

[文章编号] 1004- 0609(2001)S2- 0047- 07

热型连铸锌铝合金的缺陷形成与机理^①

马 颖¹, 郝 远¹, 阎峰云¹, 刘洪军²

(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] 对 5 种典型锌铝合金在热型连铸工艺条件下的连续定向凝固进行了研究, 探讨该工艺下锌铝合金线材表面缺陷的产生机理, 并对部分缺陷的组织结构进行了显微分析。结果表明: 只有金属液压头、型口温度、拉铸速度和冷却条件诸工艺参数在一定范围内的协调配合, 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。固液两相区的形状和位置对上述缺陷的形成有重要影响, 当固液两相区位于型口或型内时, 凝固界面将向型内凸入, 如果剩余液体不能抵消凝固收缩, 就会出现表面粗糙; 若凝固界面深入型内较多, 则使型内凝固的铸锭摩擦力过大, 形成热裂; 固液两相区移至型外, 凝固界面将变成平面, 容易发生拉漏。

[关键词] 连续铸造; 定向凝固; 加热铸型; 锌铝合金; 缺陷

[中图分类号] TG 249. 7

[文献标识码] A

热型连铸工艺即 O. C. C 法是由日本学者大野笃美(A. Ohno)发明的^[1~3]。该方法与传统的连铸方法的主要区别在于将传统连铸中的冷却铸型改为加热铸型^[4]。从而避免了合金液在铸型内壁表面的凝固, 凝固过程中的热量沿已经凝固了的固相一维传递, 形成定向凝固条件, 可以获得柱状晶乃至单晶材料。

热型连铸方法中, 由于铸型温度高于金属液的凝固温度, 消除了铸型内壁表面形核的可能性, 只有在引锭棒端部形核的晶粒可以逆着热流单向生长。同时由于表层液体过热, 产生一个铸锭中心先于表层凝固的温度场, 凝固界面通常呈向液体中凸出的形状, 有利于获得定向或单晶凝固组织。因为热型连铸过程中铸锭在离开铸型出口时, 表层仍呈液体状态, 铸锭与铸型之间始终存在一层液体薄层, 在离开铸型型口一个很小的距离之后自由凝固, 形成一个呈镜面状光滑的铸锭表面。同时液体薄层的存在, 使铸锭与铸型间摩擦力很小, 所需牵引力也很小, 而且可以连续抽拉。

热型连铸工艺的关键在于避免凝固界面附近的侧向散热, 维持很强的轴向热流, 保证凝固界面凸向液相。维持这样的导热条件需要在离开凝固界面的一定位置强制冷却, 可采用类似于传统连铸工艺的二次冷却区的喷水冷却方式冷却型外已凝固的铸锭, 而在凝固界面附近的液相一侧进行加热。

鉴于锌铝合金相图比较复杂, 且凝固温度范围

较宽, 对热型连铸的工艺条件要求苛刻, 故本文作者选择锌铝合金进行研究, 以深入了解热型连铸条件下其表面缺陷的产生机理, 并对部分缺陷的组织结构进行了显微分析。

1 实验方法

1.1 连铸工装与材料

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^[5], 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五个主要组成部分。

用6kW电阻炉对坩埚内的金属进行加热和保温。坩埚由钢筒焊接而成, 内腔衬为水玻璃石英砂衬, 刷涂氧化锌涂料, 坩埚侧面开孔以便安装横向导引管和铸型。横向导引管和铸型均用高强石墨制作, 横向导引管的作用是将坩埚中的金属液引入铸型, 尺寸为 $d\ 45\text{ mm} \times 210\text{ mm}$, 外表面缠绕电阻丝进行加热与保温。试验中采用型口为 $d\ 3.5\text{ mm}$ 的铸型, 铸型温度的严格控制是获得表面光滑、内部组织为柱状晶的连铸线材的关键。由于铸型有一面向空气中散热, 在连铸过程中尤其是引锭阶段热流和温度变化非常大, 传热条件恶劣, 因此对型口部分的加热和温度控制要求迅速、准确。为达此要求, 设备中对铸型部分另用电阻丝进行单独集中加热。设备中电阻炉、石墨横引管和铸型采用分段加

