

LAZ811 合金水冷凝固工艺设计与组织性能研究

王 威, 浦丽莉, 霍雨晗

(黑龙江工程学院材料与化学工程学院, 黑龙江哈尔滨 150050)

摘要: 对LAZ811合金水冷凝固模具与工艺进行了探索, 主要包括熔铸工艺分析、水冷模具的结构设计及浇注参数的确定, 并制备出了LAZ811合金铸锭。结果表明: 真空感应熔炼+氩气保护, 合理的水冷模具结构能够使合金快速凝固, 有效防止铸锭内部缩孔及缩松的形成, 并获得组织细小、拉伸性能优良的镁锂合金材料, 并适用于类似合金的生产。

关键词: Mg-Li合金; 铸锭; 真空感应熔炼; 水冷模具; 晶粒细化

作者简介:

王威(1978-), 男, 讲师, 工学硕士, 主要从事镁锂合金设计、制备技术研究。
E-mail: wwacme@126.com

中图分类号: TG24;

TG146.22

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2024)

06-0872-05

基金项目:

2022年度黑龙江工程学院大创项目(202211802109); 大学生创新创业训练计划项目(S202311802027); 2021年度黑龙江省省属高等学校基本科研业务费科研项目(2021GJ02)。

收稿日期:

2023-06-20 收到初稿,

2023-09-12 收到修订稿。

以金属Mg ($\rho=1.738 \text{ g/cm}^3$) 为基体, 向其中添加金属Li ($\rho=0.534 \text{ g/cm}^3$) 及少量Al、Zn、RE等合金化元素, 通过熔炼等方法可制备出满足不同成分要求的Mg-Li合金。Mg-Li合金的密度介于 $0.95\sim 1.65 \text{ g/cm}^3$ 之间, 其比强度、比刚度高, 兼具优良的电磁屏蔽、高阻尼、导电导热、易于成形加工等性能特点, 是最理想的轻量化材料之一^[1-2]。Mg-Li合金经过轧制、挤压、压铸以及复合工艺等成形加工后, 所制得的板材、棒材、管材以及各种相应零件已应用于航空航天、电子产品、医疗器械、汽车等领域^[3-4]。

Mg-Li合金铸造工艺对合金质量和性能具有重要影响, 是生产质量合格铸锭的关键因素。本文对LAZ811牌号合金真空熔炼浇注条件下水冷凝固工艺进行了设计与实践, 旨在验证工艺方案和工装设计的合理性, 探索获得高品质合金铸锭的方法和途径。

1 LAZ811合金熔铸工艺分析与水冷模具设计

LAZ811合金铸造工艺可从浇注方式与浇注系统结构、铸型冷却能力、合金性质及传热状态5个方面改进, 利用快速凝固工艺获得致密组织。

1.1 合金熔炼浇注工艺分析

Mg、Li均为活泼金属, 在大气环境下熔炼极易与 H_2 、 O_2 、 H_2O 等气体发生剧烈化学反应^[5-7], 产生氧化和吸气, 损耗合金元素, 铸锭中易形成气孔、氧化夹杂等缺陷。若利用覆盖剂(如LiCl+LiF), 虽能有效防止氧化和合金元素蒸发, 但易引入新的杂质和产生有害气体, 并增加除渣操作。

真空感应熔炼+惰性气体保护浇注是非常适用于Mg-Li合金制备和生产的熔铸工艺。真空感应熔炼持续时间较短, 惰性气体的防护屏障可以有效防止合金成分氧化和烧损, 同时使金属熔体表面降温, 从而减轻Mg、Li等合金成分的挥发, 减少复杂化学反应的发生。

另外, 通过选择纯Mg、纯Li及其中间合金等原材料进行熔炼, 可以最大程度减少外部污染物对Mg-Li合金成分和性能所造成的不良影响。

基于以上考虑, 本文采用真空感应熔炼+Ar气保护浇注工艺制备LAZ811合金, 按成分要求加入主要元素Li和强化元素Al、Zn, 使用铜冷石墨坩埚进行熔炼。Mg-Li

