

# 特厚板坯探伤合格率影响因素及控制措施

汪德富<sup>1</sup> 曹余良<sup>1</sup> 征亚文<sup>1</sup> 钱志友<sup>1</sup> 巩怀栋<sup>1</sup>

南京钢铁联合有限公司第一炼钢厂，江苏 南京 210000

## Influencing factors and control measures for qualified rate of ultra thick slab flaw detection

WANG Defu CAO Yuliang QIAN Zhiyou ZHENG Yawen GONG Huaidong  
(The First Steelmaking Plant , Nanjing Iron and Steel United Co., Ltd., Nanjing 210000, Jiangsu, China)

### 1. 前言

特厚钢板是指厚度 $>100\text{mm}$ 的钢板，其技术含量、产品附加值极高，其中特厚板坯连铸生产技术更是限制国家海洋、能源、建筑等军事和民用重要工程领域的关键<sup>[1-2]</sup>。然而特厚板坯大多用于生产重大装备的关键承压承重部件，其性能与质量要求极为严苛，多为管线钢、耐磨钢、高强钢和军用钢或含有多种合金元素特种钢，连铸工艺流程生产难度大，铸坯极易出现中心偏析和疏松、夹杂物、裂纹等质量缺陷<sup>[3-4]</sup>。

根据生产过程数据分析，夹杂物、中心偏析和疏松是导致特厚板坯探伤合格率低的重要影响因素，已经成为了无法采用连铸工艺连续稳定生产的限制性环节。吴伟勤等<sup>[5]</sup>通过优化精炼、连铸、轧钢等工序，提出了头坯、尾坯、钢板压缩比的分类管理；毛敬华等<sup>[6]</sup>通过研发特厚板坯内部夹杂物去除与中心偏析和疏松控制技术给出了利于夹杂物上浮去除的方法，并提出了改善中心偏析和疏松的凝固末端压下率参数；赵晶等<sup>[7]</sup>通过优化尾坯浇铸工艺，控制尾坯浇铸拉速 $v<0.5\text{m/min}$ 的时间 $t<5\text{min}$ ，使得矫直区尾坯表面温度在 $910^{\circ}\text{C}$ 以上，能够有效降低铸坯的表面横裂纹；尾坯采用无水封顶工艺，能够有效降低铸坯的中心缩孔。刘超等<sup>[8]</sup>通过对连铸坯成分、铸坯缓冷、铸坯低倍、控轧控冷、轧后钢板缓冷等工艺进行调整，探伤合格率得到明显提高。但是在连铸特厚板坯的生产过程中，由于其拉速低、凝固时间长、压下区间难以判断，极易发生中心偏析和疏松，轧制时受到压缩比的影响，铸坯中的微小缺陷难以完全压合。此外卷入铸坯内部的大尺寸夹杂物也是导致特厚板探伤不合格的重要影响因素。基于上述因素，研发了相应的工艺控制措施，并应用于南京钢铁特厚板坯连铸机上，该项研究成果将为特厚板坯连铸机铸坯质量的研究提供参考。

### 2. 连铸机主要工艺参数

南京钢铁特厚板坯连铸机主要参数见表 1。

表 1 特厚板坯连铸机主要参数

Table 1 Major parameters for 0# slab continuous casting machine

| 序号 | 项目      | 单位      | 铸机参数                              |
|----|---------|---------|-----------------------------------|
| 1  | 铸坯断面    | (mm×mm) | (460、370)×(1800~2600)             |
| 2  | 铸机半径 R  | m       | 12                                |
| 3  | 冶金长度    | m       | 45.1                              |
| 4  | 铸机拉速范围  | m/min   | 370mm 最高拉速 0.9<br>460mm 最高拉速 0.55 |
| 5  | 结晶器铜板高度 | mm      | 900                               |
| 6  | 窄边足辊对数  | 对       | 6                                 |

