

## H13钢 $\Phi 130 \sim 150$ mm 热轧材探伤不合格原因分析及改进措施

张新文, 朱康宁, 孟祥岩, 轩康乐  
(江苏永钢集团有限公司特钢公司, 苏州 215628)

**摘要:** 从 H13 钢和 H11 钢  $\Phi 130 \sim 150$  mm 热轧材的化学成分、生产工艺及探伤合格率的对比分析得出, 平均 V 含量从 0.5% 提高到 1.0% 是导致探伤不合格的关键性因素。根据缺陷分析结果并结合  $\Phi 380$  mm 连铸圆坯低倍组织, 得出导致 H13 钢探伤合格率低的原因是连铸坯中心缩孔在轧制过程中未焊合。通过改进连铸工艺和轧制开坯工艺, 将拉速从 0.58 m/min 提高至 0.65 m/min, S-EMS 从 650 A/5 Hz 改进为 200 A/8 Hz, 开坯增加 6, 8, 9 道次压下量从原  $\sim 60$  mm 至 70  $\sim 85$  mm, 将  $\Phi 380$  mm 坯型更改为  $\Phi 500$  mm, 使  $\Phi 130$  mm H13 钢探伤合格率从原来 50% 左右提升至 99.8%,  $\Phi 150$  mm H13 钢探伤合格率从原来 15.5% 提升至 97.2%。

**关键词:** H13 钢; H11 钢; 热轧材; 探伤合格率; V; 连铸工艺; 轧制开坯

### Cause Analysis and Improvement Measures of Unqualified Flaw Detection of H13 Steel $\Phi 130 \sim 150$ mm Hot Rolled Bar

Zhang Xinwen, Zhu Kangning, Meng Xiangyan, Xuan Kangle  
(Special Steel Company, Jangsu Yonggang Group Co., Ltd., Suzhou 215628)

**Abstract:** By comparison and analysis on the chemical composition, production process and inspection qualification rate of  $\Phi 130$ -150 mm hot rolled bar of H13 steel and H11 steel, it is pointed out that average vanadium content in steel increasing from 0.5% to 1.0% is the key factor leading to inspection disqualification of steel bar. According to the results of defect analysis and the macrostructure of  $\Phi 380$  mm CC bloom, it is concluded that the reason of low qualification rate of H13 steel flaw detection is that the center shrinkage hole of CC billets is not welded in rolling process. By improving the continuous casting process and rolling cogging-down process, including cast speed increasing from 0.58 m/min to 0.65 m/min, improving S-EMS from 650 A, 5 Hz to 200 A, 8 Hz, in cogging-down process increasing reduction at 6, 8 and 9 pass from original  $\sim 60$  mm to 70  $\sim 85$  mm, change bloom size from  $\Phi 380$  mm to  $\Phi 500$  mm, the qualification rate of  $\Phi 130$  mm H13 steel bar increases from about 50% to 99.8%, and that of  $\Phi 150$  mm H13 steel bar from original 15.5% to 97.2%.

**Material Index:** H13 Steel; H11 Steel; Hot Rolled Bar; Qualified Rate of Flaw Detection; Vanadium; Continuous Casting Process; Rolling Cogging-down

热作模具钢 H13 在 540  $^{\circ}\text{C}$  以下具有良好的淬透性、热硬性、耐热疲劳性及耐磨性, 是高温综合性能较好的热作模具钢。目前在国内外铝压铸模、铝挤压模及热锻造模方面普遍应用, 市场需求巨大, 但在使用要求较高的行业, 特别是铝压铸等行业, 大多数模具仍使用进口材料, 究其原因是产品质量不稳定<sup>[1-4]</sup>。据文献[5-6]报道, 国内  $\Phi 120$  mm 及以下规格 H13 热轧圆钢探伤合格率目前已接近或等于 100%, 但  $\Phi 130$  mm 以上由于探伤合格率较低, 基本依赖于锻材, 相关轧材探伤信息未见报道。本文以  $\Phi 130 \sim 150$  mm 规格 H13 热轧圆钢为研究对象, 针对性分析了导致探伤不合格的主要原因, 并提出改进措施。

#### 1 问题描述

H13 热轧圆钢的生产工艺为“110 t 电炉 $\rightarrow$ 120 LF 精炼 $\rightarrow$ 120 t VD 真空 $\rightarrow$ 圆坯连铸 $\rightarrow$ 热装 $\rightarrow$ 加热 $\rightarrow$ 开坯 $\rightarrow$ 轧制 $\rightarrow$ 退火 $\rightarrow$ 滚磨 $\rightarrow$ 探伤 $\rightarrow$ 取样 $\rightarrow$ 表检 $\rightarrow$ 打包 $\rightarrow$ 入库”。

