

轧制

结晶器振动对 2Cr13 不锈钢铸坯及轧制质量的影响

林 鹏^{1,2}, 郑亚旭^{3,4}, 王冬晨¹, 张 龙³

(1. 河北机电职业技术学院 材料与建筑工程系, 河北 邢台 054000; 2. 邢台市模具材料技术创新中心, 河北 邢台 054000;
3. 河北科技大学 材料科学与工程学院, 河北 石家庄 050091; 4. 盐城市联鑫钢铁有限公司, 江苏 盐城 224100)

摘要: 针对某钢厂生产的规格为 150 mm×150 mm 的 2Cr13 不锈钢铸坯出现的凹陷状、钩状振痕及轧制线材结疤、裂纹等质量问题, 分析了铸坯表面缺陷的产生机理, 提出了铸坯连铸生产的结晶器振动优化方案, 并进行了工业验证。结果表明: 2Cr13 不锈钢铸坯的表面缺陷是由结晶器负滑脱时间偏长造成的; 在常规拉坯速度 ($1.2 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$) 下, 相对于结晶器正弦振动, 采用结晶器非正弦振动的优化方案, 负滑脱时间和负滑脱率分别从 0.18 s 和 38% 降低至 0.12 s 和 33%; 通过适当降低负滑脱时间和负滑脱率, 有效地改善了 2Cr13 不锈钢铸坯的表面质量, 轧制线材的表面质量不良率也由 4.5% 降低至 0.8%, 表面裂纹的最大深度由 327.89 μm 降低至 94.34 μm 。

关键词: 2Cr13 不锈钢; 轧制质量; 结晶器振动; 铸坯; 负滑脱时间; 负滑脱率

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2024.10.012

中图分类号: TG335.15

文献标志码: A

文章编号: 1000-3940 (2024) 10-0092-07

Influence of crystallizer vibration on quality of casting billet and rolling for 2Cr13 stainless steel

Lin Peng^{1,2}, Zheng Yaxu^{3,4}, Wang Dongchen¹, Zhang Long³

(1. Department of Materials and Building Engineering, Hebei Institute of Mechanical and Electrical Technology, Xingtai 054000, China;
2. Xingtai Technology Innovation Center for Mold Material, Xingtai 054000, China;
3. School of Materials Science and Engineering, Hebei University of Science and Technology, Shijiazhuang 050091, China;
4. Yancheng Lianxin Steel Co., Ltd., Yancheng 224100, China)

Abstract: In response to the quality issues such as concave and hooked vibration marks, as well as rolling wire scars and cracks in the production of 150 mm×150 mm 2Cr13 stainless steel casting billets by a certain steel plant, the production mechanism of surface defects on the casting billets was analyzed, and an optimization scheme for crystallizer vibration in the continuous casting production of casting billet was proposed and verified in industry. The results indicate that the surface defects of 2Cr13 stainless steel casting billets are caused by the prolonged negative slip time of crystallizer. At a conventional casting speed of $1.2 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$, compared to the sinusoidal vibration of crystallizer, a non-sinusoidal vibration optimization scheme is adopted for the crystallizer vibration. The negative slip time and negative slip rate are reduced from 0.18 s and 38% to 0.12 s and 33%, respectively. By appropriately reducing the negative slip time and negative slip rate, the surface quality of 2Cr13 stainless steel casting billets is effectively improved. The surface quality defect rate of rolled wire is reduced from 4.5% to 0.8%, and the maximum depth of surface cracks is decreased from 327.89 μm to 94.34 μm .

Key words: 2Cr13 stainless steel; rolling quality; crystallizer vibration; casting billet; negative slip time; negative slip rate

2Cr13 是典型的马氏体不锈钢, 属于“刀具级”

马氏体钢, 由于具有优异的耐磨性, 被广泛用于生产刀具, 也常用于汽轮机叶片、注塑模具、挤压模具和动模镶块的制作。与碳素钢相比, 不锈钢铸坯在轧制前保温和粗轧阶段产生的氧化铁皮较少, 铸坯振痕无法被氧化成氧化铁皮而去除。铸坯振痕深度是衡量轧制质量优劣的重要指标之一^[1], 不锈钢铸坯的振痕深度大于 0.4 mm 时, 后续轧制工序中容易形成线材结疤、裂纹和掉块等缺陷^[2]。

某钢厂在生产规格为 150 mm×150 mm 的 2Cr13

收稿日期: 2024-06-11; 修订日期: 2024-09-15

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (52204341); 河北省自然科学基金资助项目 (E2024208002); 河北省高等学校科学技术研究项目 (ZC2024141)

