

# 首钢京唐钢铁公司高品质钢生产工艺技术

李金柱<sup>1,2)</sup> 赵长亮<sup>1,2)</sup> 田志红<sup>1)</sup> 王新华<sup>2)</sup>

1. 首钢京唐钢铁公司

2. 北京科技大学

**摘 要** 首钢京唐公司炼钢设计选用了铁水包多功能化技术、KR铁水脱硫、“脱磷转炉+脱碳转炉”冶炼、高拉速连铸等工艺装备，以实现低成本大批量生产洁净钢。投产后5年来生产运行结果证实了所选用工艺的先进性，主要表现为：（1）采用铁水包多功能化技术和KR脱硫工艺可以获得非常高脱硫效率，脱硫处理后硫含量全部低于25ppm，其中低于10ppm炉次达81.3%；（2）采用“脱磷转炉+脱碳转炉”冶炼工艺，脱碳转炉冶炼负担显著减轻，300t转炉冶炼周期可以稳定控制在30min以内，为实现“炼钢-精炼-连铸”快节奏生产提供了保证，这是相对于常规炼钢工艺的最大优势；（3）采用了高拉速连铸工艺（拉速：2.3~2.5m/min），带动了转炉、精炼、连铸产线整体快节奏运行，显著减少了钢水温降，降低转炉出钢温度。与常规炼钢工艺相比，京唐钢铁公司钢材磷、硫、氧、夹杂物含量均明显降低，实现了低成本、高效率、大批量生产洁净钢。

## 1. 前言

首钢京唐联合钢铁责任有限公司（下文简称首钢京唐公司）厂址与曹妃甸港口毗邻，该港口水深25m以上，可停靠25万吨级大型铁矿石运输船等，建有年吞吐3000万吨级铁矿石码头和5000万吨级煤炭码头。首钢京唐公司主要生产设施包括：2台550m<sup>2</sup>烧结机，4座60孔炼焦炉，2座5500m<sup>3</sup>高炉，2座铁水脱磷预处理专用转炉，3座脱碳炼钢转炉，4台大型板坯连铸机，2250mm和1580mm热连轧机各一套，2230mm、1700mm和1550mm冷连轧机组各一套，设计年产粗钢920万吨，钢材892万吨。

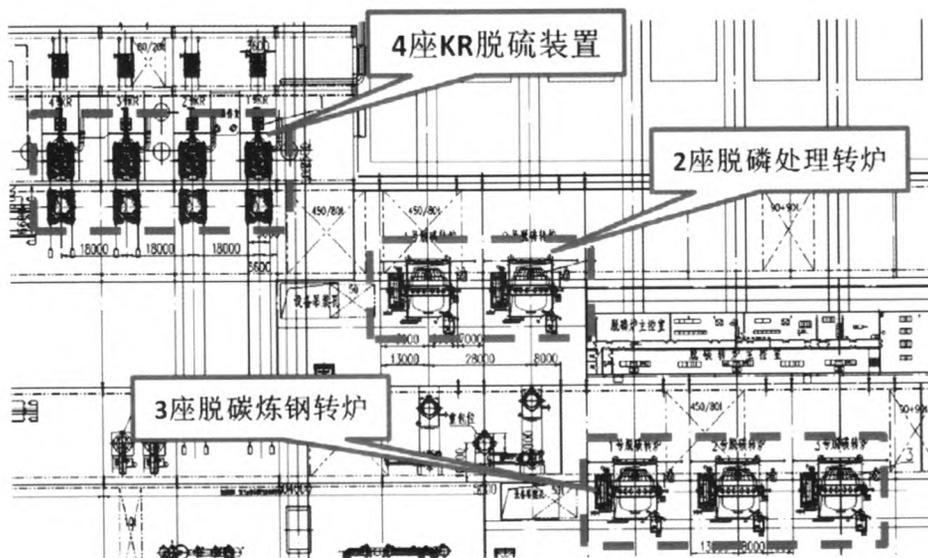


图1 首钢京唐公司炼钢厂铁水预处理与转炉炼钢工序平面布置示意图

首钢京唐公司炼钢厂建有4座KR机械搅拌式铁水脱硫预处理装置，2座转炉为铁水脱磷预处理专用转炉（简称为脱磷转炉），3座转炉为脱磷后铁水脱碳炼钢转炉（简称为脱碳转炉），脱磷转炉与脱碳转炉在不同跨间布置（图1）。炉外精炼装置包括2台双处理工位RH真空精炼装置，1台双处理工位LF精炼炉，2台CAS-OB吹氩精炼装置。板坯铸机为4台，其中1#和2#铸机浇铸铸坯最大宽度为2150mm，3#和4#铸机浇铸最大宽度为1700mm，铸坯厚度为237mm。

低成本、高效率、大批量生产洁净钢是首钢京唐公司炼钢工艺装备选型所遵循基本理念，为此选用了铁水包多功能化技术、更高脱硫效率的KR铁水处理工艺、高循环速率RH炉外精炼装置、高拉速板坯铸机等，尤其是在中国首次大规模采用了铁水脱磷预处理和脱碳转炉少渣冶炼工艺（以下

