

真空浇注和水冷锭模成形 Mg-Li 合金铸锭的工艺实践

张琳, 张国生

(西安航空职业技术学院, 陕西西安 710089)

摘要: 对某牌号Mg-Li合金铸锭的生产工艺进行了实践, 主要包括铸锭技术指标及几何形状设计、铸锭熔炼浇注及凝固冷却条件的确定、铸锭工装设计与准备、铸锭浇注和冷却工艺参数选择, 铸锭的试制与生产等。结果表明, 采用真空感应炉, 氩气、熔剂保护精炼合金, 浇注、凝固冷却均在真空状态下进行, 确定合理的锭模冷却水路结构和水冷部位, 选择合理的浇注和冷却工艺参数可以有效防止铸锭内部纵深缩孔及缩松的形成, 从而获得满足质量要求的铸锭。

关键词: Mg-Li合金; 铸锭; 真空; 水冷锭模; 工艺参数

Mg-Li合金作为超轻金属材料, 已被应用到航空航天、电子产品等领域。用其加工的零部件的原材料是用铸锭经轧制、挤压所得到的板材、棒材、管材等。因此, 铸锭质量直接影响板材、棒材、管材等的轧制、挤压工艺过程和质量, 铸锭质量是生产合格板材、棒材、管材等的关键。本文对某牌号Mg-Li合金铸锭的生产工艺进行了实践, 验证了工艺方案和工装设计的合理性, 所得铸锭满足技术质量设计指标要求。

1 铸锭的技术质量设计指标及几何形状设计

1.1 铸锭的技术质量设计指标

某牌号Mg-Li合金以镁为基, 按成分要求加入主要元素锂和强化元素铝、锌等, 密度 1.64 g/cm^3 。采用真空感应炉熔炼浇注, 根据熔炼炉条件(熔炼坩埚最大装料130 kg, 炉门高度1 200 mm), 为最大限度保证铸锭尺寸以及后续轧制、挤压料质量的要求, 对铸锭提出下列技术质量设计指标:

- (1) 铸锭要求几何形状为圆柱体, 尺寸 $\geq \Phi 310 \text{ mm} \times 900 \text{ mm}$, 质量 $\geq 110 \text{ kg}$;
- (2) 铸锭去除表面氧化皮后, 目视表面无氧化皮、气孔、渣孔等缺陷;
- (3) 铸锭去除冒口、缩孔纵向锯刨后, 目视无缩孔、缩松、夹渣等缺陷。可用料尺寸 $\geq \Phi 300 \text{ mm} \times 750 \text{ mm}$, 质量 $\geq 80 \text{ kg}$, 有用材料利用率达65%以上。

1.2 铸锭的几何形状设计

铸锭由铸锭体和补缩冒口组成。铸锭体的几何形状为圆柱体, 尺寸为 $\Phi 310 \text{ mm} \times 900 \text{ mm}$, 起模斜度为 $7'$ 。考虑到补缩冒口模的反复使用和容易取放, 补缩冒口的几何形状设计为圆锥台体, 上端尺寸为 $\Phi 190 \text{ mm}$, 下端尺寸为 $\Phi 314 \text{ mm}$, 高为150 mm, 带补缩冒口的铸锭示意图如图1所示。

铸锭体质量按式(1)进行计算。

$$G_{\text{锭体}} = \pi R^2 H \rho \quad (1)$$

式中: R 为铸锭半径, cm; H 为铸锭高度, cm; ρ 为合金密度, 1.64 g/cm^3 。

作者简介:

张琳(1980-), 女, 硕士, 副教授, 从事航空材料精密成型技术、模具设计与制造专业教学工作。电话: 15929977077, E-mail: dangyihao1118@163.com

中图分类号: TG292

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2022)11-1397-06

收稿日期:

2022-03-17 收到初稿,
2022-05-11 收到修订稿。

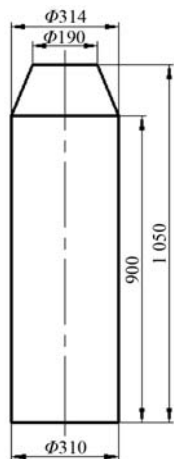


图1 带补缩冒口铸锭示意图

Fig. 1 Schematic diagram of ingot with feeding riser

因此, 铸锭体质量 $G_{\text{锭体}}=3.14 \times 15.5^2 \times 90 \times 1.64 \approx 111.5 \text{ kg}$ 。

