DOI：10.13228/j.boyuan.issn1005-4006.20190078

# 提高唐钢FSTC薄板坯连铸机拉速实践

单庆林， 赵建平， 王 帅， 侯明山， 郑久强
（河钢集团唐钢公司，河北 唐山 063016）

**摘 要**：为提高唐钢FSTC薄板坯连铸机拉速，采用了精准控制钢水成分和温度，开发高拉速专用保护渣，优化浸入式水口和结晶器结构，应用电磁制动技术等措施，使铸机最高拉速由4.5提高至6.0 m/min，且提拉速后铸坯表面质量良好，内部组织无偏析、缩孔、疏松等缺陷，生产的热轧卷具有良好的组织和性能。

**关键词**：薄板坯连铸机；拉速；组织；性能
**文献标识码**：A **文章编号**：1005-4006（2020）01-0079-04

# Practice to raise cating speed in FSTC thin-slab caster of Tangsteel

SHAN Qing-lin， ZHAO Jian-ping， WANG Shuai， HOU Ming-shan， ZHENG Jiu-qiang
（Tangshan Iron and Steel Company，Hebei Iron and Steel Group，Tangshan 063016，Hebei，China）

**Abstract**：In order to raise casting speed in FSTC thin-slab caster of Tangsteel，some measures were taken，such as ensuring a reasonable composition and temperature of molten steel，developing new type of mould powder for high casting speed production of caster，optimizing the structure of submerged nozzle and mould，applying of EMBr，etc. By means of corresponding measures，the maximum casting speed of FSTC thin-slab caster of tangsteel increased from 4.5 m/min to 6.0 m/min，and the slab has good surface quality，no defects such as segregation，porosity and shrinkage in microstructure of slab，The hot rolled coils also have good microstructure and properties.

**Key words**：thin-slab caster；casting speed；microstructure；property

近年来，随着薄板坯连铸装备技术的不断发展，全无头轧制的薄板坯连铸连轧工艺受到钢铁行业的普遍高度重视。与传统板坯连铸相比，该工艺具有生产效率高、质量均一性好、能源消耗低、金属收得率高、投资回报快等多方面优势。由于轧辊散热条件和铸轧生产匹配性等因素的限制，全无头轧制必须保证连铸机保持很高的拉速（一般在5～6 m/min）[1-3]。

唐钢FSTC薄板坯连铸连轧生产线是唐钢2003年自主集成的生产线，2台薄板坯连铸机采用达涅利公司技术，年设计产能250万t，然而，唐钢FTSC薄板坯连铸的拉速相对较低，攻关前最高拉速4.5m/min，限制了产线效率的提升与全无头轧制的实施，因此，本文的目的是通过分析和改善结构。

## 1 唐钢FSTC薄板坯连铸机主要技术参数

唐钢FTSC薄板坯连铸机主要技术参数如下，

钢包容量：150 t；

铸机类型：直弧形，直线段高1.95 m；

铸机半径：5 000 mm（多点弯曲和矫直）；

结晶器：长漏斗型（带漏钢预报系统）；

中间包容量：38 t（溢流容量42 t）；

冶金长度：14.24 m；

铸机浇注断面：92.5/87.5/72.0/67.5×（860～1 730）mm；

扇形段布置：共10个扇形段，13个冷却环路。

## 2 高拉速控制工艺

### 2.1 精准控制钢水成分和温度

合理的钢水成分和温度是实现铸机高拉速生产的关键，为满足高拉速生产，唐钢薄板坯连铸机采用了精准控制钢水成分和过热度的方法，即根据钢中成分含量的不同以及钢水过热度的不同，设定不同的铸机拉速，以保证生产稳定，具体如下：

（1）由于钢中C含量越接近包晶区（C质量分

作者简介：单庆林（1978—），男，大学本科，正高级工程师； E-mail：shanqinglin2016@163.com； 收稿日期：2019-09-22

数0.08%～0.17%)，铸坯的裂纹倾向越大，因此生产过程中，C含量越接近包晶区的钢，拉速控制越低，以减小铸坯裂纹倾向，即浇注低碳钢(C质量分数0.040%～0.052%)，当C质量分数0.052%～0.055%，拉速不得高于5.5 m/min，C质量分数高于0.055%，拒浇。浇注中碳钢(C质量分数0.19%～0.21%)，当C质量分数小于0.19%，拉速不得高于5.5 m/min；当C质量分数小于0.18%，拒浇。

