

自适应调压铸造下 ZL114A 合金微观组织及蠕变行为

芦 刚 陈义斯 严青松 毛 蒲 涂志新 黄朋朋
(南昌航空大学轻合金加工科学与技术国防重点学科实验室)

摘 要 针对铸造铝合金零部件轻量化、薄壁化、复杂化对生产工艺提出的新要求,在真空差压铸造基础上,研究了不同轴径 ZL114A 合金铸件在自适应调压状态下的微观组织和力学性能变化。通过光镜和扫描电镜观察凝固组织及枝晶形貌的演变,着重测试分析了保压压力、凝固压差、分级加压压差对 ZL114A 合金试样蠕变性能的影响,并进一步探讨了蠕变温度和蠕变应力对蠕变性能的影响。结果表明,ZL114A 铸件在受控压力下凝固的组织趋向致密化,而枝晶在压力挤滤渗流作用下明显细化;晶界滑移是蠕变断裂的主要作用机制,高压力和强压差下试样的抗蠕变性能得到显著改善,这归因于共晶 Si 结构的转变抑制了裂纹的萌生、扩展以及晶界微孔的减少。

关键词 调压铸造;ZL114A 合金;微观组织;蠕变行为;枝晶间距

中图分类号 TU512.4;TG249.2

文献标志码 A

DOI:10.15980/j.tzzz.2022.01.001

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Microstructure and Creep Behavior of ZL114A Alloy via Adaptive Controlled-pressure Casting

Lu Gang, Chen Yisi, Yan Qingsong, Mao Pu, Tu Zhixin, Huang Pengpeng

(National Defense Key Discipline Laboratory of Light Alloy Processing Science and Technology, Nanchang Hangkong University)

Abstract: In order to meet the requirements for producing lightweight, thin-walled and complicated aluminum alloy parts, a new casting process was put forward. Based on the vacuum counter pressure casting, the microstructure and mechanical properties of ZL114A alloy castings with different axial diameters were investigated under the adaptive pressure regulation. The evolution of solidification microstructure and the dendrite morphology were observed by optical microscope and scanning electron microscope. The effects of holding pressure, solidification counter-pressure and graded counter-pressure on the creep properties of ZL114A alloy specimen were emphatically analyzed, and effects of creep temperature and creep stress on the creep properties were further discussed. The results indicate that the microstructure of ZL114A castings under controlled-pressure tends to densify, while the dendrite is obviously refined under pressure extrusion and seepage. Meanwhile, mechanism of creep fracture is dominated by grain boundary slip. The creep resistance of castings with high pressure and strong counter-pressure is significantly improved, which is attributed to the fact that the transformation of eutectic silicon structure restrains the initiation, propagation of cracks and the reduction of grain boundary micropores.

Key Words: Controlled-pressure Casting, ZL114A Alloy, Microstructure, Creep Behavior, SDAS

ZL114A 合金具有较高的比强度、比模量,在航空航天、机械、交通运输等领域得到了广泛应用,成为实现轻量化结构件制造的首选材料^[1~4]。然而,生产复杂薄壁件时为提升充型能力,浇注温度的提高致使 ZL114A 熔体凝固过程中树枝晶容易过度生长,同时造成大量疏松、缩孔等缺陷^[2,3~6]。

关于控制 ZL114A 合金显微组织的方法的研究报道很多,其中真空差压铸造具有“真空下充型,压力下凝固”特性,可同步实现复杂铸件完整充型和材料性能的提高^[7~11]。董选普等^[7]在分析真空差压铸造铝合金性能的过程中发现,与其他常规铸造工艺如重力铸造和真空吸铸相比,利用真空差压铸造技术,铝合金的抗拉强

收稿日期:2021-09-02

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51861027);江西省优势科技创新团队重点项目(20181BCB19001)

第一作者简介:芦刚,男,1982 年出生,副教授,南昌(330063),E-mail:aimulalg@163.com

通信作者:严青松,男,1973 年出生,教授,南昌(330063),E-mail:yanqs1973@nchu.edu.cn

引用格式:芦刚,陈义斯,严青松,等. 自适应调压铸造下 ZL114A 合金微观组织及蠕变行为[J]. 特种铸造及有色合金,2022,42(1):1-6.

LU G, CHEN Y S, YAN Q S, et al. Microstructure and creep behavior of ZL114A alloy via adaptive controlled-pressure casting[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2022, 42(1):1-6.