相同的工艺路径, 采用  $\Phi 380$  mm 规格连铸圆坯轧制  $\Phi 130$  mm 规格圆钢, 探伤标准为 JB/T 5000.15-2007 II 级要求, H11 探伤合格率为 100%, 而 H13 钢探伤合格率仅为 55.2%。成分见表 1, 可以看出, 两种钢属于同一系列, 尽管 Mo 含量上限有较大差别, 但实际控制值较为接近; 而 V 含量差别较大, H13 的平均 V 含量为 1.0%, H11 的平均 V 含

表 1 H13 钢和 H11 钢标准成分比较/%  
Table 1 Comparison between H13 steel and H11 steel standard components / %

钢号	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	V	Ni	Cu	Al
H13	0.37~0.42	0.80~1.20	0.20~0.50	≤0.015	≤0.005	4.75~5.50	1.10~1.75	0.80~1.20	≤0.25	≤0.25	≤0.035
H11	0.37~0.43	0.80~1.20	0.20~0.50	≤0.015	≤0.005	4.75~5.50	1.10~1.60	0.30~0.60	≤0.25	≤0.25	≤0.035

量为 0.5%，说明 V 元素是关键性的影响因素。

## 2 原因分析

### 2.1 缺陷分析

探伤结果显示,缺陷集中于圆钢中心,当量大多数在  $\Phi 3 \sim \Phi 5$  mm,最大时达到  $\Phi 9$  mm,呈条状不连续分布,见图 1 所示。探伤定位不合格部位,取样在金相显微镜 Axio Imager M2m 下观察,检测面存在两个大孔洞及多个小孔洞,分布范围  $0.97 \text{ mm} \times 0.38 \text{ mm}$ ,孔洞内无氧化铁,无夹杂物,见图 2(a)、(b)所示。

随后将试样用酒精超声波清洗约 5 min 后置于场发射电子显微镜 SUPPA 55 SAPPHERE 下观察,孔洞内壁光滑,未发现异常组织及夹杂物,缺陷断口呈冰糖状,具有脆性断裂特征,见图 2(c)所示。

凝固过程中,由于树枝晶的充分发展及各晶枝间相互封锁作用,使一部分液体被孤立分隔于各晶枝之间,凝固收缩时得不到液体的补充,凝固结束后,便在这些区域形成许多分散的形状不规则的缩孔,这种缩孔处没有夹杂,表面也未被氧化,在后续压力加工时可以焊合<sup>[7]</sup>。H13 钢连铸坯纵剖样见图 3 所示。可以观察到不连续的中心缩孔。这是由于

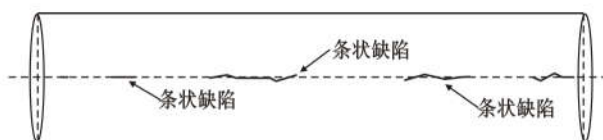


图 1 H13 钢  $\Phi 130$  mm 轧材缺陷分布示意图  
Fig. 1 Schematic diagram of defect distribution of H13 steel  $\Phi 130$  mm rolled bar

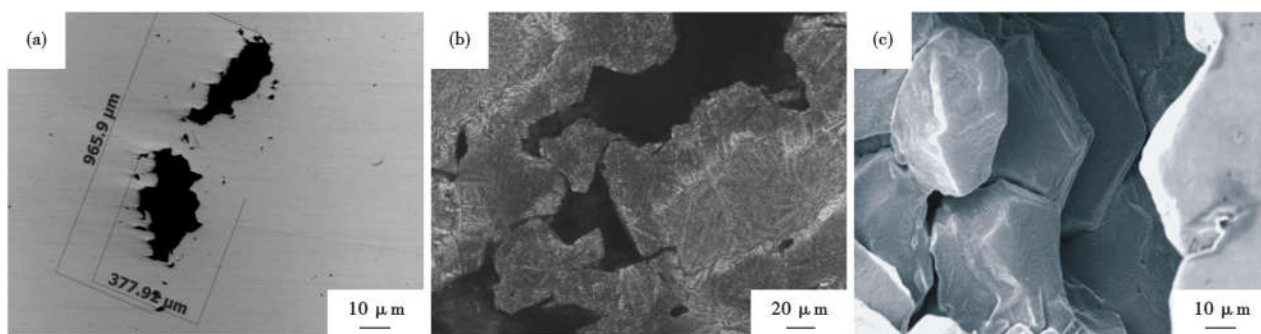


图 2 H13 钢  $\Phi 130$  mm 轧材缩孔缺陷形貌:(a)(b)光学,(c)场发射电镜  
Fig. 2 Morphology of shrinkage hole defect in H13 steel  $\Phi 130$  mm rolled bar: (a)(b) optics, (c) field emission electron microscope



