

型壳风冷对精铸 ZL114A 合金组织和性能的影响

张永¹, 陈瑞润², 刘传宝¹, 夏峰¹, 于忠军¹

(1. 中国航发哈尔滨东安发动机有限公司, 黑龙江哈尔滨 150066; 2. 哈尔滨工业大学材料科学与工程学院, 黑龙江哈尔滨 150001)

摘要: 通过制备多组硅溶胶型壳, 使之在不同风冷条件下浇注航空ZL114A合金试棒, 利用光学显微镜和拉伸机对ZL114A试棒的宏观和微观组织进行观察, 同时对同等条件的其他试棒(T6状态)进行拉伸测试, 研究不同冷却条件对ZL114A合金组织和性能的影响规律。结果表明, 相同浇注温度(720 ℃)和型壳预热温度(750 ℃)下, 当入风口(Φ200 mm)风速为80 m³/min时, ZL114A的晶粒尺寸降至25 μm以内, 发达的树枝晶Si已全部消除, 抗拉强度达到350 MPa以上。

关键词: 型壳; 风冷; ZL114A; 精密铸造; 力学性能

ZL114A合金以其优异的铸造性能、补焊性能和高强度特性, 已在航空、航天以及民用工业得到广泛应用, 尤其是ZL114A合金精密铸造带来的高尺寸精度、表面光洁度和高强度特点, 吸引了众多单位开展相关工程应用研究。为进一步提高ZL114A合金的抗拉强度, 使之超过320 MPa (HB5480-1991), 除施加传统的变质^[1]、细化^[2]和热处理优化^[3-6]工艺措施外, 还需额外提高精铸型壳的冷却速率, 但关于此方面的文献报道很少。

本文结合工业生产实际, 通过自制型壳冷却装置, 开展高温型壳风冷对比浇注试验, 对所得试棒进行光学和力学性能分析, 得出最佳的风冷工艺参数, 应用于ZL114A航空机匣铸造生产。

1 试验材料及方法

1.1 试验材料

根据HB962-2001关于ZL114A的成分要求, 选择在Al-9%Si中间合金的基础上, 添加Al-Ti-B晶粒细化剂, 配制ZL114A合金, 合金组元和杂质规定分别见表1和表2。铸型材质为全硅溶胶氧化硅质型壳。

1.2 试验方法

采用全硅溶胶制壳工艺制得用于浇注8组ZL114A试棒的型壳(图1), 每组含2个圆棒(Φ30 mm × 200 mm)和2个方棒(50 mm × 15 mm × 200 mm), 圆棒用于拉伸测试, 方棒用于金相低倍和高倍组织分析。将型壳预热至750 ℃, 预热过程中将型壳置于干砂箱内防止物理损伤, 取出型壳后, 放置在自制风冷装置(图2)的通风隔板上。

如图2所示, 将待浇注型壳均匀摆放在通风隔板上, 将温度为720 ℃的ZL114A合

作者简介:

张永(1982-), 男, 研究员级高工, 工学博士, 主要从事于航空复杂机匣铸造与模拟仿真。电话: 0451-86574401, E-mail: hitzhangyong@163.com

中图分类号: TG249.2

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2021)12-1402-04

基金项目:

基于增材制造技术的新型铸造核心工艺开发及示范(2019ZX03A02)。

收稿日期:

