

[文章编号] 1004- 0609(2001)S1- 0056- 07

# 锌铝合金热型连铸的工艺方法<sup>①</sup>

马颖<sup>1</sup>, 郝远<sup>1</sup>, 阎峰云<sup>1</sup>, 刘洪军<sup>2</sup>

(1. 甘肃工业大学材料科学与工程学院, 兰州 730050; 2. 华中科技大学材料科学与工程学院, 武汉 430074)

**[摘要]** 就热型连铸工艺条件下对具有共晶、包晶和共析转变的 5 种典型锌铝合金的连续定向凝固进行了研究, 找出了各种合金的最佳工艺参数配合范围。研究表明: 引锭操作是热型连铸工艺的关键环节, 型口温度、拉铸速度、冷却条件、合金成分和液位压头对铸锭表面质量有直接影响, 型口位置的固液区存在着热和力的平衡。只有通过调节工艺参数, 维持固液界面的良好位置, 才能拉铸出表面光滑的线材。

**[关键词]** 连续铸造; 定向凝固; 加热铸型; 缺陷

**[中图分类号]** TG 249. 7

**[文献标识码]** A

热型连铸工艺是一种连续定向凝固的铸造方法<sup>[1~4]</sup>。通过将铸型温度设置在连铸金属的液相线温度以上和对铸锭进行型外强制冷却, 在型口和冷却位置之间建立起一个大的温度梯度, 使得凝固时热量沿铸锭一维传递, 形成定向凝固条件。因为液体金属的凝固前沿位于型口或型口附近, 固液界面也就位于型口附近。热型连铸工艺的各种工艺参数如型口温度、拉铸速度、冷却条件等的微小变化, 都将给铸锭的表面和内部质量带来明显的影响, 良好的表面质量就依赖于各个工艺参数的相互协调配合<sup>[5~8]</sup>。因此, 本文作者就热型连铸工艺条件下锌铝合金线材的成形工艺进行研究, 以铸锭表面质量的变化来评价各种工艺参数的影响, 找出各种合金的最佳工艺参数配合范围。

## 1 实验方法

### 1.1 实验设备

试验采用甘肃工业大学自制实验室小型水平式热型连铸设备<sup>[9]</sup>, 设备结构如图 1 所示。该设备包括熔化保温系统、铸型加热系统、冷却系统、牵引系统和液面高度控制系统等 5 个主要组成部分。

### 1.2 实验材料

对 5 种成分的锌铝合金进行了研究: ZA5, ZA8, ZA12, ZA22, ZA27。采用的原材料为: Zn, 99.99% 的 1 号锌锭; Al, 99.9% 的 A00 号纯铝锭; Cu, Al-44% Cu 中间合金; Mg, 1 号纯镁。

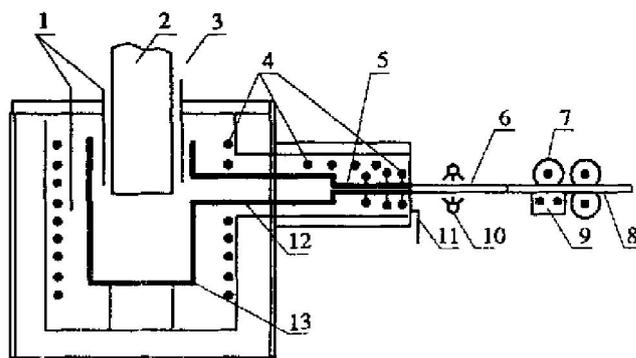


图 1 热型连铸设备结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of heated mold continuous casting equipment

- 1—Thermocouple; 2—Control bar of molten surface;
- 3—Probe of molten surface; 4—Heater; 5—Mold; 6—Ingot;
- 7—Tractive roll; 8—Dummy bar; 9—Guide block;
- 10—Cooling water; 11—Thermocouple; 12—Horizontal guide;
- 13—Crucible

熔炼工艺为: 电阻炉升温, 炉膛温度达到 700 °C 时, 向坩埚中加入纯铝块, 待铝块全部熔化后, 依次加入 Al-44% Cu 中间合金和锌块, 控制炉温在 700 °C 以下, 然后用钟罩压入镁, 用 0.1% ~ 0.2% C<sub>2</sub>Cl<sub>6</sub> 除气精炼, 然后静置、扒渣、测温, 充分搅拌后浇注成铸锭待用。合金浇注温度为: ZA5, 420~450 °C; ZA8, 450~485 °C; ZA12, 455~490 °C; ZA22, 550~585 °C; ZA27, 560~600 °C。