补缩冒口质量按式(2)进行计算。

$$G_{\text{冒}} = 1/3 \pi h (R_2^2 + R_1^2 + R_2 R_1) \rho \quad (2)$$

式中: R_1 、 R_2 分别为补缩冒口上、下端半径, cm; h 为补缩冒口高度, cm; ρ 为合金密度。

经计算, 补缩冒口质量 $G_{\text{冒}}=1/3 \times 3.14 \times 15 \times (9.5^2 + 15.7^2 + 15.7 \times 9.5) \times 1.64 \approx 12.5 \text{ kg}$ 。带补缩冒口的铸锭质量 $G_{\text{锭}}=G_{\text{锭体}}+G_{\text{冒}}=124 \text{ kg}$ 。

2 铸锭熔炼浇注及凝固冷却条件的确定

Mg-Li合金在熔炼过程中极易氧化和剧烈燃烧, 熔炼困难^[1]。为保证铸锭品质, 选择合适的熔炼工艺很重要。研究表明, 真空感应熔炼+Ar气保护浇注炉冷是非常理想的Mg-Li合金熔炼工艺^[2]。在真空和氩气保护的条件下, 可以极大地减少Mg、Li与 O_2 、 H_2O 等发生化学反应的机会, 有效防止合金元素的氧化及燃烧损失, 避免MgO、 Li_2O 等杂质污染熔体。因此, 真空感应熔炼+Ar气保护熔炼工艺是目前所有熔炼工艺中铸锭成分最稳定、保护效果最好的工艺^[3]。但是该工艺中的保护气体Ar无法在熔体表面形成致密的膜层以有效抑制Mg、Li的蒸发, 从而使合金熔体的挥发比较严重, 保护效果不够稳定^[4], 除此之外还需要考虑如何去除合金液中来源于原材料的杂质以及在熔炼过程中所产生的夹杂。

为了保证Mg-Li合金的熔炼品质, 减少合金熔体挥发, 有效净化合金液, 本研究结合现有生产条件, 采用真空感应炉^[5], 氩气、熔剂双重保护精炼合金。同时考虑模具的温度控制对铸件凝固的影响^[6], 采用水冷锭模成形铸锭。铸锭的浇注、凝固冷却均在真空状态下

进行, 即将加料、熔炼、浇注和凝固冷却置于同一个真空罐内进行, 如图2所示。由于受真空罐空间尺寸、真空条件和炉门高度等的限制, 铸锭的浇注方式、凝固冷却过程和控制成为技术关键。

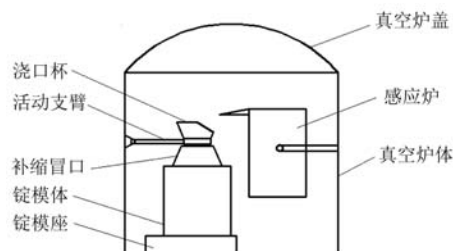


图2 铸锭的浇注和凝固冷却装置示意图

Fig. 2 Schematic diagram of pouring and solidification cooling device for ingot

3 铸锭工装设计与准备

3.1 浇口杯几何形状与安装固定装置

3.1.1 浇口杯几何形状

浇口杯用来承接合金液进而将其注入锭模, 它是用石墨材料加工而成, 呈漏斗形。受炉体真空空间的限制且为了不阻挡感应炉炉体的倾起, 浇杯口上部截去部分, 如图3所示。

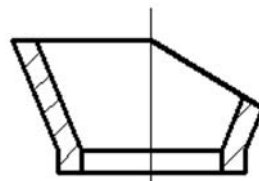


图3 浇口杯结构示意图

Fig. 3 Schematic diagram of structure of the pouring cup

3.1.2 浇口杯安装固定装置

为使浇口杯可反复使用, 在真空炉体内壁适当位置安装一个可以水平伸缩移动的活动支臂, 支臂端头设计安放浇口杯的环形结构, 如图4所示。该装置可以保证浇口杯稳定并使其浇注时对准补缩冒口模的模口, 取模时该装置移开不影响锭模取出。

