系图。图中实线为未施加电磁搅拌拉伸试样的伸长率和抗拉强度，虚线为电磁搅拌条件下试样的伸长率和抗拉强度。由图 8 可以看出，拉伸试样在高温拉伸试验下的伸长率和抗拉强度随温度的变化趋势与图 6 中所示的常温变化趋势一致。在未施加电磁搅拌条件下，温度为 600 ℃时，拉伸试样的抗拉强度和伸长率分别为 106 MPa 和 3.60%，随着浇注温度增加至 610 ℃，拉伸试样的抗拉强度和伸长率增加至 114 MPa 和 5.23%；浇注温度继续增加至 615 ℃，试样的抗拉强度和伸长率降低为 105 MPa 和5%；在施加电磁搅拌的条件下，浇注温度从 600 ℃增加到 610 ℃，抗拉强度和伸长率由 108 MPa 和7.34%增加到 118 MPa 和 8%，浇注温度继续增加至615 ℃，抗拉强度和伸长率降低为 107.5 MPa 和 7.40%。

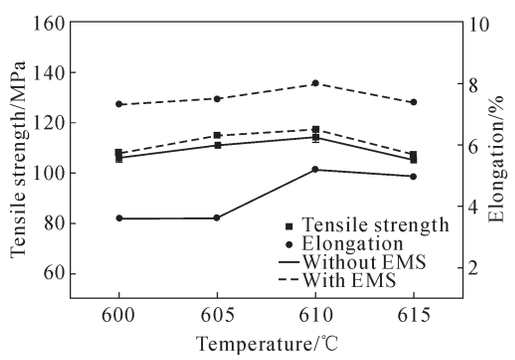

图 8 Al-15Cu 合金流变压铸拉伸试样高温拉伸性能与浇注温度的关系图

Fig.8 High temperature tensile properties of tensile samples of the rheo-diecast Al-15Cu alloy at various pouring temperatures

由图 8 可以看出，在相同浇注温度下，施加和未施加电磁搅拌的拉伸试样抗拉强度相差不大，差值在 2~4 MPa 范围内，2 种条件下的抗拉强度峰值为 118 MPa 和 114 MPa，相差 4 MPa，增幅仅为 3.5%。而伸长率则相差较大，施加电磁搅拌的拉伸试样，伸

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

长率在 7.30%~8.00%范围内，未施加电磁搅拌的拉伸试样，伸长率在 3.60%~5.23%范围内。施加电磁搅拌和未施加电磁搅拌的伸长率峰值分别为 8.00%和 5.23%，二者相差 2.76%，增幅为 52.8 %。

上述数据表明，在施加电磁搅拌和浇注温度为 610 ℃时，Al-15Cu 合金压铸件的高温力学性能和常温力学性能均优于其它浇注温度。由图 3 可知，在施加电磁搅拌及浇注温度为 610 ℃条件下，试样的晶粒尺寸较小，平均形状系数较高，有利于获得更高的力学性能。同时，由图 4 可知，以上条件下试样密度最高，即试样中存在的孔洞缺陷少于其它浇注温度的试样。众所周知，孔洞削弱试样承载面积，且在拉应力作用下孔洞有利于裂纹萌生和扩展，导致试样在低应力和低塑性下断裂，所以低的孔隙率下试样可获得高的强度和伸长率。

3 结论

(1)对于流变压铸 Al-15Cu 拉伸试样，随着浇注温度从 600 ℃增加至 615 ℃，初生 α-Al 晶粒平均等效直径由 55 μm 降低到 30 μm，而平均形状系数变化不明显；施加电磁搅拌对初生 α-Al 晶粒有一定的细化作用；在浇注温度为 610 ℃，并施加电磁搅拌时，试样组织的平均形状系数最大。

(2)随着浇注温度的增加，流变压铸 Al-15Cu 拉伸试样的密度、抗拉强度和伸长率都先增加后减小，施加电磁搅拌对流变拉伸试样的常温力学性能有着不同程度的改善，在浇注温度为 610 ℃，施加电磁搅拌条件下，拉伸试样的力学性能最好，密度达 2.961 g/cm^3，抗拉强度为 260 MPa，伸长率为 2%。