度提高了 20%，伸长率提高了近一倍；严青松等^[8]研究了真空差压铸造铝合金的补缩特性，发现凝固压力是影响铝合金致密度的关键因素。理论研究和实践生产证实，真空差压铸造工艺是成形高品质要求铝合金铸件的有效方法，因此对真空差压铸造工艺的进一步探索具有重要的现实意义^[8~10]。此外，随着近代工业的迅猛发展，不论是航空航天等军用产品，还是汽车发动机等民用零件，其高温性能要求逐渐提高，铸件在高温下服役的稳定性以及对合金的基体结构、组织和力学性能等方面的要求越来越高^[2,3,11~14]。值得注意的是，虽然有关铝合金室温拉伸、压缩性能的研究很多，而对其高温力学性能尤其是对低于熔点温度状态的低拉伸应力下蠕变现象研究报道较少^[14,15]。

本课题在真空差压设备基础上，通过智能控制气路系统，实现压力的自适应调节，系统研究了保压压力、凝固压差、分级压差对不同轴径 ZL114A 铸件试样的微观组织和蠕变性能的影响。

1 试验材料及方法

采用 VCPC 型真空差压铸造设备制备 ZL114A 合金试样，设备原理图和铸件取样位置示意图见图 1。图 2 为试验理想真空差压工艺曲线，图 3 为试验理想分级加压压差曲线。铸件外形尺寸为 $\phi 45\text{ mm}\times 210\text{ mm}$ ，铸型由酚醛树脂覆膜砂制成，预热温度为 $120\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，材质为 ZL114A(ZAlSi7Mg1A)，浇注温度为 $700\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。图 2 中保压压力分别为 200、250、300、350 kPa，凝固压差分别为 30、50、70、90 kPa，图 3 中分级加压压差分别为 35、85、135、185 kPa，真空度为 20 kPa。从铸件中加工 4 个 $\phi 16\text{ mm}$ 的试样，3 个加工为 $\phi 10\text{ mm}$ 的蠕变标准试样，其他试样用于微观组织观察及显微形貌分析，取样方式见图 1b。用 CSS-3905 型蠕变试验机对试样进行蠕变试验，试验温度为 $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，应力为 120 MPa 。采

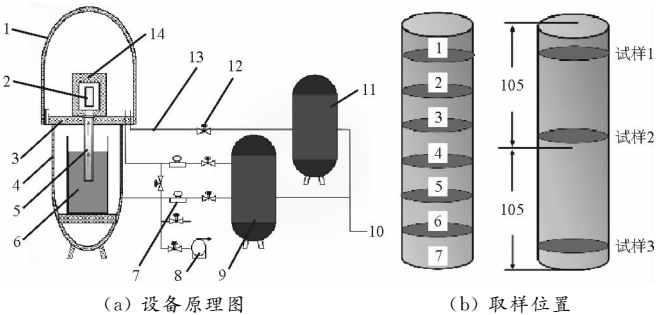


图 1 真空差压铸造设备原理图及铸件取样位置示意图
Fig.1 Schematic diagram of vacuum counter-pressure casting equipment and sampling position of casting

- 1.上罐 2.铸件 3.隔板 4.下罐 5.升液管 6.熔炼金属液
- 7.调节阀 8.真空泵 9.下罐储气罐 10.排气口
- 11.上罐储气罐 12.开关阀 13.进气管 14.铸型

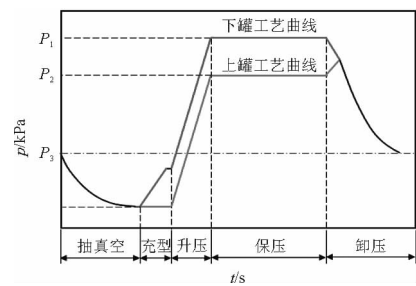


图 2 试验理想典型真空差压工艺曲线
Fig.2 Experimental ideal vacuum counter-pressure process curves

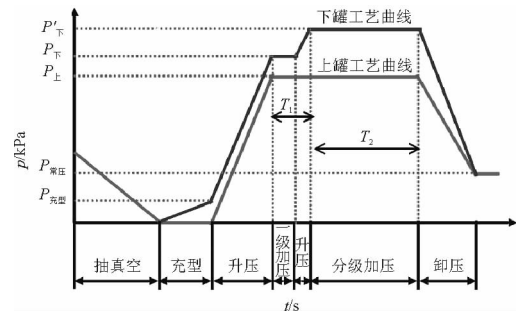


图 3 试验理想分级加压压差曲线
Fig.3 Experimental ideal graded vacuum counter-pressure process curves