作者简介: 林 鹏 (1984-), 男, 博士, 讲师

E-mail: PengLin3005@163.com

通信作者: 郑亚旭 (1984-), 女, 博士, 讲师

E-mail: zhengyaxu1984@163.com

不锈钢连铸小方坯时，铸坯振痕深度高达 0.5 ~ 0.8 mm，铸坯表面常出现凹陷、深振痕等严重缺陷，导致轧制过程出现微裂纹、结疤等线材表面缺陷，严重影响了线材成品率。2Cr13 不锈钢铸坯的表面质量可以通过优化结晶器振动、调整结晶器保护渣性能和铸坯水冷强度等措施加以改善。降低保护渣黏度、提高碱度、降低结晶器或二冷水强度，均有利于减少 2Cr13 不锈钢连铸小方坯的表面缺陷^[3]。关于结晶器保护渣和水冷强度对 2Cr13 不锈钢铸坯质量的影响，目前已有较多的相关研究；结晶器振动对 2Cr13 不锈钢铸坯和轧制质量的影响研究多集中在板坯或大方坯^[4-6]，而对小方坯影响的研究较少。因此，有必要结合钢铁企业的实际生产条件，研究得到适合 2Cr13 不锈钢小方坯连铸生产的结晶器振动参数，以提高铸坯及轧制线材的产品质量。

本文以断面为 150 mm×150 mm 的 2Cr13 不锈钢连铸小方坯为研究对象，结合马氏体不锈钢的钢种特性和实际生产工艺，探讨了铸坯表面缺陷的产生机理，提出了铸坯结晶器振动优化方案，进行了工业试验并取得了良好的线材轧制效果，为马氏体不锈钢小方坯和轧制线材质量的改善提供了一定的理论支撑和解决思路。

1 试验材料及方法

试验材料为某钢厂生产的规格为 150 mm × 150 mm 的 2Cr13 不锈钢连铸小方坯，其主要化学成分见表 1。

表 1 2Cr13 不锈钢的化学成分（%，质量分数）
Table 1 Chemical compositions of 2Cr13 stainless steel
(%, mass fraction)

C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Fe
0.20	0.64	0.56	0.015	0.004	0.21	13.00	余量

2Cr13 不锈钢线材的生产工艺流程为：70 t 电炉→60 t AOD 炉（Argon Oxygen Decarburization Furnace）→50 t LF 炉（Ladle Furnace）→150 mm×150 mm 四机四流方坯连铸机→铸坯退火→铸坯修磨→轧机轧制。连铸机结晶器采用液压振动，振幅为（±2~±9）mm，振频为每分钟（40~300）次，振幅和振频能够实现在线调节^[1]。线材轧制为控轧控冷工艺，精轧温度为 1050 ℃，吐丝温度为 950 ℃，终轧尺寸为 Φ10.5 mm。在铸坯表面非切割影响区切取长度为 150 mm 的纵向试样，将其在 80 ℃、体积分数为

50%的盐酸溶液中酸洗 20 min，清洗后得到酸洗低倍试样。利用游标卡尺测量铸坯的振痕深度。定义振痕弯曲度 Δ*m* 为正常水平振痕与弯曲振痕在拉坯方向上的最大垂直距离，可利用振痕弯曲度 Δ*m* 定量表示振痕的弯曲程度^[7]，其测量方式如图 1 所示。在每根铸坯上分别取 3 个位置，测量铸坯振痕的深度和弯曲度。利用 Leica MEF-4M 型光学金相显微镜观察和分析线材的裂纹深度。在每卷 2Cr13 不锈钢线材的头部和尾部各取两个试样，酸洗后观察试样的裂纹和结疤情况，若试样存在结疤或深度大于 80 μm 的裂纹，则判定此试样不合格。定义不合格试样的总数与所有被检验试样总数的比值，为线材表面质量不良率。

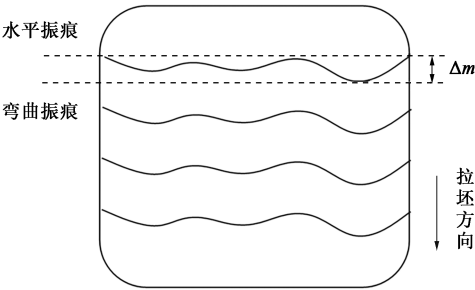


图 1 振痕弯曲度示意图
Fig. 1 Schematic diagram of vibration mark curvature

2 现行工艺下铸坯及线材质量

2.1 铸坯及线材缺陷

在现行生产工艺下，2Cr13 不锈钢铸坯表面存在紊乱的、沿铸坯拉坯方向不规则弯曲的振痕，并出现凹陷状和钩状振痕，如图 2 所示。将 2Cr13 不锈钢铸坯轧制为规格为 Φ10.5 mm 的线材，线材表面多次检验出结疤、裂纹等缺陷，如图 3 所示。由