(2) S会使钢产生热脆，P使钢产生冷脆，都是钢中的有害元素，因此钢中严格控制其含量，因此唐钢生产过程中，低碳钢中S的质量分数要求小于0.006%，P质量分数要求不超过0.022 %，当S质量分数0.006%～0.008%，拉速不得高于5.5 m/min；S质量分数高于0.008%，拒浇。P质量分数高于0.022%，拒浇。中碳钢S质量分数要求不超过0.004%，P质量分数要求不超过0.025%，S质量分数0.004%～0.005%，拉速不得高于5.5 m/min；S质量分数0.005%～0.006%，拉速不得高5.0 m/min；S质量分数高于0.006%，拒浇。P质量分数高于0.025%，拒浇。

(3) 钢水过热度过高和过低都对高拉速生产产生不良影响，过热度过高，出结晶器的坯壳过薄，容易漏钢，过热度过低会造成冷钢在水口内壁絮集，造成通钢量减小，甚至造成水口冻结，导致停浇事故。因此实际生产过程中唐钢板坯连铸机开机炉次，要求钢水过热度为30～45 ℃，钢水过热度高于52 ℃时，拒开；连浇炉次，要求钢水过热度20～30 ℃，钢水过热度30～35 ℃，拉速不得超过5.0 m/min；钢水过热度35～40 ℃，拉速不得超过4.5 m/min；钢水过热度高于40 ℃，停浇，以免发生漏钢事故。

### 2.2　开发高拉速生产用保护渣

高拉速对保护渣提出了更高要求[4-6]：(1)提供足够的保护渣消耗量。保护渣的消耗量降低容易使液态渣膜破裂，发生粘结；(2)具有适宜的液渣层厚度，以防止高拉速下保护渣供应不足；(3)坯壳与结晶器壁间渣膜厚度适宜，分布均匀。唐钢薄板坯连铸机高拉速生产实践表明，拉速超过4.5 m/min后，高拉速使得渣耗量下降，流入坯壳与结晶器铜板间的液渣形成的渣膜难以满足润滑的需要，频繁发生粘结，并且高拉速下，形成的渣膜不均匀，传热效果变差，影响坯壳的均匀生长，铸坯纵裂倾向增加，同时由于由于坯壳在结晶器内停留时间变短，导致坯子表面微小裂纹没有足够时间愈合，导致板卷表面裂纹缺陷增多。为满足唐钢薄板坯连铸机高拉速生产要求，唐钢开发了高拉速专用保护渣，保护渣的主要物理性能如表1所示，可见该保护渣具有较低的黏度、熔点和较快的熔化速度，使液态渣膜均匀稳定，保证了铸坯出结晶器之前坯壳与结晶器铜板之间液态渣膜的连续性，使得铸坯与结晶器之间的摩擦是液体摩擦，可有效控制粘结。同时，该保护渣碱度和析晶温度高，能够控制传热减少纵裂。

**表1　高拉速保护渣的物理性能**

**Table 1　Physical indexes of mould powder for high casting speed production**

| 钢种 | 碱度 | 黏度/(Pa·s$^{-1}$) | 熔点/℃ | 熔速/s | 转折温度/℃ | C/% |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 中碳钢、中碳低合金钢 | >1.60 | <0.30 | 1 072 | 23 | 1 130 | 10.10±1.00 |
| 低碳钢、低碳低合金钢 | >1.20 | <0.50 | 1 012 | 32 | 1 142 | 7.10±1.00 |