2021-08-31 收到初稿,

2021-09-28 收到修订稿。

表1 合金的化学成分

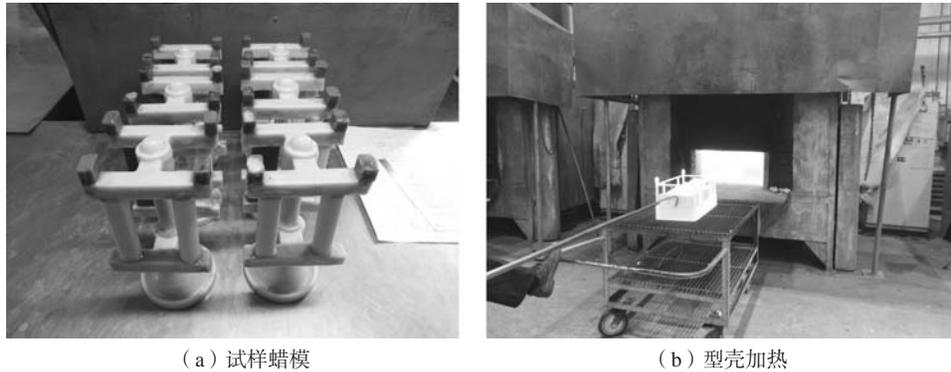
Table 1 Compositions of the alloy w_B/%

Mg	Ti	Si	Al
0.45~0.75	0.08~0.25	6.5~7.5	余量

表2 杂质成分最大值

Table 2 The maximum content of the impurities

w _B /%				
Be	Mn	Zn	Pb	Cu
0.07	0.1	0.1	0.05	0.1



(a) 试样蜡模 (b) 型壳加热

图1 型壳制备和预热

Fig. 1 Preparation and pre-heating of the shell

金液浇注到型壳的过程中保证型壳初始温度不低于浇注温度，同时在风冷装置底部通过进风口（ $\Phi 200\text{ mm}$ ，以下风速均以此标定），吹入室温 $25\text{ }^\circ\text{C}$ 的压缩空气，空气流量可控。保持相同浇注温度和型壳预热温度，每次浇注2组（4个圆棒+4个方棒），调整空气流量，重复做4次。每次型壳摆放位置通过标记法固定不变，具体的试验记录见表3。

对浇注得到的8组试棒进行T6热处理，参数（按照HB5446-2014）为：固溶温度（ $535\sim 545\text{ }^\circ\text{C}$ ），固溶时间（ $6\sim 7\text{ h}$ ），淬火转移时间不大于 15 s ，出炉后水冷，淬火水温（ $60\sim 70\text{ }^\circ\text{C}$ ）；时效温度（ $160\sim 170\text{ }^\circ\text{C}$ ），时效时间（ $5\sim 6\text{ h}$ ），出炉后空冷。热处理后，将16个圆棒用于拉伸性能测试（型号为CMT5105电子拉力试验机），16个方棒用于宏观金相和微观金相分析（腐蚀剂为 $0.5\%\text{ HF}$ 水溶液）。拉伸试棒尺寸（按GB1177—

1991）^[6]如图3所示。

2 结果与分析

2.1 空气流量对精铸 ZL114A T6 组织的影响

如图4所示，为精铸ZL114A合金试棒整体腐蚀（腐蚀剂为 $1.5\%\text{ HF}$ 水溶液）后的宏观照片。易看出，经过风冷（空气流量为 $80\text{ m}^3/\text{min}$ ）后，ZL114A合金宏观组织的粗大树枝晶已经显著变小，大部分一次枝晶臂长度由正常空冷（空气流量为 0 ）条件下的 2 mm 以上降至 2 mm 以下，尤其是在靠近型壳内壁处，出现了大量的细小的等轴晶。图5为精铸ZL114A合金试棒在不同风冷条件下凝固，经T6处理后的组织形貌。

图5中黑色项为Si相，即为图4中的白色树枝晶组织，白色基体相为 $\alpha\text{-Al}$ 晶粒，在其晶粒间分布着共晶组织和 Mg_2Si 相。从图5可看出，当空气流量从 0 增至 $50\text{ m}^3/\text{min}$ 时，合金中游离Si相和 $\alpha\text{-Al}$ 相都由发达的树枝晶形态转化为欠发达树枝晶形态，晶界数量增加，