用 DureScan 型维氏显微硬度计对试样进行显微硬度测试，载荷为 0.98 N，保压时间为 3 s。利用 Quanta200 电镜观察 ZL114A 合金的共晶 Si 形貌及蠕变断口形貌。利用 XJP-6A 光学金相显微镜观察 ZL114A 合金的微观组织，基于 Image-Pro Plus 软件，采用截线法对 ZL114A 铝合金铸件试样的二次枝晶间距 (λ_{SDAS}) 进行测量：

$$\lambda_{SDAS} = \frac{D_i'}{2.15(n-1)}$$

式中， D_i' 为通过 Image-Pro Plus 软件测量的值； n 为二次枝晶数。ZL114A 合金的主要化学成分见表 1。

表 1 ZL114A 合金的主要化学成分
Tab.1 The main chemical composition of ZL114A alloy %

ω_B							
Si	Mg	Be	Ti	Fe	Zn	Cu	Al
6.5~7.5	0.4~0.7	0.04~0.07	0.04~0.2	<0.2	<0.1	<0.01	余量

2 试验结果与分析

2.1 保压压力和凝固压差对枝晶形貌的影响

图 4 为保压压力对不同轴径铸件按纵深取样后试样的二次枝晶间距的影响。可以看出，对于轴径分别为 6、9、12 mm 的试样，随着保压压力上升，ZL114A 合金凝固组织中二次枝晶间距逐渐减小。在铸造过程中，合金熔体冷却时往往会形成粗细不均匀的树枝晶，金属液只能从先凝固的枝晶间隙中流动补缩。而对于真空差

压铸造工艺,由于合金的凝固是在一定压力下进行的,在较高的环境压力作用下,推动金属液渗入枝晶间隙能力增强,补缩效果增强。当压力进一步提升,先结晶组织受到流动熔体作用易发生断裂,这些游离在熔体中的碎晶可作为 ZL114A 结晶的异质形核核心,在避免枝晶

过度生长的同时提升了形核率。此外,随着取样纵深的增加,二次枝晶间距降低,同时随着轴径的降低,二次枝晶间距也逐渐降低。可归因于散热能力的提升,使树枝晶显著细化,最小二次枝晶间距分别为 12.52、14.55、15.51 μm 。图5为不同保压压力下 $\phi 12\text{ mm}$ 铸件相同

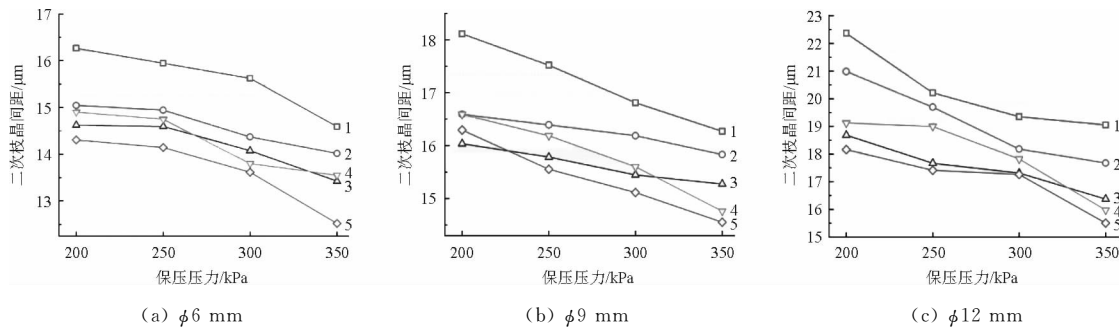


图 4 保压压力对不同纵深位置试样二次枝晶间距的影响

Fig.4 Effects of holding pressure on the secondary dendrite arm space for samples in different vertical depth

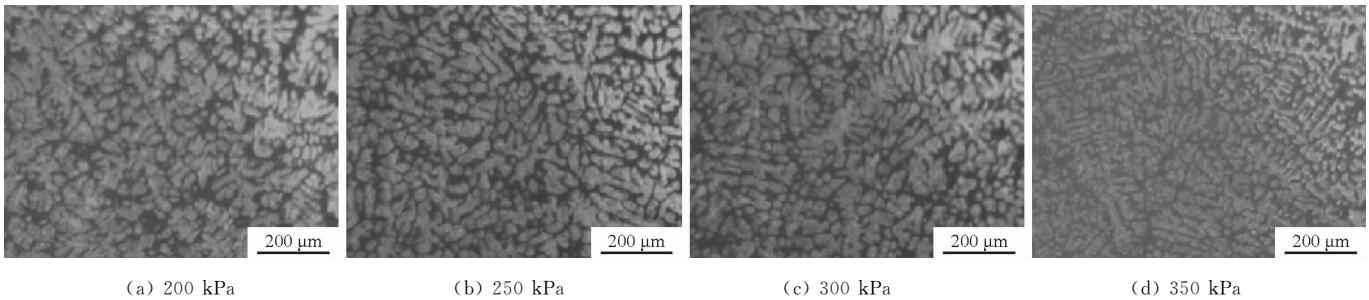


图 5 不同保压压力下 $\phi 12\text{ mm}$ 铸件的显微组织

Fig.5 Microstructure of castings with a diameter of 12 mm at different holding pressure