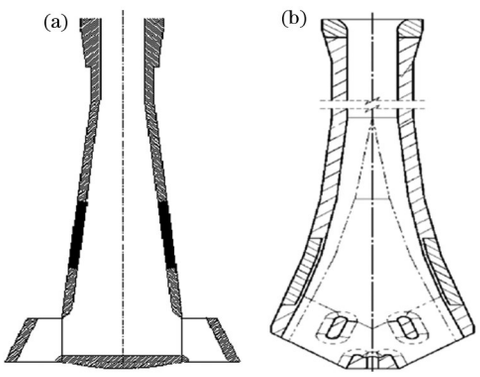
### 2.3　优化浸入式水口结构

合理的浸入式水口结构是保证结晶器液面稳定，保护渣流入均匀的关键[7-9]。原唐钢薄板坯连铸机采用如图1(a)所示的水口结构，生产过程中随着拉速的提高，结晶器液面波动变大，局部位置甚至出现翻腾现象，导致保护渣在坯壳与结晶器铜板间流入不均，容易发生粘结或产生裂纹缺陷，为此唐钢优化了水口结构，新的水口结构如图1(b)所示，水口工作端采用了五吐出孔设计方案，水口的一个孔在水口底部中心位置，该吐出孔严格垂直向下，该孔钢水流量占比16～17%，其目的是减少其余四个孔的通钢量，从而达到降低向上流股对结晶器液面扰动的作用，侧壁上的两个吐出孔呈倾斜向上，钢水流量占比在19%～20%，其作用是将钢水直接输送到结晶器上部，改善保护渣的融化条件，作为主流道的两个下吐出孔具有较大的向下水平导流倾角，具有稳定结晶器液面的作用，流量占比63%～65%。水口结构优化后，结晶器液面局部翻腾现场消失，可保证结晶器液面稳定，1 300 mm以上断面6.0 m/min拉速、1 300 mm以上5.5 m/min拉速均可稳定生产。

### 2.4　改进结晶器结构和冷却方式

高拉速生产时通过结晶器铜板的热流量增加，铜板表面温度升高，如温度过高，容易产生镀层脱落、铜板磨损变形等问题[10-12]。唐钢薄板坯连铸机高拉速生

产时遇到问题主要如下：(1)拉速达到4.5 m/min后，窄板铜板边部磨损严重，连铸坯出现角横裂缺陷；(2)拉速大于4.3 m/min后，铜壁弯月面处镀层出现严重龟裂甚至脱落；(3)拉速大于4.8 m/min时，铜板弯月面出现熔化现象。




(a) 优化前； (b) 优化后。

**图1 水口结构优化前后结构对比**

**Fig.1 Comparison of submerged nozzle structure before and after optimization**

采取解决措施如下：(1)进行结晶器窄板反倒角设计，符合窄面坯壳的自然形状，使坯壳所受相对摩擦应力减小，铸坯角横裂发生率由22.99%降低至0.06%。(2)采用结晶器上口裸镀铜板技术，解决了镀层脱落问题。(3)进水方式改为上进水方式，消除铜板熔化现象。并将冷却方式由水孔改为水槽，采用CuCrZr材质铜板，结晶器铜板插入的热电偶温度显示，弯月面温度降低了60 ℃，结晶器下部温度上升33 ℃，使高拉速下结晶器铜板使用寿命由132炉提高至350炉。

## 2.5 应用电磁制动技术

合理控制钢液流动是薄板坯连铸最关键的技术之一，因为它对连铸坯的表面和内部质量的影响很大，同时还对生产顺行具有显著影响。随着拉速的增加，单位时间自结晶器水口内流出的钢液量加大，钢液流速变快。这就给结晶器内流场控制带来了很大的困难。在水口高速射流区域施加结晶器静磁场能够减缓上回流区流动强度和液面波动，从而减小铸坯缺陷概率[13-14]。唐钢薄板坯连铸机当拉速达到5 m/min以上时，仅凭水口不能稳定弯月面流速及结晶器流场，难以达到稳定生产和铸坯质量目的，因此2019年3月安装了电磁制动装置，结果表明，低拉速（拉速低于4.5 m/min）时，电磁制动对液位影响不明显，拉速大于4.5 m/min时，电磁制动装置使液位明显稳定，图2为拉速5.0 m/min下，投入电磁制动前后结晶器液位对比图，可见投入电磁制动后，结晶器液位波动幅度减少了近50%，有效的减小了结晶器液位波动，可满足高拉速的生产需求。