简称“脱磷转炉+脱碳转炉”冶炼工艺)。首钢京唐公司炼钢厂于2009年5月投产,近5年实际生产效果证实了该工艺装置设计的先进性,本文对其进行简要介绍和分析讨论。

## 2. 首钢京唐公司炼钢工艺装置运行效果

### 2.1 KR铁水脱硫预处理

首钢京唐公司对高炉铁水采用“称量-运输-脱硫-装炉”同一铁水包多功能化技术(亦称之为“一包到底”工艺),高炉铁水包由铁水车运输到炼钢厂内,在KR脱硫预处理站对包内铁水进行脱硫和扒渣处理,然后兑入转炉进行后续冶炼。由于炼铁厂与炼钢厂之间布局紧凑(高炉出铁场至炼钢车间运输距离仅841m),加之不对铁水进行转兑,铁水温降得到了有效控制,KR处理前铁水温度平均为1386℃(标准差:27.8℃),为后续高效脱硫预处理提供了十分有利条件。

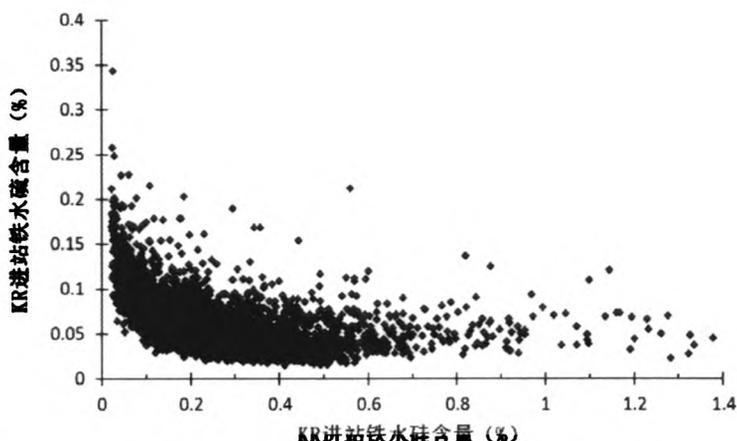


图2 KR处理前铁水硅含量与硫含量对应关系

表1 KR铁水脱硫预处理主要工艺参数

搅拌时间(min)	搅拌头转速(cpm)	脱硫剂	脱硫剂用量(kg/t)	扒渣时间(min)
8.5~13.0	150~200	CaO-CaF <sub>2</sub>	6.0~11.5	平均: 9.5

首钢京唐公司两座5500m<sup>3</sup>大型高炉投产后运行基本正常,利用系数稳定在2.2t/d/m<sup>3</sup>以上,但尚存在铁水成分波动较大问题,主要表现为铁水硅和硫含量的波动。由图2给出的铁水硅与硫含量关系可以看到,有相当数量炉次,铁水硅含量低于0.10%,硫含量高于0.07%,甚至达到了0.1%以上。由于硫含量波动范围大,KR铁水脱硫处理采用的脱硫剂加入量、搅拌时间等工艺参数控制范围也较大,表1为大多数炉次KR脱硫预处理采用的工艺参数。由图3给出的2014年1~3月份

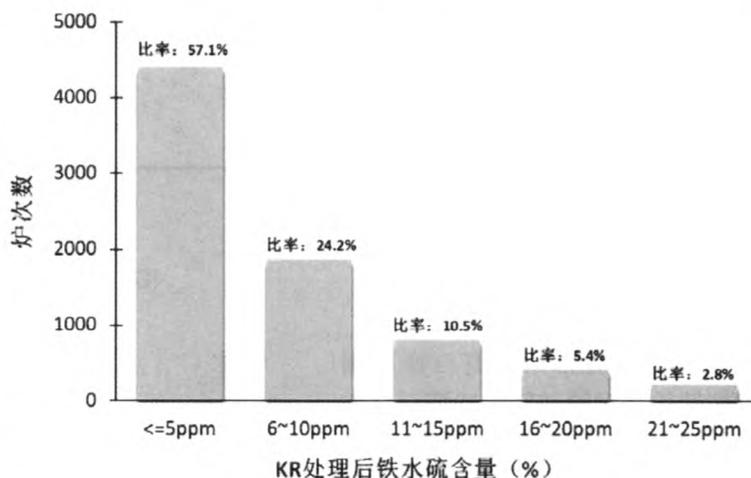


图3 KR脱硫处理后铁水硫含量的分布

7727包铁水脱硫处理后的硫含量分布可以看到,KR机械搅拌处理工艺具有非常高脱硫效率,在近1/3的铁水含硫量超过0.06%情况下,KR处理后铁水硫含量全部低于25ppm,其中低于10ppm炉次高达81.3%。首钢京唐公司采用铁水包多功能化技术和高效KR机械搅拌脱硫预处理工艺,对其能够低成本大批量生产低硫、超低硫钢发挥了重要作用。

### 2.2 转炉铁水脱磷预处理

首钢京唐公司建有2座为脱磷预处理专用转炉,可以对接近全量铁水进行脱磷处理。脱磷转炉装入量在320t左右,废钢比控制在8%左右,氧枪供氧强度在1.4Nm<sup>3</sup>/min/t左右,炉底设有16个双环缝式喷口吹入N<sub>2</sub>进行搅拌,底吹气体流量控制在0.25Nm<sup>3</sup>/min/t左右,脱磷转炉吹炼时间在7min左右,冶炼周期平均为22.8min,石灰用量、炉渣碱度、处理结束铁水碳含量等数据见表2。