(3)随着拉伸试验温度的增加，流变压铸Al-15Cu 拉伸试样的抗拉强度下降，伸长率上升，高温力学性能最好的为电磁搅拌条件下浇注温度为 610 ℃的试样，300 ℃拉伸试验下，抗拉强度和伸长率分别为 118 MPa 和 8%。

参考文献：

[1] 张晗，郝启堂，李新雷，薛彦庆，余文涛，娄泽宇，王培卿. 热处理工艺对 Al-Cu-Mn-Mg 合金微观组织与力学性能的影响[J]. 材料热处理学报，2023, 44(3): 58-67.
ZHANG H, HAO Q T, LI X L, XUE Y Q, YU W T, LOU Z Y, WANG P Q. Effect of heat treatment on microstructure and mechanical properties of Al-Cu-Mn-Mg alloy[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2023, 44(3): 58-67.

[2] 苏阳，郜均虎，丁佐军，胡剑伟，吴佳慧. 淬火水温对 Al-Cu 合金组织性能的影响[J]. 世界有色金属，2018(15): 178-179.
SU Y, GAO J H, DING Z J, HU J W, WU J H. Effect of quenching temperature on microstructure and property of Al-Cu alloy[J]. World Nonferrous Metals, 2018(15): 178-179.

[3] LI Y, LI H X, KATGERMAN L, DU Q, ZHANG J S, ZHUANG L Z. Recent advances in hot tearing during casting of aluminium alloys[J]. Progress in Materials Science, 2021, 117: 100741.

[4] 陈莉娟，李永晖，陶淑芬. 电磁搅拌对铝铜合金宏观组织及偏析的影响[J]. 热加工工艺，2010, 39(7): 69-71.
CHEN L J, LI Y H, TAO S F. Effect of electromagnetic stirring on macrostructure and segregation of Al-Cu alloy[J]. Hot Working Technology, 2010, 39(7): 69-71.

[5] 徐春杰，路瑶涵，马东，张凯军，王银玉，杨怡，屠涛，田军，张忠明. 镁合金半固态流变成形技术的发展与应用[J]. 铸造技术，2021, 42(7): 625-630, 646.
XU C J, LU Y H, MA D, ZHANG K J, WANG Y Y, YANG Y, TU T, TIAN J, ZHANG Z M. Development and application of semi-solid rheoforming technology for magnesium alloy[J]. Foundry Technology, 2021, 42(7): 625-630, 646.

[6] KHALIFA W, EL-HADAD S, TSUNEKAWA Y. Microstructure characteristics and tensile property of ultrasonic treated-thixocast A356 alloy[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2015, 25(10): 3173-3180.

[7] DING Z G, HOU S H, CHEN S, LIU Z H, LI D Q, FENG J, ZHANG F, PENG L M. Effects of Cu content on microstructure and mechanical properties of rheo-diecasting Al-6Zn-2Mg-xCu alloys[J]. China Foundry, 2022, 19(4): 321-326.

[8] 梁博，王亚宝，刘建朝，张志峰，徐骏. Al-6.6Si 铝合金 MSMT 法流变压铸成型研究[J]. 铸造技术，2013, 34(9): 1174-1176.
LIANG B, WANG Y B, LIU J C, ZHANG Z F, XU J. Experimental studies on processing of Al-6.6Si alloy prepared by MSMT rheocasting[J]. Foundry Technology, 2013, 34(9): 1174-1176.

[9] 艾永平. 近共晶和过共晶铝-硅-铜合金的半固态加工[J]. 轻金属，2015(7): 51-53, 60.
AI Y P. Semisolid processing of near-eutectic and hypereutectic Al-Si-Cu alloys[J]. Light Metal, 2015(7): 51-53, 60.