区域的显微组织。可以看出,随着保压压力增加,粗大树枝晶逐渐碎化,枝晶间共晶 Si 分布更加均匀,这与图 4 中显示的规律一致,证实了调控真空差压铸造工艺保压压力对于凝固组织具有细化的作用。

图 6 为保压压力对 ZL114A 合金显微硬度和致密度的影响。从图 6a 可以看出,随着保压压力增大,铸件的显微硬度逐渐增大, $\phi 9\text{ mm}$ 的试样在 350 kPa 保压压力时的显微硬度(HV)约为 83.2。随着保压压力增大,ZL114A 合金树枝晶组织明显细化,粗大的共晶 Si 相转变为圆棒状,见图 7。当保压压力为 300 kPa 时

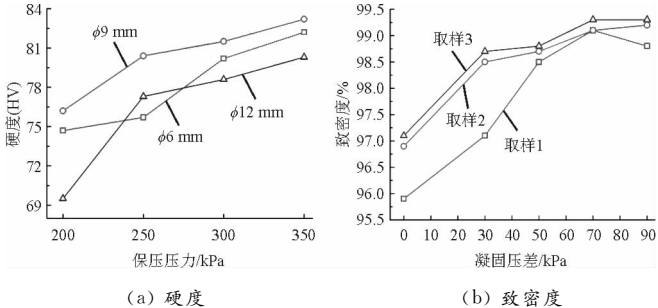


图 6 压力调控对 ZL114A 铸件组织及性能的影响

Fig.6 Effects of controlled-pressure on structure and properties of ZL114A castings

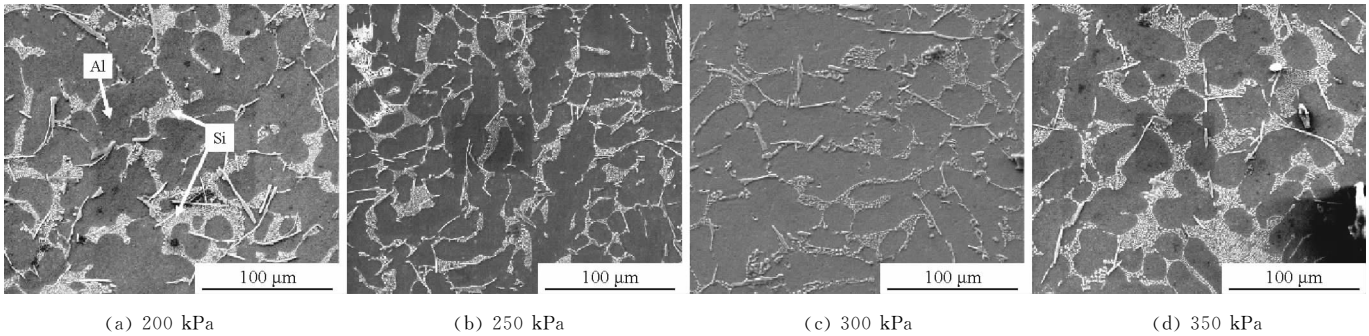


图 7 不同保压压力下 ZL114A 合金凝固组织 SEM 图

Fig.7 SEM images of solidification structure of ZL114A at different holding pressure

ZL114A 合金基体内的碎片状、长针状 Si 相几乎全部消失,基体相 α -Al 在压力挤滤渗流作用下球化,出现类等轴晶组织,见图 7d。从图 6b 可以看出,凝固压差有利于实现铸件的高致密化。而取样位置带来的变化主要归因于合金熔体前端先接触铸型受到激冷作用,容易被后端熔体补缩。凝固压差源自于上下罐环境压力差值,在充型完毕后施加于合金熔体,作用于金属液。一方面可以有效地细化组织,另一方面促进合金液中残留气体排出,减少了冶金缺陷产生。同时,高压状态下 ZL114A 合金的补缩能力进一步提升,打破先析出树枝晶的阻碍,避免了区域微小熔池的产生,使显微疏松减少,获得了高致密的凝固组织。