### 1.3 引锭

由于锌铝合金表面张力小<sup>[10]</sup>, 内聚力低, 能够

① [收稿日期] 2000- 10- 08; [修订日期] 2000- 12- 28

[作者简介] 马颖(1966- ), 女, 副教授, 工学硕士。

很好地润湿铜、铁等材料, 所以试验中采用粘附引锭法, 通过锌铝合金与引锭材料的粘附性将金属液粘出型口。一旦金属液与引锭接触, 打开冷却水, 启动牵引系统, 就可以进行引锭操作了。引锭操作是热型连铸工艺中最关键和最难掌握的部分, 直接关系到拉铸是否能够成功。拉铸刚开始时, 由于冷却水的激冷和铸锭中热流传递的突然变化, 使型口处铸型温度发生很大变化, 一般都要先降低一定的温度再回升, 这种温度的波动对合金的连铸过程影响很大<sup>[11]</sup>, 如果操作不好, 就会造成拉漏、热裂或者糊状型口, 甚至型口凝固, 使引锭失败。

综上所述, 引锭开始时铸型出口处热量和温度都要发生很大变化, 因此, 拉铸速度要在一个合理的数值启动, 而且应该是一个逐渐递增的非稳态调节过程, 直到冷却水直接冷却到铸锭上为止, 才可以进行稳定的拉铸。试验中确定了各种合金的良好引锭规范, 如表 1 所示。

表 1 引锭操作规范

Table 1 Operation technology of pulling ingot

Alloy	Outlet temperature / °C	Pulling speed / (mm·min <sup>-1</sup> )	Cooling speed / mm
ZA5	385~ 395	13 <sup>→</sup> 22	20~ 25
ZA8	410~ 420	15 <sup>→</sup> 27	20~ 25
ZA12	435~ 445	15 <sup>→</sup> 27	20~ 25
ZA22	485~ 495	18 <sup>→</sup> 32	20~ 25
ZA27	495~ 505	22 <sup>→</sup> 32	20~ 25

## 2 影响铸锭表面质量的工艺因素

### 2.1 合金成分的影响

热裂和糊状型口的发生与锌铝合金的成分密切相关。共晶合金如 ZA5 热裂的倾向性比较大。对于过共晶的 ZA8, ZA12, ZA22 和 ZA27 合金而言, 如果型口温度太低或冷却太强, 表面粗糙缺陷更容易出现, 严重时就会形成糊状型口。这是由于共晶成分与过共晶成分合金的凝固特性不同所造成的。如前所述, 热裂、表面粗糙、拉漏等铸造缺陷的发生都与型口处和型壁接触的铸锭表面层中液相分数有关, 因为合金成分和其它参数同型口处铸锭表面的液相分数关系很大, 所以对热型连铸线材的表面质量影响也很大, 直接关系到拉铸的难易程度。

同样的凝固条件下, 铝含量越高的合金凝固温度范围也越宽, 凝固时液固区间就越大, 型口处铸锭表面枝晶间液体分数越多, 意味着铸锭表面的液

相分数  $f_L$  越多, 热裂的发生机率也就越小。即使有热裂产生, 裂纹也可以迅速为金属液所填充而消除热裂, 因此对于含铝量较多的锌铝合金来说, 没有热裂现象发生。但是溶质含量越高, 凝固区间就越大, 当工艺参数的变动造成型壁局部点温度低于液相线温度时, 型壁容易生核结晶, 如果这些过冷结晶点在拉出型口前周围没有足够的液相补缩, 就会突出铸锭表面, 造成表面粗糙。凝固区间越大, 铸型内液固区越长, 过冷结晶点越容易出现; 如果铸型温度不够高, 过冷点太多, 合金糊状凝固的特性会造成游离晶不断富集, 导致糊状型口发生, 使拉铸失败。在相似的拉铸条件下, 共晶成分的 ZA5 会产生热裂, 过共晶成分的锌铝合金往往出现表面粗糙和糊状型口缺陷。

