

连铸坯表面裂纹的控制

蔡开科

(北京科技大学)

摘要 生产无缺陷的连铸坯是连铸坯热送、热装的前提条件。铸坯表面裂纹可能导致最终轧制产品出现缺陷。简要评述了影响连铸坯表面纵裂纹、横裂纹和星形裂纹形成的原因,及防止表面裂纹产生的技术措施。

关键词 连铸坯 表面裂纹 控制措施

Controlling Crack on Surface of Continuous Casting Slab

Cai Kaike

(Beijing Science and Technology University)

Abstract Producing continuous casting slab without defect is precondition to hot delivery and charging continuous casting slab. Crack on surface of slab may lead to defect on final rolling product. Reasons effecting on forming vertical crack, transversal crack and star crack on surface of continuous casting slab are simply discussed and technological measures to prevent surface crack are put forward.

Key Words continuous casting slab surface crack controlling measure

1 前言

铸坯裂纹是影响连铸机产量和铸坯质量的主要缺陷。据统计,铸坯各类缺陷中有 50% 为裂纹缺陷。铸坯出现裂纹,轻者需进行精整,重者会导致漏钢和废品,既影响连铸坯生产率,又影响产品质量,增加生产成本。

带液芯的铸坯在连铸机内运行和凝固过程中产生裂纹是一个复杂的问题。当外力作用于带液芯的坯壳上时,钢的高温力学行为、凝固的冶金行为和铸机设备运行状态是使铸坯产生裂纹的主要因素。铸坯裂纹可分为铸坯表面裂纹和铸坯内部裂纹两类。连铸坯常见的表面裂纹见图 1 所示。本文仅就连铸坯表面裂纹产生的原因及其防止措施作一简要评述。

2 铸坯表面纵裂纹

2.1 板坯表面纵裂纹特征

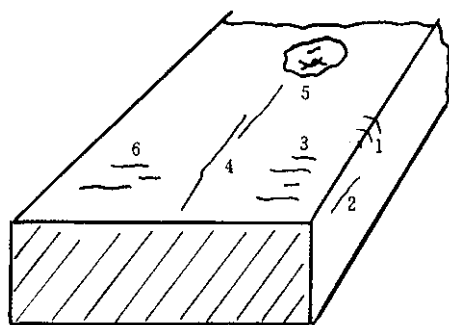


图 1 连铸坯常见的表面裂纹示意图

1—横向角部裂纹;2—纵向角部裂纹;3—横裂纹;
4—宽面纵向裂纹;5—星形裂纹;6—深振痕

表面纵裂纹可能在板坯宽面中心区域或宽面到棱边的任一位置产生。综合分析表明,纵裂纹有以下特征:

(1) 产生纵裂纹的表面常伴有凹陷(depression),纵裂纹的严重性与表面凹陷相对应。

万方数据

蔡开科,教授,博士生导师,北京科技大学冶金与生态工程学院(100083)。

(2) 裂纹沿树枝晶干方向扩展。

(3) 裂纹内发现有硅、钙、铝等元素的夹杂物。

(4) 在裂纹周围发现有 P, S, Mn 的偏析。

(5) 裂纹边缘出现一定的脱碳层, 说明裂纹是在高温下形成扩展的。

以 $250\text{mm} \times 1200\text{mm}$ ($[C] = 0.08\%$) 板坯为例:

细小纵裂纹: 宽度 $1 \sim 2\text{mm}$, 深度 $3 \sim 4\text{mm}$, 长 100mm 左右。

宽大纵裂纹: 宽度 $10 \sim 20\text{mm}$, 深度 $20 \sim 30\text{mm}$, 长度有几米, 严重时会因贯穿板坯而报废。

铸坯表面裂纹与中厚板表面缺陷的关系为:

板坯表面裂纹深 $1 \sim 5\text{mm}$, 当压缩比为 $4.2 \sim 6.8$ 时, 产品裂纹深度为 2mm 。1000 块板坯轧制统计表明: 轧制厚度 $< 20\text{mm}$ 时, 裂纹指数为 0.32 ; 轧制厚度为 $20 \sim 40\text{mm}$ 时, 裂纹指数为 2.98 ; 轧制厚度 $> 40\text{mm}$ 时, 裂纹指数为 11.25 。

2.2 表面纵裂纹产生的原因

板坯表面纵裂纹在连铸机内产生原因如下:

(1) 板坯横断面低倍检验表明, 纵裂纹起源于激冷层薄弱处 (约 $2 \sim 3\text{mm}$)。

(2) 结晶器的模拟试验表明, 纵裂纹起源于结晶器弯月面区 (几十毫米到 150mm) 周边坯壳厚度薄弱处。

这说明纵裂纹起源于结晶器的弯月面区初生凝固壳厚度的不均匀性。坯壳受下列所述力的作用:

(1) 板坯凝固壳四周温度不均匀而产生的收缩力;

(2) 板坯收缩时由钢水静压力产生的鼓胀力;

(3) 宽度收缩时受侧面约束产生的弯曲应力。

这些力综合作用在坯壳上, 当张应力超过钢的高温允许强度时, 就在坯壳薄弱处萌生裂纹, 出结晶器后在二冷区继续扩展。

结晶器弯月面区坯壳厚度生长不均匀的主要原因是:

(1) 包晶相变 ($L + \delta \rightarrow \gamma$) 收缩特征, 气隙过早形成, 导致坯壳生长不均匀。

(2) 工艺因素影响坯壳生长不均匀。

显然, 要防止纵裂纹产生, 就必须保证结晶器弯月面初生坯壳厚度均匀, 避免坯壳产生应力梯度。由于包晶相变的收缩特征无法改变, 因此必须准确控制影响结晶的初生坯壳生长的工艺因素, 才能防止纵裂纹产生。

2.3 影响表面纵裂纹产生的因素

(1) 钢水成分

钢水中 $[S] > 0.015\%$ 时纵裂纹增加, 见图 2。

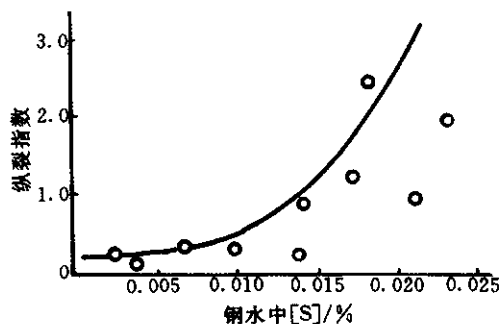


图 2 钢水中 $[S]$ 与裂纹指数的关系

Mn/S 升高时纵裂纹指数降低, 见图 3。 $[C] = 0.12\% \sim 0.15\%$ 时纵裂纹产生倾向严重, 见图 4。

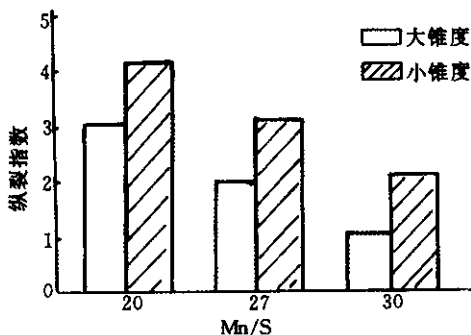


图 3 Mn/S 对纵裂的影响

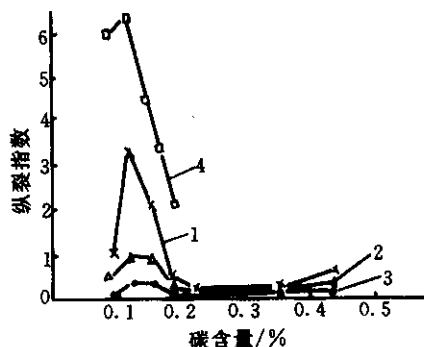


图 4 含碳量对板坯宽面纵裂纹的影响

曲线 1~4 分别代表 4 种保护渣

包晶相变钢 $\delta \rightarrow \gamma$ 转变,收缩大,气隙过早形成,坯壳折皱,结晶器热流不稳定,坯壳厚度生长不均匀性加重。

(2) 拉速

拉速提高,纵裂纹指数增加,渣膜厚度减薄,见图 5、6。

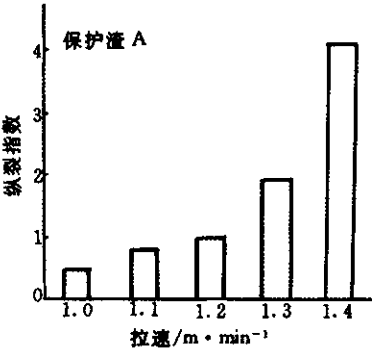


图 5 拉速对纵裂纹的影响

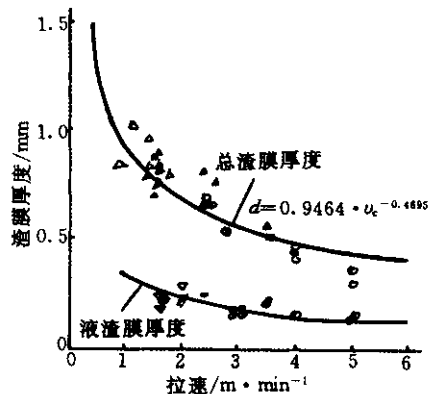


图 6 拉速对渣膜厚度的影响

(3) 保护渣液渣层厚度