合金采用顶注方式，浇注温度为680~700℃（热电偶测温），浇注时间5~6 min，根据熔炼设备条件，坩埚尺

寸设计为 $\Phi 300\text{ mm} \times 400\text{ mm}$ ，坩埚熔炼示意图与铸锭如图1所示。

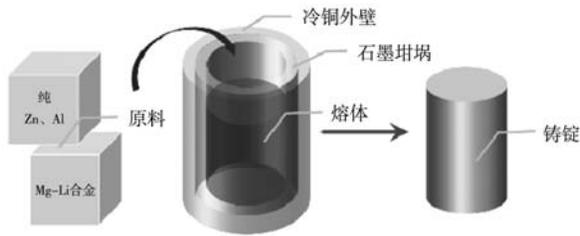


图1 坩埚熔炼示意与铸锭图

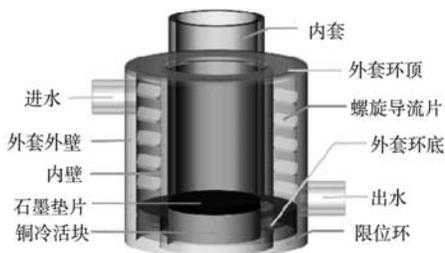
Fig. 1 Crucible melting diagram and ingots

利用水冷模具控温对合金熔体进行凝固，以获得良好的金属组织，保证铸锭对后续轧制、挤压料质量的要求。

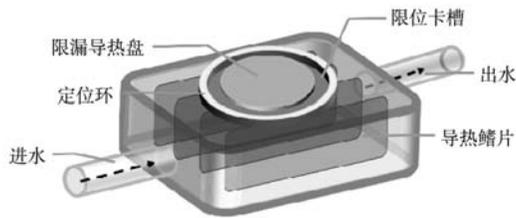
组合而成，均为中空，可水冷散热，由铜板、不锈钢板和不锈钢无缝管制造。由于不锈钢板的膨胀系数为14~16，铜的热膨胀系数为18.5，两种材料配合使用时，不会因为膨胀造成模具变形过大，无法取出造成损坏，如图2所示。

1.2 合金凝固水冷模具设计

水冷模具为易拆分体式，由上部夹套与下部模座



(a) 夹套结构示意图



(b) 模座结构示意图

图2 水冷模结构图

Fig. 2 Structure diagram of the water-cooled mold

夹套由外套与内套构成，均为中空圆柱体，外套用于对内套水冷散热，使用时将内套嵌入外套内腔中，底部由散热石墨片和铜冷活块封堵。夹套内壁嵌有螺旋导流片，以减缓水流速度，增强冷却效果。底部和四周水冷有利于合金顺序凝固，防止缩松的产生。外套高度低于内套，有利于非水冷部位，凝固较晚的合金液对下补缩。

模座由矩形水箱体与箱顶部圆环、圆台构成。圆环与模体尺寸配合，起到限位作用，圆台起到对上部夹套定位和散热作用，使底部合金能够快速凝固，获得尺寸细小的合金组织。

1.3 合金凝固冷却工艺参数的选择

合金凝固冷却是一个复杂的热传递过程。合金将热量由内套传递给外套和底座，热量被循环冷却水带走。水冷模具材料的导热系数、合金的凝固潜热、循环水的流速、温度、流量以及冷却时间都会影响合

金的凝固方式和冷却速度，进而影响合金的组织与性能。循环水由水泵控制，作为最大的影响因素，其流量、速度、温度均可调节控制。

因真空感应炉体冷却与水冷模具冷却由同一水泵供水，故进水温度选择为20~30℃以下，出水温度控制在60~70℃以下，根据不同工艺的具体要求，循环水工艺参数可以灵活调整。所制合金铸锭表面经去皮处理，数据如表1所示。

2 合金成分与组织

合金使用Mg-Li (20% Li) 二元合金作为基体，熔炼过程中可以有效减少Li元素的损耗，并在其中添加纯Al与纯Zn，在真空感应熔炼炉中氩气保护下熔铸了LAZ811合金铸锭（图1）。