### 3. 特厚板坯内部夹杂物控制技术

#### 3.1. 特厚板坯夹杂物过程分析

在特厚板坯轧制过程中，残留于特厚板坯内部的夹杂物会沿着轧制方向变形，拉长，严重时会导致出现中间裂纹，是导致特厚板坯探伤不合格的主要原因之一。通常采用转炉→LF→RH 炉外精炼的方式得到高洁净度钢液供特厚板坯连铸机来避免铸坯内部的夹杂物。分别从精炼，连铸中间包进行钢液中夹杂物数密度对比发现，如图 1 所示，夹杂物含量明显处于增加的趋势，在每一炉钢包打开过程中尤为明显，其原因为钢水在注入中间包的过程中冲刷中间包耐材带来的外生夹杂物和钢液二次氧化造成的内生夹杂物，因此控制中间包内钢液的稳定性是控制夹杂物产生的关键。

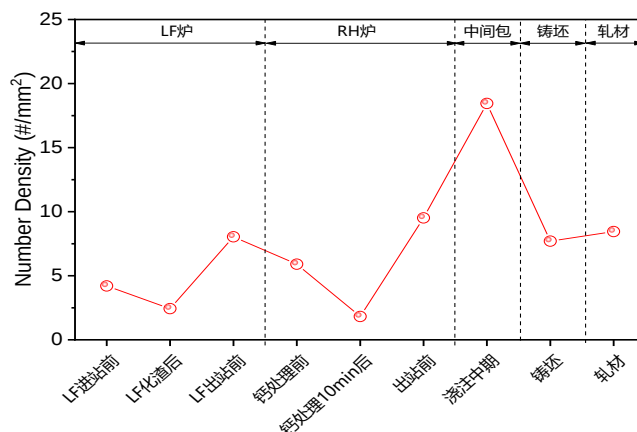


图 1. 钢液中夹杂物数密度对比图

Fig. 1. Comparative diagram of inclusion number and density in liquid steel

#### 实行全流程保护浇注

为最大限度提升全流程保护浇铸工艺水平，通过开浇前增加中间包吹氩装置，增加保护套管吹氩装置，中间包包盖吹氩装置等措施，避免在浇铸过程中，钢水和空气接触发生二次氧化。分别在钢包开浇、90t、关包时进行钢中增[N]法，钢中增[O]法取样分析，结果如图 2 所示，从图中可以看出，钢包开浇时，中间包中[N]和[O]增量明显大于比浇铸过程中后期大，钢包在开浇时，中间包内部处于非稳态状态下，钢水的裸露增加了二次氧化的可能性。随着浇铸时间的延长，[N]和[O]增量均有所减小，[N]和[O]所结合的夹杂物不断上浮到中间包液面上被覆盖剂吸收。在钢包停浇时，[N]和[O]增量有小幅度上升，中间包液面下降，导致中间包内衬耐火材料氧化后进入钢水中导致。从图 2 中可以看出，在钢包开浇、90t、关包时[N]和[O]增量均明显降低。

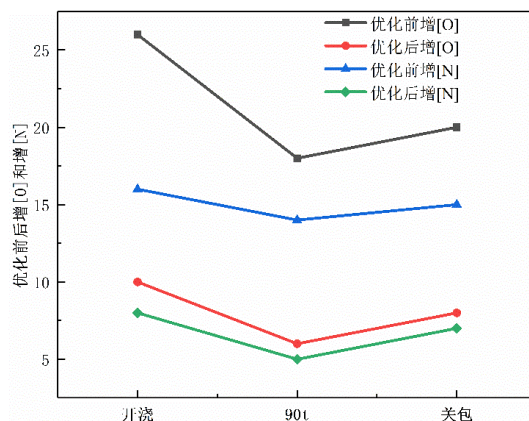


图 2.全流程保护浇铸前后中间包[N]和[O]增量

Fig. 2 Tundish [N] and [O] increments before and after full process protection casting