液渣层厚度 $< 10\text{mm}$,纵裂纹发生率增加,见图 7。

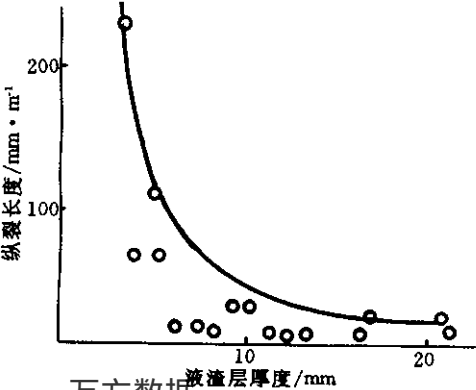


图 7 液渣层厚度对纵裂纹的影响

高凝固温度和高结晶温度的保护渣,减少结晶器弯月面传热可使纵裂发生率减少 50%。

(4) 结晶器液面波动

液面波动 $< \pm 5\text{mm}$,纵裂纹最少,见图 8;液面控制方式对纵裂纹影响如图 9 所示。

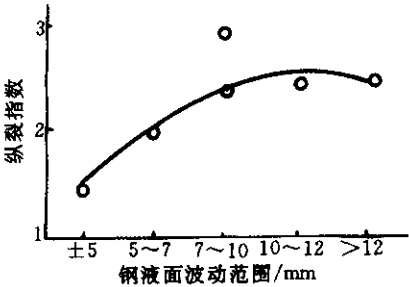


图 8 结晶器液面波动对纵裂纹的影响

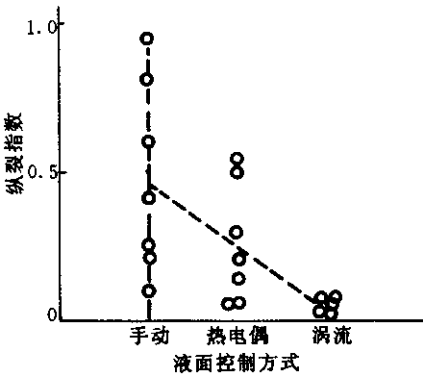


图 9 液面控制方式对纵裂纹的影响

(5) 结晶器热流和冷却

图 10 所示为 90mm×1000mm 板坯结晶器弯月面以下 45mm 热流与纵裂纹指数的关系。

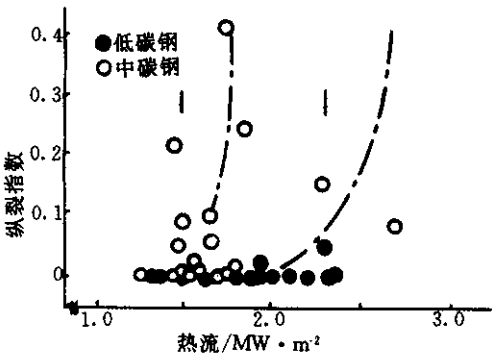


图 10 铸坯热流对纵裂指数的影响

① 低碳钢 ($[C] = 0.05\%$), 结晶器热流 $> 2.1\text{MW}/\text{m}^2$ 时,纵裂纹指数增大;

②中碳钢($[C]=0.11\%$ C), 结晶器热流 $>1.7\text{MW}/\text{m}^2$ 时, 纵裂纹指数增大。

图 11 为 $250\text{mm}\times 1400\text{mm}$ 板坯结晶器的宽面平均热流与板坯纵裂指数的关系。结晶器的侧面热流与纵裂纹指数如图 12 所示。

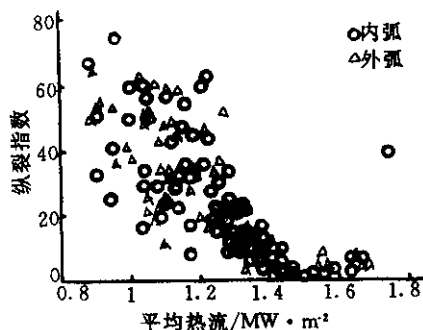


图 11 宽面铜板热流与裂纹的关系

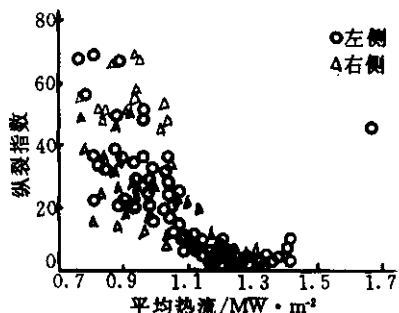


图 12 侧面铜板热流与裂纹的关系

由图 11、12 可知, 当结晶器的宽面铜板平均热流为 $1.4\sim 1.6\text{MW}/\text{m}^2$, 侧面平均热流为 $1.1\sim 1.3\text{MW}/\text{m}^2$ 时, 板坯表面纵裂纹发生率最小。

