

保压压力对不同壁厚低压铸造 Al-5.8Zn-2.3Mg-1.7Cu 合金组织和性能的影响

李 薇¹ 陈兴通¹ 谭 盼² 李鹏飞² 隋育栋²

(1. 云南省交通规划设计研究院股份有限公司, 昆明 650041; 2. 昆明理工大学材料科学与工程学院, 昆明 650093)

摘 要 利用扫描电镜、布氏硬度计和万能材料试验机 etc 仪器, 结合自行设计的低压铸造阶梯形模具, 研究了保压压力对不同壁厚低压铸造 Al-5.8Zn-2.3Mg-1.7Cu 合金微观组织和力学性能的影响。结果表明, 当壁厚较小时, 保压压力对合金的组织没有明显影响。当壁厚增大时, 合金的铸态组织随着压力增加晶粒尺寸减小。保压压力的增大使合金的低压铸造力学性能改善。

关键词 保压压力; 壁厚差异; 低压铸造; 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.T20250005

Effects of Holding Pressure on Microstructure and Properties of Low-pressure Casting Al-5.8Zn-2.3Mg-1.7Cu Alloy with Different Wall Thicknesses

LI Wei¹, CHEN Xingtong¹, TAN Pan², LI Pengfei², SUI Yudong²

(1. Yunnan Provincial Transportation Planning & Design Institute Co., Ltd., Kunming 650041; 2. School of Materials Science and Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093)

Abstract: Effects of holding pressure on the microstructure and mechanical properties of low-pressure casting Al-5.8Zn-2.3Mg-1.7Cu alloy with different wall thicknesses were investigated by scanning electron microscope, Brinell hardness tester and universal material testing machine, combined with the self-designed low-pressure casting stepped mold. The results reveal that when the wall thickness is small, the holding pressure has no obvious effect on the microstructure of the alloy. With the wall thickness increases, the as-cast structure of the alloy is decreased with the increase of pressure. The increase of holding pressure can improve the mechanical properties of low-pressure casting of alloys.

Key Words: Holding Pressure, Wall Thickness Difference, Low-pressure Casting, Microstructure, Mechanical Properties

Al-Zn-Mg-Cu 合金具有密度小、比强度和比刚度高、优异的耐蚀和耐磨性、良好的加工成形性及可回收再生等特点, 广泛应用于航空、汽车轻量化等领域^[1-3]。Al-Zn-Mg-Cu 系合金一般通过轧制、变形处理, 主要由于这类合金的铸造性能差、很难成形形状较为复杂的零件^[4-5]。低压铸造、挤压铸造等工艺为 Al-Zn-Mg-Cu 系铝合金的铸造成形及零件的制备提供了可行途径, 是近年来高强铝合金成形技术发展的重要方向。

铝合金低压铸造在汽车工业中得到广泛应用。由于低压铸造生产时气体、夹杂物卷入少, 金属液充型平稳, 无飞溅现象, 可避免卷入气体及对型壁和型芯的冲

刷, 提高了铸件的合格率^[6]。铝合金低压铸件在关键汽车铸件部件的制造中有着广泛的应用^[7-8], 但由于保压压力的差异, 使生产零件的组织 and 性能差异较大。在保压压力较低时, 铸件缺陷较大。保压压力较高时, 在铸件壁厚不同的组织容易在高应力下导致晶间开裂^[9]。文仁兴等^[10]研究了低压铸造保压压力对 AlSi7Mg 铝合金组织和力学性能的影响。结果表明, 在 320 kPa 高压压力下制备的试样组织致密且力学性能优良。该压力通过改善充填性能和加快冷却速度, 有效提升了 AlSi7Mg 合金的力学性能。林益雄等^[11]分析了成形压力与保压时间对合金组织和力学性能的影响。发现当成形压力为 100 MPa、保压时间为 10 s 时, 合金组织中

收稿日期: 2025-01-04; 修订日期: 2025-06-10

基金项目: 云南省交通运输厅科技资助项目(云交科教便[2022]123号); 云南交投科技创新计划资助项目(YCIC-YF-2022-20)

第一作者: 李薇, 女, 1988 年出生, 高级工程师, E-mail: agnes0821@126.com

引用格式: 李薇, 陈兴通, 谭盼, 等. 保压压力对不同壁厚低压铸造 Al-5.8Zn-2.3Mg-1.7Cu 合金组织和性能的影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2026, 46(5): 770-775.