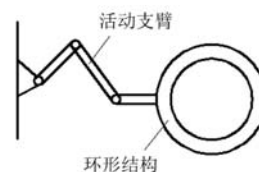


图4 浇口杯安装固定装置结构示意图

Fig. 4 Schematic diagram of pouring cup installation and fixing device

浇口杯活动支臂用不锈钢材料加工, 其尺寸视真空空间允许最大旋转限度而定。为保证浇注后合金凝

固体不使浇口杯底口与冒口模上端口连接，炉料计算和称取精确，使用前须均匀喷涂厚0.2 mm左右水基氧化锌涂料，在350~400 °C烘干0.5 h左右后使用。

3.2 补缩冒口模设计

补缩冒口模依据补缩冒口的几何形状和尺寸设计。为使冒口模装卸方便并能反复使用，其几何形状如图5所示。补缩冒口模用8~10 mm厚的不锈钢板焊接加工，使用前均匀喷涂0.2 mm左右水基氧化锌涂料并烘干0.5 h以上，使用过程中视其变形状况随时用校正模校正。

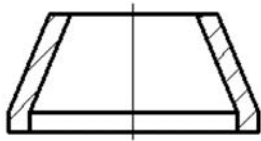


图5 补缩冒口模示意图

Fig. 5 Schematic diagram of feeding riser mold

3.3 水冷锭模结构设计

水冷锭模是铸锭成形的关键装备，由模体、模座、进出水接头等组成。模体和模座的几何形状均为中空圆柱体。

3.3.1 模体结构

模体是锭模的成形部分，几何形状为中空圆柱体，由内套、外套、导流片等组成，如图6所示。

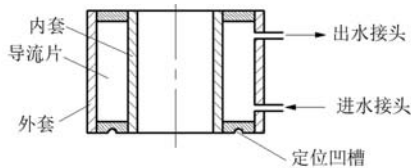


图6 模体结构示意图

Fig. 6 Schematic diagram of mold structure

内套用壁厚10~12 mm、 $\Phi 315$ mm \times 1 000 mm的无缝不锈钢管加工至 $\Phi 310$ mm \times 900 mm。内套内壁加工至 $Ra 3.2$ ，起模斜度7'。内套外壁上焊接厚2 mm、宽25 mm、间距为30 mm的不锈钢螺旋导流片。外套用厚度为10~12 mm的不锈钢板卷轧、焊接而成，上部焊接出水管接头，下部焊接进水管接头。模体内套和外套的上、下端用厚度为15 mm的不锈钢板环焊接封堵，下端板环加工出 $R=5$ mm的环形定位凹槽。

3.3.2 模座结构

模座为带圆凸台（限漏凸台）的中空圆柱体，如图7所示。模座高280 mm，凸台高度8 mm，中空高

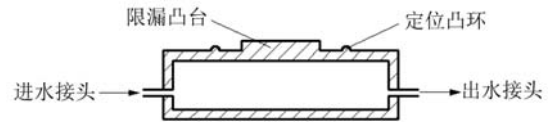


图7 模座结构示意图

Fig. 7 Schematic diagram of structure of the mold base

度100 mm，用厚度为10 mm的不锈钢板焊接加工。模座上接面加工出 $R=4$ mm的定位凸环（与模体尺寸配合），座壁对称焊接进、出水管接头。模座底与真空炉底固定。

3.4 锭模的安装与使用维护

3.4.1 锭模安装

锭模是铸锭的成形体，每成形一个铸锭，须安装拆分一次，反复使用。因此，正确地安装锭模，决定了生产的安全和锭模的使用寿命，需严格按规程操作。

将锭模底座固定在炉底确定的位置后，在限漏凸台上放置6~8 mm厚的石墨片，其后安置模体，石墨片与模体壁间隙不大于1 mm，模体与模座合模间隙小于0.5 mm。模体、模座合模后，在模体上端安放冒口模。为防止合金液从缝隙上溢，在冒口模周边压实石棉绳。随后调整浇口杯位置，将感应炉炉体空倾至最大限度，观察浇口杯位置是否适当。安装后的初始锭模如图8所示。