2.1 合金成分与凝固区间测试

合金成分经过IRIS Intrepid II 等离子体发射光谱检

表1 合金循环水温度及铸锭尺寸
Table 1 Alloy circulating water temperature and ingot size

| 炉次 | 浇注温度/℃ | 浇注时间/min | 进水温度/℃ | 出水温度/℃ | 直径/mm | 高度/mm | 损耗率/% |
|----------|--------|----------|--------|--------|-------|-------|-------|
| LAZ811-1 | 680 | 4 | 20~30 | <60 | 300 | 400 | 5< |
| LAZ811-2 | 690 | 4 | 20~30 | <60 | 300 | 400 | 5< |
| LAZ811-3 | 700 | 4 | 20~30 | <60 | 300 | 400 | 5< |

测, 结果如表2所示。检测结果表明, 所得合金实际成分与设计值偏差不大, 元素的损耗率都在设计范围内, 并没有出现过多的损失。

LAZ811合金凝固区间通过DSC测得固液相线介于591~453 ℃之间, 凝固区间138 ℃。

表2 合金名义成分与实测成分
Table 2 Nominal and measured compositions of the alloy
 $w_B/\%$

| 含量 | 炉次 | Li | Al | Zn | Mg |
|---------|----------|------|------|------|----|
| 名义含量 | LAZ811 | 8 | 1 | 1 | 余量 |
| | LAZ811-1 | 7.94 | 0.99 | 0.98 | 余量 |
| 实测含量 | LAZ811-2 | 7.92 | 0.98 | 0.99 | 余量 |
| | LAZ811-3 | 7.96 | 0.96 | 0.97 | 余量 |
| 平均偏差率/% | — | 0.75 | 2 | 2 | — |

2.2 金相组织

从铸锭芯部纵向剖面截取边长为80 mm的立方体金相试样, 观察水凝固工艺对合金内部组织的影响。金相试样经打磨抛光、无酸侵蚀后在金相显微镜上观察合金显微组织, 并用Leica Qwin软件对 α 相的晶粒大小和面积进行测量。

图3为不同浇注温度下的LAZ811合金铸态显微组织, 在照片中均未见到有气孔、夹杂和缩松存在。从图中可见, LAZ811合金由双相组织构成, 白色为 α 相, 呈现少量块状、大量的长条与棒状, 周围被黑色 β 相包裹。非水冷室温冷却条件下, 合金局部有少量黑色析出物, 白色 α 相多呈现粗大短棒状、块状; 相对在水冷条件下, 视野中白色 α 相的数量大幅增加, 更多呈现针状、鱼骨状、少量块状和棒状形态, 未见明显黑色析出物出现。在不同的浇注温度下, α 相的