表2 脱磷预处理转炉冶炼相关数据(统计炉次:2720~2820炉)

铁水[%P]		冶炼结束[%C]		石灰用量(kg/t)		炉渣CaO/SiO <sub>2</sub>		炉渣ΣFeO (%)	
平均值	标准差	平均值	标准差	平均值	标准差	平均值	标准差	平均值	标准差
0.111	0.0095	3.25	0.19	12.82	3.24	2.111	0.297	12.64	5.71

图4给出了脱磷转炉冶炼前后铁水磷含量变化情况，首钢京唐公司铁水磷含量在0.080~0.145%之间（平均为0.111%），经脱磷转炉冶炼，铁水磷绝大多数降低至0.02~0.05%范围（平均为0.033%），表观脱磷率( $[P]_{\text{初始}} - [P]_{\text{终点}} / [P]_{\text{初始}} \times 100$ 平均为70.3%。采用脱磷预处理减轻了脱碳转炉冶炼负担，为缩短脱碳转炉炼钢周期和生产洁净钢发挥了重要作用。

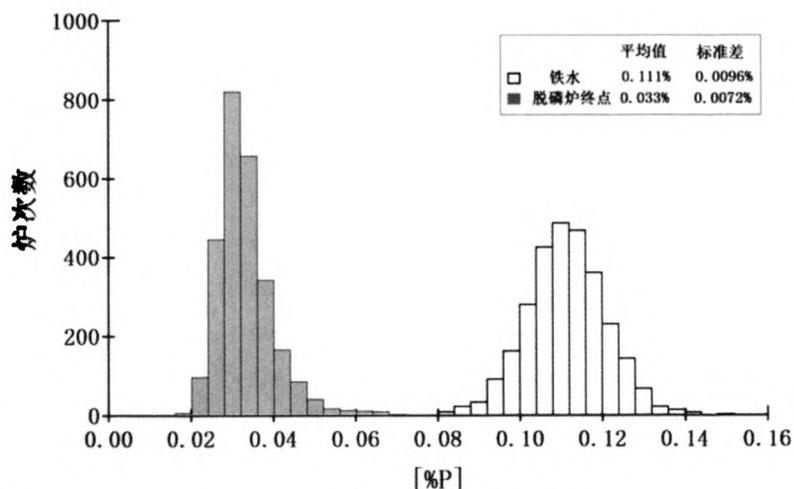


图4 脱磷转炉冶炼前后铁水磷含量分布

图5为对2014年1季度脱磷转炉2715炉数据进行整理，得到的石灰用量与终点脱磷率的关系。由于数据量大，为了更清楚显示石灰量与脱磷率之间关系，采用了移动平均分析方法，按照石灰加入量排序，对每10个炉次脱磷率取一平均值，然后将每个平均值相连接成线（图5中红色线）。可以看到，在石灰用量低于10kg/t时，脱磷率随石灰用量增加呈增加的趋势，但当石灰用量在10kg/t以上时，石灰用量对脱磷转炉脱磷率影响不大。

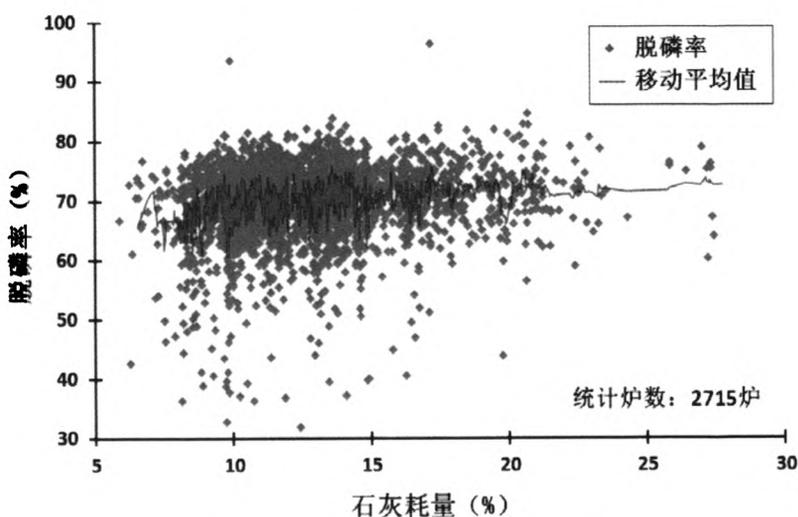


图5 脱磷转炉脱磷率随石灰用量的变化

### 2.3脱碳转炉冶炼

首钢京唐公司建有三座脱碳专用转炉，对脱磷转炉冶炼后铁水进行脱碳炼钢，亦可对常规铁水进行冶炼。脱碳转炉基本采用全铁水冶炼（不装废钢），装入量在310t左右，出钢量294t左右，氧枪供氧强度在 $3.0\text{Nm}^3/\text{min}/\text{t}$ 左右，炉底设有8个双环缝式底吹喷嘴吹入 $\text{N}_2/\text{Ar}$ 进行搅拌，底吹搅拌强度在 $0.05\text{Nm}^3/\text{min}/\text{t}$ 左右。