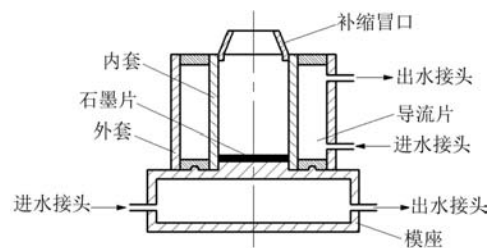


图8 安装后的初始锭模结构示意图

Fig. 8 Schematic diagram of the initial ingot mold structure after installation

3.4.2 锭模的检查与使用维护

(1) 使用前须对锭模的焊缝进行磁粉或者射线检查。

(2) 使用前须对模体、模座做充气渗漏检查。充气气压为进水压力的1.2倍以上，在持压状态下渗入水中24 h以上，其间不断观察有无气泡渗透现象。

(3) 模体、模座工作面需均匀喷涂0.2 mm左右水基氧化锌涂料，350~400 °C烘干0.5 h以上，后续使用中视涂料脱落状况补涂。

(4) 浇注完成后，铸锭在锭模中凝固冷却3 h以上，出水温度低于35 °C以后方可排真空打开炉盖和炉

门, 移开浇口杯, 用铲出工具铲出锭模模体, 顶出铸锭。

4 铸锭浇注和冷却工艺参数选择

4.1 铸锭浇注工艺参数选择

铸锭在真空状态下浇注, 浇注工艺参数主要是浇注温度、浇注速度和时间。浇注温度和浇注时间影响合金的流动性和凝固速度, 浇注速度影响合金的流动性、收缩率和冷却速度。Mg-Li合金流动性较好, 铸锭型腔和浇注系统结构简单且采用顶注方式热模浇注, 较低温浇注不影响合金的充型能力并可减小其体积收缩。所以, 浇注温度在680~700℃(热电偶测量的炉膛温度)范围内调整。使用的感应炉炉体设置有自动倾炉装置, 浇注速度和时间被限定, 需要5~6 min炉体可倾至最大限度完成合金液浇注。

4.2 铸锭凝固冷却工艺参数选择

锭模采用循环水冷却, 铸锭凝固冷却速度快。铸锭的凝固冷却过程是一个复杂的热传递物理过程。铸锭潜热传递给锭模内套, 内套热被循环冷却水带走。铸锭潜热、锭模内套材料的导热系数、循环冷却水温度和流速流量、水冷时间等都影响到铸锭的凝固方式和冷却速度, 从而影响到铸锭的补缩和组织。在诸多影响铸锭凝固冷却速度的因素中, 冷却循环水的进水出水温度、进水出水管截面积、进水水压和水量是主要影响因素, 其中冷却循环水的进水出水温度影响最大且易测量控制。循环冷却水由离心水泵提供, 水压和供水量一定, 可在进水口分布安装调节阀进行调节。进、出水温度可在进水出水口安装测温仪测量。因感应炉、真空炉体冷却与锭模冷却由同一水泵供水, 故进水温度选择为20~30℃, 出水温度选择在75℃以下^[7-8]。

5 铸锭试制及结果

5.1 初始锭模试制方案及结果

在设备和初始锭模调试正常、工艺参数确定后进行了初始模浇注试制。

表1 初始锭模的试制方案及工艺参数
Table 1 Trial manufacture scheme and process parameters of initial ingot mould

炉号	配料	浇注	浇注	进水	出水
	质量/kg	温度/℃	时间/min	温度/℃	温度/℃
MLZD01-001	130.5	690	6	20~30	<70
MLZD01-002	131	695	6	20~30	<75
MLZD01-003	131.5	700	6	20~30	<75

5.1.1 初始锭模的试制方案

用初始模浇注试制三个炉次, 配料约130.5~131.5 kg, 浇注温度范围为690~700℃, 三个炉次的浇注时间、进水及出水温度均相同, 具体见表1。其中, 合金熔炼烧损、挥发率为6%, 配料质量按式(3)计算。

$$G_{\text{配料}} = G_{\text{锭体}} + G_{\text{冒}} + (G_{\text{锭体}} + G_{\text{冒}}) \times 6\% \quad (3)$$