为了避免因型口温度太低或铸锭表面液体分数太少而造成热裂、表面粗糙或糊状型口, 及因型口温度太高或液体分数太高而导致拉漏, 则固液区在型口位置只能在一定的合适区域内移动, 移出这个区域, 拉铸就会出现缺陷。合适的液固区范围跟合金本身的性质有着直接的关系。ZA27 合金在型口处液固区的可移动范围很小, 凝固范围宽, 凝固时保持液固态的时间长, 型口处枝晶间液体分数太多, 容易拉漏, 同时又容易产生晶粒游离, 在金属液中形成游离晶, 因此液固区不能在型内太多。要型口保持不拉漏, 枝晶间残余液相分数必须低于一定的数值, 要表面不会出现突起形成粗糙, 液固区就不能进入型口太多。同其它几种合金相比, 要使 ZA27 合金液固区处在这个合适的范围内, 各个工艺参数的调整需要更加准确和协调。

### 2.2 金属液压头的影响

升高坩锅中液位, 金属液柱中静压力增大, 在一定程度上对减少或消除热裂或表面粗糙有利。因为二者的发生都与铸锭表面液体金属的补缩有关。静压力增大, 金属液的渗透力加强, 使得铸锭表面液体膜的补缩作用和润滑作用能够充分发挥。摩擦力的减小使热裂倾向减小, 大的静压力还压迫金属液进入已形成的裂纹中, 消除热裂。金属液渗透力的加强使金属液能够补偿表面层液体的凝固收缩, 局部结晶点不再外露, 也就不再出现表面粗糙。随着金属液位的增大, 型口液柱中的压力增大, 拉铸出的铸锭直径逐渐变粗。压力继续增大, 表面张力不能克服液位压头和由于直径增大引起的重力增大的双重作用, 液柱表面被压破, 液柱断开, 金属液从型口无控制地流出, 形成拉漏。对凝固范围宽的

合金如ZA27更是如此，由于部分液固区位于型外，型口处枝晶间液相多而且表面张力小，压力稍大，金属液就会从枝晶间流出造成拉漏。

因此，对高含铝量的ZA12, ZA22和ZA27合金来说，严格控制坩锅中金属液位高度尤其重要，不可使其太高。在能够使铸锭维持型口的完整形状的前提下，尽量使液位高度取低值。但是对于凝固范围小的ZA8和ZA5合金，在允许的范围内稍微增大压头，有利于取得表面质量良好的铸锭。有时即使型口温度低于液相线温度，但是如果液位压头足够，也可以拉铸出表面光滑的锌铝合金连铸线材。

### 2.3 型口温度的影响

在冷却条件和拉铸速度一定的条件下，改变型口温度，再根据铸锭的表面质量，观察各种不同成分锌铝合金的型口温度合适范围，试验结果如图2所示。

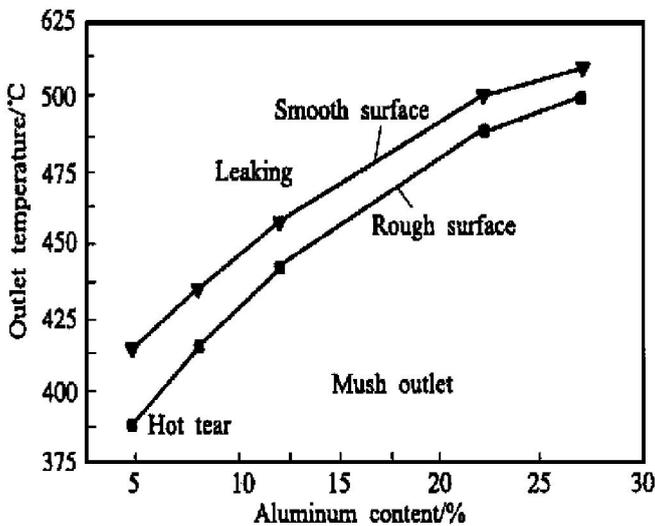


图2 型口温度对表面质量的影响

Fig. 2 Influence of outlet temperature on surface quality

由图2可见，对某一成分的合金，型口温度在一定的范围内变化调节都可以得到表面光滑的铸锭。当型口温度低于图中下限时，由于固液界面推入型内太多，型口处液体分数的减少不足以抵消表面的凝固收缩，会造成表面粗糙。如果型口温度再下降，共晶成分的ZA5合金由于摩擦力增大形成热裂，过共晶成分的锌铝合金由于型壁初晶形核而发生表面粗糙或糊状型口。如果型口温度高于图中上限，型口处铸锭温度太高，固液区界面会移出型外，造成液体分数太高，导致液柱下垂断开或液体直接沿型口流出形成拉漏。