### 增加中间包容量

中间包具有降低钢水静压力，保持中间包的钢水液面，促进钢水中的夹杂物上浮和分流钢水的作用，在多炉连浇更换钢包时，中包内的液面会下跌，导致液面低于临界值在塞棒位置产生漩涡，将渣子卷入到结晶器中，产生夹杂，通过增加中间包容量对比实验，分别进行取样分析探伤不合钢板材料比例如图 3 所示，通过增加中间包容量，在换包过程中中间包液面低于临界值的比例大幅降低，降低了钢水对耐火材料的冲击和侵蚀，同时中间包内的钢液停留的平均时间加长，夹杂物上浮时间增加，大型夹杂物的数量明显降低，钢水的洁净度升高。

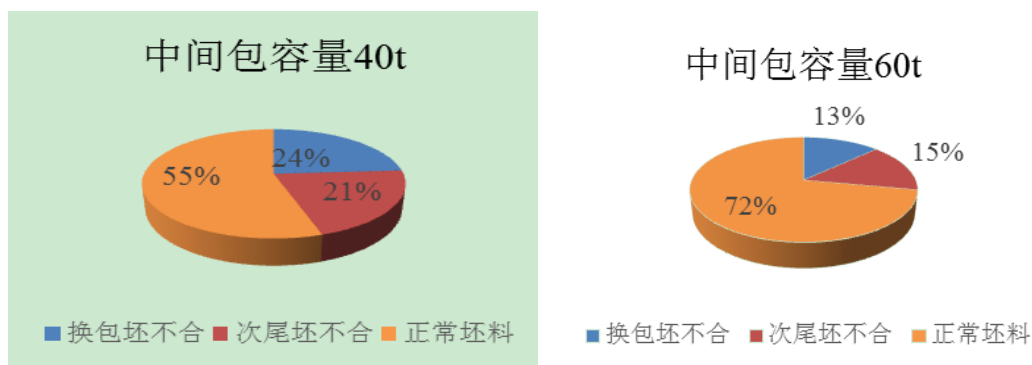


图 3 中间包容量对钢板探伤合格率的影响

Fig. 3 Effect of tundish capacity on steel plate flaw detection qualification rate

### 3.4. 生产过程拉速控制

对存在探伤缺陷的 460mm 特厚板坯轧制成品厚度为 44.5mm，缺陷深度为 27.1mm，进行定位、标记，切下后制成试样进行扫描电镜分析，观察其缺陷形貌及成分组成。通过对典型探伤缺陷部位进行扫描电镜分析得出缺陷处的微观缺陷表现主要为钢板 1/2 和 1/4 之间的夹杂物如图 4 所示。对于特厚板坯连铸机而言，铸坯成倍加厚，结晶器内腔随之加大，铸坯内部钢液流动状态与常规板坯连铸机相比差别较大，夹杂物在铸坯内弧侧有明显偏聚现象。根据铸坯内部钢液流场分析，铸坯内部流场的回流区延伸到弧形区，夹杂物随着回流区进入连铸坯弧形区域以后再上浮，遇到内弧侧凝固前沿并被捕捉，由于特厚板坯拉速较慢，夹杂物不断形核长大，并且导致连铸坯内弧侧偏聚现象。通过对比不同拉速对夹杂物上浮的影响，结果如图 5 所示。当拉速超过 0.55m/min 时，460mm 厚度铸坯中大型夹杂物上浮率呈明显下降趋势。因此，拉速宜控制在 0.55m/min 以下。