5.1.2 试制结果

初始模试制三个炉次后, 对三个铸锭进行了几何尺寸、质量、表面加工及纵向刨切检查。

(1) 铸锭尺寸: 直径约310 mm, 高约905 mm, 符合铸锭技术设定要求。

(2) 铸锭质量: 约112 kg, 符合铸锭技术设定要求。

(3) 表面加工去除氧化皮5 mm后, 目察表面无气孔、渣孔, 符合铸锭技术设定要求。

(4) 纵向刨切铸锭后, 目察可见从铸锭底部起大约250 mm左右及以上有缩松及缩孔, 并随铸锭的高度增加而增大, 不符合铸锭技术设定要求。

(5) 有用材料利用率(η)按照式(4)、(5)进行计算。

$$\eta = \frac{G_{\text{有用}}}{G_{\text{配料}}} \times 100\% \quad (4)$$

$$G_{\text{有用}} = \pi R^2 H_{\text{有用}} \rho = 3.14 \times 15.5^2 \times 25 \times 1.64 \approx 30\,929 \text{ g} \approx 30.9 \text{ kg} \quad (5)$$

式中: R 为铸锭半径, cm; $H_{\text{有用}}$ 为铸锭有用料高度, cm; ρ 为合金密度, 1.64 g/cm³。

可知, 铸锭的有用料质量和有用材料利用率 η 均不符合铸锭技术设定要求。

5.1.3 试制铸锭未达标原因分析

铸锭内部纵深缩孔和有用料质量未达到技术设定要求, 分析其原因, 主要是铸锭凝固冷却的方式和过程的控制不当。铸锭采用底部和四周壁水冷, 底部水冷有利于铸锭顺序凝固, 而四周壁全部水冷则造成铸锭同时凝固, 致使内部缩孔得不到合金液补缩, 铸锭完全凝固后, 内部形成缩孔、缩松。分析这一主要原因后, 对锭模结构进行了改进, 并进行了二次组炉试制。

5.2 锭模结构改进后的试制方案及结果

5.2.1 锭模结构改进

锭模结构改进主要是针对模体的冷却水路和水冷部位作以改进, 模座水冷方案不变。①模体冷却水路改进, 将模体内套外壁螺旋导流片间距改为20 mm, 以减缓水流速度, 增强冷却效果。②模体水冷部位改

进,减小模体外套的高度,使模体3/4高度以下水冷、1/4高度以上不水冷,使铸锭上部和补缩冒口较晚凝固,确保有足够的合金液补缩铸锭下部,如图9所示。

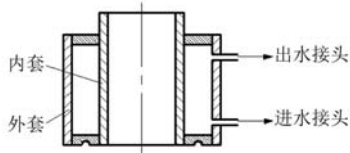


图9 模体水冷部位改进示意图

Fig. 9 Schematic diagram of improvement of water cooling part of ingot mold

5.2.2 锭模改进后的试制方案及结果

锭模改进后仍旧浇注试制三个炉次,配料均为131 kg,浇注温度相比初始锭模试制稍有调整,具体见表2。

表2 锭模改进后的试制方案及工艺参数
Table 2 Trial manufacture scheme and process parameters of the ingot mould after improvement

炉号	配料/kg	浇注温度/℃	浇注时间/min	进水温度/℃	出水温度/℃
MLZD01-004	131	685	6	20~30	<70
MLZD01-005	131	690	6	20~30	<75
MLZD01-006	131	695	6	20~30	<75

用改进模按131 kg配料试制三个炉次后,对三个铸锭进行了表面去除氧化皮后几何尺寸、质量和纵向刨切检查,各项指标达到铸锭技术质量设定指标,结果见表3。

表3 锭模改进后的试制结果
Table 3 Trial manufacture results of the ingot mould after improvement

炉号	直径/mm	高度/mm	质量/kg	利用率/%	表面目视	纵向刨切
MLZD01-004	300	752	87	65	无气孔渣孔	无缩孔
MLZD01-005	300	755	87.5	66.8	无气孔渣孔	无缩孔
MLZD01-006	300	750	86.9	66.4	无气孔渣孔	无缩孔

6 铸锭生产

6.1 铸锭生产方案及结果

根据二次试制MLZD01-004、-005、-006三个铸锭的结果分析,最终选择MLZD01-005炉的工艺参数投入生产,具体见表4。最终为后续轧制板材、挤压棒材提供了合格坯料,如图10所示。