2.2 自适应调压铸造工艺对合金蠕变行为的影响

图 8 为保压压力-凝固压差的压力调控对 ZL114A 合金致密度和蠕变性能的影响。由图 8a 可知,凝固压差的提升增加了致密化程度,铸件的致密化表现为高压

力结晶下微孔的愈合和金属液的充分补缩。从图 8b 可以看出,保压压力越高的 ZL114A 合金试样的抗蠕变能力越好,在相同蠕变条件下蠕变应变量小,蠕变速率缓慢,而对于保压压力低的合金试样当超过一定时间后蠕变位移量迅速上升,发生大幅变形。在最佳保压压力下设计梯度凝固压差对 ZL114A 合金试样的蠕变曲线,见图 8d。可以看出随着凝固压差上升,试样的抗蠕变性能逐渐提升,蠕变应变缓慢降低。其中,当凝固压差高达 90 kPa,试样在长时间高温低应力下蠕变量几乎不变,并且不发生断裂。图 9 为压力调控的 ZL114A 合金试样的断口形貌,可见随着保压压力和凝固压差上升,断口处有极少数韧窝出现,说明材料抗高温蠕变性能有所提高。当凝固压力为 250 kPa 时,试样断口表现出脆性断裂的特征,出现大量明显且光滑的解理台阶和解理面,有大量的分叉裂纹和二次裂纹断面,裂纹断面与崩裂的硅片断杂乱交织在一起。然而,当压力足够大时,

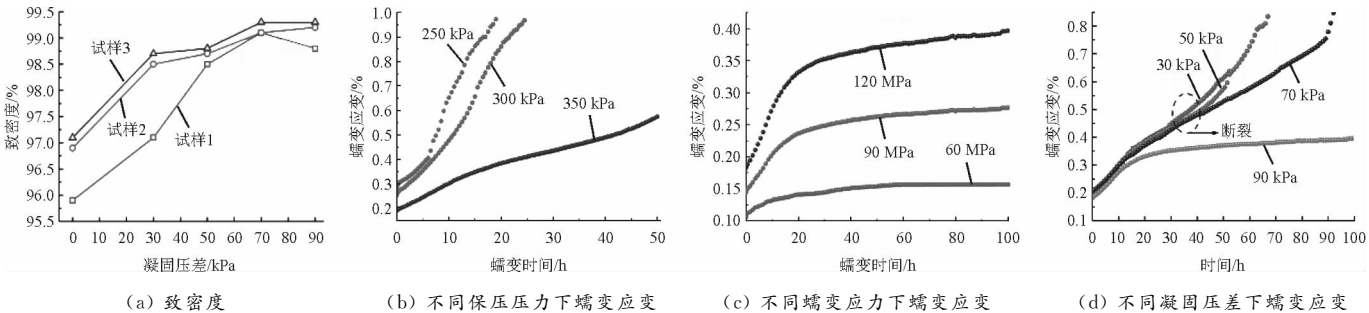


图 8 压力调控对 ZL114A 铸件致密度和蠕变性能的影响

Fig.8 The effects of controlled-pressure on the compactness and creep properties of ZL114A castings