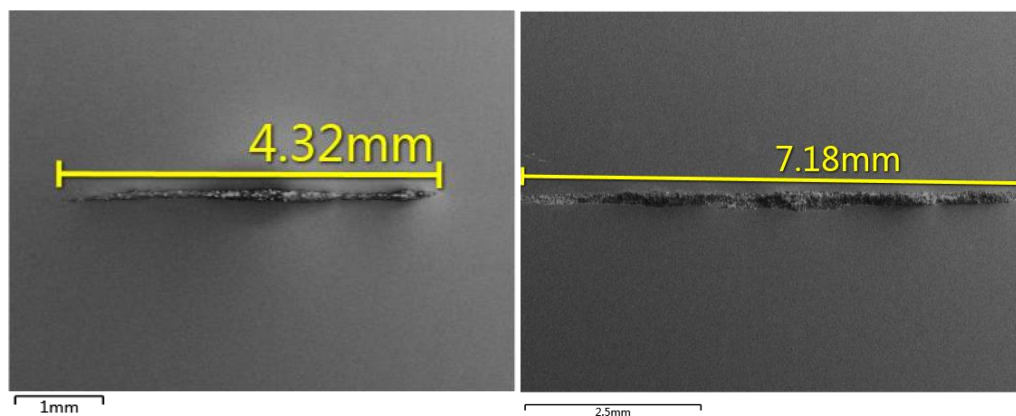


图 4 缺陷部位成分图

Fig. 4 Composition Diagram of Defect Parts

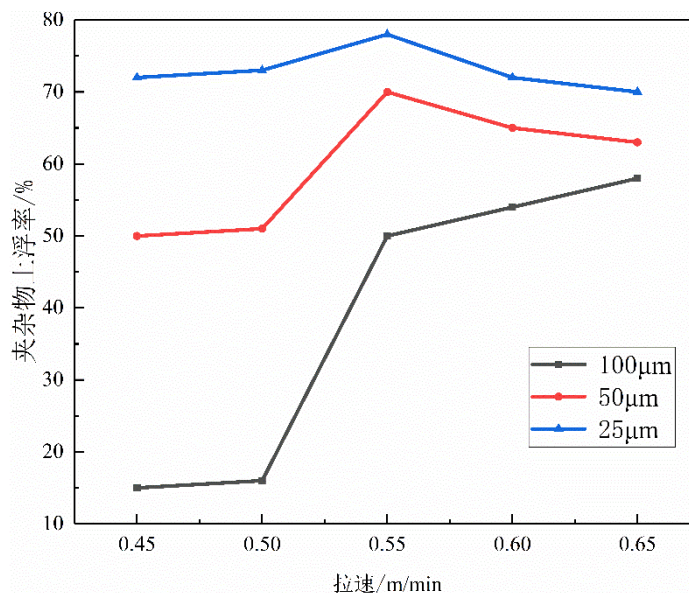


图 5 拉速对夹杂物上浮率的影响

Fig.5 Effect of casting speed on inclusion floatation rate

### 3. 特厚板坯中心疏松与偏析控制技术

凝固过程中的选分结晶是导致中心偏析与疏松的根本原因<sup>[9]</sup>, 随着铸坯厚度加厚, 凝固速度明显降低, 中心偏析与中心疏松恶化。目前低过热度、电磁搅拌、凝固末端压下等工艺技术都是控制铸坯中心偏析的有效方法。本文重点研究了在铸坯凝固末端通过调整不同钢种的压下区间和压下量来调整动态重压下段所处的区间, 如表 1 所示, 使坯壳变形来弥补两相区凝固收缩量。这一方面可以消除或减轻凝固收缩带来的中心孔隙, 防止晶间富集溶质液体向铸坯中心的横向流动; 另一方面, 重压下所产生的的凝固坯壳挤压作用破坏了树枝间的搭桥, 使凝固末端与液相穴上部保持联通有利与液相穴上部保持联通有利于补偿; 还有就是通过重压下的压力作用将中心富集的夹杂物等液体挤出, 进一步促进夹杂物上浮的同时使一些中心富集溶质的液体与周围的钢液再次混合, 溶质元素再次分配, 这就达到了使中心结构致密以消除铸坯中心疏松和中心偏析的目的, 进而提高探伤合格率。