随着合金成分向共晶点移动，型口温度的可调

范围也逐渐增大，与合金的凝固温度范围变化趋势正好相反。ZA27的合适型口温度变化范围是10℃，ZA5则是25℃，增大了15℃。由于ZA27凝固温度范围宽，晶体生长形式是发达的柱状枝晶伸向型内液体中生长，枝晶间溶质偏析严重，凝固时枝晶间残余较多液相。型口温度升高时，液固区移向型外，增大了型口处枝晶间的液相分数，拉漏倾向就大。ZA5合金由于是共晶两相共生生长，凝固位置几乎就在一个曲面上，因而液固界面向型内液体内凸入。型口温度上升会使固液界面向型外移动，固液界面的凸度变小，但是对型口处液相分数的影响较小。只有当型口温度增大到一定的温度，移出型外的固液界面几乎变成平面，表面张力不足以维持型外液柱的压力时才发生拉漏。其它几种合金的情况介于ZA5和ZA27之间，因此，热型连铸时锌铝合金的成分离共晶点越远，型口温度的控制要求就越严格。

### 2.4 拉铸速度的影响

冷却条件(冷却距离  $L = 20 \text{ mm}$ ，冷却水量  $Q = 16 \text{ L/h}$ )和型口温度(高于液相线温度  $10 \text{ }^\circ\text{C}$ )固定的条件下，拉铸速度对各种合金连铸线材的表面质量影响如图3所示。

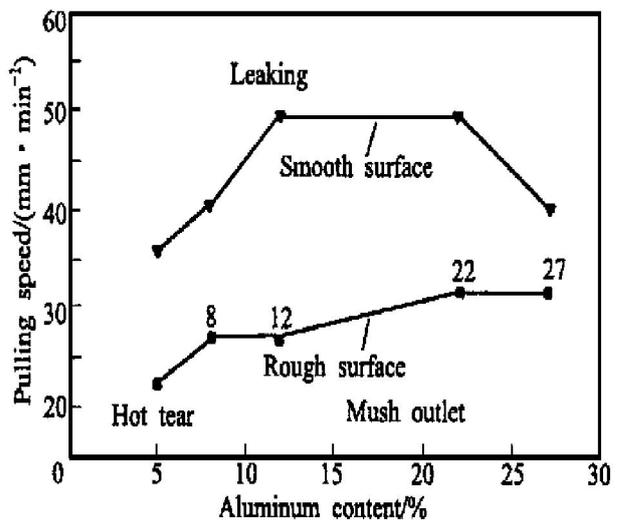


图3 拉铸速度对表面质量的影响

Fig. 3 Influence of pulling speed on surface quality

拉铸速度的合理变化范围规律随成分不同而变化。由图3中可见，ZA12和ZA22的拉铸速度可调节范围较宽，可以在一个较大的范围内变化得到光滑表面的铸锭。然而ZA5和ZA27变化范围较小，拉铸速度的控制需要更加严格和准确。ZA5为共晶合金，在固定温度下凝固，液固两相共存区是一个曲面，液固区很小，就位于型口或者型口附近。根

据 Soda 等<sup>[12]</sup>的研究结果, 纯铝的液固界面位于型口以内 4 mm 可以获得良好表面质量的热型连铸线材。液固界面进入型口太多, 发生热裂, 移出型口又容易造成拉漏。而 ZA27 合金凝固范围很宽, 型口位置的铸锭中枝晶间仍然有相当多的液体金属存在。如果固液区移到型外太多, 液体金属外流, 形成拉漏, 进入型内一定距离, 又容易产生表面粗糙。所以固液区在型口位置的可移动长度有限, 拉铸速度的可调节范围也不可能很宽。另外几种合金既不象 ZA5 那样液固两相界面是一个面, 必须位于型口附近很窄的距离内, 又不象 ZA27 那样液固区内枝晶间残余液体太多, 它们有一定长度的液固区, 液固区内液体量又比较合适, 不至于太多。所以液固区在型口处的可移动距离较长, 不拉漏而又能保持一定厚度的液体金属薄层, 避免出现表面粗糙和热裂, 拉铸速度调节范围也就比较宽。