图 13、14 分别为结晶器两宽面铜板和两侧面铜板热流差值与板坯纵裂纹关系。由图 13、14 可知, 对称铜板热流差值控制在 $\pm 0.05\text{MW}/\text{m}^2$ 时, 板坯表面纵裂纹发生率较小。

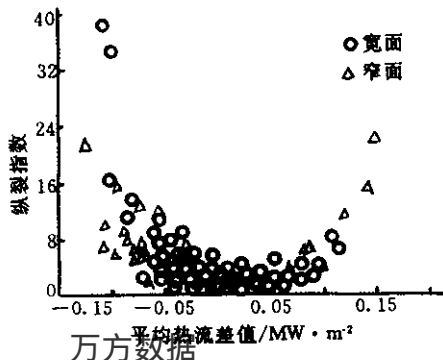


图 13 宽面铜板热流差值与裂纹的关系

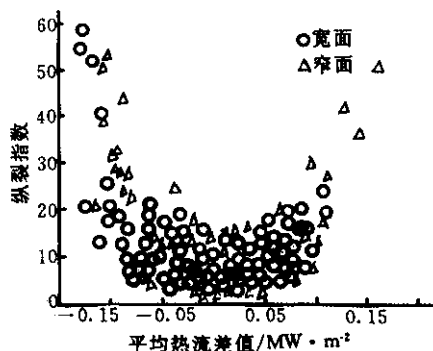


图 14 侧面铜板差值与裂纹的关系

这说明铜板对称面导出热量相同时, 凝固坯壳厚度生长均匀。

侧边铜板热流与宽面铜板热流之比为 $0.8\sim 0.9$ 时, 板坯表面纵裂指数最小, 见图 15。若比值太小, 说明侧面铜板热流过低, 凝固坯壳厚度较薄, 钢水静压力作用使侧面鼓胀, 加大了宽面坯壳变形, 在薄弱处产生微裂纹。若比值过大, 说明侧边热流过高, 侧边凝固坯壳生长过厚, 当宽面鼓胀时, 侧边不能随之收缩而导致宽面坯壳薄弱处应力集中, 从而产生微细裂纹。

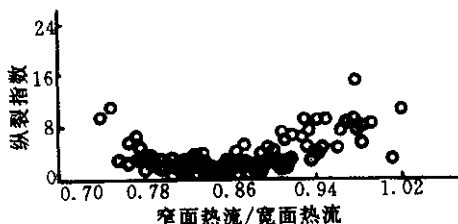


图 15 侧面热流与宽面热流比值与裂纹的关系

结晶器弱冷, 有利于减少纵裂纹, 见图 16。

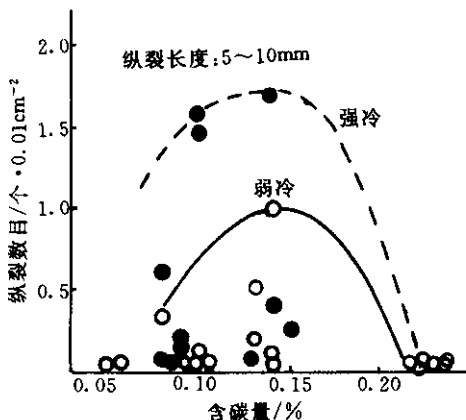


图 16 结晶器弱冷对小纵裂纹的影响

某厂板坯结晶器水量减少(由 100%降至 87%),二冷强度由 100%降至 80%,纵裂指数由 1.92 降至 0.51。

(6) 结晶器的锥度

结晶器锥度对纵裂纹的影响如图 17 所示。

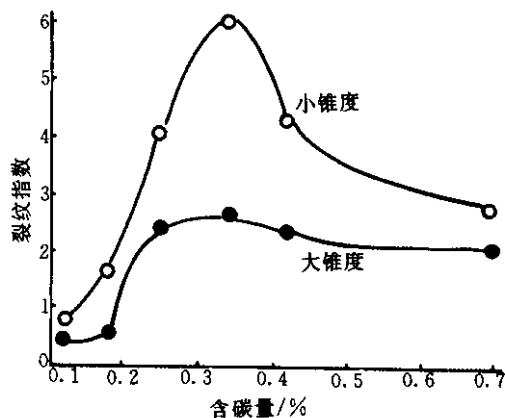


图 17 结晶器锥度和钢成分对皮下内裂的影响

(断面尺寸为 240mm×240mm,拉速为 0.7m/min)