表 2 典型钢种对应压下区间、压下量与动态重压下

Tab 2 Corresponding reduction interval, reduction amount and dynamic heavy reduction for typical steel grades

| 钢种      | 压下区间    | 压下量  | 动态重压下段      |
|---------|---------|------|-------------|
| NM500-2 | 0.2~0.7 | 15mm | 11、12、13    |
| N45-2   | 0.2~0.7 | 15mm | 11、12、13、14 |
| F40-QT  | 0.2~0.9 | 14mm | 10、11、12    |
| S355J-3 | 0.2~0.9 | 15mm | 11、12、13    |

## 5. 特厚板坯内部质量控制技术应用效果

上述技术在第一炼钢厂的特厚板坯连铸机上全面实施，目前已生产了船舶及海洋工程用钢、碳素模具钢、核电容器用钢、海底抗酸管线用钢等特厚板坯。为了系统的检查分析特厚板坯内部质量，通过在线切割低倍试样，统计了 500 多个特厚板坯低倍样进行分析，根据 YB/T4003-1997 标准对其内部质量进行评级。如图 6 所示，中心偏析优于 B0.5 级的占比 98.4%，中心疏松优于 1.0 的占比 97.2%，其内部质量水平如图 7 所示。

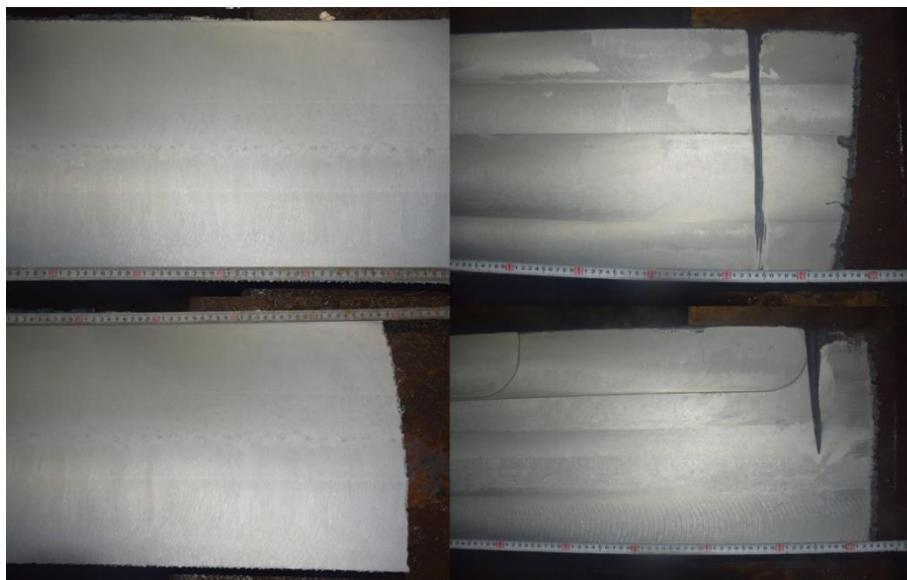


图 6 特厚板坯横断面低倍实物图

Fig.6 Cross Section Macroscopic Physical View of Extra Thick Slab

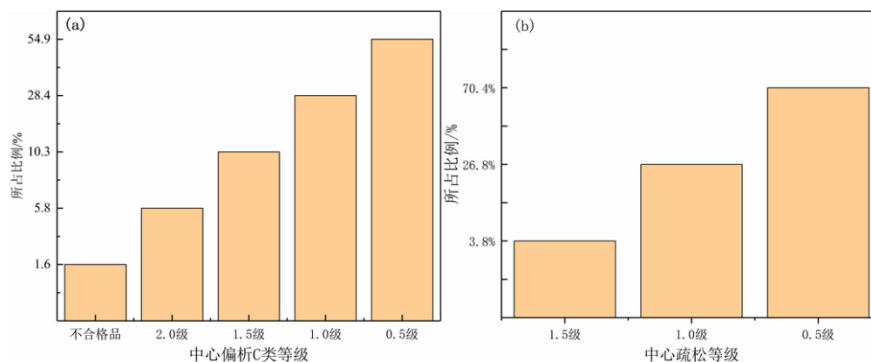


图 7 特厚板坯中心偏析与中心疏松

Fig. 7 Center Segregation and Center Porosity of Extra Thick Slab

综上所述，技术实施后显著提高了连铸坯内部质量，实现了高品质特厚板的高效稳定的生产，并已经成功应用于国际上的核电站、海底抗酸管线、碳素合金模具钢及机械工程超级耐磨钢等领域，探伤合格率稳步提升，如图 8 所示。