① [收稿日期] 2000- 12- 27; [修订日期] 2001- 05- 02

[作者简介] 马 颖(1966-), 女, 副教授, 硕士。

热与控温, PID 控制系统将温度控制在要求的温度。铸型温度检测与控制热电偶放在型口边的孔内, 深入型壁内 5 mm。本文中的型口温度就是指此点热电偶所检测的温度值。

由于坩埚中的熔体液面高度决定着铸型出口处的静压力, 所以控制坩埚中的液位高度对拉铸成功与否关系很大。这个高度应当与铸型出口处上表面齐平或略高一点, 这样既可以保证金属液充满铸型, 使连铸件尺寸形状良好, 又不至于因液位太高金属压头太大导致拉漏。液面高度控制系统的作用就是保持这个高度, 使坩埚中金属液以一定的流量经横引导管向铸型中均匀供给。试验中采用液位探头连续检测液位高度, 当液位低于要求高度时, 电路断开, CPU 发出控制信号, 通过丝杠机构将电机的转动转化为液面控制棒的直线下降和坩埚内液面上升。液面达到高度, 电路接通, 电机停止转动。这样通过本系统可以维持坩埚中液位在一定的高度。在本试验中坩埚中液位被控制在型口上表面 3 ~ 5 mm。

本文作者对 ZA5, ZA8, ZA12, ZA22, ZA27 五种成分的锌铝合金进行了研究。采用的原材料: 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。

1.2 引锭工艺与参数

由于锌铝合金表面张力小^[6], 内聚力低, 能够很好的润湿铜、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。将黄铜棒前端磨尖, 或者在黄铜管一端轧入小段铁丝, 铁丝露出铜管约 5 mm, 这样在引锭插入型口后金属液就包在尖端或铁丝上增大了金属液与引锭的接触面积和粘附力, 从而可以很容易地引出金属液。

为了克服引锭开始时型口温度的波动给铸锭质量带来的影响, 补偿引锭和铸锭传热条件的差异, 避免拉漏、热裂或糊状型口造成的拉铸失败, 一般

拉铸开始前设置型口温度高于预定温度, 拉铸开始时就会降到液相线以下, 而后回升到预定温度, 从而避免了缺陷导致的拉铸失败。

引锭刚刚开始时热流强度较弱, 故拉铸速度不能过快。否则一开始就以大速度拉铸, 凝固放出的潜热热量来不及散失, 固液界面前沿热量富集, 金属凝固速度慢, 液固区向型外推移, 使得型口处液体过多, 这时液体金属就会从枝晶间流出, 容易形成拉漏。相反, 初始拉铸速度过慢, 或者冷却过强, 型口处温度降低, 形成热裂和铸锭型口凝固, 导致铸锭难以拉出, 凝固范围宽的合金形成糊状型口, 也不能拉铸成功。所以, 铸锭必须以一定的速度拉出铸型, 然后逐渐加大拉铸速度, 尤其在铸锭即将通过冷却水时, 必须适当加大拉铸速度, 抵消冷却的突然加强导致的铸锭中传热速度的加快、传热量过多。为了减小材料传热系数的差异给铸锭中热平衡造成的不稳定, 开始时冷却不可太强。因此, 引锭速度、型口温度和冷却条件要相互协调配合, 引锭过程中各个工艺参数要在一定的范围内调整, 将铸锭良好的拉铸出来^[7]。试验中确定了各种合金的良好引锭规范如表 1 所示。

2 热型连铸锌铝合金线材的缺陷形成

热型连铸锌铝合金的过程中出现的主要缺陷有: 热裂、表面粗糙、拉漏、糊状型口、弯曲、尺寸不稳定等等(图 1)。其中, 由于工艺参数和成分的变化使铸锭中热流传递发生变化, 从而影响固液区的移动和型口温度的变化而引起的缺陷有: 热裂、表面粗糙、糊状型口、拉漏。

2.1 热裂

热型连铸工艺中, 铸型温度高于合金熔点, 铸锭中心先于表面凝固, 位于型内铸锭的表层与铸型内壁之间存在一层环形液体薄层^[8], 起到铸型和铸

表 1 引锭操作规范

Table 1 Operating properties of pulling ingot

Alloy	Outlet temperature/ °C	Pulling speed/ (mm•min ⁻¹)	Cooling distance/ mm	Pulling speed/ (mm•min ⁻¹)	Cooling distance/ mm
ZA5	385~ 395	13 [→] 22.5	20~ 25	> 18	20~ 30
ZA8	410~ 420	15 [→] 27	20~ 25	> 18	20~ 30
ZA12	435~ 445	15 [→] 27	20~ 25	> 22.5	20~ 30
ZA22	485~ 495	18 [→] 32	20~ 25	> 22.5	20~ 30
ZA27	495~ 505	22 [→] 32	20~ 25	> 27	20~ 30

The flow of cooling water is 14L/h and “[→]” means “increasing”.