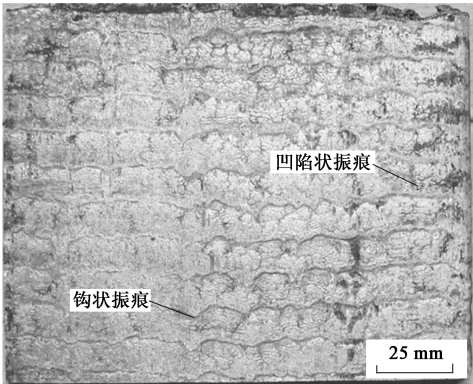
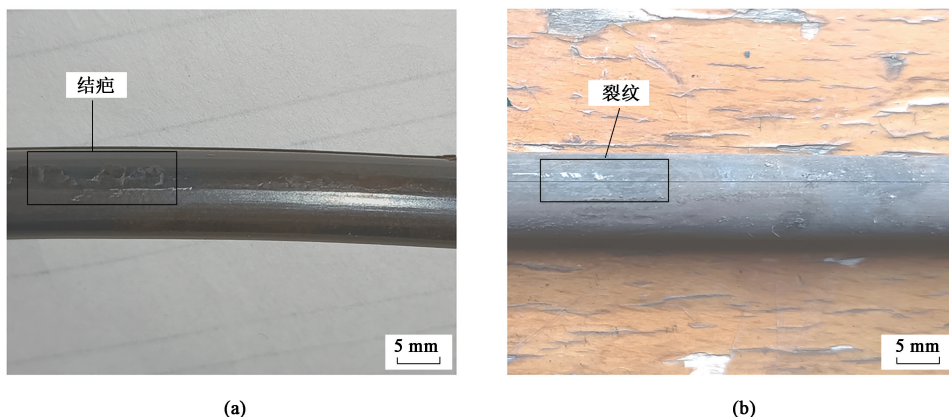


图 2 2Cr13 不锈钢铸坯表面缺陷
Fig. 2 Surface defects of 2Cr13 stainless steel casting billet



(a)

(b)

图 3 2Cr13 不锈钢线材表面缺陷

(a) 轧制结疤 (b) 轧制裂纹

Fig. 3 Surface defects of 2Cr13 stainless steel wire

(a) Rolling scar (b) Rolling crack

于 2Cr13 马氏体不锈钢在高温下生成的氧化铁皮较少, 其铸坯振痕缺陷在轧制前加热炉保温过程中无法氧化烧掉, 同时, 振痕深处的少量氧化铁皮也无法通过除磷水有效去除, 所以, 后续轧制过程中铸坯表面的振痕缺陷无法被轧辊压合, 最终导致线材结疤和裂纹等缺陷产生^[8]。

2.2 缺陷产生机理

2Cr13 不锈钢线材的轧制质量, 与其母材铸坯的表面质量密切相关, 而铸坯的表面质量与铸坯的钢种特性、铸坯生产过程中的结晶器振动参数有关^[9-11]。

钢种特性方面, 2Cr13 马氏体不锈钢在初生坯壳成形温度 1300 °C 下的高温强度为 0.024 MPa, 而奥氏体不锈钢、铁素体不锈钢在此温度下的高温强度分别为 0.120 和 0.025 MPa^[3]。马氏体不锈钢的高温强度低, 导致 2Cr13 不锈钢铸坯在结晶器内容易出现表面凹陷和深振痕; 2Cr13 不锈钢的线膨胀系数远高于碳素钢的线膨胀系数^[12], 且 2Cr13 不锈钢属于包晶钢, 这就使得其初生坯壳在冷却凝固时的体积收缩大, 铸坯内外应力大, 容易造成振痕过深, 从而导致轧制线材表面产生结疤。

结晶器振动方面, 2Cr13 不锈钢铸坯正常的振痕为规则的平凹状的直振痕, 而凹陷状深振痕和钩状振痕属于铸坯表面质量缺陷, 如图 4 所示^[13-14]。在负滑脱期, 结晶器向下振动的速度大于铸坯拉坯速度, 初生坯壳在结晶器内壁处的保护渣内压力作用下, 向远离结晶器内壁方向变形; 在正滑脱期, 结晶器向上振动, 保护渣的负压又把初生坯壳拉回到结晶器内壁, 形成了凹陷状深振痕。当

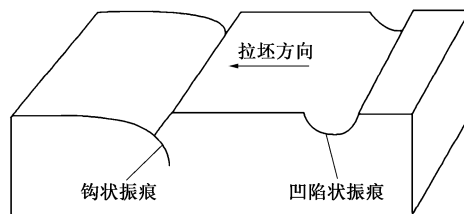


图 4 2Cr13 不锈钢铸坯表面缺陷示意图

Fig. 4 Schematic diagram of surface defects for 2Cr13 stainless steel casting billet