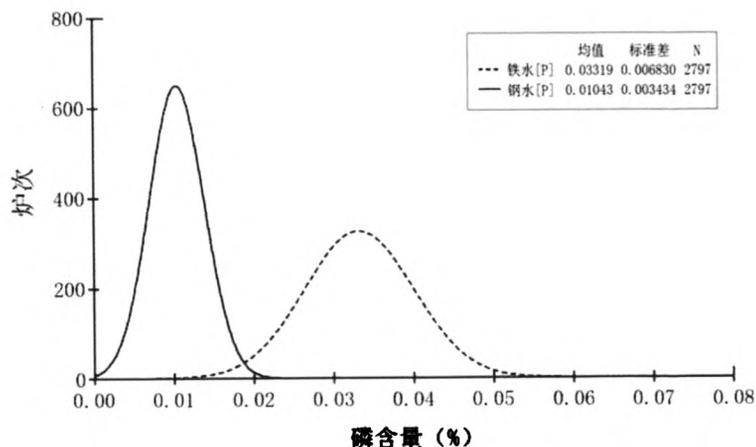


图6 脱碳炉冶炼前后[P]含量变化

图6为脱碳炉终点钢水磷含量与入炉铁水磷含量的分布情况，由于在之前脱磷转炉脱除了70%左右磷，脱碳转炉终点钢水磷含量较常规转炉冶炼工艺有明显降低，在所统计的2797炉中，终点钢水磷含量 $\leq 0.01\%$ 炉次超过60%。而在生产抗酸管线钢等要求超低磷含量要求钢种时，通过适当增加脱碳转炉石灰用量，采用合理氧枪枪位与供氧强度等，可以稳定地将钢水[P]降低至0.006%以下。

图7为脱碳转炉冶炼终点钢水碳含量与氧含量乘积 ( $[\%C][\%O]$ ) 与转炉采用常规铁水冶炼终点碳氧积的比较，可以看到，脱碳转炉冶炼终点钢水碳氧积平均为0.00231，显著低于常规转炉冶炼

工艺的终点钢水碳氧积（平均为0.0026），这主要是由于脱碳转炉脱碳速度快、渣量减少而造成的。在终点碳含量基本相同情况下，脱碳转炉冶炼终点钢水氧含量降低，这对降低脱氧剂和合金消耗，减少钢中非金属夹杂物，生产洁净钢是非常有利的。

图8为脱碳转炉冶炼周期（出钢-出钢时间）分布情况，为了对比也给出了同期常规铁水（未经脱磷转炉冶炼）转炉冶炼周期。经脱磷转炉处理过的铁水，碳、硅、磷含量较常规铁水降低，脱碳转炉供氧吹炼时间缩短，加之脱碳转炉不装废钢，溅渣护炉也较短（表3），因此其冶炼周期与常规转炉冶炼相比减少了5min左右。在图8所统计的3299炉脱碳转炉冶炼周期，短于28min的炉次比率超过60%，其中有近10%炉次冶炼周期短于25min。

首钢京唐公司1#和3#铸机为高拉速铸机，目前生产低碳冷轧钢种拉速最高已达2.3~2.5m/min。以浇铸1050~1100mm宽度铸坯为例，拉速超过2.3m/min，单炉连铸周期即

缩短至29~33min范围。采用高拉速连铸，缩短连铸周期，实现“转炉-精炼-连铸”产线整体快节奏运行，是首钢京唐公司建设高水平钢厂重要目标，而采用“脱磷转炉+脱碳转炉”炼钢工艺，可以将转炉冶炼周期稳定地控制在30min以内，为钢厂整体快节奏运行提供有力保证，以至于可以这样认为，这是首钢京唐公司所选炼钢工艺相对于常规炼钢工艺的最大优势。

表3 脱磷铁水脱碳转炉冶炼与常规铁水冶炼周期比较

转炉冶炼工艺类型	脱碳转炉冶炼		常规铁水转炉冶炼	
	平均值	标准差	平均值	标准差
铁水、废钢装入时间 (min)	4.242	0.933	5.829	1.924
供氧吹炼时间 (min)	12.64	1.647	15.92	2.335
溅渣护炉时间 (min)	3.465	1.218	4.261	1.023
冶炼周期 (min)	28.15	2.72	33.29	3.15

首钢京唐公司采用“脱磷转炉+脱碳转炉”冶炼工艺也遇到了许多困难，而脱碳转炉热量不足是其中最大难题，目前在冶炼较高出钢温度钢种时，脱碳炉通常需加入一定量提温剂，如碳化硅、硅铁合金等。解决这一问题关键是加快“转炉-精炼-连铸”产线生产节奏，控制钢水运输、精炼、连铸过程温降，降低脱碳转炉出钢温度，本文对此将在介绍高拉速连铸生产时加以进一步论述。

#### 2.4 炉外精炼

首钢京唐公司建有两台双精炼工位RH真空精炼装置、一座双精炼工位LF钢包精炼炉和两台CAS-OB精炼装置，其中CAS-OB装置主要用于普通低碳、中碳热轧品种，应用比率占全钢种的20%左右。LF精炼工艺主要用于要求超低硫、极低硫含量控制的低合金高强度钢，如管线钢、工程机械用高强钢等，占钢产量的27%左右。RH真空精炼则主要用于汽车、家电、镀锡板的低碳、超低