LI W, CHEN X T, TAN P, et al. Effects of holding pressure on microstructure and properties of low-pressure casting Al-5.8Zn-2.3Mg-1.7Cu alloy with different wall thicknesses[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2026, 46(5): 770-775.

α -Al相平均晶粒尺寸为 $29.59\ \mu\text{m}$, 形状因子为 0.76, Mg_2Si 相主要呈点状或棒状弥散分布, 金属间化合物的析出受到明显抑制, 合金抗拉强度为 312 MPa, 伸长率为 13.5%, 与重力铸造时合金的力学性能(抗拉强度为 185 MPa, 伸长率为 3.1%)相比, 分别提高了 68.6% 和 335.5%。

综上, 铝合金铸件保压压力的不同, 导致合金微观组织差异, 进而对合金的力学性能产生影响。虽然目前关于铝合金的保压压力和力学性能之间的相关性已有报道, 但缺乏直接的试验证据来证实保压压力改变时力学性能的差异。因此, 本研究采用扫描电镜、布氏硬度计和万能材料试验机等手段, 结合自行设计的低压铸造阶梯形模具, 研究保压压力对不同壁厚低压铸造 Al-5.8Zn-2.3Mg-1.7Cu 合金微观组织和力学性能的影响, 旨在为其应用提供参考。

1 试验方法和设备

试验原材料采用工业纯 Al($>99.7\%$, 质量分数, 下同)、纯 Zn($>99.97\%$)、纯 Mg($>99.95\%$) 铸锭及 Al-50Cu 中间合金。使用 KGPS-100-2.5S 中频电磁感应炉熔炼: 将清理、刷涂料并烘干的石墨坩埚与切割、清洁的合金放入干燥箱, 于 $200\ ^\circ\text{C}$ 加热。随后在坩埚中加入纯铝, $720\ ^\circ\text{C}$ 熔化。待铝开始熔化时加入 Al-50Cu 合金(利用铜相对原子质量大于铝, 促进均匀化)。纯铝及铝铜合金部分熔化后加入纯锌锭, 使其与铝同步熔化、均匀分布。降温至 $690\sim 700\ ^\circ\text{C}$, 加入铝箔包裹的纯镁锭, 缓慢搅拌至熔化。待合金全部熔化后, $690\ ^\circ\text{C}$ 下用 C_2Cl_6 精炼除气 15 min, 随后升温至 $710\ ^\circ\text{C}$ 静置 20 min, 扒渣后浇注。将低压铸造阶梯形模具预热温度设定为 $130\sim 160\ ^\circ\text{C}$, 将金属液平稳快速充满型腔后在不同保压压力(0.03、0.035、0.04 和 0.045 MPa)下保压 15 s; 保压结束后关闭进气系统, 自动进入冷却阶段持续 60 s 后开模取样。图 1 为不同壁厚铸造模具及板状拉伸试样的示意图, 其中, 低压铸造阶梯形模具材质为模具钢, 阶梯形铸件的形状及尺寸(5、15、30 和 60 mm)见图 1a。

试验采用 J452 型低压铸造机。金相试样依次用 240、400、800、1 200 和 1 500 目砂纸进行打磨。最后, 分别使用 $3\ \mu\text{m}$ 和 $0.5\ \mu\text{m}$ 粒度的金刚石研磨膏在全自动抛光机上进行粗抛和精抛。磨抛机转速为 600 r/min, 抛光时间为 $5\sim 10\ \text{min}$ 。使用 Keller 试剂(5 mL 的 $\text{HNO}_3 + 3\ \text{mL}$ 的 $\text{HCl} + 2\ \text{mL}$ 的 $\text{HF} + 190\ \text{mL}$ 的 H_2O)对抛光过的金相试样腐蚀 $7\sim 9\ \text{s}$ 。使用 ZeissEVO180 扫描电镜对不同铸件进行微观组织观察。使用 HB-

3000C 布氏硬度计对试样进行硬度测试, 载荷为 612.9 N, 采用直径为 2.5 mm 的不锈钢球形压头, 保压时间为 15 s。硬度值根据 GB/T231.1-2022 标准进行计算, 最终布氏硬度为 5 个读数去除最大值和最小值的平均值。室温拉伸性能测试采用 Zwick/RoellZ100 型万能试验机, 根据 GB/T228.1-2022 进行。拉伸试样为板状试样, 拉伸速率为 $1\ \text{mm/min}$, 尺寸见图 1b。