结晶器振动参数选择不当时, 结晶器振动脱壳效果差, 初生坯壳与结晶器内壁之间的粘结加重, 使得初生坯壳被振动的结晶器撕裂, 溢流出的钢水在结晶器内壁水冷的作用下重新凝固, 造成振痕不规则弯曲并形成钩状振痕, 最终导致轧制线材表面产生裂纹。

3 铸坯结晶器振动优化

3.1 现行结晶器振动特点

针对某钢厂生产的规格为 150 mm×150 mm 的 2Cr13 不锈钢铸坯, 采用的结晶器振动方式为正弦振动, 其工艺参数为负滑脱率 N_s 和负滑脱时间 t_N , 计算公式为分别为^[2,15]:

$$N_s = 1 - \frac{4hf}{1000v_c} \quad (1)$$

$$t_N = \frac{60}{\pi f} \cdot \cos^{-1} \left(\frac{1000v_c}{\pi fh} \right) \quad (2)$$

式中: v_c 为铸坯拉坯速度, ($\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$); h 为结晶器振幅, mm; f 为结晶器振频, ($\text{次} \cdot \text{min}^{-1}$)。

由式 (1) 和式 (2) 计算得出不同拉坯速度下结晶器正弦振动的工艺参数值, 见表 2。由表 2 可以看出, 结晶器正弦振动下, 铸坯拉坯速度提高, 结晶器振频随之升高, 振幅不变, 结晶器振动的负滑脱率和负滑脱时间逐渐降低。文献 [16] 和文献 [17] 指出, 针对小方坯成形, 结晶器振动的负滑脱时间的适用值为 0.08~0.13 s。在常规拉坯速度 ($1.2 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$) 下, 2Cr13 不锈钢铸坯的结晶器振动的负滑脱时间偏长, 为 0.18 s, 不利于保护渣的消耗及初生坯壳与结晶器的润滑, 容易导致铸坯产生表面缺陷。

表 2 结晶器正弦振动参数

Table 2 Sinusoidal vibration parameters of crystallizer

拉坯速度/ ($\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$)	振幅/ mm	振频/ ($\text{次} \cdot \text{min}^{-1}$)	负滑脱率 $N_s/\%$	负滑脱时间 t_N/s
0.8	8.0	114	41	0.22
1.0	8.0	122	39	0.19
1.2	8.0	130	38	0.18
1.4	8.0	138	37	0.16
1.6	8.0	146	36	0.15

利用 Origin 软件, 对表 2 中的结晶器振频 f 和铸坯拉坯速度 v_c 进行一次拟合回归, 得到关系式如式 (3) 所示, 其中拟合回归的相关系数 $R^2=1$ 。

$$f = 40v_c + 82 \quad (3)$$

由式 (3) 可以看出, 现行的结晶器正弦振动的同步控制模型为 $f=av_c+b$ (其中, a 、 b 为比例系数)。这种振动方式的特点是当拉坯速度发生变化时, 能够保持结晶器负滑脱时间稳定在一定的范围内, 同时在较高拉坯速度下, 小方坯结晶器振动相对平稳, 但是铸坯成形质量无法得到有效保证。

3.2 结晶器振动优化原理

在其他连铸工艺参数固定的前提下, 铸坯振痕深度为^[7]:

$$d = k \frac{t_N}{\sqrt{\eta}} \quad (4)$$

式中: d 为铸坯振痕深度, mm; k 为比例常数, ($\text{mm} \cdot \text{Pa}$); η 为结晶器保护渣黏度, ($\text{Pa} \cdot \text{s}$)。

由式 (4) 可以看出, 在保护渣性能、拉坯速度固定的前提下, 振痕深度主要由结晶器负滑脱时间决定。振痕是在结晶器负滑脱期间产生的^[18], 负滑脱时间越长, 铸坯振痕波峰波谷处所受的结晶器

振动力越大, 结晶器内部的保护渣对初生坯壳的内压力作用时间越长, 使得初生坯壳变形越大, 造成振痕深度增加。而由式 (2) 可以看出, 负滑脱时间主要由铸坯拉坯速度 v_c 、结晶器振频 f 和振幅 h 决定。在铸坯拉坯速度、保护渣性能固定的前提下, 振频提高, 结晶器负滑脱时间降低; 振幅降低, 则结晶器负滑脱时间相应降低。因此, 负滑脱时间应适中, 过长会造成保护渣消耗过小, 过短会造成漏钢事故。

铸坯初生坯壳的振痕弯曲度, 与结晶器内的钢液及保护渣液面波动正相关。而钢液及保护渣液面波动可以通过优化结晶器振频和振幅来控制。提高振频、减小振幅可以减轻弯月面处坯壳向铸坯内侧弯曲的程度, 从而有效地控制振痕弯曲度^[19]。