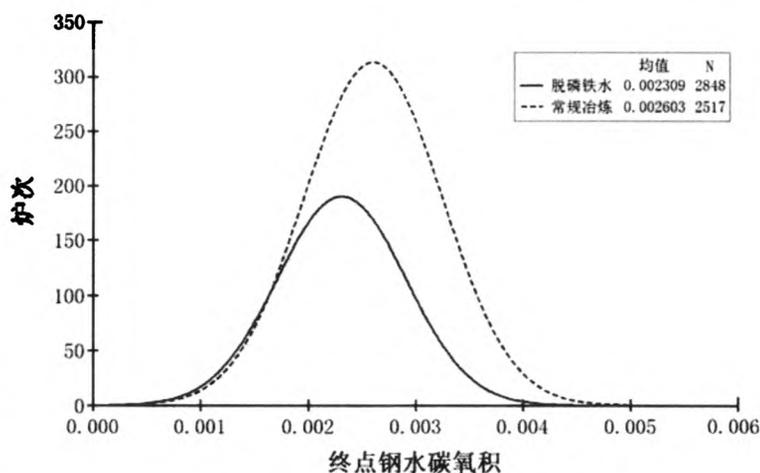


图7 脱磷铁水与常规铁水转炉炼钢终点碳氧积比较

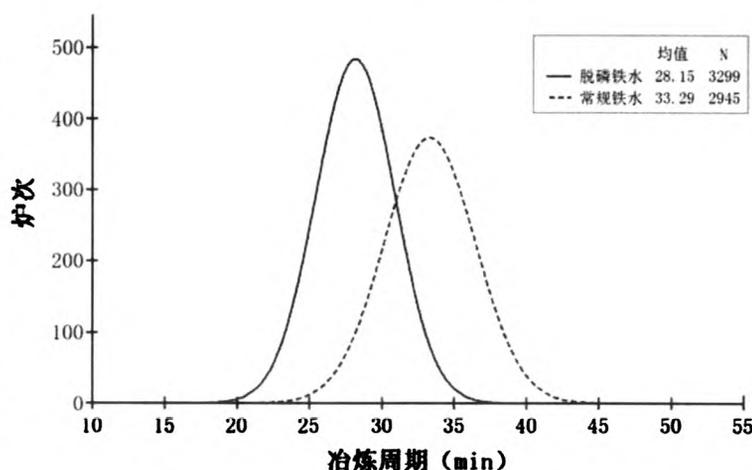


图8 脱磷铁水与常规铁水转炉冶炼周期比较

碳钢及部分低合金高强度钢，应用比率在53%左右。表4给出了首钢京唐公司炉外精炼工艺装置主要参数，其中LF精炼工艺参数为生产X80/70管线钢的相关数据，RH相关参数为生产超低碳钢（IF钢）数据。

表4京唐公司炉外精炼装置主要参数

CAS-OB		LF		RH	
浸渍罩内径(m)	1.676	变压器功率(MW)	45	真空泵类型	蒸汽泵
底吹Ar流量(Nl/min)	~2000	底吹Ar流量 (Nl/min)	~1600	真空抽气能力(kg/h, 67Pa下)	1250
吹氩时间(min)	15	升温速率(°C/min)	~4.5	浸渍管内径 (mm)	750
精炼周期(min)	33.5	通电加热时间	26.4	提升气体流量(Nl/min)	~4000
钢水温降(°C)	23.2	钢水温度提升(°C)	55.2	钢水温降(°C)	29.5
吹氧提温比率(%)	12.5	精炼周期 (min)	47.8	精炼周期 (min)	33.6

对于X80/70管线钢、工程机械用高强钢等钢种，采用“KR脱硫预处理-脱磷转炉-脱碳转炉-LF精炼-RH精炼”工艺流程。以X80/70管线钢为例，其精炼工艺要点为：（1）脱碳转炉出钢严格挡渣，出钢过程向钢包内加入50%左右精炼渣料和铝进行脱氧；（2）LF精炼过程加入其余50%左右渣料和足够铝粒，将炉渣碱度、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>和FeO含量分别控制在5~7、22~25%和1%以下，并在精炼后期增大底吹Ar流量以加强脱硫；（3）RH精炼时间不短于25min，以获得良好脱氢、脱氮和非金属夹杂物去除效果。

图9为首钢京唐公司生产X80/70管线钢，炉外精炼前后钢水[S]、[P]、[N]、T.O平均含量的变化。对于X80/70管线钢，降低磷含量有利于提高钢板低温冲击韧性、焊接、抗HIC等性能，京唐钢铁公司采用“脱磷转炉+脱碳转炉”冶炼工艺，可稳定地将[P]控制在0.009%以下。由图中还可看到，由于LF精炼脱硫效率高（包括脱碳转炉出钢过程的脱硫），即便脱碳转炉终点钢水硫含量升高至0.0089%左右（为降低成本适当放宽了废钢等原材料硫含量控制要求所致），经LF精炼[S]含量仍可去除至0.0006%左右，RH精炼后钢水T.O和[N]含量可控制在0.0012%和0.0030%以下，达到了很高洁净度水平。2013年首钢京唐公司X80/70等牌号管线钢产量为44.9万吨。