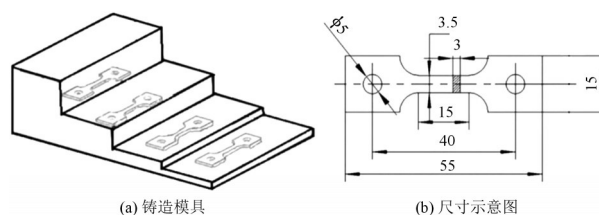


图 1 铸造模具和拉伸试样的尺寸图

Fig.1 Dimensions of casting mold and tensile specimen

2 试验结果与讨论

2.1 保压压力对不同壁厚显微组织的影响

图 2 为不同保压压力合金的 SEM 图片。可以看出, 当铸件厚度为 5 mm 时, 保压压力从 0.03 MPa 增至 0.04 MPa, 合金的微观组织为近等轴晶区, 枝晶臂短粗, 共晶组织以连续网状分布, 没有产生明显的差异。当保压压力增加到 0.045 MPa 时, 较大的保压压力抑制了晶粒长大, 合金的组织发生明显细化, 共晶组织以细小网状形式分布。由于铸件厚度较小的合金充型时间短, 且壁厚较小处最先充型, 金属液与模具内壁接触遇冷以异质形核方式快速形成大量晶核, 并且快速长大, 使金属液迅速凝固。由于该凝固过程时间较短, 但铸件整体充型时间较长, 因此当铸件充型完成后, 薄壁件已经凝固, 后续的保压过程对合金的微观组织影响能力减弱, 所以合金的组织无明显变化特征。

当合金铸件厚度为 15 mm 时, 由晶界处共晶组织包围的 α -Al 组织表现为先增大后减小。保压压力从 0.03 MPa 增加至 0.035 MPa, 压力升高使金属液密度增加, 压力铸造凝固过程使合金组织缺陷减少。保压压力继续增大对合金组织的影响较小, 合金微观组织保持了稳定性。由于铸件壁厚较小, 液态金属凝固速度快, 凝固时间短, 所以保压压力对合金的凝固没有产生明显的影响。由于厚度为 15 mm 的铸件微观组织主要为柱状晶, 主要由粗大柱状树枝晶构成, 当保压压力增大时, 充满型腔的金属液受外加应力的作用, 其单向生长被抑制, 因此枝晶生长发生转向或停止长大, 从而使合金的枝晶臂变得短粗, 方向性减弱。