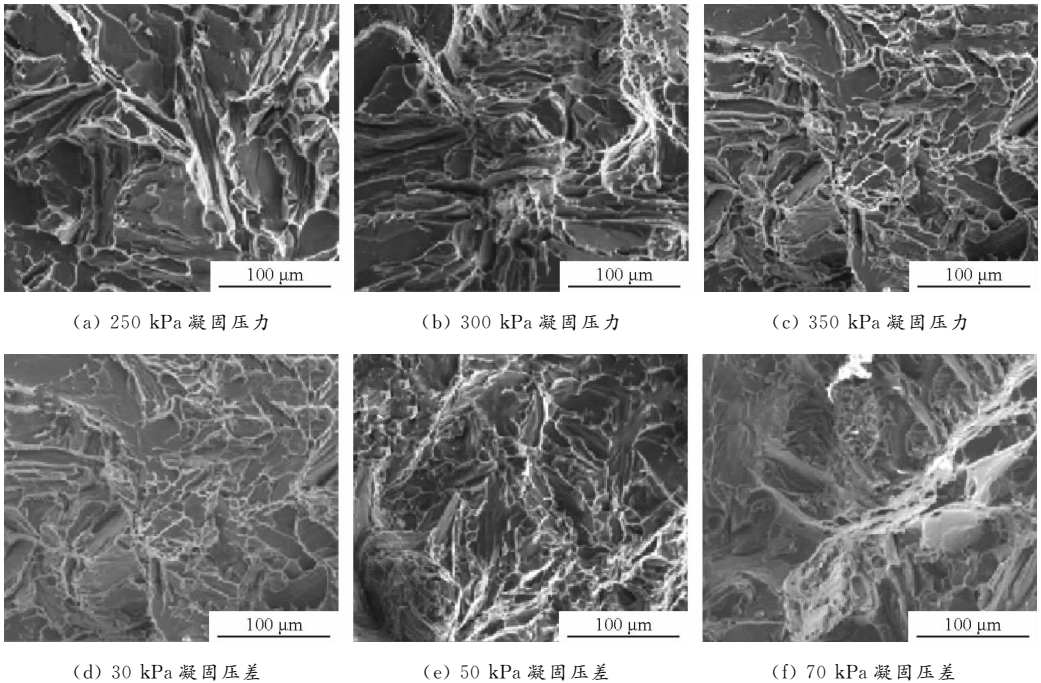


图 9 压力调控下 ZL114A 铸件断口 SEM 形貌

Fig.9 SEM morphologies of fracture of ZL114A casting specimens at different controlled-pressure

试样断口仍然表现出脆性断裂特征,但解理台阶和解理面的数量有所下降,韧窝数量增加,说明此时韧性变强,侧面证实了试样抗蠕变性能的提升。图 8c 为不同蠕变应力下最佳保压压力和凝固压差试样的蠕变行为。在蠕变刚开始时,试样发生低塑性变形,应变曲线保持线性上升。同时,这个过程中基体内的位错不断增殖和运动,带来形变强化,增强 ZL114A 合金的抗应变能力。

图 10 为分级加压压差对 ZL114A 合金铸件试样的性能影响。由图 10a 和图 10b 可以看出,与保压压力、凝固压差对 ZL114A 合金凝固组织的作用相类似,铸件试样的致密化程度随着压力的增加不断上升,在分级压差为 185 kPa 时,试样 3 密度和致密度分别为 2.64 g/cm³, 99.0%。说明在压力下充型、结晶、凝固后 ZL114A 固相组织接近理论致密度。由图 10c 可见,在分级加压压差作用下,85、135、185 kPa 3 种试样在稳态

蠕变下均未发生断裂。相较于图 8d 中低凝固压差试样的断裂,分级压差的增强效应更强,有效地提升了 ZL114A 合金的抗蠕变能力。其中,随着分级压差上升,蠕变曲线线性区间斜率逐渐减小,蠕变应变量也显著降低,尤其是对于分级压差为 185 kPa 的试样,蠕变应变在 0.3%~0.4% 之间,在长时间高温低应力作用下 ZL114 合金保持非常稳定的低蠕变变形。由图 10d 可见,不同蠕变状态下变形后合金试样的硬度,整体上随着分级压差的上升逐渐上升,可归因于压差作用导致组织的强化。对于相同分级压差下的试样,蠕变应力越大的铸件蠕变后硬度越低,蠕变温度越高的铸件蠕变后硬度也越低,说明蠕变状态对蠕变性能的影响十分显著。较高温度和应力作用下,蠕变时合金组织内的位错运动速率越快,晶格滑移加剧,晶界运动也随之加速,长时积累后蠕变程度更加显著。图 11 为 ZL114A 合金铸件在

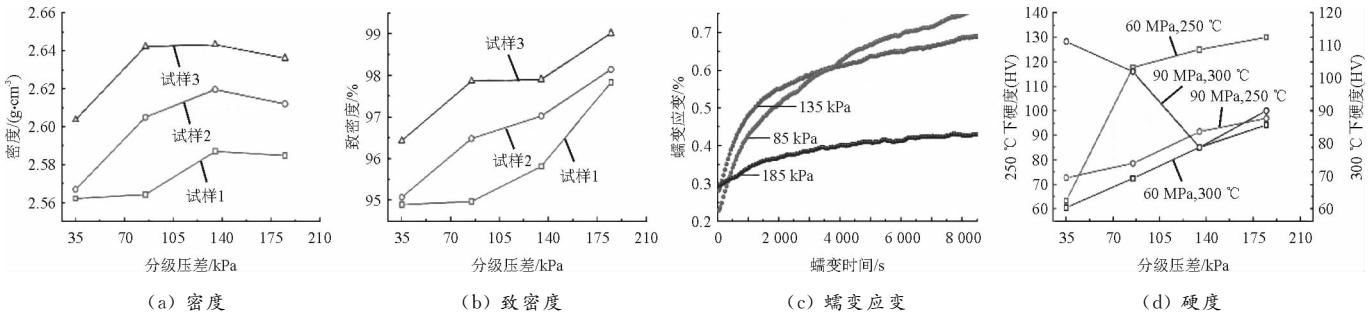


图 10 分级加压压差对 ZL114A 铸件性能的影响

Fig.10 The effect of graded counter-pressure on the properties of ZL114A castings

