



## 蠕变温度对真空差压分级加压铸造 ZL114A 合金高温蠕变性能的影响

吴晓雨, 严青松, 芦 刚, 黄朋朋, 黄普英

(南昌航空大学 航空制造工程学院, 南昌 330063)

**摘 要:** 本文采用 OM、SEM 和高温蠕变性能测试等技术手段, 研究了蠕变温度对真空差压分级加压铸造 ZL114A 合金高温蠕变性能的影响。结果表明: 在同一分级加压力差下, 当蠕变温度较低时, 蠕变空洞生长困难, 蠕变变形量较小。在相同的蠕变条件下, 随着分级加压力差的增加, 在晶界上偏聚的针状共晶硅组织转变为分布更均匀的棒状, 蠕变空洞的数量减少, 断口具有明显的韧性断裂特征。分级加压力差为 185 kPa 的试样, 在进行 50 h 的蠕变后仍未断裂, 高温蠕变性能获得极大的改善。

**关键词:** 真空差压铸造; 分级加压力差; 高温蠕变; 断口形貌

文章编号: 1004-0609(2021)-09-2339-09

中图分类号: TG249.6

文献标志码: A

**引文格式:** 吴晓雨, 严青松, 芦 刚, 等. 蠕变温度对真空差压分级加压铸造 ZL114A 合金高温蠕变性能的影响[J]. 中国有色金属学报, 2021, 31(9): 2339-2347. DOI: 10.11817/j.ysxb.1004.0609.2021-37847

WU Xiao-yu, YAN Qing-song, LU Gang, et al. Effect of creep temperature on high temperature creep properties of vacuum counter-pressure graded pressure casting ZL114A alloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2021, 31(9): 2339-2347. DOI: 10.11817/j.ysxb.1004.0609.2021-37847

目前, 世界化石能源短缺和生态环境污染问题日渐严重, 材料轻量化发展已成为高度重视的研究方向<sup>[1]</sup>。铸造铝合金具备密度低、耐磨性高、比强度高、质轻、耐腐蚀等优点, 广泛应用在航空航天、机械和交通运输等工业领域<sup>[2-4]</sup>。然而, 随着现代工业的日益飞速发展, 大部分工业领域对其产品的高温性能的要求逐渐严格, 例如, 近年来常由铸造 Al-Si 系合金制造的汽车发动机的缸体和缸盖需在 300 °C 左右的高温 and 载荷条件下进行长时间工作<sup>[5]</sup>, 改善铸造铝合金的高温性能成为需要迫切解决的问题。当金属材料的工作环境温度大于其蠕变阈值温度( $0.3T_m$ ,  $T_m$  为金属材料的熔点)时, 蠕变使金属材料容易发生变形甚至产生裂纹, 高温蠕变性能决定了金属材料在高温环境下服役的时间<sup>[6]</sup>。国内外研究学家大多通过优化设计合金成分、热处理工艺和元素的微合金化作用等途径来获得新型耐

热析出相<sup>[7]</sup>, 从而达到提高合金的高温蠕变性能的目的, 但很少有研究者通过改变真空差压铸造和分级加压力差来改善铸造铝合金的高温蠕变性能。CHAUHAN 等<sup>[8]</sup>通过将近纳米级超细晶 5083 铝合金进行蠕变试验来探讨其蠕变行为, 研究结果表明, 当蠕变应力逐渐减小, 试样的表观应力指数及表观应力激活能逐渐增大。EDDAHBI 等<sup>[9]</sup>研究了挤压 Al-Cu-Mg-Ti-Ag 合金的微观组织及蠕变性能, 结果显示, 当温度为 400 °C, 应变速率为  $10^{-4} \sim 10^{-2} \text{ s}^{-1}$  时, 试样的伸长率大约为 25%; 当温度为 520 °C, 应变速率为  $10^{-4} \text{ s}^{-1}$  时, 试样的伸长率大约为 170%。要东明<sup>[10]</sup>研究了稀土 La 变质、稀土 Pr 变质和 La+Pr 复合变质对铸造 Al-Cu 合金微观结构和抗蠕变性能的影响, 结果揭示, 添加稀土 La 和 Pr 使合金变质后大量析出  $\theta'$  相, Al-Cu 合金在高温蠕变过程中的热稳定性得到了提高, 很好地阻碍了高温蠕变过程

**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); 江西省研究生创新专项资金资助项目(YC2020S537)

**收稿日期:** 2020-11-09; **修订日期:** 2021-05-06

**通信作者:** 芦 刚, 副教授, 博士; 电话: 0791-86453167; E-mail: aimulalg@163.com

中位错的运动,提升了变质合金的抗蠕变性能。

真空差压铸造是一种综合真空吸铸、低压铸造和差压铸造等工艺优点,在真空条件下低压充型、高压结晶的新型差压铸造精密成形工艺<sup>[11-13]</sup>,能够满足质量要求较高的复杂薄壁 ZL114A 合金铸件的生产要求。沈加利<sup>[14]</sup>在真空差压铸造工艺的基础上施加超声波,研究了超声功率和凝固压力协同作用对 ZL114A 合金铸件的抗拉强度和伸长率的影响,结果证明,当超声功率逐渐增加时,ZL114A 合金的抗拉强度和伸长率先增大后减小,且当超声功率为 600 W 时,抗拉强度和伸长率达到峰值。严青松等<sup>[15]</sup>研究了真空差压单级加压与分级加压工艺对 ZL205A 合金致密度的影响,结果表明,分级加压压差为 50kPa 的 ZL205A 合金试样致密度更高。