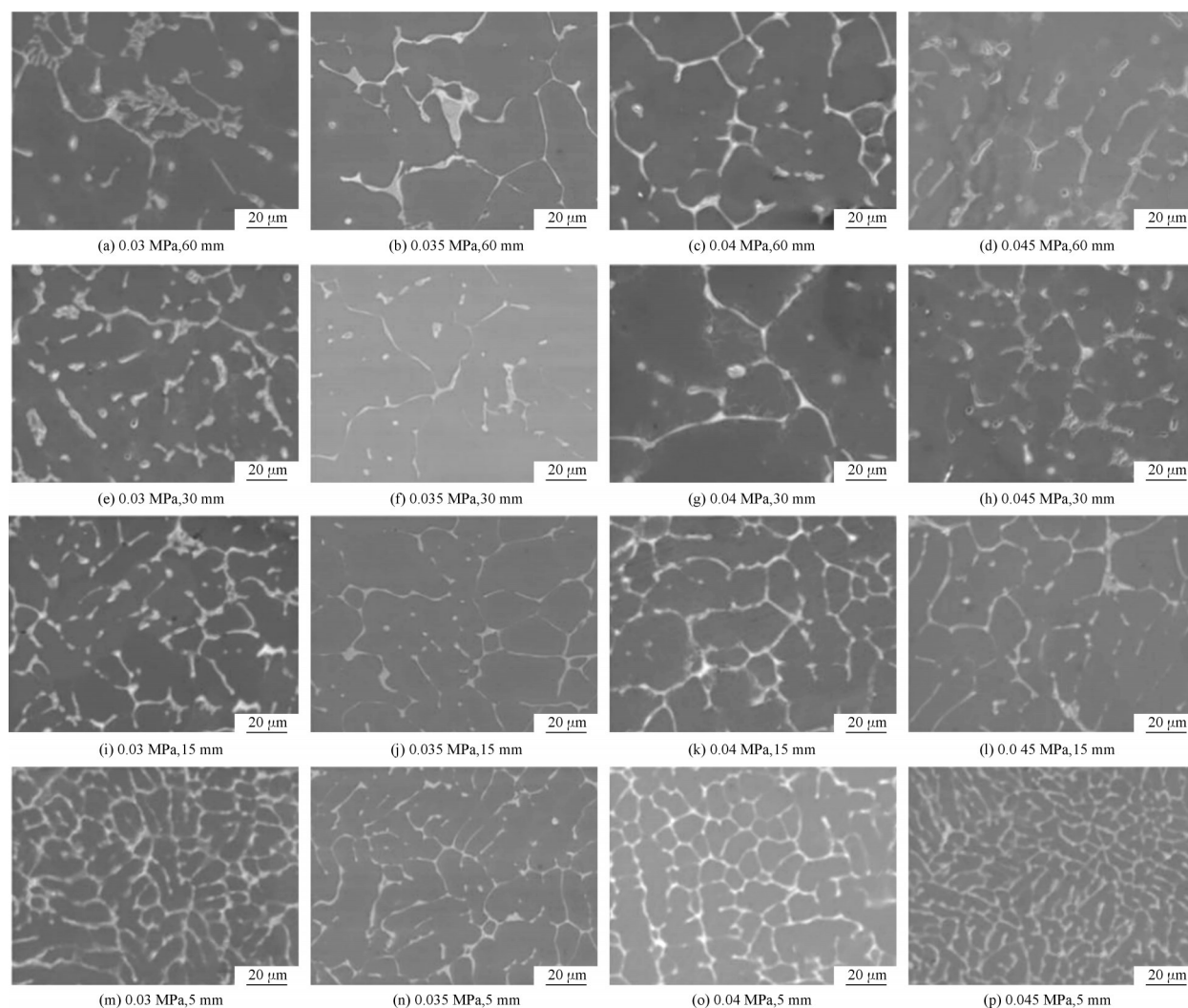


图2 不同保压压力下合金的显微组织

Fig.2 Microstructure of alloys under different holding pressure

厚度为 30 mm 和 60 mm 的铸件随着保压压力增加,微观组织的尺寸先增加后减小,晶间共晶组织的形态由连续网状逐渐转变为细小棒团块状和网状共存。由于保压压力的存在,合金的流动性减弱,凝固过程中共晶组织由于凝固速度的加快使液态金属未能充分扩散,析出的共晶组织弥散分布于基体晶界之间,未能形成连续网状形态。保压压力较小时,保压压力对合金作用力较小,铸件内部的等轴晶的受热影响发生长大,晶粒尺寸较大。当保压压力增大后,外部应力作用于未凝固的合金熔体,抑制了合金内部等轴晶的长大,使合金等轴晶晶粒发生细化,等轴枝晶的树枝晶特征减弱。因此厚度为 60 mm 的合金其晶粒尺寸小于厚度为 30 mm 室温铸件的。

2.2 保压压力对不同壁厚合金力学性能的影响

2.2.1 布氏硬度

不同保压压力的 Al-5.8Zn-2.3Mg-1.7Cu 合金的布

氏硬度见图 3。厚度为 5 mm 的合金铸锭,随着保压压力升高,合金的布氏硬度(HBW)在 99.7~112.33 之间波动,整体上具有逐步增大的变化趋势。由于铸件厚度小、凝固速度快,保压压力未能对合金组织产生明显规律性的影响。厚度大于 15 mm 的不同厚度铸件,布氏硬度表现为随着保压压力的增大先减小后增大的变化。同时,随着保压压力增大,布氏硬度整体逐渐增大。保压压力为 0.035 MPa 的 15、30 和 60 mm 厚的合金铸件布氏硬度(HBW)均为最小值,分别为 110.33, 118 和 108.33。根据微观组织分析结果可知,保压压力为 0.035 MPa 的合金晶粒尺寸随着铸件厚度的增加逐步增大,其组织大于其他保压压力下的合金微观组织,因此该压力下合金的布氏硬度较小。保压压力超过 0.035 MPa 后,保压压力抑制了晶粒的长大,使合金组织细化,合金的力学性能提高,布氏硬度逐步增大,此时合金的力学性能与铸件厚度具有密切关系。