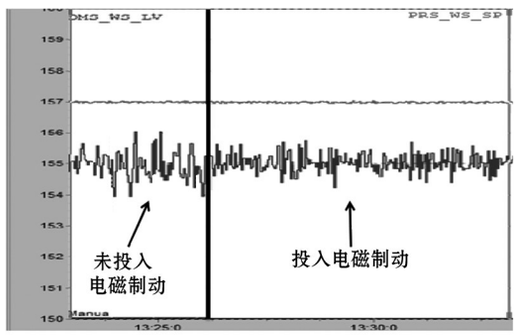



**图2 投入电磁制动前后对结晶器液位波动对比**

**Fig.2 Comparison of mould level before and after applying of EMBr**

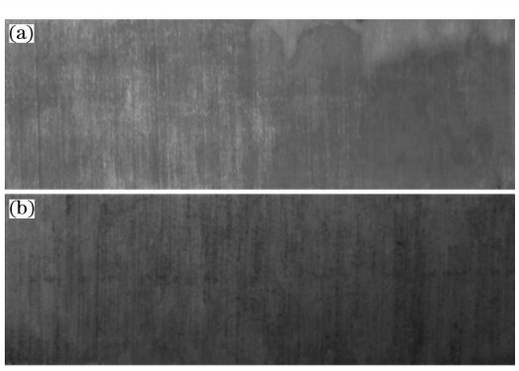
## 2.6 实施效果

通过以上技术措施，唐钢FSTC薄板坯连铸机浇注低碳钢、中碳钢生产拉速可稳定在5.5～6.0 m/min。表2为在4.0和6.0 m/min拉速下生产的铸坯（中碳钢）降判率对比，可见，铸坯由于夹渣、裂纹缺陷的降判率有所升高，说明拉速提高，铸坯表面质量有所下降，但6.0 m/min拉速下生产的铸坯仍保持较低的降判率，质量仍较好。图3为两种拉速下生产的铸

**表2 4.0和6.0 m/min拉速下生产的铸坯降判率对比**

**Table 2 Comparison of degrade rate of slab in casting speed of 4.0 and 6.0 m/min**

| 拉速/（m·min$^{-1}$） | 中碳钢 | | 低碳钢 | |
|---|---|---|---|---|
| | 夹渣降判率/% | 裂纹降判率/% | 夹渣降判率/% | 裂纹降判率/% |
| 4.0 | 0.08 | 0.11 | 0.31 | 0.12 |
| 6.0 | 0.17 | 0.17 | 0.56 | 0.28 |

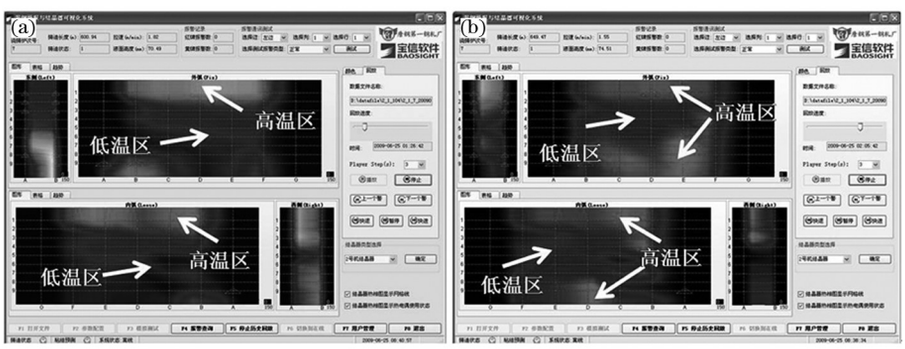



(a) 4.0 m/min； (b) 6.0 m/min。

**图3 拉速4.0 m/min和6.0 m/min铸坯低倍组织对比**

**Fig.3 Macrostructure of slab produced at casting speed of 4.0 m/min and 6.0 m/min**

坯（中碳钢）低倍组织对比照片，可见两种拉速下铸坯组织无明显差别，都没有疏松缩孔和偏析，两种拉速下铸坯金相组织如图4所示，可以看出6 m/min拉速下，铸坯表层等轴晶区厚度明显变薄，内部组织未见明显差异。两种拉速下铸坯生产的热轧卷性能如表3所示，可见不同拉速下同种规格的产品，性能相差不大，高拉速生产的铸坯仍然拥有良好的表面质量、内部质量以及组织性能。