综上所述, 为有效控制 2Cr13 不锈钢铸坯振痕深度和弯曲度, 保证足够的保护渣渣耗和合适的负滑脱时间, 应适当提高结晶器振频并降低振幅。

3.3 结晶器振动优化方案

确定结晶器振幅值时, 实际拉坯速度与振幅的比值不应过低, 在一定的振频条件下, 应尽量采用小振幅; 实际拉坯速度与振幅的比值也不应过高, 否则会导致负滑脱时间过短。通常振幅值的合理范围为 4~8 mm^[20]。

为了有效降低铸坯表面质量缺陷, 根据 3.2 节的分析, 提出采用结晶器非正弦振动的优化方案。2Cr13 不锈钢铸坯生产时结晶器非正弦振动的振幅 h' 、振频 f' 和负滑脱时间 t'_N 分别为^[21]:

$$h' = C_1 + C_2 v_c \quad (5)$$

$$f' = (1-p)(C_3 + C_4 v_c) \quad (6)$$

$$t'_N = \frac{60(1-p) \arccos \left[\frac{1000(1-p)v_c}{2\pi p f} \right]}{\pi f} \quad (7)$$

式中: C_1 为拉坯速度为 $0 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ 时的振幅, mm; C_2 为振幅与拉坯速度的比值; C_3 为拉坯速度为 $0 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ 时的振频, ($\text{次} \cdot \text{min}^{-1}$); C_4 为振频与拉坯速度的比值; p 为非正弦波形的偏斜率。

取 $C_1=6 \text{ mm}$, $C_2=1$, $C_3=140 \text{ 次} \cdot \text{min}^{-1}$, $C_4=20$, $p=0.2$, 计算得到 2Cr13 不锈钢铸坯生产时结晶器非正弦振动的参数值, 见表 3。由表 3 可以看出, 结晶器非正弦振动下, 铸坯拉坯速度提高, 结晶器振频和振幅随之升高, 结晶器振动的负滑脱率和负滑脱时间逐渐降低。在常规拉坯速度 ($1.2 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$) 时, 2Cr13 不锈钢铸坯结晶器非正弦振动的负滑脱时间为 0.12 s。

表 3 结晶器非正弦振动参数

Table 3 Non-sinusoidal vibration parameters of crystallizer

拉坯速度/ ($\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$)	振幅/mm	振频/ ($\text{次} \cdot \text{min}^{-1}$)	负滑脱率 $N_s/\%$	负滑脱时间 t'_N/s
0.8	6.8	156	35	0.13
1.0	7.0	160	34	0.13
1.2	7.2	164	33	0.12
1.4	7.4	168	32	0.12
1.6	7.6	172	32	0.11

4 工业验证

4.1 铸坯质量

在某钢厂 150 mm×150 mm 的小方坯连铸机开展了 19 炉 2Cr13 不锈钢结晶器振动的工业生产试

验，连铸机每流生产铸坯 206 根。铸坯拉坯速度取常规工艺值 $1.2 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ 时，试验过程中其他连铸工艺参数不变，第 1 流采用优化后的非正弦振动参数（表 3），第 2 流、第 3 流和第 4 流均采用优化前的正弦振动参数（表 2），试验过程控制良好。各流铸坯的成形质量对比如图 5 所示。由图 5 可以看出，采用结晶器正弦振动参数生产的第 2~4 流 2Cr13 不锈钢铸坯表面成形质量较差，振痕弯曲，并伴有钩状和凹陷状振痕，测得第 2~4 流铸坯的振痕平均深度为 0.58 mm，振痕平均弯曲度为 0.53 mm；采用优化方案非正弦振动参数下的第 1 流铸坯质量较好，振痕浅且均匀，未发生粘连、钢水遗漏后二次凝固等现象，测得第 1 流铸坯的振痕平均深度为 0.24 mm，振痕平均弯曲度为 0.27 mm。