锥度 $< 0.8\%/m$, 窄面凸出 → 角部纵裂; 锥度 $> 0.8\%/m$, 窄面凹入 → 无角部纵裂。

板坯角部纵裂纹与出结晶器宽面鼓肚有关。宽面鼓肚而窄面随之收缩(凹入), 则无角部纵裂纹, 而窄面凸出则有角部纵裂纹产生。

强化足辊宽面冷却, 减弱窄面冷却可消除角部纵裂纹。

(7) 结晶器振动

结晶器振动振痕浅时, 铸坯无角部纵裂纹; 振痕深, 则角部纵裂纹增加; 负滑脱时间值 t_N 增大, 板坯表面纵裂增加; $t_N = 0.2 \sim 0.3s$, 纵裂较少。

(8) 结晶器钢液流动

水口不对中、水口材质浸蚀及出口流股不对称, 均会造成偏流, 增加裂纹产生的几率。此外, 水口插入深度应适当。

(9) 结晶器变形

小方坯常出现角部纵裂纹(靠近角部棱边或离开角部 10~15mm), 与凝固前沿热撕裂有关。它的产生取决于: 方坯菱变、结晶器圆角半径(半径大, 纵裂沿棱角产生; 半径小, 纵裂离开角部)、结晶器变形与磨损程度。

保持结晶器合适锥度、较大的圆角半径(6~8mm)、准确对弧和支撑、防止结晶器磨损及均匀

的冷却等均可减轻或消除小方坯角部纵裂的产生。

(10) 出结晶器下口的冷却

足辊和零段二冷水过强, 板坯宽面纵裂加剧, 如水流密度由 $110L/(m^2 \cdot min)$ 降到 $60L/(m^2 \cdot min)$ 时, 纵裂指数由 2 降到 0。

2.4 防止表面纵裂纹措施

防止纵裂纹产生的根本措施是使结晶器弯月面区域坯壳生长厚度均匀。

(1) 结晶器初始坯壳均匀生长

热顶结晶器(弯月面区热流减少 50%~60%); 波浪结晶器(弯月面区热流减少 17%~25%); 结晶器弱冷; 合适的结晶器锥度; 控制结晶器窄面热流与宽面热流比值为 0.8~0.9, 以减少纵裂纹; 调节结晶器水量和进出水温度, 控制结晶器弯月面铜板温度为恒定值。

(2) 结晶器钢水流动的合理性

液面波动 $\pm 3 \sim \pm 5mm$; 浸入式水口对中, 防止偏流; 合理的浸入式水口设计(合适的出口直径、倾角); 合适的水口插入深度。

(3) 结晶器振动

合适的负滑脱时间 t_N ; 合适的频率和振幅; 防止振动偏差(纵向, 横向 $< 0.2mm$)。

(4) 合适的保护渣

对结晶器坯壳表面易产生凹陷(纵裂)和粘结的钢种, 选用保护渣的原则是:

凹陷钢(包晶钢): 热流控制; 固体渣层厚度; 高熔点; 高粘度; 较高结晶温度(高碱度)。

粘结钢: 摩擦力控制; 液渣膜厚度; 低熔点; 低粘度; 低碱度(玻璃性)。

除设计合适的保护渣组成和熔化性能外, 在生产上, 还必须根据浇铸钢种和拉速, 控制好下列参数:

$$\eta \cdot v (\text{粘度} \cdot \text{拉速}) = 0.2 \sim 0.4 Pa \cdot s \cdot m/min;$$

结晶器钢液面上液渣层厚度 10~15mm;

均匀渣膜厚度 ($d = 0.95 \cdot v_c^{-0.47}$);

适当的渣子消耗 ($0.3 \sim 0.5 kg/m^2$, 或 $0.5 \sim 0.7 kg/t$)。

(5) 出结晶器铸坯运行

结晶器与零段的支撑对弧准确;

二次冷却均匀性;

(6) 调整钢水成分

钢中碳含量避开包晶区, $[C]$ 向下限或上限控制;

钢中 $[S] < 0.015\%$, $[Mn]/[S] > 30$;

残余元素 $[Cu]$ 、 $[As]$ 、 $[Zn]$ 控制 $< 0.1\%$ 。

3 铸坯表面横裂纹

3.1 表面横裂纹特征

铸坯表面横裂纹特征如下:

(1) 横裂纹可位于铸坯面部或棱边。

(2) 横裂纹与振痕共生, 深度 $2 \sim 4\text{mm}$, 可达 7mm , 裂纹深处生成 FeO 。不易剥落, 热轧板表面出现条状裂纹。振痕深, 柱状晶异常, 形成元素的偏析层, 轧制板上留下花纹状缺陷。