[10] 祁明凡，康永林，周冰，张欢欢，朱国明. 流变压铸 A380 铝合金的显微组织与力学性能[J]. 中国有色金属学报，2015, 25(8): 2029-2039.
QI M F, KANG Y L, ZHOU B, ZHANG H H, ZHU G M. Microstructures and mechanical properties of A380 aluminum alloy produced by rheo-diecasting process[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2015, 25(8): 2029-2039.

[11] 杨依珉，赵君文，巫国强，王海波. 半固态流变压铸铝合金件疲劳性能研究[J]. 特种铸造及有色合金，2021, 41(1): 83-87.
YANG Y M, ZHAO J W, WU G Q, WANG H B. Fatigue behavior of semi-solid rheo-die casting aluminum alloy parts[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2021, 41(1): 83-87.

[12] JARFORS A E W, DI A D, YU G G, ZHENG C, WANG K K, WANNASIN J. Semisolid materials processing: A sustainability perspective[J]. Solid State Phenomena, 2022, 327: 287-292.

[13] LUO X Q, HAN Y J, HOU Y M, LI Q B, JIN Y. Effect of pouring temperature by a novel micro fused-casting on microstructure and properties of ZL101 semisolid slurry[J]. Journal of Wuhan University of Technology-Materials Science Edition, 2023, 38: 1179-1183.

[14] BAHL S, HU X H, SISCO K, ALLEN HAYNES J, SHYAM A. In-

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

fluence of copper content on the high temperature tensile and low cycle fatigue behavior of cast Al-Cu-Mn-Zr alloys[J]. International Journal of Fatigue, 2020, 140: 105836.

[15] BAHL S, HU X H, HOAR E, CHENG J H, ALLEN HAYNES J, SHYAM A. Effect of copper content on the tensile elongation of Al-Cu-Mn-Zr alloys: Experiments and finite element simulations [J]. Materials Science and Engineering: A, 2020, 772: 138801.

[16] 王海波,赵君文,陶星宇,戴光泽. 高 Cu 铸造铝合金的摩擦磨损性能[J]. 材料工程,2022, 50(11): 109-118.
WANG H B, ZHAO J W, TAO X Y, DAI G Z. Friction and wear properties of cast aluminum alloy with high Cu content[J]. Journal of Materials Engineering, 2022, 50(11): 109-118.

[17] 潘志勇. 半固态铸造高 Cu 含量 Al-Cu 合金的组织及形成机制[J]. 特种铸造及有色合金,2009, 29(8): 713-717.
PAN Z Y. Microstructure and formation mechanism of semi-solid casting Al-Cu alloy containing high Cu[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2009, 29(8): 713-717.

[18] 高昌前,赵冰,韩秀全,侯红亮. 连续 SiC 纤维增强钛基复合材料高温变形研究[J]. 航空制造技术,2015, 58(S2): 36-38, 42.
GAO C Q, ZHAO B, HAN X Q, HOU H L. Deformation study of SiC fiber reinforced Titanium composites at high temperature[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2015, 58(S2): 36-38, 42.

[19] 朱艳丽,赵君文,李微,朱振宇,戴光泽,张鲲. 电磁搅拌对 7A04 铝合金大体积半固态浆料组织的影响[J].中国有色金属学报,2014, 24(11): 2735-2742.
ZHU Y L, ZHAO J W, LI W, ZHU Z N, DAI G Z, ZHANG K. Effect of electromagnetic stirring on microstructure of large-volume semi-solid slurry of 7A04 aluminum alloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2014, 24(11): 2735-2742.

[20] 刘政, 谌庆春, 罗浩林, 刘骏义, 周志鹏. 电磁搅拌对半固态 A356-Y 铝合金凝固组织的影响[J]. 中国稀土学报,2014, 32(1): 61-68.
LIU Z, CHEN Q C, LUO H L, LIU J Y, ZHOU Z P. Effect of electromagnetic stirring on microstructure of semisolid A356-Y alloy [J]. Journal of the Chinese Society of Rare Earths, 2014, 32(1): 61-68.

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net