图 3 H13 钢  $\Phi 380$  mm 连铸圆坯纵剖酸洗宏观组织形貌  
Fig. 3 Macrostructure morphology of longitudinal section pickling H13 steel  $\Phi 380$  mm continuous casting round bloom

二冷区冷却的不均匀性导致柱状晶的不稳定生长,在铸坯纵截面中心点常常形成 5~10 cm 有规则的“凝固桥”<sup>[8]</sup>。在轧制加热过程中,缩孔之间因被阻隔而未被氧化,故检测时未发现脱碳及高温氧化质点等典型氧化特征。

因此,从缺陷形貌并结合纵剖酸洗样,可推断出该缺陷为连铸坯中心缩孔在轧制过程中未焊合所致。

### 2.2 机理分析

$\Phi 380$  mm 规格 H13 钢和 H11 钢连铸坯的拉速、电磁搅拌等工艺参数均一致,见表 2 所示。两者最大的不同在于成分方面的差异,H13 钢的 V 含量为 1.01%,而 H11 钢的 V 含量为 0.38%,见表 3 所示。按照 YB/T153-2015 标准评级,H13 的中心缩孔

表 2 H11 钢和 H13 钢工艺参数比较  
Table 2 Comparison between H11 steel and H13 steel process parameters

钢号	熔炼号	规格/mm	拉速/(m·min <sup>-1</sup> )	M-EMS/(A/Hz)	S-EMS/(A/Hz)	F-EMS/(A/Hz)	过热度/°C
H13	20E107231	Φ380	0.58	250/2	650/5	1 100/8	26
H11	21E101353	Φ380	0.58	250/2	650/5	1 100/8	25

表 3 H11 钢和 H13 钢化学成分/%  
Table 3 Chemical composition of tested H11 steel and H13 steel/%

钢号	熔炼号	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu	Mo	V
H13	20E107231	0.38	0.93	0.41	0.009	0.001	5.15	0.04	0.03	1.38	1.01
H11	21E101353	0.37	1.04	0.39	0.008	0.001	5.12	0.05	0.02	1.29	0.38

为 1.0 级, H11 钢的中心缩孔为 0.5 级。轧制为 Φ380 mm 规格后, 采用探伤 (JB/T 5000.15-2007 II 级) 检测, H13 钢的探伤合格率仅为 55.2%, 而 H11 钢的合格率为 100%。

含 V 微合金钢连铸坯高温塑性的研究表明<sup>[9]</sup>, 含 V 较高时, 钢在第 III 脆性温度区的脆化程度比含 V 低的更为严重。连铸过程中, 钢液补缩不充分, 凝固末期形成缩孔。随着温度降低, 外表面受拉应力, 内部受压应力, 在后续加热过程中, 外表面受压应力, 内部受拉应力, 当温度进入第 III 脆性区时, 形成脆性断口, 与场发射电子显微镜检测结果吻合。

对汽车横梁用新型含 V 合金钢的研究发现<sup>[10]</sup>, 在其它合金含量相同的情况下, V 含量从 0% ~ 0.75% 变化时, 钢的流动性和抗热裂性先增强后降低, 显微组织先细化再粗化的变化规律。研究 V 微合金化对汽车零部件用钢性能的影响时发现<sup>[11]</sup>, 在 42CrMoVx 钢中添加从 0.1% ~ 0.9% 的 V 含量时, 钢的拉伸性能、耐磨性、耐腐蚀性先增加后降低, 最佳的 V 含量应控制在 0.5%。由于 V 能形成熔点高、体积大的碳化物, 随着 V 含量的增加, 钢液的黏度增加<sup>[12]</sup>。与 V 含量相对较低 (0.5%) 的 H11 钢

相比, H13 钢的 V 含量已达到 1.0%, 钢的流动性、抗热裂性、显微组织、拉伸性能等指标均相对较差, 尤其是钢的流动性, V 含量增加后, 钢水的流动性变差, 连铸凝固末期的补缩也变得相对困难, 形成缩孔的倾向增大, 因此, 缩孔在轧制过程中未焊合是导致探伤不合格的主要原因。