锭之间润滑剂的作用，减小了摩擦，而且由于液体薄层最后凝固，所以用很小的力就可以拉铸出表面光滑如镜的铸锭。但是，如果工艺参数不合适，使液体薄层厚度不足或固液界面深入铸型过大，则已凝固部分直接接触型壁，特别是在型壁表面不光滑的情况下，就会使摩擦力太大，导致热裂缺陷。图2所示为热裂缺陷的形成示意图。

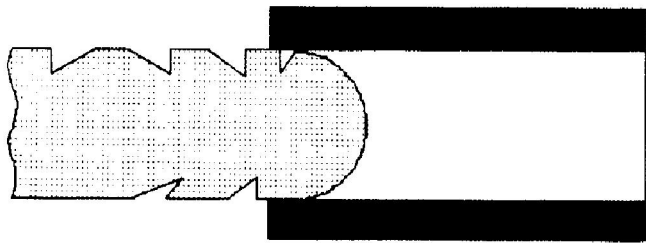


图2 热裂的形成
Fig. 2 Forming of hot tear

如果液相分数足以填充已形成的热裂纹，这样热裂纹可以被消除而不形成缺陷。热型连铸工艺中足够的液相分数还可以减小铸锭与型壁的摩擦，使凝固区的应力最小。液相分数不够，不但增大了机械摩擦力，进而使局部应力增大，热裂倾向增加，还使产生的热裂纹一直保持到凝固结束，在表面上形成裂纹缺陷。热型连铸过程中，型口处铸锭表面液体薄层的厚度和型腔内壁的表面状况是影响热裂相互作用的两个重要因素。型腔内壁的表面状况对

铸锭质量有着明显的影响，特别对于液层较薄的情况更是如此。型腔内表面粗糙时，铸锭与之接触时摩擦力更大，发生热裂的倾向变大。如果型腔表面干净光滑，有时即使型口温度降到合金液相线以下，也不会发生明显的因摩擦力太大造成的热裂，仍然可以拉铸出表面光滑的铸锭。

型腔表面状况不良造成的热裂缺陷可以通过增大铸锭表面环形液相层的厚度来消除。拉铸过程中液相薄层的厚度随铸型的温度和溶质浓度而变化。型口温度提高，固液区移向型外，与型腔内壁接触的铸锭表面液相分数增加，液相层增厚，即使型壁粗糙或不干净的表面也可以形成良好的润滑层，摩擦力大大减小，热裂不会发生。ZA5 很容易出现热裂缺陷，而 ZA22 和 ZA27 则几乎没有热裂情况出现。这是因为溶质含量越高，表面液相润滑层越厚的缘故。

总之，控制各工艺参数尤其是型口温度与冷却强度以保证固液界面不要深入型口过大是避免热裂形成的关键。

2.2 糊状型口

如果铸型温度太低或者冷却太强，共晶成分的ZA5 易发生热裂缺陷，高溶质合金 ZA12, ZA22 和 ZA27 则会发生这种情况：铸锭越拉越细，直至最终被拉断，这时观察到型口处有一层半固态糊状物质，从型口外沿伸到铸锭中心呈锥状，线材从锥状