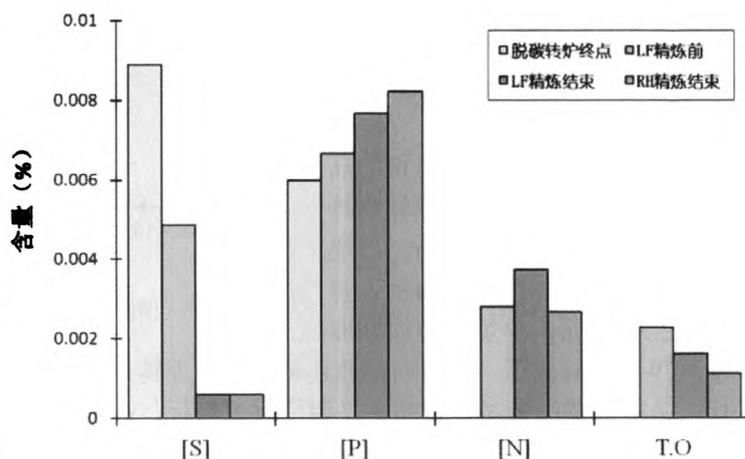


图9 X80/70钢精炼前后钢水[S]、[P]、[N]、T.O含量的变化

首钢京唐公司RH真空精炼炉主要用于汽车、家电用超低碳钢（IF钢）和低碳铝脱氧钢（LCAK钢），超低碳钢采用常规RH精炼工艺，在RH精炼脱碳期将碳脱除至0.0020%以下，然后加入Al、Ti等进行纯循环搅拌，超低碳钢RH精炼周期平均为33.6min，其中纯循环时间为8.5min左右。低碳铝脱氧钢种的RH精炼采用“轻处理”工艺，首先在较低真空度下（1100Pa左右）将钢水[C]由0.035~0.05%脱除至0.01~0.03%，

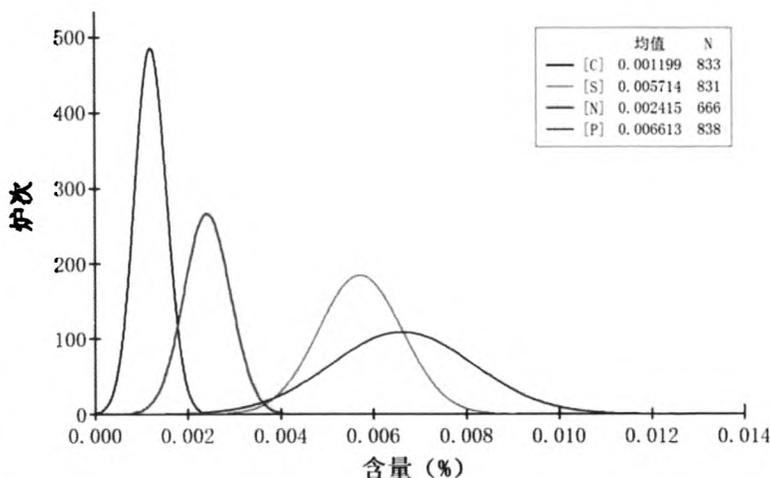


图10 超低碳钢RH精炼结束钢中杂质含量分布

然后加入铝、增碳剂等并进行纯循环搅拌。低碳铝脱氧钢种RH精炼周期平均为26.5min，其中纯循环时间为9.2min。

图10为首钢京唐公司生产汽车用超低碳钢，RH精炼后钢水[C]、[N]、[S]、[P]含量的分布情况。可以看到，[C]平均为0.0012%，[N]平均含量低于0.0025%，[P]低于0.0067%，[S]低于0.0058%，达到了很高的洁净度水平。首钢京唐公司2012年开始生产汽车钢板，2013年汽车钢板产量增加至63.1万吨，家电钢板产量达到163万吨/年。

2.5高拉速连铸

首钢京唐公司炼钢厂建有4台板坯连铸机（主要参数见表5），其中1#和3#板坯铸机设计为高拉速铸机，铸机长43m，配备有结晶器钢水电磁制动功能的FC结晶器，主要用于汽车板、家电板等冷轧钢种。2#和4#铸机长度能够满足高拉速工艺需要，但没有装备FC结晶器，主要用于中碳、低合金高强度钢等热轧钢种，采用常规拉速。与常规拉速铸机相比，高拉速连铸除能够大幅提高铸机产能，降低生产成本之外，更重要的是能够带动和加快“转炉-精炼-连铸”产线生产节奏，实现炼钢厂高效生产。

表7 首钢京唐公司板坯连铸机主要参数

参数	1#铸机	2#铸机	3#铸机	4#铸机
铸机类型	垂直+弯曲	垂直+弯曲	垂直+弯曲	垂直+弯曲
铸流数	2	2	2	2
铸坯尺寸 (mm)	厚度	237	237	237
	宽度	1100~2150	1100~2150	900~1650
铸机长度 (m)	43.548	43.548	43.548	43.548
弧半径 (m)	9.5	9.5	9.5	9.5
设计拉速 (m/min)	Max. 2.3		Max. 2.3	
中间包钢水容量 (t)	80	80	80	80
结晶器长度 (mm)	900	900	900	900
结晶器振动方式	液压振动	液压振动	液压振动	液压振动
FC结晶器	有	无	有	无
垂直段长度 (m)	2.56	2.56	2.56	2.56
二冷	动态控制	动态控制	动态控制	动态控制
动态轻压下	有	有	有	有