迄今为止,国内外学者对真空差压铸造过程中超声功率、超声施振温度、交变磁场、凝固压力和凝固压差等工艺参数对铸造铝合金力学性能和机械加工性能的影响进行了大量的研究<sup>[16-18]</sup>。关于铝合金高温蠕变性能方面的研究基本集中在粉末冶金法制备的铝合金、铝基复合材料和变形铝合金的高温蠕变性能上<sup>[19]</sup>,关于铸造铝合金高温蠕变性能的研究报道较少,尤其是关于蠕变温度对真空差压分级加压铸造 ZL114A 合金高温蠕变性能影响的研究还未见报道。因此,本文作者以 ZL114A 合金作为研究对象,研究蠕变温度对真空差压分级加压铸造 ZL114A 合金(后文简称真空差压铸造 ZL114A 合

金)高温蠕变性能的影响,揭示其蠕变特性,为获得良好的抗蠕变性能的铸造铝合金提供一定的理论依据和技术指导。

### 1 实验

实验采用南昌航空大学自主研发的 VCPC 型真空差压铸造设备,设备原理示意图如图 1 所示。当真空差压铸造设备抽真空后,经过充型、一级加压、一级保压、分级加压、分级加压保压和卸压阶段,真空差压分级加压铸造理想工艺曲线如图 2 所示。

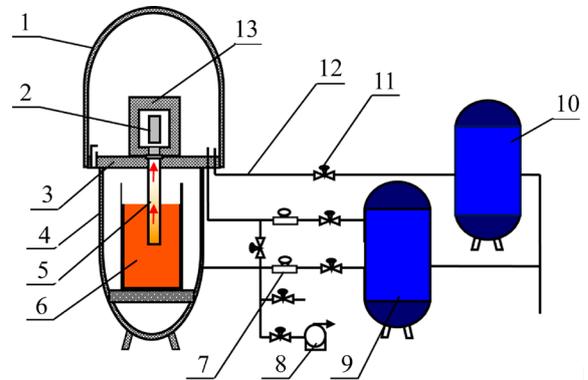


图 1 真空差压铸造设备原理示意图

Fig. 1 Schematic diagram of vacuum counter-pressure casting equipment: 1—Upper kettle; 2—Sample; 3—Clapboard; 4—Down kettle; 5—Rising tube; 6—Molten metal; 7—Regulating valve; 8—Vacuum pump; 9, 10—Gas jar; 11—Switch valve; 12—Intake pipe; 13—Sand mould

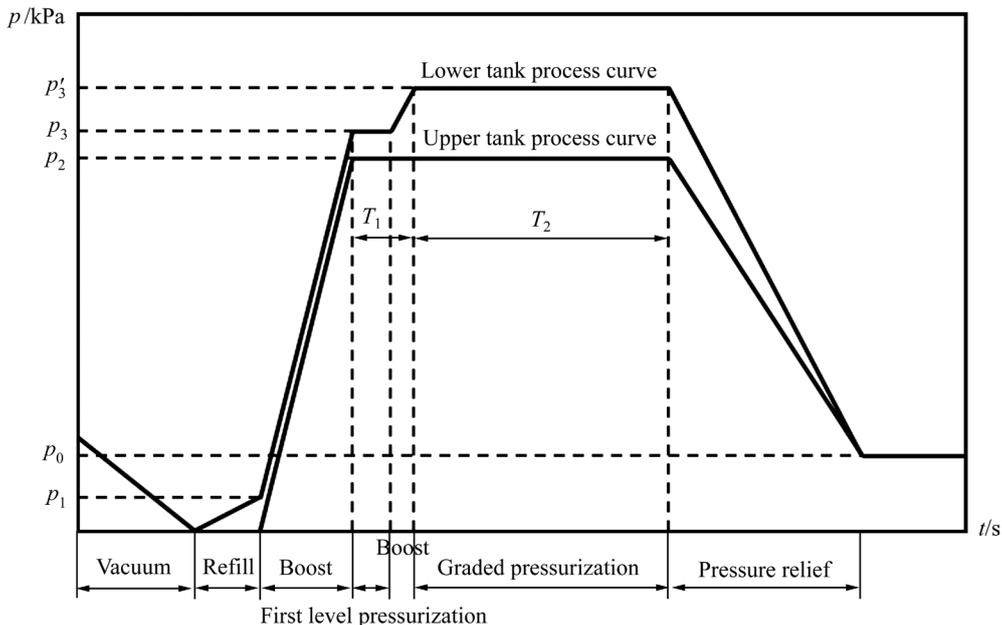


图 2 真空差压分级加压铸造理想工艺曲线

Fig. 2 Ideal process curve of vacuum counter-pressure graded pressure casting

铸件为  $d 58 \text{ mm} \times 210 \text{ mm}$  的圆棒, 铸型由酚醛树脂覆膜砂制成, 预热温度设置为  $120 \text{ }^\circ\text{C}$ , 合金为 ZL114A, 浇注温度设置为  $720 \text{ }^\circ\text{C}$ 。参考以往研究成果<sup>[15]</sup>, 实验中设定以下工艺参数来制备 ZL114A 合金试样: 一级凝固压力为  $250 \text{ kPa}$ , 真空度为  $20 \text{ kPa}$ , 一级加压凝固时间为  $20 \text{ s}$ , 分级加压凝固时间为  $300 \text{ s}$ , 充型压差为  $35 \text{ kPa}$ , 分级加压压差为  $35 \text{ kPa}$ 、 $85 \text{ kPa}$ 、 $135 \text{ kPa}$  和  $185 \text{ kPa}$ 。