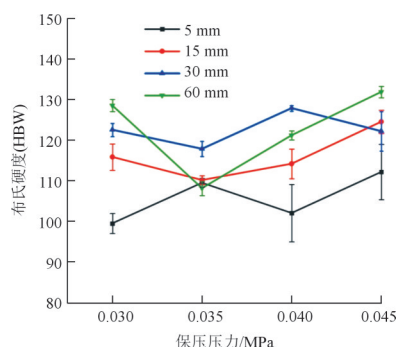


图3 不同保压压力下合金的布氏硬度

Fig.3 Brinell hardness of alloys under different holding pressures

2.2.2 拉伸性能

不同保压压力合金的抗拉强度见图4。可以看出,4组合金的抗拉强度随保压压力的增加逐渐升高,当保压压力超过0.035 MPa,合金的抗拉强度受保压压力的影响较小。保压压力为0.035 MPa的不同厚度合金的抗拉强度均取得了较佳,分别为207.87、251.20、290.85和243.99 MPa。而同一保压压力的不同厚度合金抗拉强度均表现为先升高后降低的趋势,4种保压压力下厚度为30 mm的合金铸件抗拉强度均达到峰值,分别为232.03、290.85、257.49和266.25 MPa。由于厚度为5 mm的铸件凝固速度快、凝固时间较短,液态金属充型后与模具内壁接触迅速发生热交换,高温液态金属遇冷发生异质形核,产生大量晶核,快速凝固成形。因此保压压力对初始凝固组织的影响较小,合金铸件的微观组织主要为激冷凝固形成的细小晶粒,由于合金凝固速度快,且后续补缩能力较差,因此合金中存在铸造缺陷,组织均匀性低,室温力学性能较低。当铸件厚度增加至30 mm时,充型完成后的铸件内部液态金属受保压压力作用的影响,铸件内部的缺陷减少,组织致密。同时,外部压力的作用使晶粒生长过程被抑制,合金的微观组织尺寸减小,因此组织均匀性升高和显微组织细化使合金的力学性能增强。厚度为60 mm的铸件内部主要为粗大的等轴晶,由于内部液相体积分数较大,保压压力的差异对于合金组织影响较小,合金的铸态组织受凝固过程温度场分布状态的影响较大,合金组织粗大,所以其力学性能低于厚度为30 mm的铸件。保压压力为0.04 MPa和0.045 MPa的合金抗拉强度接近,变化规律相似,保压压力的增大使不同厚度合金的抗拉强度增加量很小,表明当保压压力超过0.035 MPa后,提高保压压力对合金力学性能影响有限,因此在试验安全操作的前提下不宜过多增大保压压力。

图5为不同保压压力下合金的屈服强度分布。可以看出,合金屈服强度的变化与抗拉强度具有相似的

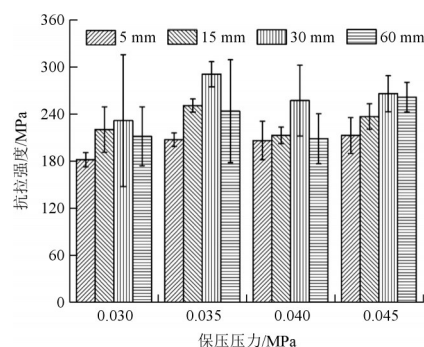


图4 不同保压压力下合金的抗拉强度

Fig.4 Tensile strength of alloys under different holding pressures

规律。相同保压压力下的合金,随着铸件厚度的增加屈服强度先增加后减小。保压压力为0.03、0.035和0.04 MPa的不同厚度合金的抗拉强度均在厚度为30 mm铸件上取得了较佳值,分别为194.45、264.63和196.69 MPa。保压压力为0.035 MPa的不同厚度合金的屈服强度相对最佳,分别为203.86、193.68、264.63和207.23 MPa。屈服强度与晶粒尺寸密切相关,所以根据不同合金由于保压压力变化引起晶粒尺寸的改变解释了屈服强度的变化。