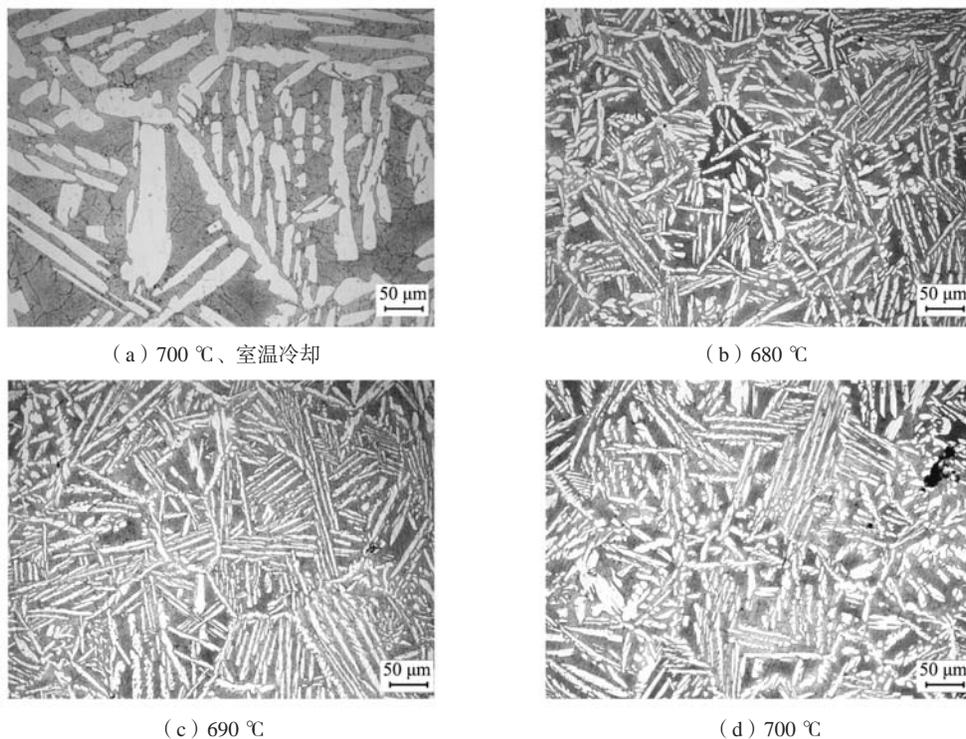


图3 LAZ811合金不同浇注温度水凝固显微组织

Fig. 3 Microstructures of water-cooled solidification of the LAZ811 alloy at different pouring temperatures

数量变化趋势并不明显, 但随着浇注温度的提高, α 相晶粒逐渐呈现长枝短刺的鱼骨状形态, 呈现逐渐向

枝晶形态转变的趋势。

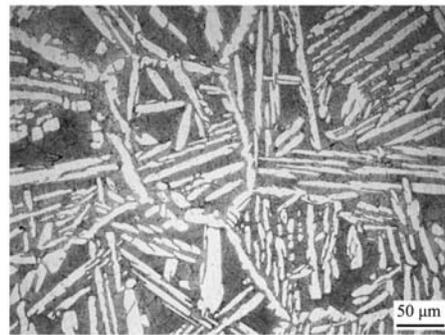
表3为合金中 α 相的晶粒尺寸大小和面积占比结

表3 合金中 α 相尺寸和所占的面积比
Table 3 Size and area percentage of the α phase in the alloys

| 炉次 | 长度/ μm | 宽度/ μm | 面积/ μm^2 | 比面积/% |
|----------|-------------------|-------------------|---------------------|-------|
| LAZ811-1 | 82.82 | 25.33 | 2 415.68 | 82.55 |
| LAZ811-2 | 82.06 | 20.03 | 2 502.43 | 86.02 |
| LAZ811-3 | 73.78 | 22.40 | 2 576.84 | 83.16 |



(a) 垂直轴线



(b) 平行轴线

图4 LAZ811铸锭上表面显微组织

Fig. 4 Microstructures of the LAZ811 alloy upper surface

3 合金XRD分析及力学性能

从图5的XRD结果可以看出, LAZ811主要为 α 与 β 相构成, 并未有其他组成相析出, 常温凝固时常见的 AlLi 相和 $\text{Mg}_{17}\text{Al}_{12}$ 等并未见到, 这也与 Al 的含量较低有关, 在较快的凝固速度下, 金属化合物来不及生成析出。

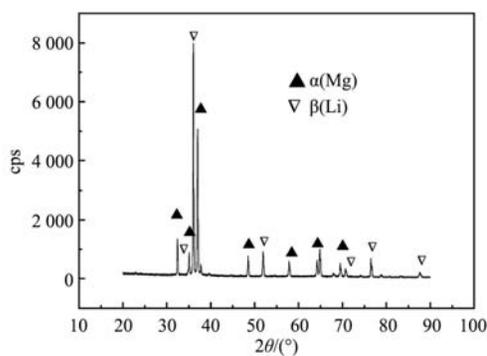


图5 LAZ811-2合金XRD图谱

Fig. 5 XRD pattern of the LAZ811-2 alloy

图6合金拉伸结果表明, 水冷凝固使合金组织细化后, 铸态合金的拉伸强度得到提高, 明显强于室温凝固, 但伸长率并未有明显变化, 合金塑性未得到明显提高。

以上研究结果表明, 真空水冷熔铸工艺能够细化合金铸锭的晶粒组织, 并保证较好的力学性能。通过低温浇注、采用水冷模具控制合金熔体的传热, 在提

果。其中, 浇注温度为 $690\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, 合金组织形态表现最优。统计结果表明, 水冷凝固方式能够明显细化晶粒, α 相的尺寸明显减小, α 相晶粒数量和占比面积也相应增加。

图4为 $690\text{ }^{\circ}\text{C}$ 浇注铸锭上表面平行与垂直于轴线的金相照片, 晶粒尺寸呈现细化杆、棒状特征, 但比芯部组织粗大, 这与该位置最后凝固热量较高有关。