(3) 铸坯横裂纹常常被 FeO 覆盖, 只有经过酸洗后, 才能发现。

3.2 横裂纹产生原因

(1) 横裂纹产生于结晶器初始坯壳形成振痕的波谷处, 振痕越深, 则横裂纹越严重。在波谷处, 由于: ① 奥氏体晶界析出沉淀物 (AlN , $\text{Nb}(\text{CN})$), 产生晶间断裂; ② 沿振痕波谷 S 、 P 元素呈正偏析, 降低了钢的高温强度。这样, 振痕波谷处, 奥氏体晶界脆性增大, 为裂纹产生提供了条件。

(2) 铸坯运行过程中, 受到外力(弯曲、矫直、鼓肚及辊子不对中等)作用时, 刚好处于低温脆性区的铸坯表面处于受拉伸应力作用状态, 如果坯壳所受的 $\varepsilon_{\text{临}} > 1.3\%$, 在振痕波谷处就会产生裂纹。

3.3 影响横裂纹产生的因素

(1) 钢成分

① $[C] = 0.10\% \sim 0.15\%$ 时, 坯壳厚度不均匀性强, 振痕深, 表面易产生凹陷或横裂纹。生产实践表明, $[C] = 0.15\% \sim 0.18\%$ 或 $0.15\% \sim 0.20\%$ 时, 振痕变浅, 铸坯边部横裂减少; ② 降低钢中 $[N]$, 防止氮化物沉淀, 也能减少横裂。

(2) 结晶器的振动特点

① 振痕深度增加, 横裂纹产生几率增大, 见图 18。

② 振动频率 f 提高, 振痕变浅, 横裂纹减少, 见图 19。

③ 负滑脱时间增加, 振痕深度增加, 见图 20。方坯 $t_N = 0.12 \sim 0.15\text{s}$, 板坯 $t_N = 0.20\text{s}$ 。

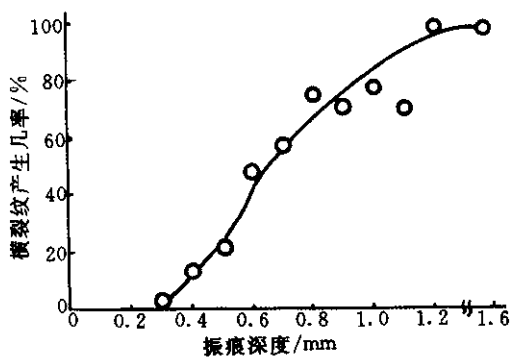


图 18 振痕深度与横裂纹产生几率的关系

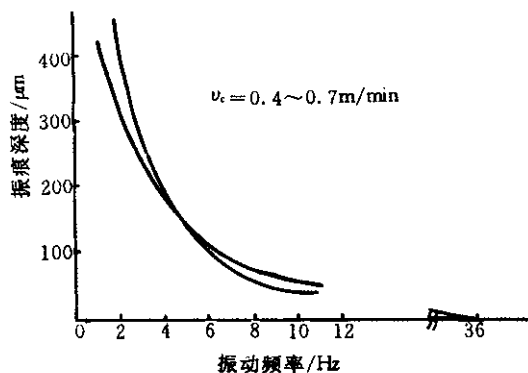


图 19 振动频率与振痕深度的关系

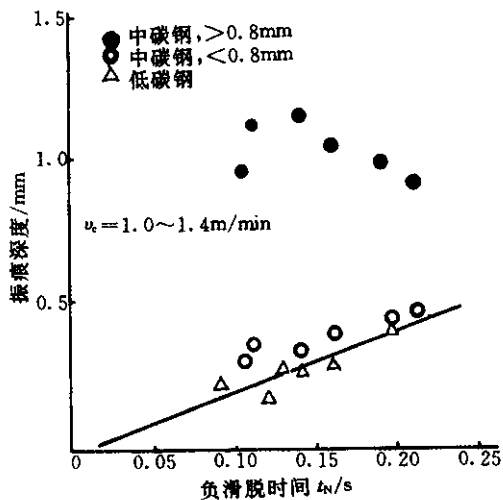


图 20 负滑脱与振痕深度的关系

(3) 结晶器液面波动

结晶器液面波动幅度增大, 横裂纹指数增大, 见图 21。

(4) 保护渣性能

保护渣耗量增加, 横裂纹产生倾向减小, 见图 22。保护渣耗量基本公式:

$$Q = 0.55 \times \left(\frac{60}{f}\right) \times \left(\frac{1}{\sqrt{\eta \cdot v}}\right) + 0.1 \text{ (kg/m}^2\text{)}$$