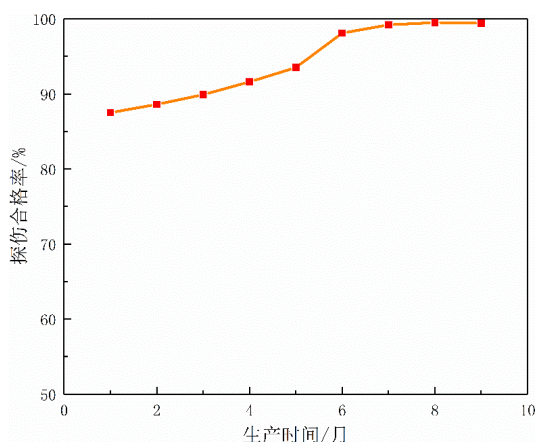


图 8 特厚板坯探伤合格率

Fig. 8 Qualification rate of ultra-thick slab inspection

## 6. 结语

综上所述，本文结合炼钢厂提高特厚板坯探伤合格率实际案例，通过提升全流程保护浇铸工艺水平，增加中间包容量降低了特厚板坯内部夹杂物的发生率，有效控制中心偏析与疏松缺陷是提升特厚板坯内部质量，提升特厚板坯轧钢过程探伤合格率的关键，形成的拉速控制制度，在铸坯凝固末端通过调整不同钢种的压下区间和压下量来调整动态重压下段所处的区间，使坯壳变形来弥补两相区凝固收缩量。达到了使中心结构致密以消除铸坯中心疏松和中心偏析的目的，进一步提高了特厚板坯的探伤合格率。

## 参考文献

- [1] Miyazawa K, Schwerdtfeger K. Macrosegregation in continuously cast steel slabs: preliminary theoretical investigation on the effect of steady state bulging[J]. Steel Research International, 1981, 52(11): 415.
- [2] Kajatani T, Drezet J M, Rappaz M. Numerical simulation of deformation-induced segregation in continuous casting of steel[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2001, 32(6): 1479.
- [3] 刘熙章.国内外特厚钢板生产技术及能力分析[J].宽厚板, 2022, 28(04):7-12.
- [4] 王臻明, 赵晶, 王玉龙, 张虎成, 甄新刚, 胡显堂.400 mm 特厚板坯中心偏析控制的研究[J].连铸, 2019, 44(06):47-50.DOI:10.13228/j.boyuan.issn1005-4006.20190017.
- [5] 吴伟勤, 蔡可森, 党军.影响中厚板探伤合格率的因素分析[J].钢铁, 2011, 46(04):98-101.DOI:10.13228/j.boyuan.issn0449-749x.2011.04.013.
- [6] 毛敬华, 帅勇, 谢贵强, 王亚涛.连铸特厚板坯内部质量控制的关键技术[J].钢铁, 2019, 54(08):64-69.DOI:10.13228/j.boyuan.issn0449-749x.20190138.
- [7] 赵晶, 王臻明, 王国连, 甄新刚, 王玉龙, 胡显堂.400 mm 特厚板坯尾坯浇铸工艺的研究[J].连铸, 2019, 44(01):1-4.DOI:10.13228/j.boyuan.issn1005-4006.20180096.
- [8] 刘超.特厚钢板探伤不合格原因分析及控制[J].宽厚板, 2021, 27(02):34-36.