图 3 所示为真空差压铸造 ZL114A 合金共晶硅组织形貌。由图 3 可以看出, 铸造后的组织几乎没有气孔、砂眼, 具有理想的铸造效果, 共晶硅组织以针片状和棒状形态存在于合金中。

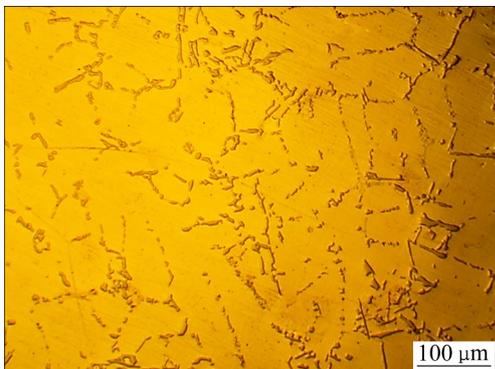


图 3 真空差压铸造 ZL114A 合金共晶硅组织形貌  
Fig. 3 Eutectic silicon microstructure morphology of vacuum counter-pressure casting ZL114A alloy

将铸件加工为  $d 10 \text{ mm}$  的标准蠕变试样, 采用 WDW-50G 型高温蠕变试验机对真空差压铸造 ZL114A 合金试样进行蠕变试验, 蠕变温度分别为  $250 \text{ }^\circ\text{C}$  和  $300 \text{ }^\circ\text{C}$ , 蠕变应力为  $90 \text{ MPa}$ ; 采用 XJP-6A 型金相显微镜对试样的微观组织进行观察, 采用 Quanta2000 型扫描电子显微镜对试样的蠕变断口形貌进行观察, 以研究蠕变温度对不同分级加压压差铸造 ZL114A 合金高温蠕变性能的影响。

## 2 结果与分析

### 2.1 蠕变温度对真空差压铸造 ZL114A 合金高温蠕变性能的影响

合金蠕变应变曲线的变化规律可以反映其蠕变变形量及高温蠕变性能的优劣。根据图 4 可以看出蠕变变形随着时间的变化具有明显的三个阶段: 减速蠕变阶段、稳态蠕变阶段、加速蠕变阶段<sup>[20]</sup>。

在蠕变应力为  $90 \text{ MPa}$ 、蠕变温度分别为  $250 \text{ }^\circ\text{C}$  和  $300 \text{ }^\circ\text{C}$  的蠕变试验条件下, 蠕变温度对真空差压铸造 ZL114A 合金高温蠕变性能的影响规律如图 4 所示。

从图 4 中可以看出, 在同一蠕变应力条件下, 蠕变温度对真空差压铸造 ZL114A 合金的高温蠕变性能具有显著影响。在蠕变温度为  $300 \text{ }^\circ\text{C}$  时, 分级加压压差为  $35 \text{ kPa}$  的试样的高温蠕变速率较快, 蠕变第 II 阶段并不明显, 曲线斜率较大, 试样在第  $12.86 \text{ h}$  断裂, 此时其变形量为  $5.82\%$ ; 当分级加压压差为  $85 \text{ kPa}$  时, 蠕变第 II 阶段较明显, 持续时间稍有增加, 试样在第  $16.76 \text{ h}$  断裂, 蠕变变形量达到  $2.87\%$ ; 当分级加压压差为  $135 \text{ kPa}$  时, 试样的蠕变断裂时间延长至  $27.54 \text{ h}$ , 蠕变应变量变化趋于平缓, 稳态蠕变阶段持续时间增加; 当分级加压压差为  $185 \text{ kPa}$  时, 试样在蠕变时间持续至  $50 \text{ h}$  后仍

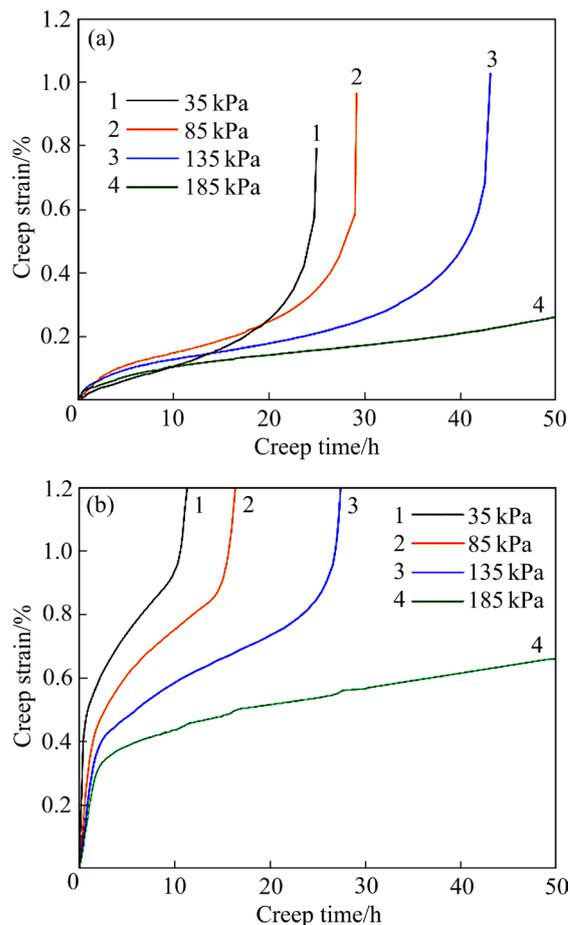


图 4 不同蠕变条件下真空差压铸造 ZL114A 合金蠕变应变曲线

Fig. 4 Creep strain curves of vacuum counter-pressure casting ZL114A alloy under different creep conditions: (a)  $250 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $90 \text{ MPa}$ ; (b)  $300 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $90 \text{ MPa}$