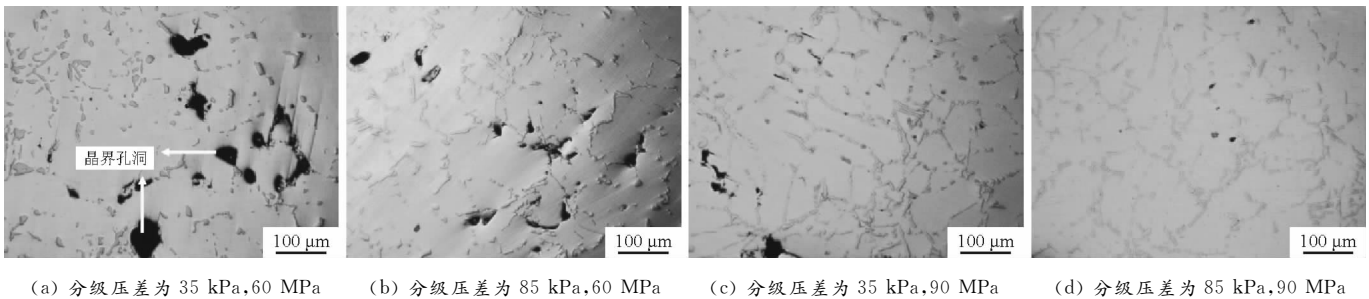


图 11 300 °C 下蠕变变形后不同分级压差下 ZL114A 试样的金相组织

Fig.11 The metallographic structure of graded counter-pressure ZL114A specimens after creep at 300 °C

蠕变后的金相组织。从图 11a 和图 11b 可知,在蠕变后由于晶界的滑移作用易产生晶界孔洞,这些晶界孔洞会随着分级压差的提升而减少。对比图 11a 和图 11c 可知,尽管高蠕变温度下试样的抗蠕变性能降低,但晶界孔洞的数量相对较少。可能的原因是,由于在 300 °C 时合金凝固组织发生二次生长,晶粒在低应力状态下,吸收载荷能量发生外缘生长,在出现晶界孔洞的同时晶界不断扩张,因此一定程度上弥补了蠕变晶界滑移量。图 12 为 300 °C 时不同蠕变应力状态下,不同分级压差试样的蠕变性能。可以看出,所有试样在蠕变后都具有相对较好的抗蠕变性能,经过线性变形阶段后,均可长时

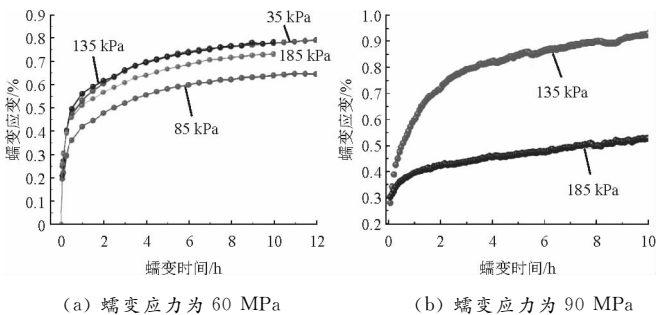


图 12 不同分级压差下 ZL114A 试样在 300 °C 下的蠕变性能

Fig.12 The creep properties of graded counter-pressure ZL114A specimens at 300 °C

间在低应力下保持稳定的低蠕变应变而非发生断裂。由图 12b 可见,185 kPa 的高分级压差下,ZL114A 合金铸件试样展现出优异的抗蠕变性。

3 结 论

(1)保压压力和凝固压差对 ZL114A 合金试样结晶组织影响显著,压力挤滤渗流可以破碎先析出树枝晶,破坏局部熔池,打开凝固补缩通道。因此,随着压力增加,共晶由碎片状、长针状转为圆棒状,基体相 α -Al 由粗大树枝状转为等轴状,二次枝晶间距逐渐减小。

(2)保压压力-凝固压差-分级压差协同作用下的自适应压力调控铸造工艺,可促进 ZL114A 合金试样的凝固致密化过程。试样密度、致密度、硬度随着压力场的加强逐渐提升,虽然仍属于脆性断裂,但解理台阶和解理面的数量有所下降,韧窝数量增加,试样抗蠕变性能提高。

(3)自适应压力调控工艺下的 ZL114A 铸件蠕变性能显著改善。保压压力为 350 kPa 的试样可在长时间蠕变后不发生断裂,进一步调控压力,在凝固压差和分级加压力差作用下,蠕变曲线线性变形阶段斜率降低,大部分试样均不发生断裂,蠕变过程保持稳定且蠕变应变低。同时,蠕变温度、应力等因素对试样的抗蠕变性能及蠕变后微观组织形貌也有一定影响。

参 考 文 献

- [1] 张建兵. 高强度铝合金铸造及热处理工艺[J]. 航空制造技术, 2003(12): 10-15.
- [2] ZHANG D L, ZHENG L H, STJOHND H. Effect of solution treatment temperature on tensile properties of Al-7Si-0.3Mg alloy [J]. Material Science and Technology, 1998(14): 619-625.