拉铸速度和型口温度的增加都将导致固液界面向型外移动, 但使界面变化的形式并不一样。根据许振明等<sup>[6]</sup>的研究, 以晶体提拉法进行定向凝固时, 提高坩埚温度, 固液界面的变化是凹 $\rightarrow$ 平 $\rightarrow$ 凸; 增加生长速度, 界面的变化是凸 $\rightarrow$ 平 $\rightarrow$ 凹。热型连铸同样也是定向凝固, 晶体提拉法中的定性结论同样也适用。在这里铸型相当于坩埚, 型口温度也就相当于坩埚温度, 拉铸速度可视为生长速度, 它们对固液界面的影响具有相同的趋势, 只不过在热型连铸工艺中固液界面一般都是微凸或者接近平面, 工艺参数的变化只是使凸界面的曲率变化。因此, 型口温度的增加会使型口处液固界面的凸度变大, 同时液固区移向型外的方向; 拉铸速度增大使液固区整体向型外移动, 同时固液界面的形状也就是向型内凸入的程度变小, 但比型口温度的影响要小, 如图 4 所示。

相反, 型口温度的减小会使界面曲率变小, 同时向型内深入; 拉铸速度变小会将固液区整个推向型内, 固液界面的轮廓更凸。拉铸速度和型口温度变化引起的这种界面移动形式的不同, 使得它们对不同成分的锌铝合金热型连铸的影响也不同。例如成分由 ZA5 变到 ZA12, 型口温度的变化只会使固液界面前沿凸入型内液体中的程度变大或者变小, 对型口处液体分数影响不很明显。由于 ZA5 是共晶合金, 液固两相界面是一个曲面, 液固区很小; ZA12 存在一定长度的液固区, 型口温度对枝晶间液体量影响较大, 而型口处枝晶间液体分数是影响铸锭表面质量的重要因素, 所以 ZA5 的型口温度调节范围比 ZA12 大。拉铸速度的变化直接使液固区

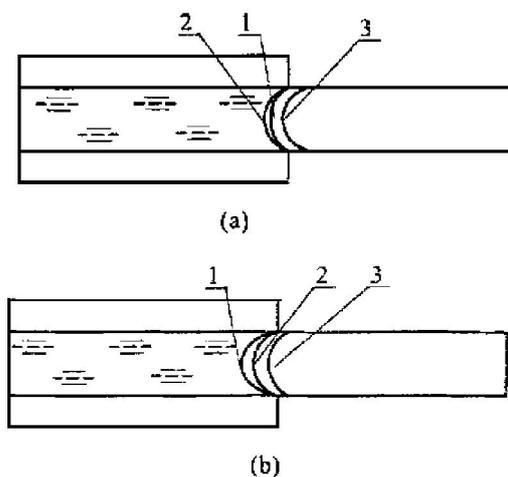


图 4 型口温度和拉铸速度对固液界面位置的影响

Fig. 4 Influences of outlet temperature and pulling speed on interface between solid and liquid

(a) 1~3—Increasing of outlet temperature;

(b) 1~3—Increasing of pulling speed

整个移向型内或型外, ZA12 有一个较宽的液固区, 型口可调位置, 而 ZA5 液固区较小, 只能维持在界面附近, 可调范围很小, 因此 ZA5 拉铸速度可调范围小于 ZA12 合金。虽然同样使液固界面向内或向外移动, 但由于影响方式不一样, 造成的变化趋势也不同。这就是图 3 和图 4 所示合金成分变化时, 型口温度和拉铸速度的范围变化趋势不一致的原因所在。

## 2.5 冷却条件的影响

冷却距离短, 冷却强度大, 固液区整体向型内移动, 固液区长度缩短, 容易出现表面粗糙。冷却距离拉长, 铸锭中热量传输太慢, 固液界面前积累热量太多, 使液固区移向型外, 拉漏倾向增大。

冷却水量与冷却距离对铸锭表面质量的影响有着相同的趋势, 但是不如冷却距离的影响那么大。从不冷却到开始加水, 冷却水量的变化对铸锭质量影响很大, 对其它工艺参数的调节范围影响也较大。但是由于铸锭直径较细, 水量高于 25 L/h 时已经能够对铸锭实施完全足够的冷却, 再加大水量对铸锭质量的影响就不明显了, 而且加大水量对铸锭产生一定的冲击振动, 造成型口处凝固界面的不稳定, 对铸锭的表面质量有一定的影响。冷却水太少时, 铸型内热量传出很慢, 型口金属液凝固太慢, 凝固界面对工艺条件非常敏感, 很容易出现拉铸缺陷。因此试验中一般冷却水量取 16 L/h, 这样既可以对铸锭进行良好的冷却, 又不至于因冷却水量过大使铸锭出现波动弯曲。