未断裂, 此时其应变量为 0.66%。当蠕变温度为 250 °C 时, 合金的稳态蠕变阶段持续时间延长, 蠕变寿命增加, 高温蠕变性能得以极大改善。

蠕变应变曲线为典型对数蠕变曲线, 将每条曲线中的稳态蠕变阶段作线性拟合后<sup>[21]</sup>, 选择合适的区间求出算术平均值可以近似得到各自相对应的稳态蠕变速率, 试验结果如表 1 所示。

表 1 不同分级加压压差下真空差压铸造 ZL114A 合金稳态蠕变速率

Table 1 Steady state creep rates of vacuum counter-pressure casting ZL114A alloy with different graded pressure differences

Temperature/ °C	Creep rate/ $10^{-2} \text{ h}^{-1}$			
	35 kPa	85 kPa	135 kPa	185 kPa
250	4.8	3.7	2.3	1.1
300	6.6	3.8	2.4	1.6

表 1 所列为在不同分级加压压差下真空差压铸造 ZL114A 合金在不同蠕变温度作用下的稳态蠕变速率统计结果。由表 1 可知, 在同一蠕变温度时, 随着分级加压压差的上升, 真空差压铸造 ZL114A 合金的稳态蠕变速率愈发减小; 在同一分级加压压差下, 蠕变温度为 300 °C 时的真空差压铸造 ZL114A

合金的稳态蠕变速率要明显高于蠕变温度为 250 °C 时的真空差压铸造 ZL114A 合金。这主要是由于蠕变温度越高, 铝合金在蠕变过程中越易于发生位错攀移的原因。且通过对比可以发现, 分级加压压差为 185 kPa 的真空差压铸造 ZL114A 合金在不同蠕变温度下的稳态蠕变速率都最低, 说明在此铸造条件下的试样的高温蠕变性能较好。

## 2.2 真空差压铸造 ZL114A 合金的共晶硅组织和蠕变空洞形貌分析

HULL 等<sup>[22]</sup>假设蠕变断裂是由球形空洞逐渐合并发生的, 以微观角度解释蠕变断裂, 可以归因于空洞成核和成长, 然后相互连接成裂纹<sup>[23]</sup>。蠕变过程中大量的位错反复运动导致试样的空穴聚集在强度最差的部位, 造成了应力的集中。随着蠕变的进行, 位错逐渐累积, 集中应力会使得共晶硅组织在交界处萌生裂纹, 并逐渐发展至最终沿共晶硅发生断裂, 造成试样的蠕变断裂。

为了探究蠕变空洞在试样组织中出现的位置, 对断口中突出的尖端部位进行取样, 然后进行粗磨、抛光以及腐蚀, 观察其微观组织形貌。不同蠕变温度条件下真空差压铸造 ZL114A 合金蠕变空洞形貌如图 5 所示。相比于针状粗大的共晶硅, 棒状

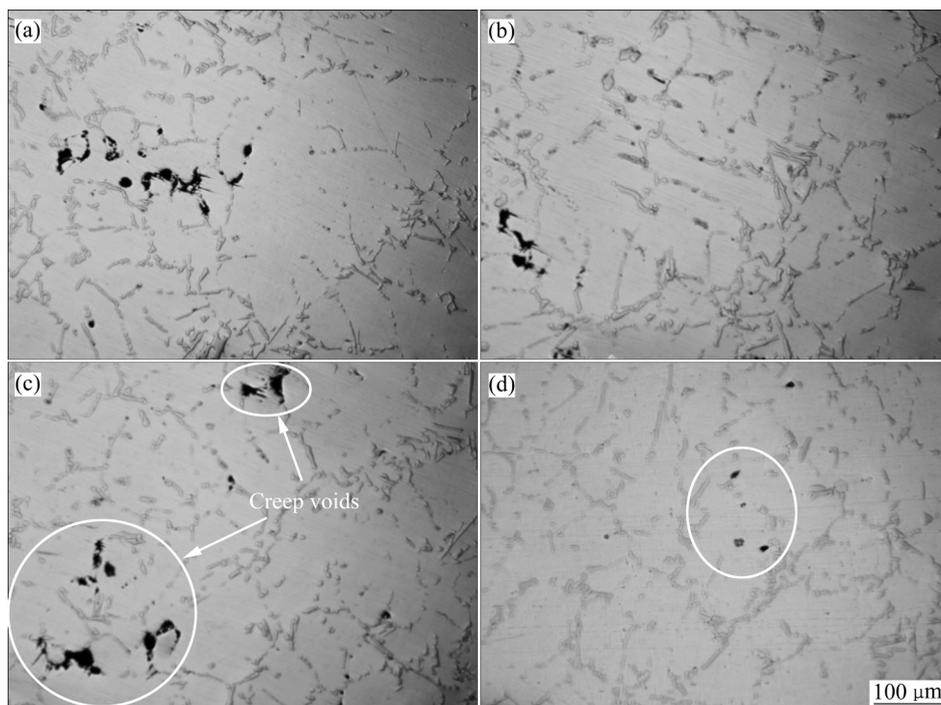


图 5 不同蠕变温度条件下真空差压铸造 ZL114A 合金蠕变空洞形貌

Fig. 5 Creep cavity morphologies of vacuum counter-pressure casting ZL114A alloy under different creep conditions: (a) 250 °C, 35 kPa; (b) 250 °C, 85 kPa; (c) 300 °C, 35 kPa; (d) 300 °C, 85 kPa