首钢京唐公司2009年投产后连铸采用常规拉速（1.2~1.6m/min），2012年后开始进行提高拉速试验研究，主要采取了以下措施[1~3]：

(1) 对结晶器铜板冷却水槽截面积、水槽间距、冷却水进水孔直径等进行了改进优化，保证了足够的冷却水流量和流速。

(2) 采用无Li<sub>2</sub>O的低粘度结晶器保护渣，在拉速提高至2.2~2.5m/min后，保护渣耗量仍能保证在0.22kg/m<sup>2</sup>以上，首钢京唐公司采用高拉速连铸工艺后，极少发生因保护渣耗量不足导致的粘接性拉漏事故。

(3) 拉速超过1.9m/min后，板坯窄面鼓肚达到10mm左右，这主要是由于宽面发生较大“鼓肚-压下”造成的。为此将二冷第3~6冷却区水量提高了10%，有效抑制了铸坯窄面鼓肚和反复发生的宽面“鼓肚-压下”造成的结晶器钢水液面波动增加。

(4) 对结晶器内钢水流实施电磁制动（FC结晶器，电流660A），并将浸入式水口内腔底端改为“凹形”，出口夹角由15°增加至20°。由图11可以看到，即便在2.5m/min高拉速下，结晶器液面波动也能够控制在±3mm以内，与拉速1.3m/min时（不采用FC结晶器）相当。

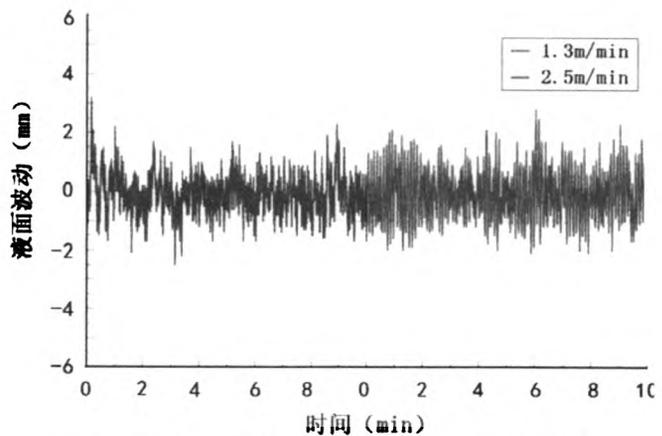


图11高拉速与常规拉速下结晶器钢水液面波动比较

图12为首钢京唐公司低碳铝脱氧钢连铸周期和RH精炼周期与拉速关系。目前高拉速主要用于浇铸较窄断面铸坯(宽度1050~1100mm)，可以看到，连铸和RH精炼周期均随拉速增加而缩短。当拉速增加至2.5m/min，连铸周期缩短至28~32min，为了保证连铸拉速稳定，RH精炼周期缩减至24~30min。

由于RH精炼、连铸周期缩短以及钢包周转加快，采用高拉速连铸工艺后，转炉出钢过程、RH精炼过程和连铸过程的钢水温降均降低。由于钢水温降减少，脱碳转炉出钢钢水温度降低了15℃(图13)。高拉速连铸显著加快了“转炉炼钢-炉外精炼-连铸”生产节奏，从而得以降低脱碳转炉出钢温度，这对于解决脱碳转炉热量不足问题、减少提温剂用量具有很重要意义。

为研究高拉速对铸坯非金属夹杂物含量的影响，如图14所示，在铸坯上表面(内弧)切取试样(100mm×80mm)，将上表面研磨掉0.5mm后，采用具备大型试样表面夹杂物自动扫描分析功能的ASPEX扫描电镜进行分析检测，每个铸坯的检测面积为11120~15290mm<sup>2</sup>。图14给出了对不同拉速浇铸铸坯试样检测到的大于50μm夹杂物的数量，其中主要为簇群状Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>夹杂物，其次为“气泡+Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>”类夹杂物。须特别指出的是，在对2.0~2.5m/min拉速浇铸铸坯所检验的总计151366mm<sup>2</sup>试样表面积中，仅检测到一个来源于结晶器保护渣卷入形成的夹杂物。

由图14可以看到，大型夹杂物数量随拉速提高呈现减少的趋势，这主要是因为：(1)由于采用了电磁控制(FC结晶器)，即便在高拉速下，结晶器钢水表面波动也得到了有效控制(图11)，因而抑制了保护渣卷入；(2)由于采用FC结晶器，结晶器钢水表面温度提高<sup>[4]</sup>，“钩状坯壳(hook)”得到有效抑制。首钢京唐公司对拉速1.0~2.3m/min范围浇铸铸坯“钩状坯壳”进行了测定，证实当拉速由1.0m/min增加至2.3m/min，“钩状坯壳”平均深度由1.57mm减少至0.46mm。

首钢京唐公司采用高拉速连铸工艺，在2.0~2.5m/min拉速下，铸坯表层(表面0.5mm下)大于50μm夹杂物数量密度控制在0.13~0.45个/cm<sup>2</sup>，达到了很高洁净度水平。

