

分级加压压差对真空差压铸造 ZL114A 合金微观组织及显微硬度的影响

黄普英 芦 刚 严青松 徐 翱 黄朋朋 刘 栋
(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 采用真空差压铸造法制备 ZL114A 合金试样,借助金相显微镜、扫描电镜及显微硬度计研究了分级加压压差对真空差压铸造 ZL114A 合金微观组织及显微硬度的影响。结果表明,分级加压压差显著影响 ZL114A 合金的显微组织和性能。在分级加压压差为 35~185 kPa 的范围内,随着分级加压压差增加,金属液的挤渗能力逐渐增强,ZL114A 合金的初生相形貌由粗大的树状晶向细小的蔷薇晶与等轴晶转变,组织明显细化,共晶 Si 也由粗大的棒状或针片状向细小的棒状或圆粒状转变;同时合金的显微硬度显著提高,当分级加压压差为 185 kPa 时,其显微硬度(HV)为 96.9,相比在压差为 35 kPa 的条件下提高了 33.4%。

关键词 ZL114A 合金;真空差压铸造;分级加压压差;硬度

中图分类号 TG146.21 文献标志码 A

DOI:10.15980/j.tzzz.2021.04.022

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Effects of Graded Pressure Difference on the Microstructure and Microhardness of Vacuum Differential Pressure Casting ZL114A Alloy

Huang Puying, Lu Gang, Yan Qingsong, Xu Pian, Huang Pengpeng, Liu Dong
(National Defense Key Discipline Laboratory of Light Alloy Processing Science and Technology, Nanchang Hangkong University)

Abstract: The ZL114A alloy samples were prepared using vacuum differential pressure casting method. With the help of metallographic microscope, scanning electron microscope and microhardness tester, the effects of graded pressure difference on the microstructure and micro-hardness of vacuum differential pressure casting ZL114A alloy were investigated. The results show that the graded pressure difference significantly affects the microstructure and properties of ZL114A alloy. Within the range of the graded pressure difference of 35 kPa~185 kPa, with the increase of the graded pressure difference, the squeezing ability of molten metal is also enhanced. The primary phase in ZL114A alloy is changed from coarse dendritic crystals to fine resette crystals and equiaxed crystals. The microstructure is obviously refined, and the eutectic silicon phase is changed from coarse rods or needles to fine rods or round grains. Meanwhile, the microhardness of ZL114A alloy has been significantly improved. When the graded pressure difference is 185 kPa, the microhardness reaches 96.9 HV, which is 33.4% higher than that of ones with the pressure difference of 35 kPa.

Key Words: ZL114A Alloy, Vacuum Counter-Pressure Casting, Graded Pressure Differences, Microhardness

收稿日期:2020-09-12;修改稿收到日期:2020-10-18
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:黄普英,男,1997 年出生,硕士研究生,南昌(330063),E-mail: 2576675112@qq.com
通信作者:芦刚,男,1982 年出生,副教授,南昌(330063),E-mail: aimulag@163.com
引用格式:黄普英,芦刚,严青松,等. 分级加压压差对真空差压铸造 ZL114A 合金微观组织及显微硬度的影响[J]. 特种铸造及有色合金,2021,41(4): 494-497.
HUANG P Y, LU G, YAN Q S, et al. Effects of graded pressure difference on the microstructure and microhardness of vacuum differential pressure casting ZL114A alloy[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2021, 41(4):494-497.

[10] 郑红红,赵爱民,曹佳丽,等. 水韧处理对高锰钢铸件组织与性能的影响[J]. 金属热处理,2014,39(2):112-115.

[11] 权国辉,张沛. 水韧处理对 ZGMn18Cr2 铸件组织与性能影响[J]. 铸造技术,2018,39(7):1 582-1 585.

[12] 张增志. 耐磨高锰钢[M]. 北京:冶金工业出版社,2002.

[13] 李玉建. ZGMn13 热处理工艺对其组织与性能的影响[D]. 沈阳:沈阳大学,2015.

[14] SYLWESTROWICZ W, HALL E O. The deformation and ageing of mild steel[J]. Proceedings of the Physical Society Section, 2002, B64(6):495.

[15] PETCH N J. The cleavage strength of polycrystals[J]. J. Iron Steel Inst.,1953,174:25-28.

[16] RICHARDS TL. The geometry of the plastic deformation of polycrystalline aggregates[J]. Rheologica Acta,1962,2(1):1-9.

[17] 彭世广,宋仁伯,王威,等. 热处理工艺对新型轻质奥氏体耐磨钢的组织与力学性能的影响[J]. 材料工程,2016,44(9):24-31.