细小的共晶硅组织不易发生应力集中现象, 也不易萌生裂纹, 有利于提高合金的高温蠕变性能。真空差压铸造过程中的分级加压压差对共晶硅形貌有直接影响, 当分级加压压差较低时, 金属液的挤滤能力较弱, 枝晶间的补缩力难以破碎粗大的共晶硅组织, 随着分级加压压差的提高, 金属液的补缩能力增强, 共晶硅组织得到细化, 且趋于棒状, 甚至随金属液在枝晶间流动。

析出相的周长面积比可以反映其分布特征, 比值越大, 说明在相同面积下材料具有更多的析出相界面, 即析出相的偏聚程度越低。通过图像处理软件 Image-Pro Plus 6.0 计算得知, 分级加压压差为 35 kPa 和 85 kPa 时, 共晶硅组织的周长面积比分别为 1.116 和 1.313, 说明提高分级加压压差可以使共晶硅的分布均匀化。

从图 5 中可以看出, 在同一蠕变温度时, 分级加压压差为 85 kPa 的试样蠕变后的空洞尺寸明显更小, 空洞数量显著减少。这是由于较高的分级加压压差可以提高金属液的流动性, 利于共晶硅组织的均匀化, 阻碍局部偏析现象的产生, 减少材料的各向异性, 更不易发生应力集中现象<sup>[24]</sup>。随着分级加压压差的提高, 共晶硅组织的形态从点状及偏聚的针状转变为分布更为均匀的棒状。在同一分级加压压差时, 随着蠕变温度的提高, 在原子间的扩散作用下, 相连的晶界空洞越多, 从而形成更长的空洞带, 加快蠕变断裂行为的发生。

### 2.3 真空差压铸造 ZL114A 合金的蠕变断口形貌分析

断口形貌记录了材料在载荷和环境的作用下断裂前的不可逆变形以及裂纹萌生到扩展断裂的全过程, 可以反映高温蠕变试样断裂时的组织及状态, 进而分析其断裂方式、断裂路径和断裂机理等。图 6 所示为不同蠕变温度条件下真空差压铸造 ZL114A 合金的蠕变断口形貌。

从图 6(a)可以看出, 在蠕变温度为 250 °C 时, 断口中韧窝分布稀疏、深浅不一, 并且出现了明显的撕裂棱, 表现出显著的韧窝聚合型断裂特征; 随着分级加压压差的提高, 断口中撕裂棱和韧窝占比增多, 试样的颈缩现象也趋于明显, 说明塑性变形

更充分, 如图 6(b)和(c)所示。从图 6(d)可以看出, 在试样断口中发现了呈放射状分布的撕裂棱, 说明在中心部位存在应力集中的现象; 并且在韧窝表面观察到析出物的存在, 可以得知, 试样的析出物作为空洞萌生源, 随着蠕变的进行, 空洞不断扩展聚集形成韧窝断裂, 造成塑性变形, 如图 6(e)和(f)所示。

图 7 所示为真空差压铸造 ZL114A 合金的高温蠕变断裂机制示意图。在蠕变初始阶段, 位错从位错源中不断产生, 相互缠结, 使位错滑移的阻力增大, 堆积在共晶硅组织的界面上, 表现为蠕变速率随时间的延长而减小。由于形变硬化的不断发展, 促进了动态回复的发生和空洞的扩展, 降低了位错密度。当位错的产生与湮灭达到动态平衡时, 蠕变速率遂为一常数, 因此形成了恒速蠕变阶段。随着空洞的长大聚集, 材料部分失效导致承载面积减小, 使得应力过大, 裂纹高速扩展, 发生大量塑性变形, 导致韧窝甚至撕裂棱的产生。

在蠕变加载的第 I 和 II 阶段, 主要以裂纹的萌生为主, 试样的承载面积较大, 在加载过程中所受的实际应力较小。随着裂纹长度与宽度的增加, 试样的有效承载面积减小, 裂纹附近的应力骤增, 蠕变速率加快, 进入第 III 阶段。此时位错的可逆滑移距离相比于裂纹的扩展距离而言基本可以忽略不计, 因此, 此时断口更接近于塑性断口的形貌, 在更高的蠕变温度下的断口具有更明显的韧窝型特征<sup>[25]</sup>。

随着蠕变温度的提高, 位错的增殖和滑移速度被加快, 相比于室温下的蠕变加载, 蠕变失效也发生得更快。在高温蠕变加载过程中, 位错在晶界和第二相上迅速聚集, 形成大量空位, 并聚集成空洞。在相同的加载条件下, 蠕变温度越低的试样越难以发生内颈缩, 空洞将以剪切断裂而连接, 进入第 IV 阶段, 在断口中表现为较小的韧窝直径和较浅的韧窝深度。韧窝形态不仅与温度有关, 共晶硅的尺寸和分布也对其尺寸有着很大的影响。由于晶界上存在空位势能, 晶粒内部的空位会首先在晶界上运动, 并且在界面夹杂物处, 共晶硅原子的吸附作用使金属材料原子的剪切结合力降低, 因此绝大多数空洞的萌发聚集在晶界中强度较弱的共晶硅夹杂