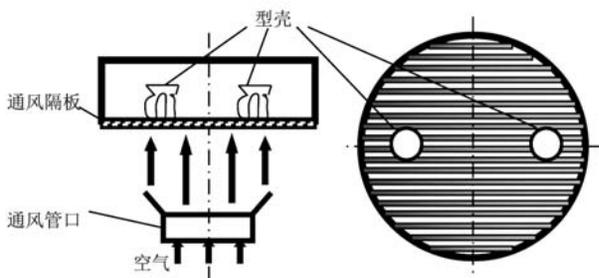
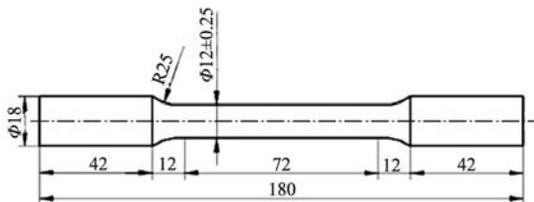


图2 高温型壳风冷浇注试验示意图（左为主视，右为俯视）
Fig. 2 Pouring experiment scheme with high temperature shell on cooling condition

表3 浇注试验参数
Table 3 Pouring parameters

序号	空气流量(常压)/ ($\text{m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$)	浇注温度/ $^\circ\text{C}$	型壳初始 温度/ $^\circ\text{C}$	状态
1	0			
2	50	720	750	T6
3	100			
4	150			