(编辑:栗万仲)

随着全球能源紧缺问题日益突出,航空航天、汽车制造等行业对产品轻量化的要求越来越高^[1,2]。铝合金不仅价格低廉、铸造性能优异,且比强度高、耐腐蚀性好,被广泛应用于工业生产^[3~5]。近年来,铸造 Al-Si 系合金被广泛用于飞机发动机、汽车发动机等重要零部件的制造^[6],然而其在金属液凝固补缩的过程中往往会产生粗大的针片状共晶 Si 组织,阻碍金属液进一步的凝固补缩,导致结晶偏析并产生大量的缩孔、缩松^[7,8],严重降低了铝合金铸件的力学性能。

ZL114A 合金作为一种传统的铸造 Al-Si 系合金,以其优良的可塑性与铸造性能被广泛应用^[9,10],但较差的强度限制了其进一步的应用,如何提高其性能成为许多研究者关注的问题。目前,对铸造 Al-Si 合金进行变质处理、改进铸造工艺以及合金化等手段在一定程度上可改善其性能^[11~13]。真空差压铸造在铸造过程中能够实现平稳充型以及有较好的凝固补缩效果,其基本原理是在真空条件下低压充型、高压结晶,实现铸件的精密成形^[14~16],因此常用来生产高品质的大型复杂薄壁件。YAN Q S 等^[17,18]研究发现,采用真空差压铸造的铝合金试样的微观组织更加细化,分布均匀,其力学性能得到明显改善。谢健辉等^[19]和杨普超等^[13]研究发现,在真空差压铸造过程中施加复合场能有效改善铸造铝合金的微观组织和力学性能。

分级加压真空差压铸造相对于传统的真空差压铸造工艺可以进一步加大凝固压差,在分级加压压差的作用下,金属液具有强劲的挤渗补缩作用,这会使得凝固初期形成的枝晶骨架被打碎,破碎的枝晶骨架分散在基体中形成大量异质形核核心,从而进一步细化晶粒并减少缩松、缩孔,提高合金的性能^[20,21]。因此,本课题通过研究分级加压压差对真空差压铸造 ZL114A 合金微观组织及显微硬度的影响,以期获得性能更好的 ZL114A 合金铸件,为扩展其应用提供参考。

1 试验材料与方法

试验材料为 ZL114A(ZAlSi7Mg1A)合金,其化学成分见表 1。

表 1 ZL114A 合金的主要化学成分

Tab.1 The main chemical composition of ZL114A alloy %							
w_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

试验设备采用自制的 VCPC 型真空差压铸造设备,该设备的原理示意图及真空差压分级加压铸造工艺的理想曲线图见图 1 和图 2。采用外形尺寸为 $\phi 60\text{ mm}\times 210\text{ mm}$ 的圆棒试样,具体的真空差压铸造工艺参数见表 2。

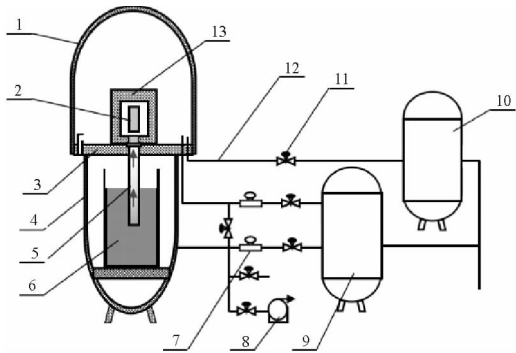


图 1 真空差压铸造设备系统原理图

Fig.1 Schematic diagram of vacuum differential pressure casting equipment system

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

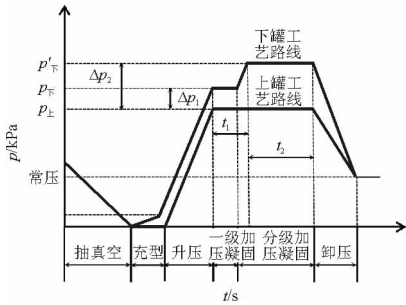


图 2 真空差压分级加压铸造工艺曲线

Fig.2 Process curve of vacuum differential pressure graded pressure casting

表 2 试验工艺参数

Tab.2 Experimental process parameters

一级凝固压力/kPa	真空度/kPa	一级加压凝固时间/s	分级加压凝固时间/s	充型压差 Δp_1 /kPa	分级加压压差 Δp_2 /kPa
					35
					85
250	20	20	300	35	135
					185