（a）4.0 m/min；（b）6.0 m/min。

**图4　拉速4.0 m/min和6.0 m/min铸坯金相组织**

**Fig.4　Metallograph of slab produced at casting speed of 4.0 m/min and 6.0 m/min**

**表3　拉速4.0 m/min和6.0 m/min生产的热轧卷性能对比**

**Table 3　Comparison of properties of hot rolled coils produced at casting speed of 4.0 m/min and 6.0 m/min**

| 钢种 | 规格/mm | 拉速/（m·min$^{-1}$） | 力学性能 | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | | 抗拉强度/MPa | 屈服强度/MPa | 延伸率/% |
| Q235B-QC（铸坯SS400） | 2.3 | 6.0 | 480 | 364 | 35.0 |
| | 2.3 | 4.0 | 464 | 362 | 33.5 |
| | 2.75 | 6.0 | 469 | 357 | 39.0 |
| | 2.75 | 4.0 | 476 | 370 | 33 |

## 3　结论

（1）通过精准控制钢水成分和温度，开发高拉速保护渣，优化浸入式水口结构，改进结晶器结构，应用电磁制动技术等措施，使唐钢FSTC薄板坯连铸机最高拉速由4.5 m/min提高至6.0 m/min。

（2）高拉速生产的连铸坯表面质量良好，内部组织未有明显的疏松、缩孔、偏析等缺陷，轧制的热轧卷具有良好的组织和性能。

**参考文献：**

[1] 杨晓江. 唐钢薄板坯高拉速技术优化研究[J]. 连铸，2016，41（5）：21.

[2] 杨杰，姚海明，郝占全. 薄板坯连铸高拉速技术研究[J]. 连铸，2016，41（5）：47.

[3] 李金栋，王胜东. 板坯连铸高拉速生产实践[J]. 连铸，2014，39（3）：1.

[4] 赵建平，董福胜，马新光，等. 唐钢提高FSTC薄板坯连铸机拉速的生产实践[J]. 河北冶金，2008，168（6）：40.

[5] 蔡宁，杜锋. 提高板坯连铸拉速的技术措施[J]. 炼钢，2007，23（5）：58.

[6] 马坤霞，刘士朝，郝立卿，等. 薄板坯连铸机高拉速下铸坯质量控制实践[J]. 连铸，2014，39（3）：39.

[7] 王先勇，刘彭涛. 小方坯高速连铸关键技术研究[J]. 连铸，2015，40（6）：1.

[8] 王胜东，钱宏智，詹美珠，等. 高拉速下凝固进程的试验测量与模型预测[J]. 钢铁，2016，51（3）：49.

[9] 景财良，罗伯钢，田志红. 首钢京唐3号铸机高拉速工艺研究与实践[J]. 钢铁，2014，49（3）：46.

[10] 孟祥宁，朱苗勇. 高拉速连铸结晶器振动参数对板坯表面裂纹形成的影响[J]. 钢铁，44（8）：34.

[11] 姚成功，田松林，王文学. 高拉速板坯结晶器设计分析[J]. 连铸，2018，43（1）：22.

[12] 王永胜. 高拉速板坯连铸结晶器液面波动影响因素研究[J]. 中国冶金，2007，22（11）：30.

[13] 王永胜. 高拉速板坯连铸结晶器液面波动影响因素研究[J]. 中国冶金，2009，19（9）：24.

[14] 黄财德，何文远，刘延强，等. 电磁制动对镀锡板高拉速结晶器内流场的影响[J]. 钢铁，2019，54（8）：90.