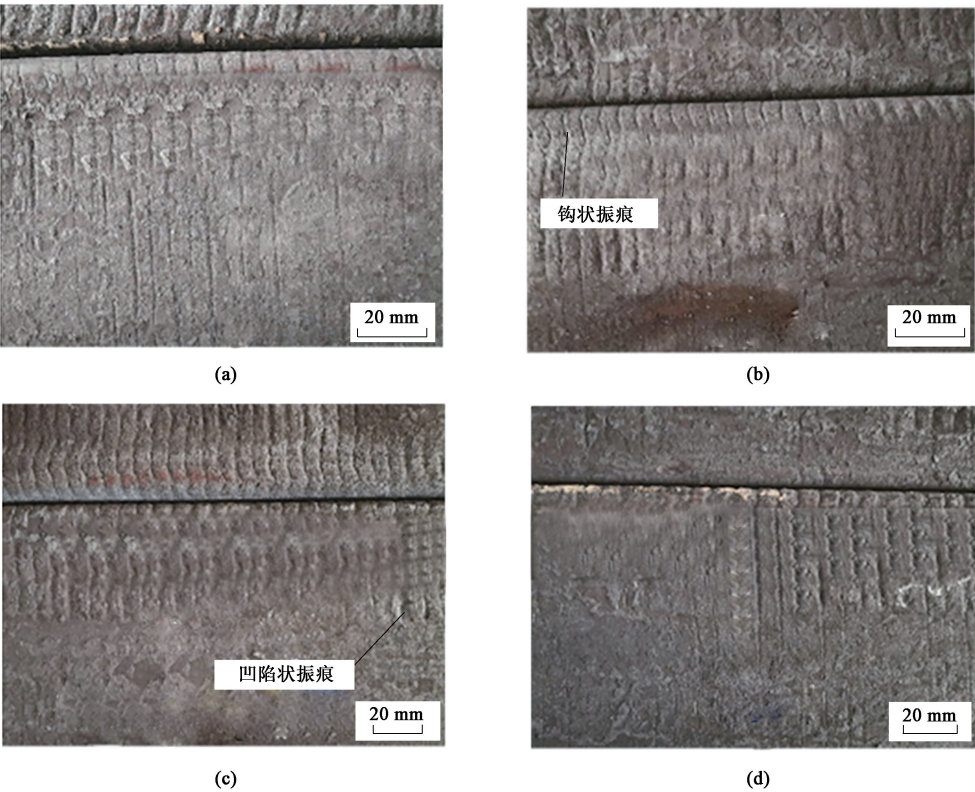


图 5 结晶器振动参数优化前后铸坯表面质量对比

(a) 第 1 流 (b) 第 2 流 (c) 第 3 流 (d) 第 4 流

Fig. 5 Comparison of surface quality for casting billets before and after optimization of crystallizer vibration parameters

(a) The first stream (b) The second stream (c) The third stream (d) The fourth stream

4.2 轧制线材质量

将结晶器振动参数优化前后生产的 2Cr13 不锈钢铸坯，在相同工艺下轧制为规格为 $\Phi 10.5 \text{ mm}$ 的线材，分别统计优化前后各 206 卷线材的表面质量情况。优化前铸坯轧制线材的表面质量不良率为

4.5%，多卷线材表面出现结疤和裂纹缺陷，表面裂纹的最大深度为 $327.88 \mu\text{m}$ ，如图 6a 和图 6b 所示；优化后铸坯轧制线材的表面质量不良率仅为 0.8%，线材表面质量明显提高，表面裂纹的最大深度为 $94.34099 \mu\text{m}$ ，如图 6c 和图 6d 所示。由表 2 和表 3

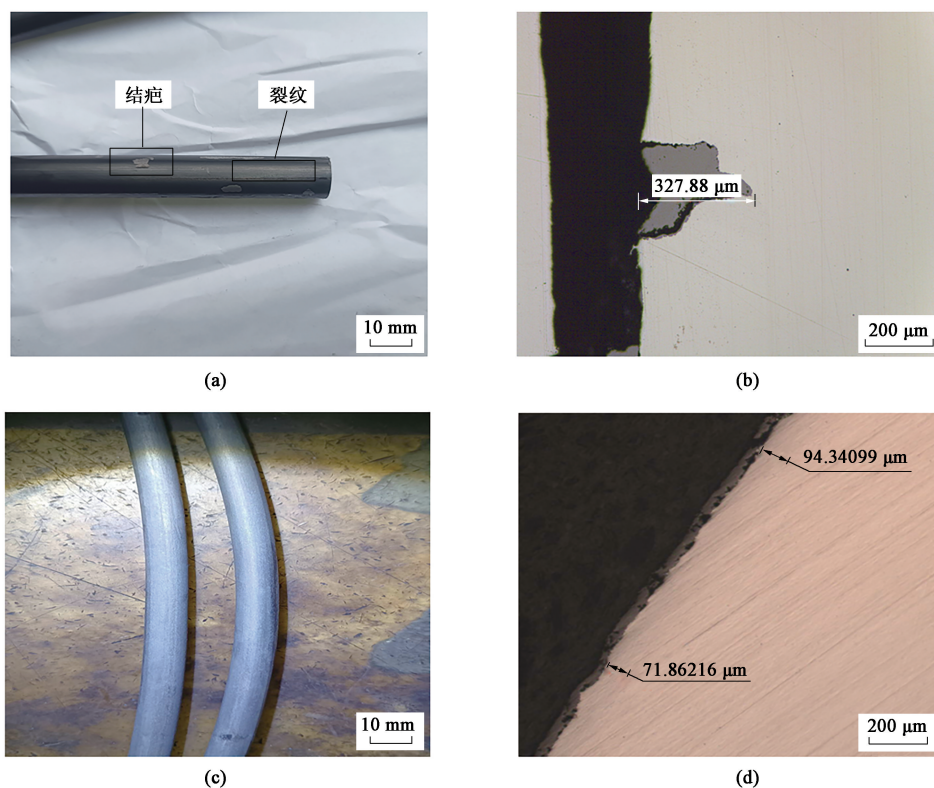


图 6 结晶器振动参数优化前后 2Cr13 不锈钢铸坯轧制线材的表面质量对比

(a) 优化前的线材表面质量 (b) 优化前的线材裂纹深度 (c) 优化后的线材表面质量 (d) 优化后的线材裂纹深度

Fig. 6 Comparison of surface quality for rolled wire of 2Cr13 stainless steel casting billet before and after optimization of crystallizer vibration parameters