在铸件中心位置取金相试样,镶嵌后进行粗磨和机械抛光,以去除表面划痕。采用 Keller 试剂(1 mL 的 HF+1.5 mL 的 HCl+2.5 mL 的 HNO₃+95 mL H₂O)对试样进行腐蚀,并通过 XP-6A 光学显微镜观察腐蚀效果,最后采用 VHX-600E 三维超景深立体显微镜和 Quanta2000 扫描电镜(SEM)分析测试设备对试样微观组织进行测试分析,同时采用 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。

2 试验结果分析

2.1 分级加压压差对合金微观组织的影响

2.1.1 分级加压压差对合金铸态组织的影响

不同分级加压压差下真空差压铸造 ZL114A 合金

试样的铸态显微组织见图 3。可以看出,分级加压压差显著影响 ZL114A 合金铸件的微观形貌。从图 3a 可以看出,35 kPa 时合金微观组织较为粗大,呈现出大小不一、形状不规则的树状枝晶;从图 3b 可以看出,85 kPa 时部分不规则的树状晶转变为蔷薇晶,并出现大量的柱

状晶;135 kPa 时,组织中还存在较多分布不均且尺寸较大的晶粒,但树枝晶基本消失,局部组织出现较为均匀的蔷薇晶与等轴晶,且蔷薇晶尺寸有较为明显的减小,见图 3c;当 185 kPa 时,凝固组织明显被细化,大多数尺寸较大的等轴晶和蔷薇状晶粒都转变为细小圆整

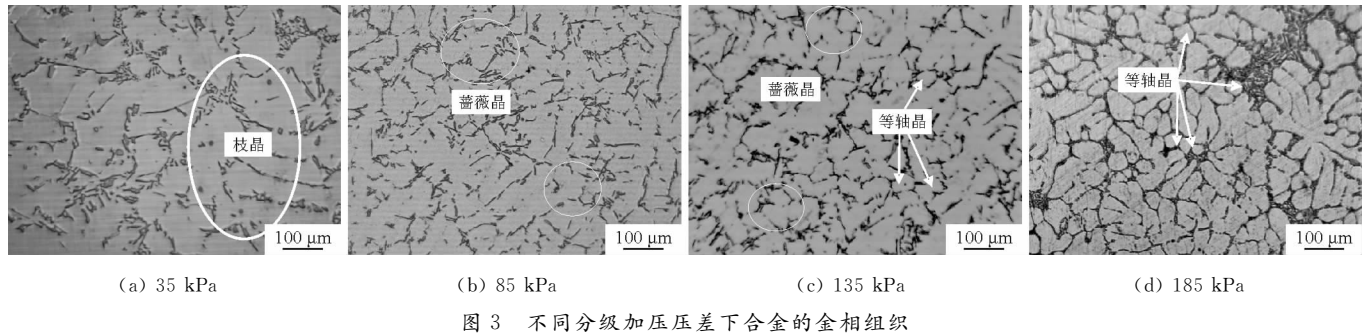


Fig.3 Metallographic structure of the alloy under different graded pressure differences

的等轴晶,组织更加均匀,见图 3d。

2.1.2 分级加压压差对共晶 Si 形貌的影响

图 4 为不同分级加压压差下真空差压铸造 ZL114A 合金中的共晶 Si 形貌。可以看出,在 35 kPa 时,存在大量粗大且分布不均匀的棒状或针片状共晶

Si,见图 4a;当分级加压压差为 85 kPa 时,粗大棒状或针片状共晶 Si 减少,共晶 Si 明显被细化,见图 4b;分级加压压差为 135 kPa 时,粗大棒状或针片状的共晶 Si 组织进一步减少,并出现大量细小的短棒状共晶 Si,见图 4c;在 185 kPa 时,只出现细小的圆棒状以及圆粒状