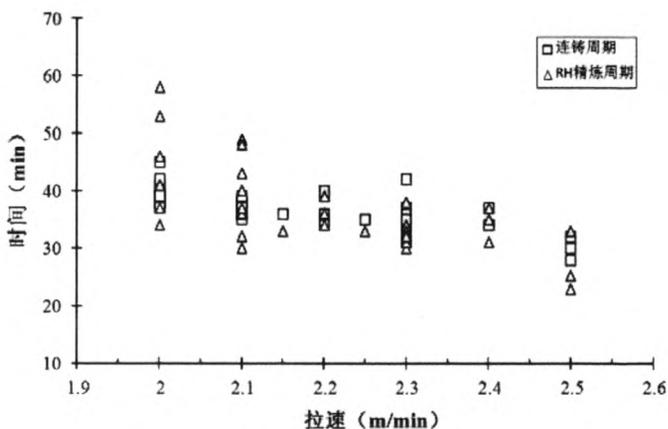


图12 连铸周期和RH精炼周期随拉速的变化

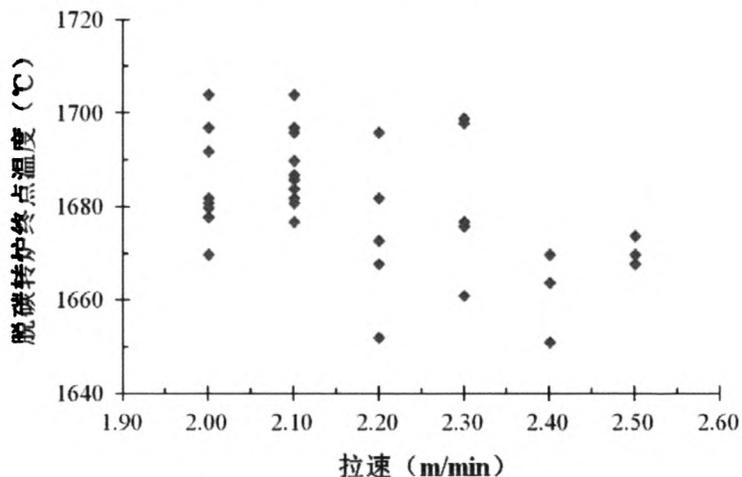


图13 脱碳转炉出钢温度随拉速的变化

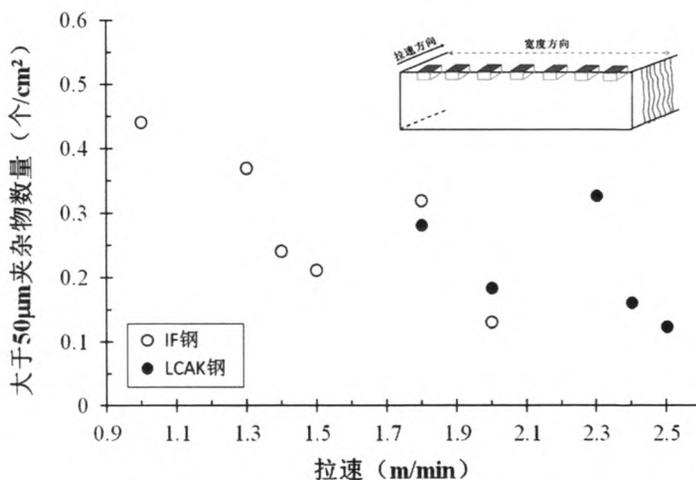


图14 铸坯表层大型夹杂物数量与拉速关系

### 3 结论

首钢京唐公司炼钢设计选用了铁水一包到底、KR铁水脱硫、“脱磷转炉+脱碳转炉”冶炼、高效率炉外精炼装置、高拉速连铸等工艺装备,以实现低成本、高效率、稳定地大批量生产洁净钢。投产后5年来生产运行结果证实了所选用工艺的先进性,主要归纳为:

(1) 采用铁水包多功能化技术和KR机械搅拌脱硫工艺,铁水脱硫处理后硫含量全部低于25ppm,其中低于10ppm炉次达81.3%。

(2) 采用“脱磷转炉+脱碳转炉”冶炼工艺,300t转炉的冶炼周期可以稳定控制在30min以内,为实现“炼钢-精炼-连铸”快节奏生产提供了保证。

(3) 对于低碳、超低碳冷轧钢种,将拉速提高至2.0~2.5m/min,除大幅提高了铸机生产效率外,还带动了“转炉-精炼-连铸”产线整体快节奏运行,减少了钢水温降,降低转炉出钢温度。

(4) 与常规炼钢工艺相比,首钢京唐公司生产钢材产品磷、硫、氧、非金属夹杂物含量均明显降低,实现了低成本、大批量生产洁净钢。

### 参 考 文 献

- [1] 李金柱,王胜东,板坯连铸高拉速生产实践,连铸, No.3, 2014, p1~6
- [2] 王胜东,彭国仲,田志红等,首钢京唐高拉速和恒拉速连铸生产工艺,第十八届全国炼钢学术会议文集,中国金属学会炼钢分会,西安,2014年, p143
- [3] 李林平,王新华,黄福祥等,低碳钢板坯高拉速实践及数值模拟,第十八届全国炼钢学术会议文集,中国金属学会炼钢分会,西安,2014年, p160
- [4] K. Kariya, Y. Kitano, et al., Development of Flow Control Mold for High Speed Casting Using Static Magnetic Fields, 1994 Steelmaking Conference, ISS, Chicago, 1994, p53-58