物中心拉出。随着拉铸的进行,糊状半固态锥形物越来越向中心增厚最终将型口完全糊住,拉铸再也难以进行下去。论文中将这种现象称为糊状型口。

糊状型口现象是由高溶质合金的凝固特性所决定的。ZA12 和 ZA22 的凝固范围分别是 50 ℃ 和 98 ℃, ZA27 更是高达 110 ℃。这么宽的凝固区间极易发生糊状凝固。如果固液界面进入型内太深,与型壁接触的金属液温度低于液相线温度,型壁上结晶形核。根据“游离晶理论”^[2],靠近型壁的液体金属中析出大量初晶,使粘度增大。由于型壁处液体初晶最多,向铸型中心逐渐减少,粘度也逐渐减小。因此型壁处液体粘度最大,拉出时与型壁摩擦力也最大,向型外的移动速度也最慢,滞后于中心部分的移动速度,使得铸型出口处铸锭外形渐渐变成锥状,锥形表面直接向空气中散热,不能再接受铸型提供的热量,温度很快下降,初晶很快长大,邻晶开始相互接触,形成半固态糊状组织,而且这种情况越来越严重,致使拉铸失败(图 3)。正因为如此,一旦出现糊状型口,情况便会一直发展和恶化下去,除非重新引锭,否则无法通过调节工艺参数进行改善,只能任其失败。

糊状型口的发生同型壁表面状况也有密切关系。型壁光滑,即使型口温度低于拉铸合金液相线,也能拉铸出表面良好的锌铝合金连铸线材。一方面,光滑的铸型内壁减少了初晶的形核,使液相在一定的过冷下不结晶;另一方面,光滑的内壁使含有少量初晶的液体摩擦力很小,可以被拉出铸型而不至于粘附在型壁上。因此,每次拉铸完成后都要对型腔进行清理,使其干净光滑。

为避免糊状型口的出现,型口温度要设得稍高一点,控制各种工艺参数之间相互协调配合,使固液界面不可进入型内太深,避免型口位置与铸型接触的液体表面温度过低而使初晶析出。

2.3 表面粗糙

良好的连铸线材的表面应当是光滑如镜面,但是试验中锌铝合金连铸线材往往发现表面粗糙缺陷:铸锭表面出现许多点状突起。这种表面粗糙缺陷一般都出现在含铝量高、凝固范围宽的过共晶锌铝合金中。工艺参数的不合理配合是造成表面粗糙缺陷的主要原因。这种表面粗糙与热裂造成的热裂纹明显不同,铸锭表面仍然光洁,但不再平整,而热裂则在表面留下裂痕。凝固温度范围宽的合金的点状突起一般都是在型口温度低、拉铸速度慢或冷却强度高时出现,这时固液区进入型内太多,铸型

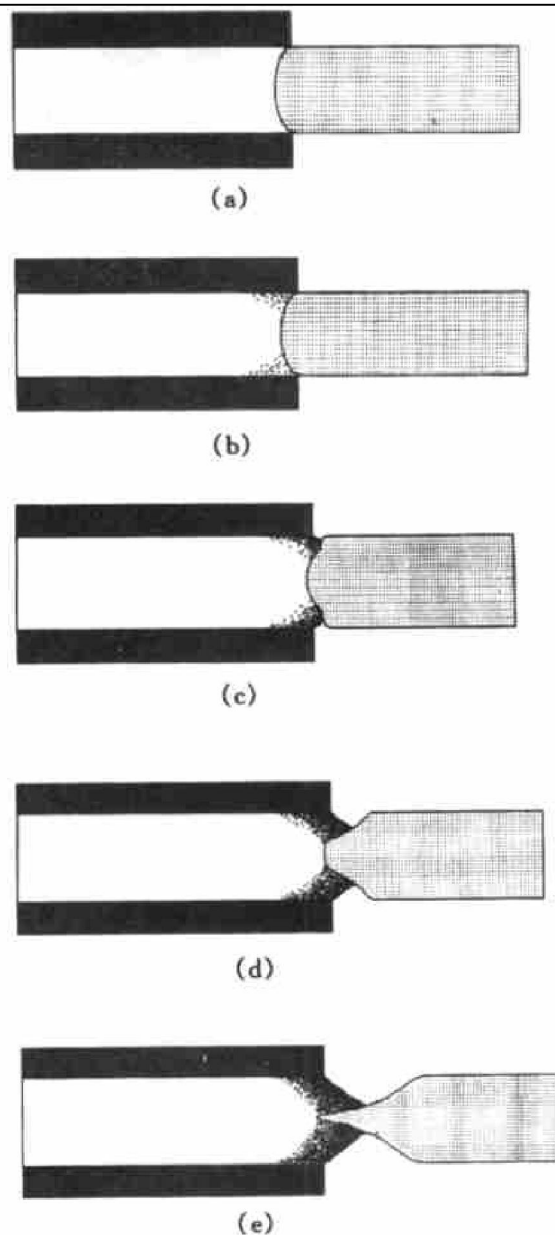


图 3 糊状型口的形成

Fig. 3 Forming of mush outlet

(a) —Good operation; (b) —Primary crystal appearing; (c), (d) —Semi-solid structure; (e) —Forming mush outlet