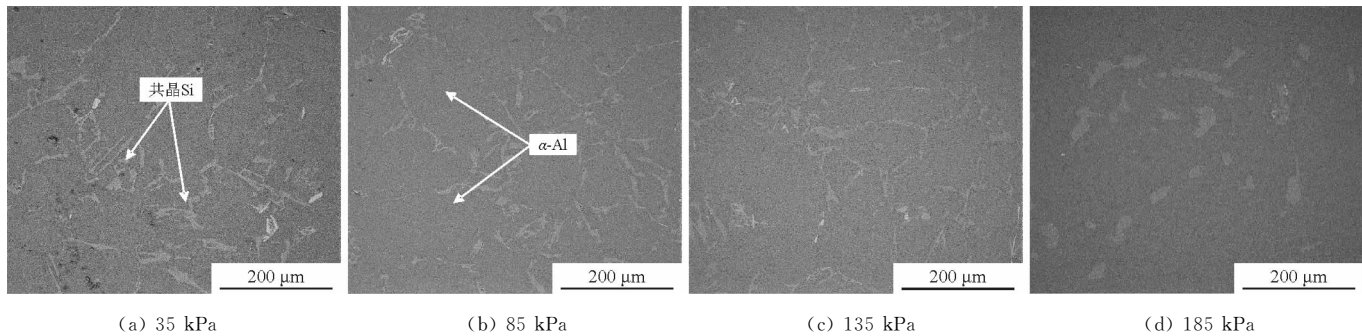


图 4 不同分级加压压差下 ZL114A 合金中共晶 Si 的 SEM 形貌

Fig.4 SEM images of eutectic silicon Si ZL114A alloy under different graded pressure differences

的共晶 Si,粗大针片状的共晶 Si 基本消失,见图 4d。

2.2 分级加压压差对时效硬度的影响

不同分级加压压差下真空差压铸造 ZL114A 合金显微硬度见图 5。可以看出,随着分级加压压差增大,其硬度不断提高。当分级加压压差为 35 kPa 时,试样

的硬度值(HV)最低,仅为 72.63;当分级加压压差提高到 185 kPa 时,试样的硬度(HV)达到最大值 96.90,相较于压差为 35 kPa 时提高了 33.4%。

3 分析与讨论

在真空差压铸造过程中,合金组织在凝固结晶时往往会形成粗细不均的树状枝晶,使得金属液的凝固补缩只能沿着这些枝晶间狭窄的通道进行,极大地阻碍了铸件的凝固补缩。当施加的压差增大时,金属液强劲的挤滤渗流能力会使得枝晶补缩通道打开,并且可能冲散之前形成的枝晶骨架,使晶粒细化;同时,孤立液相区的重新连通又能使金属液能够有效地对铸件进行凝固补缩^[22],从而极大地改善铸件的力学性能。其中,金属液在细小狭窄的枝晶间通道补缩时的凝固收缩率以及挤滤渗流能力为:

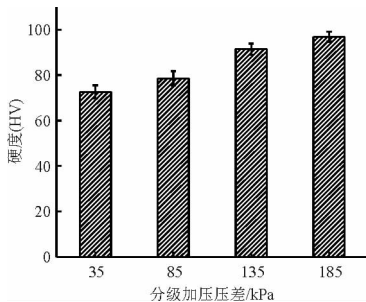


图 5 不同分级加压压差下 ZL114A 合金的显微硬度
Fig.5 Microhardness of ZL114A alloy under different graded pressure differences

$$\beta = \frac{KG}{\mu R f_1} \nabla p \quad (1)$$

式中, ∇p 为压力梯度; μ 为金属液的运动粘度; f_1 为两相区的液相率; K 为透过率; G 为温度梯度; β 为凝固收缩率; R 为冷却速率。

$$\Delta G = C(\Delta p_{\text{挤}} + \Delta p_2 - \Delta p_1) \quad (2)$$

式中, $C = \frac{KF\Delta t}{\mu\Delta L}$; $\Delta p_{\text{挤}}$ 为引起挤渗的压力差; Δp_2 为分级加压压差; Δp_1 为充型压差。

由式(1)、式(2)可知, 金属液的凝固收缩率和挤滤渗流能力与分级加压压差呈正相关, 即分级加压压差越大, 金属液凝固补缩的能力就越强, 缩松、缩孔数量降低使得铸件性能得到提升。同时, 随着分级加压压差逐渐增大, 金属液挤滤渗流的能力随之增强, 在高压差的作用下, 金属液强大的冲击力导致 ZL114A 合金中粗大针片状共晶 Si 断裂并形成二次晶核, 促使更多细小晶粒的形成。由位错理论可知, 晶粒的细化能有效钉扎晶界, 阻碍位错与晶界滑移, 从而有效提高合金的力学性能。当分级加压为 35 kPa 时, 由于压差较小, 金属液挤滤渗流的能力较弱, 金属液很难对初期形成的枝晶有效冲击, 合金的性能最差; 当分级加压压差为 85 kPa 时, 压差的升高使得金属液挤滤渗流效果增强, 金属液对共晶组织的冲击力加强, 使得部分枝晶和共晶组织破碎, 晶粒得到细化; 当分级加压压差为 135 kPa 时, 金属液的挤滤渗流能力进一步加强, 在挤滤补缩作用下, 部分枝晶补缩通道打开, 这使得被破碎的细小共晶组织能够在枝晶间流动并形成非均质形核核心, 基体中粗大的共晶组织大量减少, 晶粒进一步被细化; 当分级加压压差为 185 kPa 时, 金属液的挤滤渗流作用达到峰值, 在金属液强劲的补缩作用下, 粗大的共晶组织基本消失, 合金的微观组织明显细化, 其力学性能达到最佳。