(a) Surface quality of wire before optimization (b) Crack depth of wire before optimization
(c) Surface quality of wire after optimization (d) Crack depth of wire after optimization

的数据可知, 2Cr13 不锈钢铸坯结晶器非正弦振动的负滑脱时间为 0.12 s, 负滑脱率为 33%, 分别低于正弦振动时的 0.18 s 和 38%。2Cr13 不锈钢铸坯成形过程中结晶器负滑脱率降低, 有利于减小结晶器与铸坯间的拉坯阻力; 负滑脱时间降低, 有利于保护渣在初生坯壳与结晶器之间的润滑, 从而有效改善铸坯的振痕深度和弯曲度, 提高了轧制线材的表面质量。

5 结论

(1) 在现行的结晶器正弦振动生产工艺下, 2Cr13 不锈钢铸坯表面为紊乱的、沿铸坯拉坯方向不规则弯曲的振痕, 并出现凹陷状和钩状振痕。

(2) 2Cr13 不锈钢铸坯结晶器非正弦振动参数取 $C_1=6$ mm, $C_2=1$, $C_3=140$ 次 \cdot min $^{-1}$, $C_4=20$, $p=0.2$, 在常规拉坯速度 (1.2 m \cdot min $^{-1}$) 下, 相对于结晶器正弦振动, 采用结晶器非正弦振动的优化方案时, 负滑脱时间和负滑脱率分别由 0.18 s 和 38%降低至 0.12 s 和 33%, 通过适当降低负滑脱时

间和负滑脱率, 有效地改善了 2Cr13 不锈钢铸坯的表面质量。

(3) 结晶器振动参数优化前后, 2Cr13 不锈钢铸坯轧制线材的表面裂纹的最大深度由 327.88 μ m 降低至 94.34099 μ m, 轧制线材的表面不良率由优化前的 4.5%降低至优化后的 0.8%, 线材轧制质量显著提升。

参考文献:

- [1] 刘云峰, 刘才, 张玉娟, 等. VAI 结晶器振动参数的研究 [J]. 重型机械, 2013 (5): 22-27.
Liu Y F, Liu C, Zhang Y J, et al. Oscillation parameters of VAI mold [J]. Heavy Machinery, 2013 (5): 22-27.
- [2] 杨志雄, 朱国军, 张年华, 等. 小方坯结晶器正弦振动参数的优化 [J]. 连铸, 2020, 45 (6): 74-78.
Yang Z X, Zhu G J, Zhang N H, et al. Analysis on sinuous oscillation parameters of billet continuous casting [J]. Continuous Casting, 2020, 45 (6): 74-78.
- [3] 陈柯勋, 张雪英. 2Cr13 不锈钢铸坯表面质量优化研究 [J]. 铸造技术, 2018, 39 (6): 1291-1293, 1297.
Chen K X, Zhang X Y. Study on the surface quality optimization of 2Cr13 stainless steel billets [J]. Foundry Technology, 2018, 39