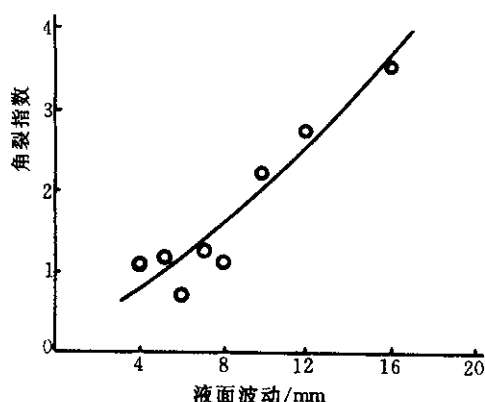


图 21 结晶器液面波动与角裂发生率的关系

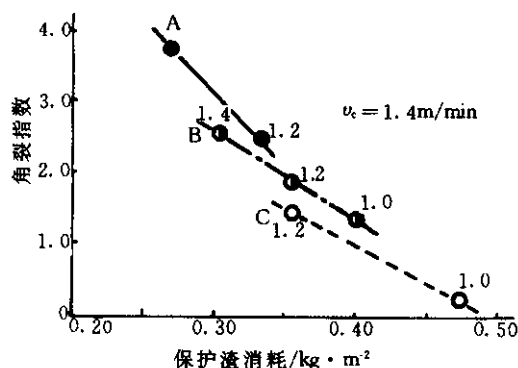


图 22 保护渣消耗量与角裂发生率的关系

A、B、C 分别为三种保护渣，其碱度分别为 1.0、1.2、1.3，
粘度(1250℃)分别为 0.16、0.14、0.10 Pa·s

渣粘度 η 和拉速 v 乘积增加，渣耗量 Q 减少，
坯壳易与铜板粘结。为防止粘结，又要降低振痕深度，
渣耗量要合适。渣耗量通常要大于 0.3 kg/m^2 ，
这是最低要求。

(5) 合适的二冷强度

① 调整二冷水分布，在矫直前铸坯温度应 $> 900^\circ\text{C}$ ，避开脆性区。

② 调整二冷水量并减小铸坯横向中心与边部温度差，尤其是避免角部温度过低。

3.4 防止横裂纹产生的措施

(1) 采用高频率，小振幅结晶器振动。

$$t_N = \frac{60}{\pi \cdot f} \cdot \cos^{-1} \left(\frac{1000V}{\pi \cdot f \cdot s} \right) \quad t_N \propto f \left(\frac{V}{f \cdot s} \right)$$

负滑脱时间 t_N 与拉速 v 成正比，与频率和振幅 f 成反比。减小振痕能防止横裂纹的产生，因此必须缩短 t_N ；由此必须采用高频率 (100 ~

400 min^{-1})，小振幅 ($\pm 5 \text{ mm}$) 的结晶器振动机构。

(2) 合适的二次冷却水量。

根据钢种不同，二冷配水量分布应使铸坯表面温度分布均匀，应尽量减少铸坯表面和边部的温度差。采用动态二冷配水模型。

(3) 合适的保护渣。

保护渣的用量和粘度既要保证减浅振痕，又要防止坯壳粘结。保护渣用量最少为 0.3 kg/m^2 。

(4) 合适的铸坯矫直温度，以避开脆性区。

(5) 矫直辊水平度管理。

矫直辊水平度对铸坯横裂的影响见图 23。

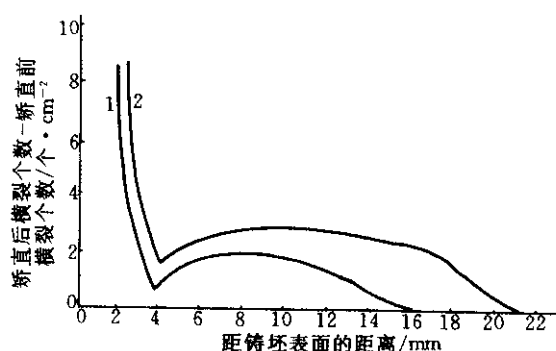


图 23 矫直辊水平度对铸坯横裂的影响

1—炉次 A，矫直辊水平度正常；

2—炉次 B，矫直辊水平度异常，东侧比正常时高 5mm

矫直辊水平度异常时铸坯矫直应变比正常的大(正常时为 1.19%，异常时为 2.69%)，横裂多且深，所以矫直辊水平度应控制在 2mm 以内。

4 铸坯表面星形裂纹

4.1 铸坯表面星形(网状)裂纹特征

(1) 铸坯表面的星形裂纹被 FeO 覆盖，经酸洗后才能发现。表面裂纹分布无方向性，形貌呈网状，裂纹深度可达 1~4mm，有的甚至达 20mm。

(2) 金相观察表明，裂纹沿初生奥氏体晶界扩展。裂纹中充满 FeO ，轧制成板材后，表面裂纹走向不规则，成弥散分布，细若发丝，深度很浅，最深处 1.1mm，必须进行人工修复。