4 结 论

(1) 分级加压压差对 ZL114A 合金的微观组织和共晶 Si 形貌均具有显著影响。当分级加压压差增加到 185 kPa 时, ZL114A 合金组织中晶粒显著细化, 粗大的树状晶与蔷薇晶基本转变为细小且圆整的等轴晶, 同时粗大的棒状或针片状共晶 Si 组织基本消失, 共晶 Si 主要以细小的短棒状与颗粒状的形式存在。

(2) 随着分级加压压差增大, ZL114A 合金的显微硬度显著增大。当分级加压压差增加至 185 kPa 时, 合金的显微硬度(HV)达到最大值 96.90, 相比 35 kPa 时的显微硬度提高了 33.4%。

参 考 文 献

[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.

- [2] 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): 1 535-1 543.
- [3] BAREKAR N S, DAS S, YANG X, et al. The impact of melt conditioning on microstructure, texture and ductility of twin roll cast aluminium alloy strips[J]. Materials Science & Engineering, 2016, A650: 365-373.
- [4] 王罡, 任珂, 胡毅森, 等. 基于微观组织特征的航天铝铜合金力学行为研究[J]. 机械工程学报, 2018, 54(9): 77-85.
- [5] SHAJI M C, RAVIKUMAR K K, RAVI M, et al. Development of a high strength cast aluminium alloy for possible automotive applications[J]. Materials Science Forum, 2013, 765: 5-10.
- [6] 王志明. ZL114A 铝合金电动汽车底盘横梁开裂失效分析[J]. 金属热处理, 2019, 44(S1): 142-146.
- [7] 洪润洲, 周永江, 姚惟斌. 真空吸铸条件下充型速度对薄壁铝合金铸件内部质量的影响[J]. 材料工程, 2006, 45(S1): 294-296.
- [8] 姚丽娟, 朱满, 坚增运, 等. Al-Si 合金的晶粒细化与凝固行为研究[J]. 热加工工艺, 2020, 49(15): 9-11.
- [9] 康福伟, 弥宁, 李晨, 等. 变质及熔体处理对过共晶铝硅合金组织的影响[J]. 哈尔滨理工大学学报, 2013, 18(4): 117-120.
- [10] 康福伟, 张继敏, 樊德智, 等. ZL114A 合金热变形本构方程[J]. 哈尔滨理工大学学报, 2018, 23(2): 134-139.
- [11] HEGDE S, PRABHUK N. Modification of eutectic silicon in Al-Si alloys[J]. Journal of Materials Science, 2008, 43(9): 3 009-3 027.
- [12] 李浩, 林冲, 费卓铭, 等. La 变质对 Al-8.5Si-3.5Cu-1.2Fe 合金组织和性能的影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2020, 40(6): 684-689.
- [13] 杨普超, 严青松, 芦刚, 等. 超声功率对差压铸造 ZL114A 铝合金硬度的影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2017, 37(10): 1 084-1 087.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] YAN Q S, YU H, WEI B K, et al. Microstructure and properties of vacuum counter-pressure cast aluminum alloy[J]. China Foundry, 2005, 2(4): 873-877.
- [18] YAN Q S, YU H, LU G, et al. Density and solidification feeding model of vacuum counter-pressure cast aluminum alloy under grade-pressuring conditions[J]. China Foundry, 2016, 13(2): 133-138.
- [19] 谢健辉, 芦刚, 严青松, 等. 电磁场对真空差压铸造 ZL205A 合金补缩特性研究[J]. 特种铸造及有色合金, 2019, 39(9): 963-966.
- [20] 刘栋, 严青松, 芦刚, 等. 交变磁场协同分级加压铸造对 ZL205A 合金致密度的影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2019, 39(10): 1 077-1 080.
- [21] 陶健全, 向林, 李晓松, 等. 真空增压铸造工艺对 ZL114A 合金充型能力和力学性能的影响[J]. 精密成形工程, 2020, 12(4): 166-170.
- [22] 郑强强. 交变磁场一级加压协同场对铝合金微观组织及力学性能的影响[D]. 南昌: 南昌航空大学, 2019.

(编辑: 张正贺)