内局部过冷点开始结晶,形成固体凝固点,点状固体周围的自由液相凝固收缩。由于此时液固区在型内,铸型表面补缩液相不足,凝固收缩后留下该点状凝固突出表面,形成点状突起。型口温度再下降,型口处液体温度降低,液相分数 f_L 减少,铸锭表面层中液体补缩越来越困难,而且型壁表面局部过冷点也增多,表面粗糙也就越来越严重。热型连铸工艺中,表面粗糙的发生与型口处的液体分数直接相关,当固液界面进入型内太多时,与型壁接触的铸锭表面层中液体分数太少,不足以提供补缩时,液体层中局部凝固点就会突出表面,导致表面粗糙。

Chang 和 Wilcox^[9]在 Bridgman Stockbarger 晶

体生长技术中, 控制加热器温度高于试验材料的熔点, 同时和冷却器配合来控制固液界面的位置。当固液区位于加热器内时, 界面向液相内凸入, 继续降低加热器和冷却器温度, 界面形状将会更凸。对纯铝和纯锡的 OCC 法凝固过程数值模拟显示了相似的结果^[10]: 如果凝固界面位于型口或型口以内, 界面将向液相凸入, 界面移出型外时, 界面将几乎成为平直的。将此结论推论到合金中, 液固区位于型口或型内时凝固界面将向型内凸入, 表面层液相分数大于铸锭中心, 最后凝固的是表面部分, 如果此时剩余液体不能抵消凝固收缩, 就会出现表面粗糙。型口温度上升, 凝固区向外移动, 而且凝固界面凸度变小, 型口处液体分数增加, 补缩变得容易, 表面粗糙不易发生。固液区全部移至型外, 凝固界面将变成平面, 固液两相有充分的机会接触, 再也不会发生补缩困难的问题, 也就没有表面粗糙现象出现, 但是这种情况下型口处液体分数太多, 容易发生拉漏。其它如拉铸速度、冷却条件等影响固液区位置的因素同样也影响表面粗糙的发生。

2.4 拉漏

由于 ZA27 凝固范围宽, 发达的柱状晶伸向型内液体中生长, 枝晶间溶质偏析液体多, 凝固时枝晶间残余较多液相。型口温度升高, 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, 液固界面向型内液体内凸入。型口温度的上升, 也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, 固液界面几乎变成直的, 移出型外, 表面张力不足以维持型外液柱的压力时才发生拉漏。其他几种合金的情况介于 ZA5 和 ZA27 之间。因此, 热型连铸锌铝合金的成分越远离共晶点, 型口温度的控制就越要求严格准确。

2.5 固液界面的影响

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。定向凝固时, 提高温度, 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^[11]。在热型连铸工艺中固液界面一般都是微凸或者接近平面, 因此工艺参数的变化使凸界面的曲率变化。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。

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 要大。拉铸速度的变化直接使液固区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。而 ZA27 合金凝固范围很宽, 型口位置的铸锭中枝晶间仍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。

3 缺陷的组织分析

3.1 表面粗糙

Ohno 认为热型连铸中出现的表面粗糙缺陷是由于初生相的枝晶臂长入铸锭表面层液相而不能得到充分的补缩, 凝固后突出表面而形成的^[10]。但是通过对铸锭微观组织的观察发现, 合金的初生枝晶非常细小, 即使突出表面也不会特别明显而形成表面粗糙缺陷^[12]。对发生表面粗糙处的铸锭进行组织观察, 结果示于图 4。从图中可以看出, 铸锭表面的点状突起并非是得不到补缩的初生枝晶的前端露出表面, 而是明显的等轴晶区。从突起处可以看到向铸锭中心处生长的放射状柱状晶组织, 因此能够推断, 表面粗糙的点状突起处是铸锭凝固时的局部冷却区, 这时铸锭中心还未凝固, 但表面已经有局部地区开始发生形核和结晶。铸型温度稍低于液相线, 与之接触的金属液开始有初晶形成, 一旦局部过冷地区出现固相, 固相直接接触型壁, 在接触点附近形成等轴晶组织。由于晶粒游离不很严重,