- [3] 陈忠伟, 介万奇. 熔体过热对 Al-7Si-0.50Mg 合金的显微组织和力学性能的影响[J]. 铸造, 2001, 50(12): 724-727.
- [4] 李华基, 李革胜, 刘昌明. 铝硅合金铸件中的二次枝晶间距[J]. 重庆大学学报, 1998, 21(2): 56-61.
- [5] 张炳荣, 王斯勇, 王一民. 重力铸造铝合金发动机缸盖的二次枝晶间距研究[J]. 铸造技术, 2008, 29(11): 1 546-1 549.
- [6] ZHANG B, GARRO M, TAGLIANO C. Dendrite arm spacing in aluminum alloy cylinder heads produced by gravity semi-permanent mold[J]. Metallurgical Science and Technology, 2003, 21(1): 3-9.
- [7] 董选普, 黄乃瑜, 吴树森. 真空差压铸造法金属液流动形态的研究[J]. 铸造, 2002, 51(7): 415-419.
- [8] 严青松, 余欢, 魏伯康, 等. 真空差压铸造工艺的凝固补缩特性与模型[J]. 中国有色金属学报, 2008, 18(6): 1 051-1 057.
- [9] 董选普, 黄乃瑜, 吴树森, 等. 用真空差压铸造法生产复杂薄壁铝合金铸件[A]. 2001 中国压铸、挤压铸造、半固态加工学术年会论文集[C]. 山东烟台, 2001.
- [10] 熊博文, 余欢, 严青松, 等. 真空差压铸造薄壁铸件的研究进展[J]. 特种铸造及有色合金, 2012, 32(3): 238-242.
- [11] 王嘉辉. 铝合金真空差压铸造分级加压凝固工艺参数的研究[D]. 南昌: 南昌航空大学, 2012.
- [12] BASSI F, SAXENA A, CONTE A L, et al. Experimental and simulated displacement in cracked specimen of P91 steel under creep conditions[J]. Procedia Structural Integrity, 2016, 2(3): 911-918.
- [13] HE J, SANDSTRÖM R. Basic modelling of creep rupture in austenitic stainless steels[J]. Theoretical & Applied Fracture Mechanics, 2017, 89(12): 139-146.
- [14] 刘晓艳, 潘清林, 陆智伦, 等. Al-Cu-Mg-Ag 耐热铝合金高温蠕变行为[J]. 金属学报, 2011, 47(1): 53-60.
- [15] VIJAYANAND V D, KUMAR J G, PARIDA P K, et al. Studies on creep deformation and rupture behavior of 316LN SS multipass weld joints fabricated with two different electrode sizes[J]. Metallurgical & Materials Transaction, 2017, A48(2): 706-721.

(编辑: 彭瑾)

2021 年汽车轻量化铝合金材料应用十件大事

近年来,汽车轻量化发展为扩大铝应用提供了广阔的市场空间,相关机构预计,到 2025 年,汽车整车较 2015 年将减重 20%,单车用铝量达到 250 kg;到 2030 年,较 2015 年将减重 35%,单车用铝量达到 350 kg。可见,未来汽车轻量化铝应用市场不容小觑。以下为 2021 年汽车轻量化铝合金材料应用行业十大重要事件。

- (1) 奇瑞新能源全铝车身制造技术入选国家绿色技术推广目录
- (2) 特斯拉国产 Model Y 的一体化铸造
- (3) “大尺寸薄壁复杂新能源汽车铝合金结构件制备技术的研发与产业化”项目通过科技成果评价
- (4) 文灿(南通)大型一体化铝合金压铸项目开工
- (5) 南山铝业汽车铝板月产销量超过 1 万 t
- (6) 宝武铝业生产汽车铝板的气垫炉机组热负荷成功试车
- (7) 西南铝汽车轻量化生产线投产
- (8) 瑞腾首款新车采用全铝车身
- (9) 奇瑞大蚂蚁车型采用全铝车身
- (10) 蔚来汽车成功开发免热处理大型铝压铸件材料

(摘自中国有色网)