- (6): 1291-1293, 1297.
- [4] 王海达, 陈列, 董贵文, 等. 结晶器振动参数对连铸坯表面质量的影响 [J]. 特钢技术, 2022, 28 (1): 15-18.
Wang H D, Chen L, Dong G W, et al. Effect of mold vibration parameters on surface quality of continuous casting slab [J]. Special Steel Technology, 2022, 28 (1): 15-18.
- [5] 刘志远, 许建飞, 程巨广, 等. 板坯结晶器非正弦振动参数优化 [J]. 中国冶金, 2018, 28 (9): 58-62.
Liu Z Y, Xu J F, Cheng J G, et al. Non-sinusoidal vibration parameter optimization of slab mold [J]. China Metallurgy, 2018, 28 (9): 58-62.
- [6] 刘志远, 杨全海, 王重君, 等. 板坯结晶器非正弦振动参数优化 [J]. 连铸, 2021, 46 (12): 76-78, 84.
Liu Z Y, Yang Q H, Wang C J, et al. Non-sinusoidal vibration parameters optimization of slab crystallizer [J]. Continuous Casting, 2021, 46 (12): 76-78, 84.
- [7] 付达超, 文光华, 刘耀宗, 等. 10B21 冷镦钢连铸小方坯表面异常振痕成因分析及控制 [J]. 连铸, 2020, 45 (3): 33-37.
Fu D C, Wen G H, Liu Y Z, et al. Formation reasons and control measures of abnormal oscillation marks for 10B21 cold-heading steel billets [J]. Continuous Casting, 2020, 45 (3): 33-37.
- [8] 邢丽娜. 304 不锈钢连铸板坯振痕形成及控制 [J]. 山西冶金, 2007, 30 (2): 27-28, 34.
Xing L N. Formation and control of oscillation mark for 304 stainless steel continuous casting slab [J]. Shanxi Metallurgy, 2007, 30 (2): 27-28, 34.
- [9] 程常桂, 邓康, 任忠鸣. 连铸坯振痕的形成机理及控制技术的发展 [J]. 炼钢, 2000, 16 (5): 55-61.
Cheng C G, Deng K, Ren Z M. Mechanism of oscillation mark formation and development of control technology for strand concasting [J]. Steelmaking, 2000, 16 (5): 55-61.
- [10] 张志强, 张炯明. 连铸坯表面振痕形成机理的研究 [J]. 钢铁研究, 2008, 36 (1): 19-22.
Zhang Z Q, Zhang J M. Research on the mechanism of oscillation mark formation during continuous casting of steel [J]. Research on Iron and Steel, 2008, 36 (1): 19-22.
- [11] 漆鑫, 唐萍, 文光华, 等. 结晶器振动参数对连铸坯表面质量的影响 [J]. 特殊钢, 2004, 25 (5): 34-37.
Qi X, Tang P, Wen G H, et al. Influence of mould oscillation parameters on surface quality of concasting billet [J]. Special Steel, 2004, 25 (5): 34-37.
- [12] 万新. 2Cr13 马氏体不锈钢连铸坯表面质量的控制研究 [J]. 铸造技术, 2010, 31 (12): 1638-1641.
Wan X. Study on control of billet surface quality of martensitic stainless steel 2Cr13 [J]. Foundry Technology, 2010, 31 (12): 1638-1641.
- [13] 李宪奎, 张德明. 连铸结晶器振动技术 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 2000.
Li X K, Zhang D M. Continuous Casting Crystallizer Vibration Technology [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2000.
- [14] 张林涛, 邓安元, 王恩刚, 等. 连铸坯表面振痕的形成及影响因素 [J]. 炼钢, 2006, 22 (4): 35-39.
Zhang L T, Deng A Y, Wang E G, et al. Formation and influencing factors of oscillation marks for continuous casting steel billet [J]. Steelmaking, 2006, 22 (4): 35-39.
- [15] 卢盛意. 连铸板坯质量 第六讲——结晶器振动对铸坯表面质量的影响 [J]. 连铸, 2002, 27 (1): 38-41.
Lu S Y. The quality of CC slabs—Lesson six—About effect of mould oscillation on surface quality of CC slabs [J]. Continuous Casting, 2002, 27 (1): 38-41.
- [16] 卢盛意. 连铸坯质量 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 2000.
Lu S Y. Continuous Casting Billet Quality [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2000.
- [17] 张银强, 杨志雄, 许继勇, 等. 小方坯连铸漏钢原因分析及控制措施 [J]. 炼钢, 2010, 26 (4): 20-23.
Zhang Y Q, Yang Z X, Xu J Y, et al. Analysis on breakout of billet continuous casting and counter measures [J]. Steelmaking, 2010, 26 (4): 20-23.
- [18] 左锐. 改善冷镦钢坯表面振痕的结晶器振动参数优化 [J]. 武钢技术, 2008, 16 (5): 24-27, 30.
Zuo R. Improvement in surface oscillation mark of cold heading billet by optimization of oscillation parameter of mold [J]. Wisco Technology, 2008, 16 (5): 24-27, 30.
- [19] 王昌绪, 张立. 提高连铸结晶器振动频率、减少振幅改善铸坯质量的研究 [J]. 钢铁, 2003, 38 (1): 19-21, 42.
Wang C X, Zhang L. Quality improvement of CC slabs by increasing mold oscillation frequency and reducing amplitude [J]. Iron and Steel, 2003, 38 (1): 19-21, 42.
- [20] 刘亮, 徐晓文. 板坯连铸结晶器振动参数的优化 [J]. 山东冶金, 2018, 40 (3): 81-82.
Liu L, Xu X W. Optimization of vibration parameters for slab continuous casting crystallizer [J]. Shandong Metallurgy, 2018, 40 (3): 81-82.
- [21] 孙德建. 连铸结晶器振动工艺参数优化及铸坯质量研究 [D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2011.
Sun D J. Optimizing Technology Parameters of the Continuous Casting Equipment's Crystallizer and the Research of the Slab Quality [D]. Qinghuangdao: Yanshan University, 2011.