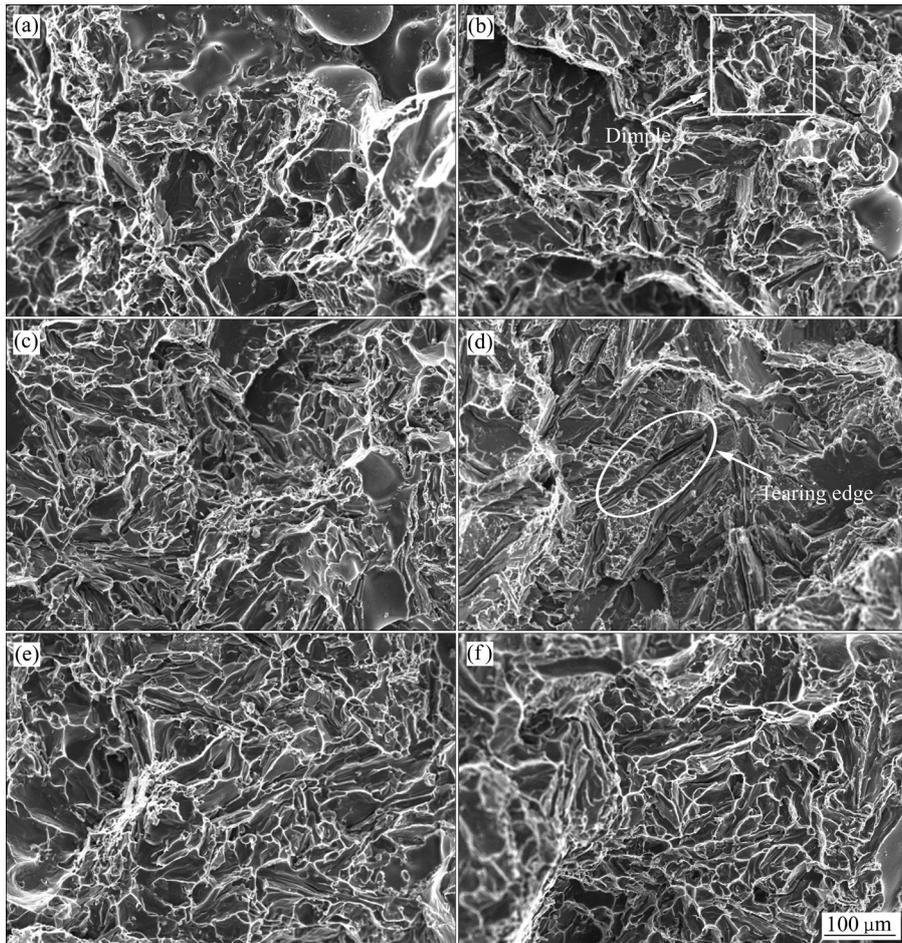


图6 不同蠕变温度条件下真空差压铸造 ZL114A 合金蠕变断口形貌

**Fig. 6** Creep fracture morphologies of vacuum counter-pressure casting ZL114A alloy under different creep conditions: (a) 250 °C, 35 kPa; (b) 250 °C, 85 kPa; (c) 250 °C, 135 kPa; (d) 300 °C, 35 kPa; (e) 300 °C, 85 kPa; (f) 300 °C, 135 kPa

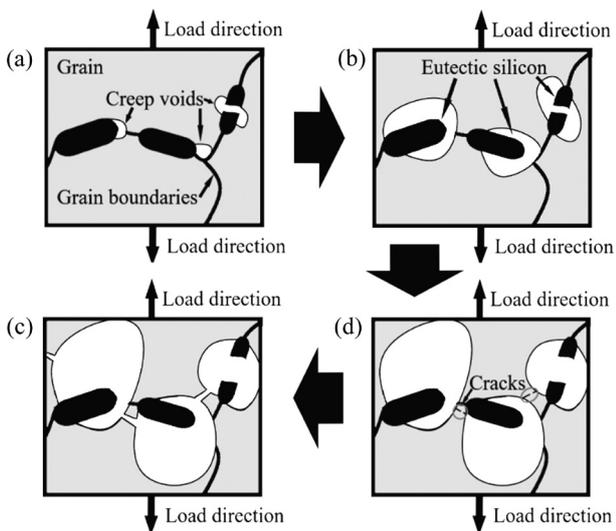


图7 真空差压铸造 ZL114A 合金的高温蠕变断裂机制示意图

**Fig. 7** Schematic diagram of high temperature creep fracture mechanism of vacuum counter-pressure casting ZL114A alloy: (a) I stage; (b) II stage; (c) III stage; (d) IV stage

处。通过真空差压铸造 ZL114A 合金蠕变试验后的微观组织形貌图可以看出，随着分级加压压差的增加，共晶硅组织被破碎并趋于均匀分布在基体中，间距越来越平均，一定程度上减少了蠕变过程中的应力集中，韧窝也就表现出相似的形态和大小。

### 3 结论

1) 在同一分级加压压差时，随着蠕变温度的升高，试样的蠕变空洞扩展速率加快，空洞尺寸增大。通过空洞的形核、长大、聚集，有效承载面积急剧缩小、应力骤增，试样以塑性变形的方式发生具有韧窝型特征的延性断裂。

2) 在同一蠕变条件下，分级加压压差对真空差压铸造 ZL114A 合金的高温蠕变性能影响显著。随着分级加压压差的提高，真空差压铸造 ZL114A 合

金的稳态蠕变速率显著减小, 蠕变变形量明显降低, 蠕变寿命增加。当分级加压压差为 185 kPa 时, 蠕变时间达到 50 h 后试样仍未断裂, 说明真空差压铸造 ZL114A 合金的高温蠕变性能在分级加压压差为 35~185 kPa 的范围内, 随分级加压压差的增加而增强。