### 3 工艺参数配合范围

根据试验观察的结果, 针对 5 种不同的锌铝合金作出了热型连铸工艺参数配合图(图 5~ 9)。从图中可以看出 3 个工艺参数, 即型口温度、拉铸速度、冷却距离, 对铸锭表面质量的影响趋势。处于阴影部分的工艺参数配合对获得表面质量高的、光滑如镜面的锌铝合金连铸线材一般是可行的。在阴影部分以外的工艺参数配合也有可能拉铸出良好的铸锭, 但往往会出现各种热型连铸的铸造缺陷, 如拉漏、表面粗糙、热裂或糊状型口等。图中冷却水量均定在 16L/h。

在 5 种锌铝合金中, ZA12 合金的拉铸速度范围最大, 在一定的工艺条件下可达 54 mm/min。而 ZA5 合金由于含铝量低, 凝固区间小, 固液界面可

移动距离最短, 所以拉铸速度可调范围最小。ZA27 虽然含铝量高, 传热好, 但是比起其它合金凝固时枝晶间残余液体最多, 固液界面的可移动距离同样太短, 控制起来非常困难, 拉铸范围也不大。如果

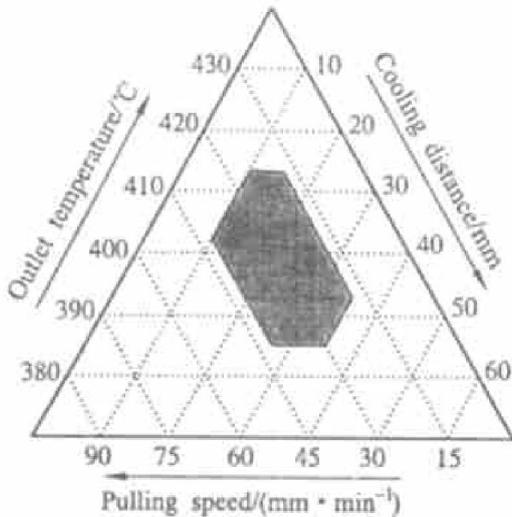


图 5 ZA5 的拉铸工艺参数配合范围

Fig. 5 Matching range of technological parameters of ZA5 in O. C. C.

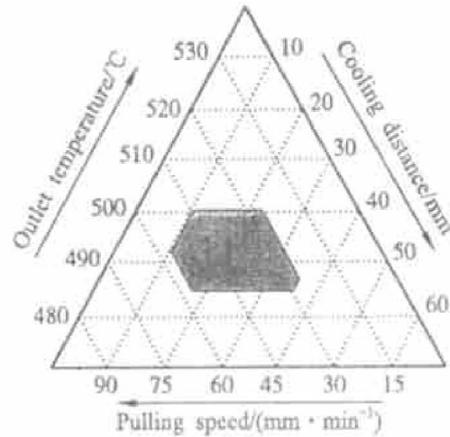


图 7 ZA12 的拉铸工艺参数配合范围

Fig. 7 Matching range of technological parameters of ZA12 in O. C. C.

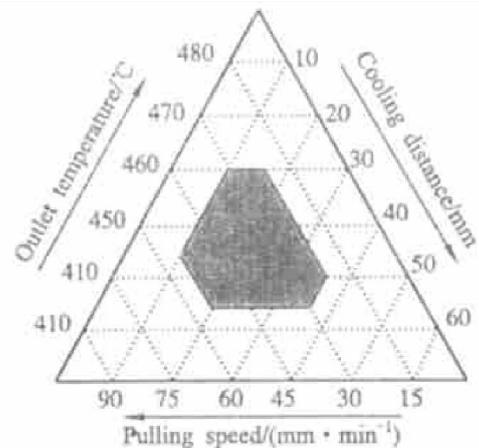


图 8 ZA22 的拉铸工艺参数配合范围

Fig. 8 Matching range of technological parameters of ZA22 in O. C. C.

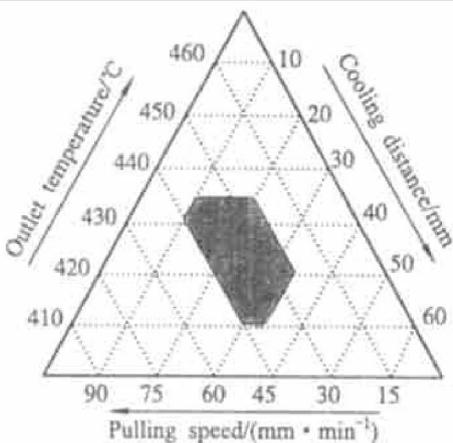


图 6 ZA8 的拉铸工艺参数配合范围

Fig. 6 Matching range of technological parameters of ZA8 in O. C. C.