在离接触点不远处开始形成柱状晶组织, 因为铸锭中心尚未凝固, 温度较高, 热流从铸锭中心通过接触点向型壁处传递, 所以柱状晶长向中心处, 以接触点为中心呈放射状, 直到接触中心处轴向生长的柱状晶为止。因为局部结晶点就在型口附近, 随拉铸的进行很快被拉出型外, 该点周围的液态合金在型外自由凝固后收缩, 由于得不到多余液相的补缩, 已经凝固的该点突出表面形成表面粗糙缺陷。如果铸型内壁温度过低, 形成较多的初晶和局部凝固点, 就会导致糊状型口。

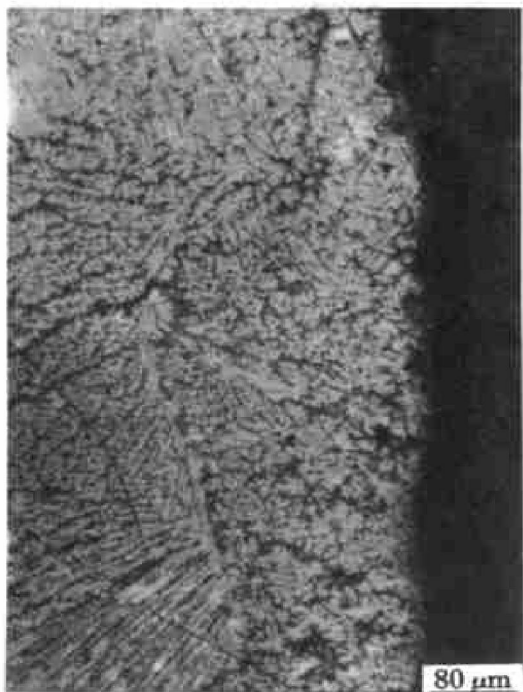


图 4 ZA27 表面粗糙的显微组织

Fig. 4 Microstructure of rough surface of ZA27 alloy

3.2 热裂

热裂是共晶合金热型连铸时固液界面凸入型内过深而引起的。型内凝固的铸锭摩擦力过大, 使刚刚结晶的铸锭表面裂开, 不能为液体金属填充, 就形成热裂缺陷。图 5 所示是 ZA5 合金热裂区域的显微组织, 可以看到表面的热裂纹阻止了柱状晶的进一步延伸。

热裂区域是等轴晶组织, 表明热裂发生前该地区的铸锭表面层生成了游离晶, 铸型内壁的温度低于合金的液相线温度。铸锭表面层的等轴晶高温时晶间结合弱, 强度很低, 与铸型摩擦时容易沿晶粒间开裂, 导致热裂的发生。因为铸锭中心处温度较高, 仍然为定向凝固条件, 晶体生长为柱状晶, 强度较高, 不会被拉开^[13]。所以只在铸锭表面留下表观上的裂纹, 而不是沿整个铸锭截面被拉断。



图 5 ZA5 热裂区域的显微组织

Fig. 5 Microstructure of hot tear zone of ZA5 alloy

3.3 弯曲

拉铸过程中外界的震动或者操作的不稳定将导致铸锭发生弯曲, 这时柱状晶会自动调整生长方向, 仍然维持与热流方向的平行, 但是弯曲处发生生长的紊乱, 柱状晶不再完全保持平直, 发生相应的弯曲(图 6)。经过弯曲处, 只要热流条件保持稳定, 柱状晶很快就会调整为又是轴向平行生长的组织。