3) 分级加压压差对真空差压铸造 ZL114A 合金的共晶硅形貌、蠕变断口形貌和蠕变空洞形貌影响显著。随着分级加压压差的提高, 共晶硅逐渐细化且形态与分布更加均匀, 有利于阻碍晶界滑移及裂纹聚合; 蠕变断口形貌中韧窝尺寸增大, 试样断裂前塑性提高; 合金组织结构愈发致密, 更不易形成蠕变空洞, 真空差压铸造 ZL114A 合金的高温蠕变性能显著提高。

## REFERENCES

- [1] 赵玉华, 满佳乐, 刘玉林, 等. 凝固速度及热处理工艺对 Al-8Ca 组织性能的影响[J]. 机械工程学报, 2018, 54(18): 62-67.  
ZHAO Yu-hua, MAN Jia-le, LIU Yu-lin, et al. Effect of solidification rate and heat treatment process on microstructure and properties of Al-8Ca[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018, 54(18): 62-67.
- [2] 蒋文明, 樊自田, 刘德均. 真空低压消失模壳型铸造和消失模铸造铝合金组织和性能对比[J]. 中国有色金属学报, 2013, 23(1): 22-28.  
JIANG Wen-ming, FAN Zi-tian, LIU De-jun. Comparison of microstructures and properties of aluminum alloy between expendable pattern shell casting with vacuum and low-pressure and lost foam casting[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2013, 23(1): 22-28.
- [3] SHIN J S, KO S H, KIM K T. Development and characterization of low-silicon cast aluminum alloys for thermal dissipation[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2015, 644: 673-686.
- [4] 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): 1051-1057.  
YAN Qing-song, YU Huan, WEI Bo-kang, et al. Coagulation and shrinkage characteristics and model of vacuum differential pressure casting process[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2008, 18(6): 1051-1057.
- [5] HUANG Hui-lan, DONG Yan-heng, XING Yuan, et al. Low cycle fatigue behaviour at 300 °C and microstructure of Al-Si-Mg casting alloys with Zr and Hf additions[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2018, 765: 1253-1262.
- [6] 隋育栋. Al-Si-Cu-Ni-Mg 系铸造耐热铝合金组织及其高温性能[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2017: 16-18.  
SUI Yu-dong. Microstructural and elevated temperature properties of cast Al-Si-Cu-Ni-Mg alloys. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2017: 16-18.
- [7] 刘贤翠, 潘冶, 唐智骄, 等. Al-Mn 系合金的组织控制与高温性能研究[J]. 金属学报, 2017, 53(11): 1487-1494.  
LIU Xian-cui, PAN Ye, TANG Zhi-jiao, et al. Microstructure control and high temperature properties of Al-Mn-based alloys[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2017, 53(11): 1487-1494.
- [8] CHAUHAN M, ROY I, MOHAMED F. A. Creep behavior in near-nanostructured Al 5083 alloy[J]. Materials Science and Engineering A, 2005, 410: 24-27.
- [9] EDDAHBI M, JIMÉNEZ J A, RUANO O A. Microstructure and creep behaviour of an osprey processed and extruded Al-Cu-Mg-Ti-Ag alloy[J]. Journal of Alloys & Compounds, 2007, 433(1): 97-107.
- [10] 要东明. La、Pr 对铸造 Al-Cu 合金组织和高温性能的影响规律及机制[D]. 长春: 吉林大学, 2012.  
YAO Dong-ming. Laws and mechanisms for the effects of La, Pr on the microstructure and elevated temperature properties of the cast Al-Cu alloys[D]. Changchun: Jilin University, 2012.
- [11] 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.  
XIONG Bo-wen, YU Huan, YAN Qing-song, et al. Research progress of vacuum differential pressure casting thin wall castings[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2012, 32(3): 238-242.
- [12] 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.  
DONG Xuan-pu, HUANG Nai-yu, WU Shu-sen. Study on the flow pattern of metal liquid in vacuum differential pressure casting[J]. Casting, 2002, 51(7): 415-419.
- [13] 黄朋朋, 芦刚, 严青松, 等. 凝固压差对真空差压铸造 ZL114A 合金微观组织及高温蠕变性能的影响[J]. 中国有色金属学报, 2020, 30(7): 1535-1543.