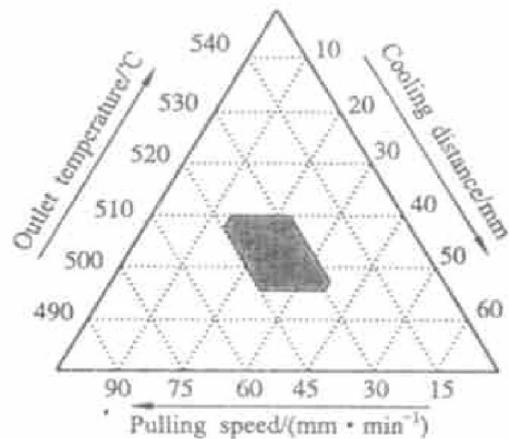


图 9 ZA27 的拉铸工艺参数配合范围

Fig. 9 Matching range of technological parameters of ZA27 in O. C. C.

型壁光滑, 即使型口温度低于液相线温度, 在较高的拉铸速度下也能够拉铸出良好表面质量的连铸线材, 而在很低的拉铸速度下即使无冷却水拉铸也会成功, 但是前者铸锭内部质量没有保证, 得不到中意的柱状晶组织, 而且发生缺陷的可能性很大, 后者生产率低, 拉铸过程不稳定, 对热型连铸线材来说均不可取。

因此, 拉铸速度、型口温度和冷却条件的改变都会造成铸锭中产生和传出的热量发生相应的变化, 引起热平衡的变化。为重新获得热量的平衡, 需要潜热的放出和液固界面前沿的热梯度的调整和改变, 使液固区进行相应的移动, 这种型口处液固界面位置的变化是造成铸锭缺陷的内在原因。拉铸速度、型口温度、冷却条件的配合是微妙的工艺过程, 要获得表面光滑的连铸线材, 就需要三者的密切协调配合, 使之位于图中的阴影区域。虽然阴影部分的工艺参数配合可以获得表面质量好的铸锭, 但是由于实际操作中难免出现工艺参数的波动和操作的不稳定, 靠近阴影区边缘的工艺参数配合经常会导致缺陷的发生, 尤其对参数变化敏感的合金例如 ZA27 来说更是如此。因此, 工艺参数的相互配合也要求有一定的允许波动范围, 工艺参数配合处于阴影部分中心区域时, 缺陷发生的机会就相当小, 拉铸过程最稳定, 也就是说对于每种合金都有一个最佳工艺参数配合。

比较图 5~ 9 可以看出, ZA27 的阴影部分面积最小, 也就是工艺参数的可调范围最小, 这就意味着 5 种锌铝合金中 ZA27 是最难拉铸的一种。这是由于 ZA27 的凝固结晶特性所决定的。从前面的分析知道, ZA27 热型连铸时固液区在型口位置的可调距离很短, 各个工艺参数的协调配合, 维持固液界面的合适位置是一个很微妙的过程。工艺参数的不稳定很容易使液固区离开这个范围, 形成缺陷, 导致拉铸失败, 所以对 ZA27 需要严格控制工艺参数。ZA5 虽然阴影面积并不是最大的, 但却是几种合金中最好拉铸的一种。因为含 5% Al 的锌铝合金是共晶成分, 当型口温度低、拉铸速度慢、或者冷却强度高时, 固液区进入型内太多, 形成热裂缺陷, 如果问题不是特别严重, 铸锭仍然可以被拉铸出来。这时只要再调整相应的工艺参数如加大拉铸速度, 就可以将铸锭调整成光滑的表面。而其它几种合金当固液区进入型口太多时, 型壁上初晶析出, 在靠近型壁的液体中形成游离晶, 导致糊状型口, 一旦出现, 将无法通过工艺参数的调节来消除。所以 ZA5 可以在一定的不良工艺条件下进行操

作, 然后再调整, 另外几种合金必须一开始就在合适的工艺参数范围内操作。

## 4 结论

1) 引锭操作是热型连铸工艺的关键部分, 需要各工艺参数根据拉铸情况相应调节, 才可以顺利引出铸锭。

2) 进入晶体稳定生长阶段, 热型连铸主要工艺参数型口温度、拉铸速度、冷却条件及其他因素如合金成分、液位压头对铸锭表面质量有直接的影响。试验表明, 只有各工艺参数在一定的范围内协调配合, 才能拉铸出表面光滑的锌铝合金线材, 不合理的工艺参数将导致热裂、表面粗糙、糊状型口和拉漏等缺陷。