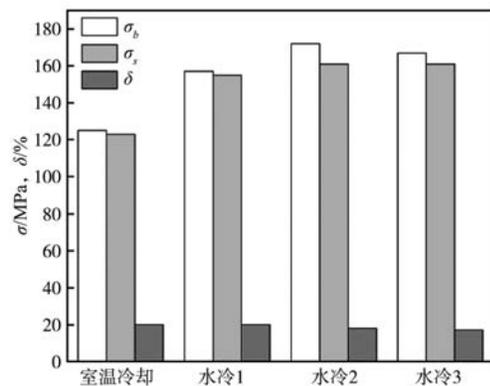


图6 LAZ811合金力学性能

Fig. 6 Mechanical properties of the LAZ811 alloy

高冷却速度的前提下实现快速凝固, 可以抑制LAZ811合金晶粒粗大枝晶的产生, 能够获得无明显铸造缺陷, 具有良好细化效果的LAZ811合金组织, 使力学性能得到一定的改善。

试验结果也印证了该工艺适用于LAZ811及其系列合金的制备。在此基础上若更换冷却介质, 利用深过冷技术增加更大的过冷度, 可大幅提高形核率, 获得更加细小的合金组织。

4 结论

(1) 采用真空感应炉+氩气熔铸LAZ811合金, 浇注温度不高于 $700\text{ }^{\circ}\text{C}$ 可以获得无气孔、夹杂、成分稳定、晶粒细小的合金组织。

(2) 水冷模具有利于控制合金散热, 形成顺序凝固, 且水冷模具外套不高于内套, 有利于合金液的补缩, 铸锭内部没有明显缩松产生。

(3) 该工艺在生产时无污染物产生和扩散, 可以实现镁锂合金铸锭的生产, 具有进一步优化的潜力和实用性。

参考文献:

- [1] 冯凯, 李丹明, 何成旦, 等. 航天用超轻镁锂合金研究进展 [J]. 特种铸造及有色合金, 2018, 37 (2): 140-143.
- [2] 丁文江, 吴国华, 李中权, 等. 轻质高性能镁合金开发及其在航天航空领域的应用 [J]. 上海航天, 2019 (2): 1-8.
- [3] 宋文杰, 刘洁, 董会萍, 等. 超轻镁锂合金熔炼工艺研究 [J]. 材料导报, 2020, 34: 316-321.
- [4] 张五勋. 用中频真空炉生产镁-锂合金圆锭 [J]. 轻合金加工技术, 2019, 47 (8): 10.
- [5] 张琳, 张国生. 真空浇注和水冷锭模成形Mg-Li合金铸锭的工艺实践 [J]. 铸造, 2022, 11 (71): 1397-1402.
- [6] 李万青, 何永亮, 刘静岩, 等. 真空感应炉自动监控系统的应用 [J]. 铸造, 2021, 70 (2): 265-267.
- [7] ZHU Xue-feng, YU Bao-yi, LI Zheng, et al. Influence of pouring methods on filling process, microstructure and mechanical properties of AZ91 Mg alloy pipe by horizontal centrifugal casting [J]. China Foundry, 2018, 15 (3): 196-202.

Study on Microstructures and Mechanical Properties of LAZ811 by Water-Cooled Solidification Process Design

WANG Wei, PU Li-li, HUO Yu-han

(School of Materials Science and Chemical Engineering, Heilongjiang Institute of Technology, Harbin 150050, Heilongjiang, China)

Abstract:

The LAZ811 water-cooled solidification mold and process were explored, mainly including the analysis of the melting and casting process, the structural design of the water-cooled mold and the determination of casting parameters, and the preparation of LAZ811 alloy ingots. The results showed that vacuum induction melting+argon protection and reasonable water-cooled mold structure could make the alloy solidify rapidly, effectively prevent the formation of internal shrinkage and shrinkage loosening of the ingots, and obtain the magnesium-lithium alloy material with fine organization and excellent tensile properties, which is suitable for the production of similar alloys.

Key words:

Mg-Li alloy; ingot; vacuum induction melting; water-cooled mold; grain refining