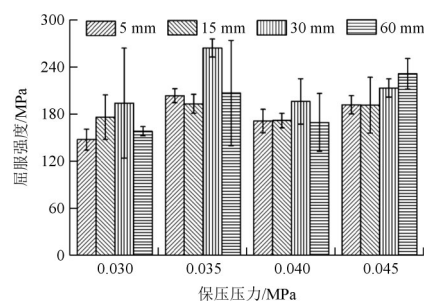


图5 不同保压压力下合金的屈服强度

Fig.5 Yield strength of alloys under different holding pressures

图6为不同保压压力下合金的伸长率。可以看出,不同保压压力的合金铸锭伸长率相对应的变化趋势并不相同,保压压力为0.03 MPa时,伸长率随铸件厚度的增加先增大后减小。由于保压压力较小,压力对晶粒的影响作用很小,因此合金组织与性能主要依赖于合金铸件的凝固过程。由于Al-Zn-Mg-Cu系合金具有较

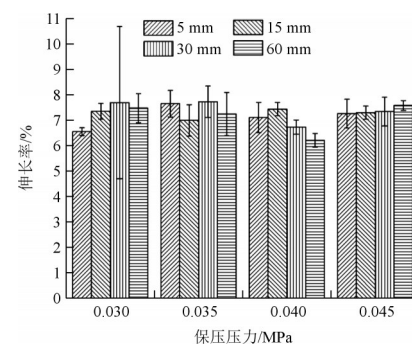


图6 不同保压压力下合金的伸长率

Fig.6 Elongation of alloys under different holding pressures

大的热裂倾向,特别对于薄壁部位由于激冷过程造成铸件内部产生微裂纹,因此使合金性能降低。当铸件厚度增加,凝固过程加长,凝固速度减慢,因此合金的凝固组织均匀性提高,有利于力学性能的提高,也带来伸长率增加。但对于壁厚过大的60 mm铸件,其内部晶粒粗大导致了伸长率的降低。保压压力为0.035 MPa的合金,不同厚度的铸件伸长率接近,厚度为15 mm和60 mm的铸件伸长率较低。当保压压力增大,压力对合金的凝固产生积极的作用使合金铸锭组织致密,缺陷数量减少,因此合金的伸长率整体上升。而厚度为15 mm的铸件主要由柱状晶构成,在外加拉应力作用下柱状晶之间协调变形的能力差,容易发生开裂,导致合金的伸长率较低。厚度为60 mm的铸件由于内部粗大的晶粒使合金的伸长率降低。保压压力为0.04 MPa的合金,由于其组织粗大,所以合金的伸长率整体偏低,同时随着铸件厚度的增加导致合金的晶粒逐步粗化,因此合金的伸长率逐渐下降。当保压压力为

0.045 MPa时不同厚度的试样的伸长率接近。由于保压压力增大,压力对不同厚度的合金凝固产生的作用效果相似,外加压力增大导致合金凝固过程的温度场变化对合金的微观组织产生的影响减弱,因此合金的性能依赖于保压压力。

2.3 断口组织分析

图7为不同保压压力合金的室温拉伸断口形貌。可以看出,不同合金的断口主要由韧窝构成,为典型的塑性断裂。保压压力为0.03 MPa时,由于保压压力小,合金的凝固过程中由于重力作用产生了回流使合金组织产生缩孔、浇不足等铸造缺陷,因此合金的力学性能较低。在厚度为60 mm的铸件断口中,存在大量的解理面和河流状花样,表明合金在拉伸过程中产生了脆性解理断裂。由于压力较小,压力对壁厚很大的合金组织的影响作用很小,因此合金组织与性能主要依赖于合金铸件的凝固过程,而铸件厚大部分组织粗化严重,因此合金发生了部分脆性断裂。保压压力为