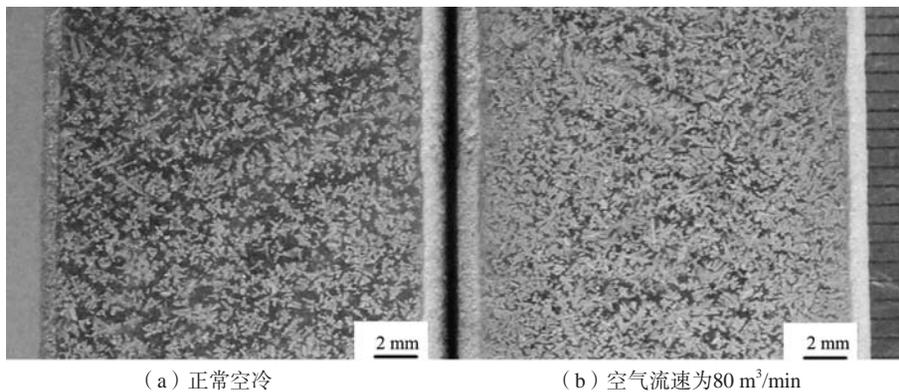
(a) 试棒尺寸图



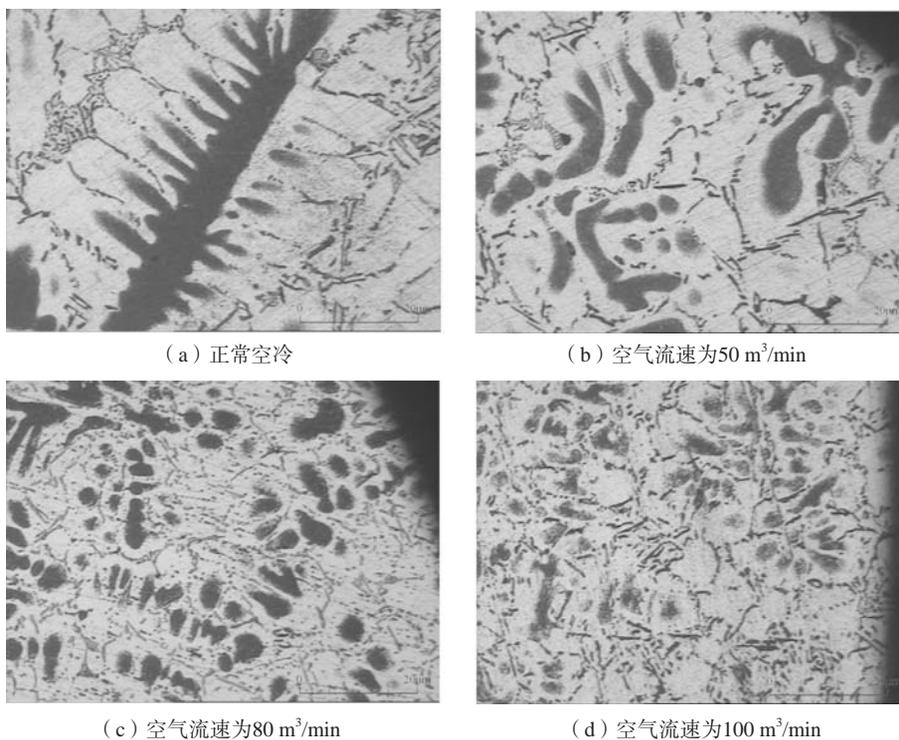
(b) 试棒实物图

图3 拉伸试棒

Fig. 3 Tensile test bar



(a) 正常空冷

(b) 空气流速为80 m³/min图4 在空冷和空气流速为80 m³/min时精铸ZL114A宏观晶粒组织Fig. 4 Macro-structures of the investment casting ZL114A alloys between normal air cooling and 80 m³/min air flow rate

(a) 正常空冷

(b) 空气流速为50 m³/min(c) 空气流速为80 m³/min(d) 空气流速为100 m³/min

图5 不同冷却条件下的精铸ZL114A的T6金相组织对比

Fig. 5 Microstructures comparison of the investment casting ZL114A alloys under different cooling conditions

晶界处的共晶组织由团聚状变得更加弥散；当空气流量进一步增大至80 m³/min时，组织中欠发达的树枝状Si相基本消失，而转变为10~30 μm的颗粒，α-Al晶粒尺寸由图5b中的平均30~40 μm降至15~25 μm，晶界数量更多；当空气流量继续增大至100 m³/min时，相比图5c组织，游离Si相和α-Al晶粒尺寸基本保持不变。

2.2 空气流量对精铸 ZL114A 性能的影响

对不同冷却条件下、相同浇注温度、型壳预热温度和热处理条件下的同一组内的圆棒进行拉伸测试，得到数据见表4。由表4可知，未施加风冷条件下，精铸ZL114A的室温力学性能不满足HB5480《高强度率铝合金优质铸件》。当对其凝固过程施加风冷条件后，

合金的组织得到显著细化，其力学性能因此得到显著提升，当空气流量达到80 m³/min时，合金的抗拉强度提高幅度最大，当空气流量进一步提高后，力学性能变化不大。

将表4中的性能与空气流量对应关系，以曲线的形式反应在图6中，易看出，当施加风冷后，合金的力学性能提高明显，随着风速从50 m³/min提高至80 m³/min时，抗拉强度提高幅度最大，相比正常空冷，提高达17%。当风速从80 m³/min再次提高至100 m³/min时，抗拉强度、屈服强度和伸长率提高幅度不明显。

由此可见，在ZL114A凝固过程中，通过施加冷却条件，其T6组织得到显著细化，性能得到显著提升。说明外在的冷却温度梯度，作用于合金凝固界面前沿

表4 不同冷却条件下的精铸ZL114A试棒拉伸性能
Table 4 Mechanical properties of the investment casting ZL114A test bars under different cooling conditions

序号	空气流量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$)	抗拉强 度/MPa	屈服强 度/MPa	伸长率 /%
1	0	300	263	4.5
2	50	320	275	5.2
3	80	350	280	6.2
4	100	351	279	6.1

提高了凝固过冷度，细化了晶粒组织。当风速进一步加大后，由于空气本身的比热和热导率很小，它与型壳之间的换热已达到一定极限，无法更多地带走热量，则不会产生进一步细化晶粒、提高性能的效果。