- HUANG Peng-peng, LU Gang, YAN Qing-song, et al. Effect of solidification pressure differences on the microstructure and high temperature creep properties of vacuum counter-pressure casting ZL114A alloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2020, 30(7): 1535–1543.
- [14] 沈加利. 超声功率对真空差压铸造 ZL114A 合金致密度与机械性能的影响[D]. 南昌: 南昌航空大学, 2015.
- SHEN Jia-li. Ultrasonic vibrating and vacuum counter-pressure synergistic effect on ZL114A alloy density and mechanical property[D]. Nanchang: Nanchang Hangkong University, 2015.
- [15] 严青松, 徐 帅, 芦 刚, 等. 压力对真空差压铸造 ZL205A 合金致密度的影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2014, 34(7): 719–722.
- YAN Qing-song, XU Shuai, LU Gang, et al. Effects of solidification pressure on relative density of Al-Cu alloy in vacuum counter-pressure casting[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2014, 34(7): 719–722.
- [16] 郑强强, 芦 刚, 严青松, 等. 励磁电流-凝固压力协同对真空差压铸造 ZL205A 合金晶粒尺寸的影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2019, 39(5): 520–523.
- ZHENG Qiang-qiang, LU Gang, YAN Qing-song, et al. Effects of excitation current-solidification pressure synergistic field on grain size of vacuum differential pressure casting ZL205A alloy[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2019, 39(5): 520–523.
- [17] 严青松, 杨普超, 芦 刚, 等. 超声振动-真空差压协同场下 ZL114A 合金共晶硅的生长特性[J]. 中国有色金属学报, 2018, 28(8): 1507–1515.
- YAN Qing-song, YANG Pu-chao, LU Gang, et al. Growth characteristics of ZL114A alloy eutectic silicon under synergistic field between ultrasonic vibration and vacuum counter-pressure[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2018, 28(8): 1507–1515.
- [18] 严青松, 潘 飞, 芦 刚, 等. 施振温度对超声振动-真空差压协同作用下铝合金微观组织及力学性能的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2018, 47(6): 1842–1847.
- YAN Qing-song, PAN Fei, LU Gang, et al. Effect of ultrasonic vibration temperature on microstructure and mechanical properties of aluminum alloy under synergistic action between ultrasonic vibration and vacuum counter-pressure[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2018, 47(6): 1842–1847.
- [19] 吕一格, 刘喜军, 张健康, 等. 粉末冶金铍-铝合金高温蠕变行为试验研究[J]. 轻合金加工技术, 2020, 48(6): 47–52.
- LÜ Yi-ge, LIU Xi-jun, ZHANG Jian-kang, et al. Study on high temperature creep behavior of beryllium-aluminum alloy in powder metallurgy[J]. Light Alloy Fabrication Technology, 2020, 48(6): 47–52.
- [20] 蔡 彬, 李卫杰, 周伟伟, 等. Al-0.2Sc-0.04Zr 合金的高温蠕变行为[J]. 特种铸造及有色合金, 2014, 34(2): 113–115.
- CAI Bin, LI Wei-jie, ZHOU Wei-wei, et al. High temperature creep behavior of Al-0.2Sc-0.04Zr alloys[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2014, 34(2): 113–115.
- [21] 夏雅阁, 王杰芳, 张国鹏, 等. Cu 含量对 Al-Cu-Mg-Ag 合金蠕变行为和微观组织的影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2019, 39(8): 914–918.
- XIA Ya-ge, WANG Jie-fang, ZHANG Guo-peng, et al. Effects of Cu content on creep behavior and microstructure of Al-Cu-Mg-Ag alloy[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2019, 39(8): 914–918.
- [22] HULL D, RIMMER D E. The growth of grain-boundary voids under stress[J]. Philosophical Magazine, 1959, 4(42): 673–687.
- [23] 周顺深. 钢脆性和工程结构脆性断裂[M]. 上海: 科学技术出版社, 1983: 166.
- ZHOU Shun-shen. Steel brittleness and brittle fracture of engineering structure[M]. Shanghai: Science and Technology Press, 1983: 166.
- [24] 刘 斌, 蒋业华, 潘亮星, 等. 共晶硅形貌对 ZL114A 合金拉伸断裂机制的影响[J]. 铸造技术, 2010, 31(5): 612–615.
- LIU Bin, JIANG Ye-hua, PAN Liang-xing, et al. Effect of eutectic silicon morphology on tensile fracture mechanism of ZL114A alloy[J]. Foundry Technology, 2010, 31(5): 612–615.
- [25] 周 丽, 殷凤仕, 孙晓峰. 一种铸造镍基高温合金的高温蠕变断裂行为[J]. 山东理工大学学报(自然科学版), 2003, 17(4): 36–39.
- ZHOU Li, YIN Feng-shi, SUN Xiao-feng. Creep rupture behavior of a cast Ni-base superalloy at high temperature[J]. Journal of Shandong University of Technology(Sci & Tech), 2003, 17(4): 36–39.

## Effect of creep temperature on high temperature creep properties of vacuum counter-pressure graded pressure casting ZL114A alloy

WU Xiao-yu, YAN Qing-song, LU Gang, HUANG Peng-peng, HUANG Pu-ying

(School of Aeronautic Manufacturing Engineering, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China)

**Abstract:** The effect of creep temperature on the high temperature creep properties of vacuum counter-pressure graded pressure casting ZL114A alloy was investigated by optical microscopy(OM), scanning electron microscopy (SEM) and high temperature creep properties test. The results reveal that the growth of creep voids is difficult at a lower creep temperature under the same graded pressure difference, resulting in a lower amount of creep deformation. On the other hand, the eutectic silicon which segregation on the grain boundary transforms from acicular to uniformly distributed rod-like tissue with the increase of graded pressure difference under the same creep conditions, meanwhile, the number of creep voids decreases, and fracture shows a characteristic of ductile fracture. The experiment indicates that the sample with a graded pressure difference of 185 kPa does not rupture after 50 h of creep which proves that the high temperature creep performance is greatly improved.

**Key words:** vacuum counter-pressure casting; graded pressure difference; high temperature creep; fracture morphology

---

**Foundation item:** Project(51861027) supported by the National Natural Science Foundation of China; Project (20181BCB19001) supported by the Advantage Science and Technology Innovation Team of Jiangxi Province, China; Project (YC2020S537) supported by the Graduate Student Innovation Special Fund of Jiangxi Province, China

**Received date:** 2020-11-09; **Accepted date:** 2021-05-06

**Corresponding author:** LU Gang; Tel: +86-791-86453167; E-mail: aimulalg@163.com

(编辑 何学锋)