3) 热型连铸工艺过程中, 型口位置的固液区内存在着热和力的两个平衡。只有通过两个平衡调节工艺参数, 维持固液界面的良好位置, 才能拉铸出表面光滑的连铸线材。其中 ZA27 是最难拉铸的一种合金。

## [ REFERENCES ]

- [ 1 ] Ohno A, Soda H, Mclean A, et al. The OCC process: a new method for near net and shape casting [ J ]. *Advanced Materials*, 1990, 28(3): 161- 168.
- [ 2 ] Ohno A. Review of development of OCC process [ J ]. *Trans of Japan Institute of Metals*, 1991, 30(5): 448- 449.
- [ 3 ] XU Zhen-ming(许振明), LI Jian-guo(李建国), FU Heng-zhi(傅恒志), et al. Study on continuous casting of copper single crystal [ A ]. SUN Guo-xiong(孙国雄). *Proceedings of the 9th China Foundry Conference (第九届中国铸造学会论文集)* [ C ]. Shenyang: Northeastern Univ Press, 1997. 345- 349.
- [ 4 ] FAN Xin-hui(范新会), CAI Ying-wen(蔡英文), LI Jian-guo(李建国), et al. Continuous casting technology of single crystal metals [ J ]. *Chinese Journal of Materials Research (材料研究学报)*, 1996, 10(3): 264- 266.
- [ 5 ] FAN Xin-hui(范新会), WEI Peng-yi(魏鹏义), LI Jian-guo(李建国), et al. 工艺参数对单晶连铸线材表面质量的影响 [ J ]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals (中国有色金属学报)*, 1997, 7(1): 134- 137.
- [ 6 ] XU Zheng-ming(许振明), LI Jian-guo(李建国), LI Jin-shan(李金山), et al. Continuous casting technology of single crystal copper rod [ J ]. *Trans Nonferrous Met Soc China*, 1998, 8(2): 277- 282.

- [7] XU Zheng-ming(许振明), LI Jin-shan(李金山), LI Jian-guo(李建国), et al. 连铸铜单晶工艺参数的匹配及其对铸棒表面质量的组织的影响[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals (中国有色金属学报), 1999, 9(suppl. 1): 221- 228.
- [8] PENG Li-ming(彭利明), MAO Xie-min(毛协民), XU Kuang-di(徐匡迪). Simulation and control model for interactions among process parameters of directional solidification continuous casting [J]. Trans Nonferrous Met Soc China, 2000, 10(4): 449- 452.
- [9] YAN Wei-wu(阎威武). 热型连铸技术及其设备的研究[D]. Lanzhou: Gansu University of Technology, 1998.
- [10] Oho A. Development of advanced materials by the OCC process [J]. Light Metal, (in Japanese), 1989, 39 (10): 735- 740.
- [11] Soda H, Motoyasu G, Mclean A, et al. Alloy casting by the horizontal Ohno continuous casting system [J]. Cast Metals, 1993(2): 76- 86.
- [12] Soda H, Motoyasu G, Mclean A, et al. Effect of process variables on alloy rod produced by the horizontal Ohno continuous casting (OCC) process [J]. Canadian Metall Q, 1994(2): 89- 98.

## Technique of producing ZA alloys by heated mold continuous casting

MA Ying<sup>1</sup>, HAO Yuan<sup>1</sup>, YAN Feng-yun<sup>1</sup>, LIU Hong-jun<sup>2</sup>

(1. School of Materials Science and Technology, Gansu University of Technology, Lanzhou 730050, P. R. China;

2. School of Materials Science and Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, P. R. China)

**[Abstract]** The continuous directional solidification technique of 5 kinds of special ZA alloys with eutectic, eutectoid and peritectic transformations under the condition of continuous casting by heated mold was studied. The optimum fitting range of technique factors in each alloy is found. The results show that the operation of guiding ingot is the key of the technique to produce directional solidification ZA alloy line by heated mold in continuous casting method. Outlet temperature, pulling speed, cooling condition, alloy composition and pressure head have direct influences on the surface quality of ingot. There is a balance between heat and force in the two-phase zone of solid and liquid. Only adjusting technique factors with the balance and keeping a good place of the interface between solid and liquid, can the smooth ZA alloy line be continuously pulled out.

**[Key words]** continuous casting; directional solidification; heated mold; defects

(编辑 何学锋)