这是运用细晶强化机理在ZL114A 航空机匣铸造领域的典型实施案例。为后续改变冷却介质、加大型壳冷却速率，以提高精铸铝合金甚至镁合金机匣力学性能指明了技术方向。

3 结论

(1) 750 °C型壳预热的精铸ZL114A合金经过风冷后，组织中游离Si相和 α -Al相生长受到抑制，随着风速的增强，由发达的树枝晶变为欠发达的等轴晶；晶

参考文献:

- [1] 赵淑荣, 金青林, 刘斌, 等. 变质处理对ZL114A合金组织和性能的影响 [J]. 热加工工艺, 2010, 39 (13): 71-74.
- [2] 王忠, 牛晓峰, 侯华, 等. 低压铸造下凝固过程缩孔缩松的预测方法研究 [J]. 铸造, 2011, 60 (10): 983-987.
- [3] 李卫超, 邹勇志, 曾建民, 等. 固溶工艺对ZL114A合金组织和性能的影响 [J]. 铸造, 2008, 57 (6): 565-568.
- [4] 严青松, 余欢, 徐志锋, 等. 浇注工艺对金属型铸造ZL114合金力学性能的影响 [J]. 铸造技术, 2009, 30 (2): 265-268.
- [5] 张建兵, 平秀民. 高强度铝合金铸造及热处理工艺 [J]. 航天制造技术, 2003 (6): 35-38.
- [6] 胡兴业, 张永, 刘野, 等. 浇注工艺参数对ZL114A热处理后性能的影响规律 [J]. 2015, 64 (11): 1132-1134

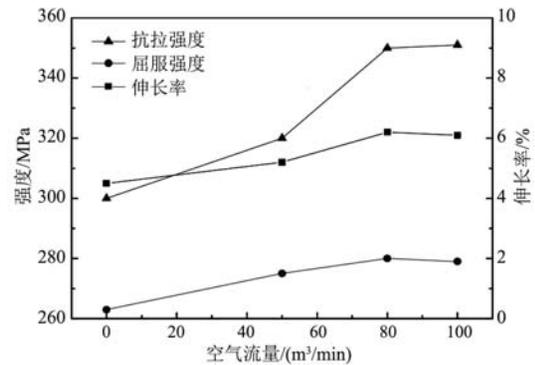


图6 不同空气流量对精铸ZL114A的力学性能的影响

Fig. 6 Effects of different air flow rates on mechanical properties of the ZL114A alloys by investment casting

界处的共晶组织的团聚尺寸也显著缩小，晶界数量显著增加。

(2) 当风速从50 m^3/min 增大至80 m^3/min 时，游离Si相变为10~30 μm 的颗粒， α -Al晶粒尺寸由30~40 μm 降至15~25 μm 。

(3) 施加风冷条件后，精铸ZL114A合金的力学性能明显提高，相比正常空冷条件，当风速为80 m^3/min 时，力学性能提高17%。

(4) 受限于冷却介质的比热和热导率，当风速进一步增大至100 m^3/min 时，晶粒尺寸和力学性能提高不明显。

Effects of Air Cooling on the Morphology and Mechanical Properties of Investment Cast ZL114A Alloy

ZHANG Yong¹, CHEN Rui-run², LIU Chuan-bao¹, XIA Feng¹, YU Zhong-jun¹

(1. Avic Harbin Dongan Engine (Group) Corporation Ltd., Harbin150066, Heilongjiang, China; 2. School of Materials Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, Heilongjiang, China)

Abstract:

Investment cast ZL114A alloy test bars were prepared by pouring into several silica sol shells. After T6 treatment, they were cut into samples for not only optical but also tensile inspection to investigate that how different air flow rate affects the morphology and mechanical properties. The results show that for the 720 °C pouring temperature and the 750 °C initial shell temperature, with air flow rate 80 m^3/min from the inlet ($\Phi 200$ mm), the grain size decreased to less than 25 μm , meanwhile, those big silicon dendrite grains disappeared, and the tensile strength reached to more than 350 MPa.

Key words:

shell; air cooling; ZL114A; investment casting; mechanical properties