### 3 改进措施

#### 3.1 改进连铸工艺, 改善内部质量

由于 H13 钢连铸坯缩孔较大, 在轧制过程难以焊合, 为减小缩孔, 工艺改进的主体思路为: 采用电磁搅拌力将凝固末端中心缩孔打散, 为后续轧制焊合奠定基础。通过数值模拟, 见图 4 所示, 将拉速从 0.58 m/min 提高至 0.65 m/min 后, 液芯长度由原来的 18.3 m 延长至 20.5 m。根据末端电磁搅拌位置, 计算出末端电磁搅拌时液芯比例从原来的 7.8% 提高至 34.2%。

采用不同连铸工艺参数进行正交试验并设计改进后的连铸工艺参数, 见表 4 所示。可以看出, 工艺改进后, 低倍缩孔明显好转, 见图 5 所示。

在相同的轧制工艺条件下, 采用 Φ380 mm 规格

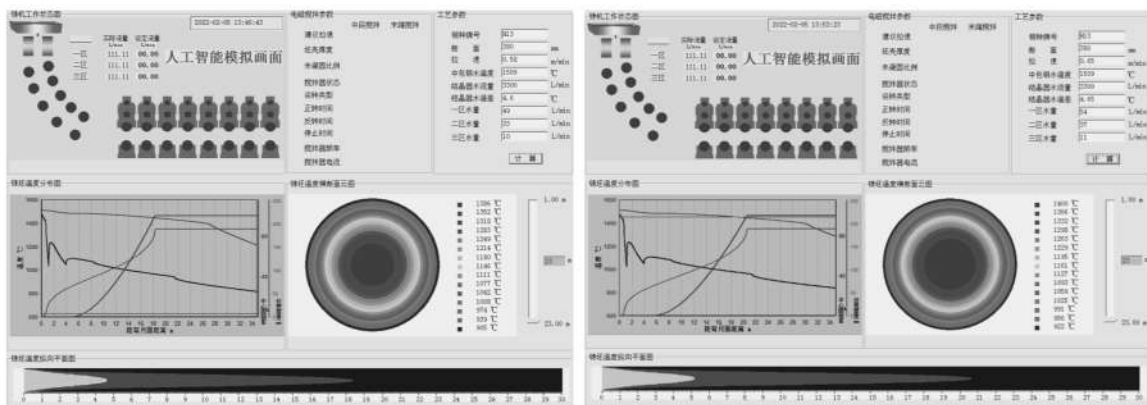


图 4 不同拉速下连铸工艺的模拟情况  
Fig. 4 Simulation of continuous casting process at different drawing speeds

表 4 H13 钢  $\Phi 380$  mm 铸坯改进前和改进后连铸工艺  
Table 4 Continuous casting process of H13 steel  $\Phi 380$  mm bloom before and after improvement

工艺	拉速/ ( $\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$ )	M-EMS/ (A/Hz)	S-EMS/ (A/Hz)	F-EMS/ (A/Hz)
改进前	0.58	250/2	650/5	1 100/8
改进后	0.65	250/2	200/8	1 100/8

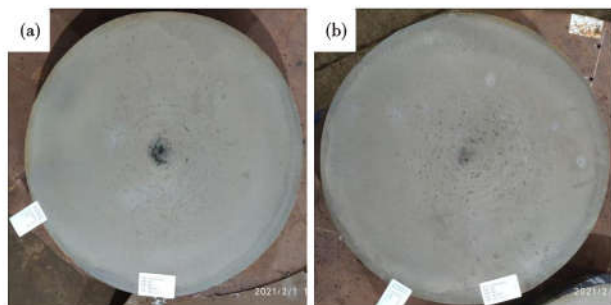


图 5 H13 钢  $\Phi 380$  mm 铸坯改进工艺前(a)后(b)低倍组织的比较

Fig. 5 Comparison of macrostructure of H13 steel  $\Phi 380$  mm cast bloom before (a) and after (b) of process improvement

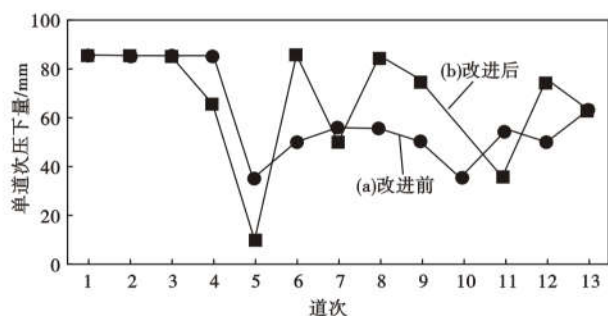


图 6 H13 钢  $\Phi 380$  mm 铸坯改进工艺前(a)和改进后(b)开坯单道次压下量

Fig. 6 Single pass reduction of breakdown of H13 steel  $\Phi 380$  mm cast bloom before (a) and after (b) of process improvement