表4 生产工艺参数

Table 4 Production process parameters

配料/kg	浇注温度/℃	浇注时间/min	进水温度/℃	出水温度/℃
132	690	6	20~30	<75



(a) 原始铸锭



(b) 切冒口及扒皮后的铸锭

图10 某牌号Mg-Li合金铸锭

Fig. 10 Ingot of a brand Mg-Li alloy

6.2 铸锭质量控制与安全生产

(1) 配料。主要金属原材料镁、锂、锌等最好采用一级品,镁锭和锂锭启封后应先除油和吹砂才能用于配料;一次配料不超过10炉,分别填写配料单,配料器具需定期校检,以保证其精准度。

(2) 合金熔炼。熔炼前对设备进行安全检查,并保证对所有工具清理干净;严格执行加料顺序和合金熔炼操作规程;须抽查一炉化学成分,并按相关规定进行检验。

(3) 铸锭工装的使用与维护。定期检查维护铸模,保证铸模合模间隙小于0.5 mm;定期检查浇口杯、补缩冒口模、锭模的水基氧化锌涂层状况。

(4) 浇注成形。须保证将熔炼好的合金液充分静置方可浇注;浇注合金液前,随时检查冷却水管、水管接头,严禁在渗漏现象下熔炼浇注。

(5) 铸锭的后处理。铸锭车削氧化皮、锯割刨切须用冷却液冷却,严禁无冷却液状态下车削、锯割刨切铸锭,正确使用镁砂消防。

7 结论

(1) 采用真空感应炉,氩气、熔剂双重保护精炼合金,可以有效防止合金液的氧化、燃烧和挥发,同时可以有效去除合金液中的杂质。

(2) 锭模的冷却水路和水冷部位影响铸锭的凝固过程。底部水冷有利于铸锭顺序凝固,而四周壁全部水冷则造成铸锭同时凝固,易使铸锭内部形成缩孔、缩松。

(3) 将水冷锭模模体内套外壁螺旋导流片间距设置为20 mm,冷却效果好,有利于铸锭快速冷却;对

铸锭底部和四周壁同时水冷，且对模体3/4高度以下水冷，1/4高度以上不水冷，可避免铸锭内部纵深缩孔及缩松的形成。

(4) 采用顶注方式预热模具浇注，尽可能采用较

低的浇注温度，在685~695 °C范围内浇注可以获得无气孔、渣孔的合格铸锭。实现了某牌号Mg-Li合金铸锭的顺利生产，具有一定的推广价值。

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] 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.
- [3] 徐仕豪, 温璐, 彭翔, 等. 镁锂合金熔体保护和净化的研究现状与展望 [J]. 中国有色金属学报, 2021, 31 (7): 1774-1785.
- [4] YANG G Q, PENG X D, YANG Y, et al. Microstructure and mechanical properties of as-cast and extruded Mg-8Li-3Al-0.7Si alloy [J]. Journal of Central South University, 2018, 25 (4): 764-771.
- [5] 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.
- [6] 胡才权, 倪志江. 基于滑模控制的低压铸造模具冷却控制系统设计 [J]. 精密成形工程, 2022, 14 (1): 147-152.
- [7] 江俊, 杨万章, 邱世云. $\Phi 320$ mm大直径6063铝合金圆铸锭生产工艺研究 [J]. 云南冶金, 2019, 48 (3): 74-78.
- [8] 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.

Process Practice of Forming Mg-Li Alloy Ingot by Vacuum Casting and Water-Cooled Ingot Die

ZHANG Lin, ZHANG Guo-sheng

(Xi'an Aeronautical Polytechnic Institute, Xi'an 710089, Shaanxi, China)

Abstract:

The production process of a certain grade of Mg-Li alloy ingot was practiced, mainly including ingot technical index and geometric shape design, ingot smelting and pouring and determination of solidification and cooling conditions, ingot tooling design and preparation, ingot pouring and cooling selection of process parameters, trial production and production of ingots, etc. The results showed that the uses of vacuum induction furnace, argon, flux protection refining alloy, pouring, solidification and cooling were all carried out in a vacuum state, the decision of the reasonable ingot mold cooling water channel structure and water cooling parts, the selection of reasonable pouring and cooling process parameters can effectively prevent the formation of deep shrinkage cavity and shrinkage porosity inside the ingot, thereby obtains the ingot that meets the quality requirements.

Key words: Mg-Li alloy; ingot; vacuum; water-cooled ingot mold; process parameters