4.2 铸坯表面星形裂纹产生的原因

铸坯表面星形裂纹沿一次晶界分布，裂纹边界有脱 C 现象，说明是在结晶器内高温下 (1400°C) 坯壳处奥氏体转变之前形成的。铸坯表面星状裂纹形成的原因有不同的观点，大致如下：

(1) 铜渗透和铜富集

① 铜渗透。结晶器下部铜板渣层破裂,发生固/固摩擦接触,Cu 局部粘附在坯壳上,Cu 熔点为 1040℃,Cu 熔化后沿奥氏体晶界渗透,晶界被破坏而失去塑性,产生热脆现象。金相分析表明,在裂纹里常发现有铜($[Cu]=1.6\%$),证明了该观点的正确性。

② 铜富集。钢中含 Cu0.05%~0.2%,高温铸坯由于 Fe 氧化,在 FeO 皮下形成熔点低、含 Cu 的富集相(70%Cu,15%Ni,10%Sn,5%Fe),形成液相沿晶界穿行,在高温时(1100~1200℃)具有最大的裂纹敏感性。

(2) 奥氏体晶界沾污

① 结晶器弯月面初生坯壳由于 $\delta \rightarrow \gamma$ 转变→收缩→鼓胀→坯壳弯曲,在张力和钢水静压力作用下,奥氏体晶界裂开,固/液界面富集溶质的液体进入裂纹,加上晶界析出物,污染了晶界,成为晶界薄弱点,是产生星状裂纹的起点。

② 铸坯运行过程中进一步受到张力作用(鼓肚、不对中、不均匀冷却等),裂纹进一步扩展。

(3) 表面凹陷和不规则褶皱(振痕)

① 板坯表面有凹陷和不规则振痕。清理后,发现有的分布着细小裂纹,裂纹深度 2mm,内含 Si、Al、Ca 及 Na 的氧化物。在轧材表面会遗留如头发丝细小的裂纹,有时还会发现 Al_2O_3 、 SiO_2 、Na 及 K 等成分,与保护渣的成分相近。

② 采用防止纵向裂纹产生的措施,尤其是控制结晶器振动(高频率,小振幅)和低粘度碱性保护渣,可使星形裂纹明显减少。

(4) H_2 过饱和析出

① 试验分析表明,表面网状裂纹也有不含 Cu、不含保护渣的情况。当钢水中 $[H]>0.00055\%$ 时,出现网状裂纹废品;当 $[H]>0.001\%$ 时,网状裂纹废品增加;

② 在结晶器的弯月面区,结晶速度很快(冷却速度 $>100^\circ C/s$),凝固初生坯壳中,H 过饱和。当坯壳温度降低时,原子 H 从固体中析出,向晶间的微孔隙扩散变成 H_2 ,造成附加应力,再加上钢水静压力和收缩力,超过了一定温度下钢的允

许强度,则沿晶界断裂,形成网状裂纹。

③ 降低钢中 $[H]$ 和 $[S]$,提高 $[Mn]/[S]$ 比,可使网状裂纹明显减少。

(5) 晶间硫化物脆性

① 树枝晶间富集 S→奥氏体晶界富集有熔点为 980~1000℃的 (Fe, Mn)S (Mn28%~29%, Fe34%~35%, S36%),在晶界处形成硫化物液体薄膜,在外力作用下形成网状裂纹。

② 降低 $[S]$,提高 $[Mn]/[S]$ 比,延长加热时间,提高加热温度,使晶界 (Fe, Mn)S 转变为 MnS,可减少轧制板材中的星形裂纹。

铸坯表面星形裂纹形成机理是非常复杂的,很可能是多种因素作用的结果。

4.3 防止星形裂纹产生的措施

(1) 采用镀 Ni 或镀 Cr 的 Cu-Ag、Cr-Zr-Cu 铜板结晶器。

(2) 针对钢成分对裂纹的敏感性,将 C、S、Mn/S 及 N 含量控制在合理范围内。

(3) 优化浇铸工艺参数,调整浇铸温度、拉速及二冷水量。

(4) 采用合适的保护渣。

(5) 保持连铸机设备状况良好。

5 结论

(1) 连铸坯表面裂纹的产生主要取决于:钢成分对裂纹敏感性、浇铸工艺条件及连铸机设备状况。

(2) 带液芯的连铸坯在连铸机内运行过程中受到外力作用是坯壳产生裂纹的外因,钢的高温力学行为是产生裂纹的内因,而设备和工艺因素是产生裂纹的条件。

(3) 根据所浇钢种,对连铸机设备的调整应符合钢水凝固收缩规律,以坯壳不发生变形为原则。优化工艺参数,使其处于能够保证连铸坯不产生裂纹或不足以造成废品的允许范围内,得到合理的铸坯凝固结构。

参考文献(略)

(编辑 许平静)

收稿日期:2003-12-08