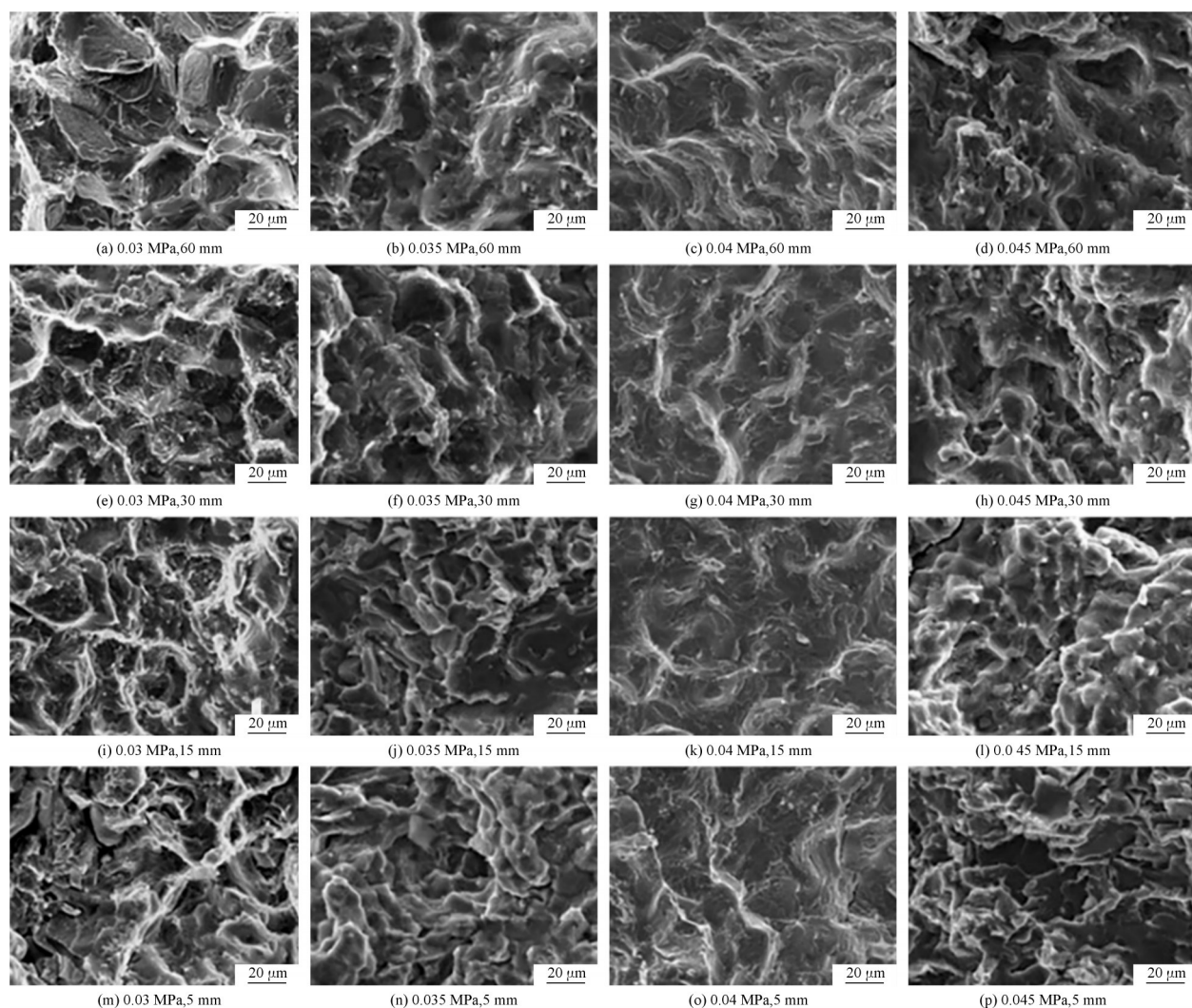


图7 不同保压压力合金的室温拉伸断口形貌SEM图

Fig.7 SEM images of tensile fracture morphologies of alloys at room temperature under different holding pressures

0.035 MPa时,厚度为5 mm的铸件断口主要由韧窝构成,同时包含细小的微裂纹,合金的伸长率较大。当厚度为15 mm的铸件断口中存在大量的条状解理面,断口中存在长条状组织。由于该合金主要由柱状树枝晶构成,在拉应力作用下柱状晶之间容易发生开裂,产生微裂纹造成材料的断裂失效,因此合金的伸长率较低。厚度超过15 mm后,合金的断口主要由韧窝构成,随着厚度的增加合金内部晶粒粗化使韧窝尺寸增大、深度减小,合金的韧性降低。保压压力为0.04 MPa时,铸件断面中存在大量韧窝,同时包含细小的微裂纹,随着厚度增加韧窝数量减少、尺寸增大、深度变浅。该变化规律与合金伸长率的变化相同,晶粒粗化造成了合金的韧性下降,所以断口中的韧性断裂特征减少。保压压力为0.045 MPa时,厚度为5 mm的铸件断口中存在解理面,因此包括部分脆性断裂,而其他厚度合金的断口由韧窝构成,存在一些细小的微裂纹,通过裂纹的萌生与扩展消耗能量,因此合金的伸长率较大,韧性逐渐增加。