轧制为  $\Phi 130$  mm 规格,连铸工艺改进后的探伤合格率达到 81.25%,而原工艺探伤合格率为 50%,说

明连铸工艺改进方向的正确性,但考虑拉速提高后增加漏钢,纵裂的风险,故将该思路推广至  $\Phi 500$  mm 规格,将连铸工艺拉速从 0.35 m/min 改为 0.40 m/min 进行试验。

### 3.2 轧制方面的工艺调整

提高开坯机单道次压下量可以使压力有效传递至中心,从而达到焊合缩孔的目的。连铸工艺改进取得阶段性成果后,根据文献[13],结合开坯机设备能力特点,提高开坯机道次压下量,设计出一套开坯工艺,见图 6 所示。工艺调整后,第 1~3 道次压下量不变,第 4 道次和第 5 道次正平坯料,第 6 道次提高压下量,第 7 道次轻压并正平,第 8 道次再次采用大压下量,第 9~13 道次将坯料轧制为目标中间方 200 mm  $\times$  220 mm。可以看出,轧制工艺调整后,在第 6~9 道次时,采用大压下量,最大到达 85 mm。

采用调整后的开坯工艺, $\Phi 500$  mm 规格轧制  $\Phi 150$  mm 规格时,探伤合格率从原来的 15.5% 提升至 97.2%,轧制  $\Phi 130$  mm 规格时,探伤合格率从原来的 50% 提升至 99.8%。

## 4 结论

(1)引起 H13 热轧圆钢探伤不合格的原因为连铸过程产生的中心缩孔,缩孔在轧制过程中未焊合;

(2)改进连铸工艺,提高末端电磁搅拌处液芯比例,可适当减小缩孔,有利于提高探伤合格率。经过工艺改进,在相同的轧制工艺下, $\Phi 380$  mm 规格轧制  $\Phi 130$  mm 圆钢,探伤合格率从 50% 提高至 81.25%;

(3)提高开坯机单道次压下量可以使压力有效传递至中心,从而起到焊合缩孔的目的。工艺改进后,采用  $\Phi 500$  mm 规格轧制  $\Phi 150$  mm 规格,探伤合格率从 15.5% 提升至 97.2%;轧制  $\Phi 130$  mm 规格,探伤合格率从 50% 提升至 99.8%。

### 参考文献

- [1] 韩永强,吴晓春. 国内外塑料模具钢研究现状与发展趋势[J]. 模具工业,2018,44(9),1-7.
- [2] 张 曜. 提升 H13 热作模具钢质量的工艺研究[J]. 中国金属通报,2019(1):132-133.
- [3] 杨 娥,张 军. H13 模具钢心部缺陷原因分析[J]. 物理测试,2014,32(5):40-43.
- [4] 孙晓林,王 飞,毛明涛,等. H13 钢中富 V 初生碳化物的形成及影响因素[J]. 钢铁,2018,53(5):68-75.
- [5] 张正波,邓湘斌,冯杰斌,等. 提高  $\Phi 110$  mm 规格 H13 探伤合格率工艺实践[J]. 山西冶金,2018,41(3),22-25.
- [6] 吴 鹏,杨毓永,杜飞虎. 提高 H13 大棒材探伤合格率工艺实践[J]. 特钢技术,2016,22(3),45-47.
- [7] 崔忠圻,谭耀春. 金属学与热处理[M]. 北京:机械工业出版社,2017:57-58.
- [8] 蔡开科,程士富. 连续铸钢原理与工艺[M]. 北京:冶金工业出版社,2008:254-255.
- [9] 刘新宇,许中波,王新华,等. 含 V 微合金钢连铸坯高温塑性的研究[J]. 钢铁,2000,35(1):51-54.
- [10] 左明伟,曼茂力,田 辉,等. 汽车横梁用新型含 V 合金钢的铸造性能和显微组织研究[J]. 加热工艺,2022,51(5):77-79.
- [11] 马骊歌,李显生. V 微合金化对汽车零部件用钢性能的影响[J]. 钢铁 V 钛,2021,42(4):68-70.
- [12] 干 勇,倪满森,余志祥,等. 现代连续铸钢实用手册[M]. 北京:冶金工业出版社,2010:32-33.
- [13] 宝钢特钢韶关有限公司. 一种提高  $\Phi 110$  规格 H13 超声探伤合格率的轧制工艺:中国,CN109530432A[P]. 2019-3-29. <https://le.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?dbcode=YJZZ&dbname=YJZTLKSCPD2019&filename=CN109530432A&>