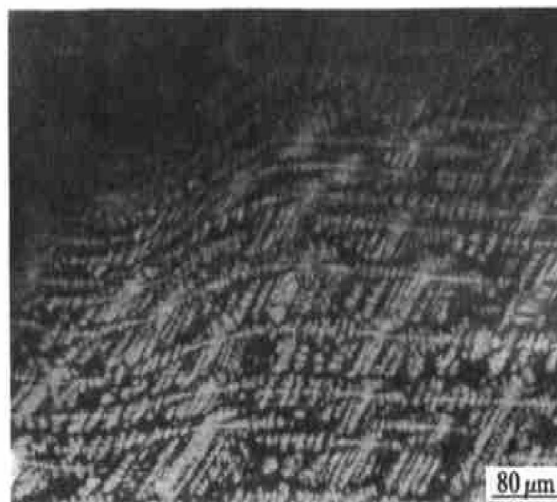


图 6 ZA12 铸锭弯曲的显微组织

Fig. 6 Microstructure of winding ZA12 ingot

[REFERENCES]

- [1] Ohno A. Continuous casting of single crystal ingots by the OCC process [J]. Journal of Metals, 1986(38): 14 - 16.

- [2] Ohno A, Motoyasu G. Solidification process [A]. Proc of Third Int Conf [C]. London: The Institute of Metals, 1988. 416.
- [3] Soda H, Motoyasu G, Mclean A, et al. Alloy casting by the horizontal Ohno continuous casting system [J]. Cast Metals, 1993(2): 76– 86.
- [4] Ohno A. Development of advanced materials by the OCC process [J]. Light Metal, (in Japanese), 1989, 39 (11): 735– 740.
- [5] MA Ying(马 颖), HAO Yuan(郝 远), YAN Feng-yun(阎峰云), et al. 热型连铸锌铝合金的工艺方法 [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals(中国有色金属学报), 2001, 5(Suppl. 1): 56– 62.
- [6] HU Xiurlian(胡秀莲), LI Shichun(李世春). ZA5 合金铸态共晶的研究 [J]. Materials Engineering (材料工程), 1997(11): 20– 22.
- [7] XU Zhenming(许振明), Li Jinshan(李金山), LI Jianguo(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和组织的影响 [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals(中国有色金属学报), 1999, 9(Suppl. 1): 221– 228.
- [8] 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.
- [9] M C Flemings. Behavior of metal alloys in the semisolid state [J]. Metall Trans, 1991(22B): 269– 293.
- [10] Ohno A. Review of development of OCC process [J]. Trans Japan Institute Metals, (in Japanese), 1991, 30 (5): 448– 449.
- [11] Ohno A, Soda H, Mclean A, et al. The OCC process: a new method for near net and net shape casting [J]. Advanced Materials, 1990, 28(3): 161– 168.
- [12] MA Ying(马 颖), HAO Yuan(郝 远), YAN Feng-yun(阎峰云), et al. 热型连铸锌铝合金定向凝固线材的组织分析 [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals(中国有色金属学报), 2001, 11(2): 221– 226.
- [13] MA Ying(马 颖), HAO Yuan(郝 远), YAN Feng-yun(阎峰云), et al. Zr-Al 合金热型连铸定向凝固的晶体生长机理 [J]. Acta Metall Sinica (金属学报), 2001, 37(2): 202– 206.

Defect formation and mechanism of ZA alloy made in continuous casting by heated mold

MA Ying¹, HAO Yuan¹, YAN Feng-yun¹, LIU Hong-jun²

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

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

[Abstract] The continuous directional solidification technique of five kinds of special ZA alloys with eutectic, peritectic and eutectoid transformation under the condition of continuous casting by heated mold was studied. The mechanism of surface defects appearing in ZA alloy line was discussed and the structure of some defects were analyzed by SEM. The results show that only when the fitting of various technique factors, pressure head, outlet temperature, pulling speed and cooling condition is reasonable under a certain range, can the ZA alloy smooth line be continuously pulled out. Unreasonable technique will result in hot tear, rough surface, mush outlet, leaking and other defects. The shape and location of solid-liquid zone have the importance influence on the forming of above defects. When the solid-liquid zone is located in the mould outlet or inner mould, the surface of solidification will protrude into the inner mould. If the left liquid can not counteract the solidification contract, the rough surface will appear. If the solidification surface further into the mould, the ingot in mould will have a big friction force when pulling and form hot tear. When the solid-liquid zone is moved out of mould, the solidification surface will turn into a plane, which made it easy to form leaking. The vibration or unstable operation will make the ingot winding during pulling.

[Key words] continuous casting; directional solidification; heated mold; zinc-aluminum alloy; defects

(编辑 何学锋)