3 结 论

(1)保压压力对合金铸态组织的影响具有差异性,壁厚较小时,保压压力对合金的组织没有明显影响。当壁厚增大时,合金的铸态组织随着压力增加晶粒尺寸减小。

(2)保压压力增大使合金的低压铸造力学性能提高,布氏硬度逐渐升高,抗拉强度最大值分别为232.03、290.85、257.49和266.25 MPa。屈服强度最大分别为203.86、193.68、264.63和207.23 MPa。当保压压力超过0.04 MPa以后,保压压力对合金的组织与性能影响较小。

(3)保压压力升高使中等壁厚合金的韧性提高,合金断面中的韧窝增多、尺寸减小,脆性断裂占比减小。铸件壁厚较大时,保压压力对合金的断裂类型和断口形貌无明显影响。

参 考 文 献

- [1] 高文林,王瑞珏,王继成,等.挤压比对Al-Zn-Mg-Cu合金微观结构和力学性能的影响[J].轻金属,2024(12):30-36.
- [2] 李健,何涛,杜向阳,等.7xxx铝合金等通道转角挤压研究进展[J].塑性工程学报,2024,31(11):1-12.
- [3] 张博涛,贺永东,赵亿坤,等.复合添加Sc、Er、Be对Al-Zn-Mg-Cu合金组织与性能影响[J].特种铸造及有色合金,2024,44(10):1409-1415.

- [4] 夏灿,许世春,杨继玺,等.Ni含量对Al-5.6Zn-2.5Mg-1.6Cu合金热裂倾向的影响[J].材料工程,2025,53(4):43-51.
- [5] 成义锐,孙小涵,贺永东,等.Sc对Al-8.5Zn-2.3Mg-2.4Cu合金组织与性能的影响[J].矿冶工程,2024,44(5):142-147.
- [6] 王海飞,李铁钢.Al-Zn-Mg-Cu-Zr合金的热变形行为研究[J].铸造,2024,73(8):1089-1095.
- [7] 黎柏康,赵佳蕾,秦翔智,等.超高强Al-Zn-Mg-Cu系合金板材研究[J].轻合金加工技术,2024,52(5):22-26.
- [8] 李元浩,王连登,牛渊博,等.电磁搅拌对半固态Al-Zn-Mg-Cu合金组织影响及工艺[J].特种铸造及有色合金,2024,44(4):521-527.
- [9] 王永红,郭丰佳,黄同斌,等.Al-Zn-Mg-Cu合金厚板沿厚度方向的显微组织和硬度[J].金属热处理,2024,49(10):148-155.
- [10] 文仁兴,谢延敏.低压铸造压力与冷却速度对AlSi7Mg铝合金组织和性能的影响[J].热加工工艺,2025,25(17):144-146.
- [11] 林益雄,王连登,黄街华,等.成形压力对Al-5Mg-2Si-Mn合金组织和性能的影响[J].特种铸造及有色合金,2020,40(11):1286-1290.

(编辑:张正贺)

《特种铸造及有色合金》征稿启事

《特种铸造及有色合金》杂志是中国科学技术协会主管、中国机械工程学会铸造分会和武汉机械工艺研究所共同主办的全国性科技期刊,是对国内外公开发行的中文核心期刊,中国科技论文统计与分析用刊,INSPEC、CA、MA、AJ、JST、Scopus等国内外权威数据库及检索系统收录期刊,并获得全国优秀科技期刊一等奖、国家期刊奖、新中国60年有影响力的期刊、湖北省十大有影响力的自然科学期刊等。

本刊面向国内外广大科技工作者征稿,征稿内容包括:各种(黑色和有色合金)特种铸造方法、各种有色合金及复合材料的成形理论、工艺、设备、材料、测试与控制、计算机应用等方面的科技成果、生产技术和现场经验,此外还包括各相关学科和交叉学科,如挤压铸造(液态模锻)、半固态加工、新能源材料、电子封装、高熵合金、非晶合金(金属玻璃)、焊合、粉末冶金、合金化、热处理、表面处理等方面的学术和技术研究成果等。

特种铸造及有色合金杂志社(武汉)有限公司

地址:武汉市江岸区建设大道融玺1001大厦11楼

邮编:430019

电话:027-85358206,85486024,
85358127

投稿网址:www.special-cast.com

邮箱:tzzz@special-cast.com

