

新一代炼钢厂功能优化与集成

张福明 崔幸超 张德国

(北京首钢国际工程技术有限公司, 北京 100043)

摘要 本文研究分析了现代化炼钢厂洁净钢生产技术, 提出了以生产效率、制造成本和产品性能为核心的洁净钢生产技术理念。通过对新一代炼钢厂高效率、低成本、高质量钢铁产品制造功能的解析与集成, 结合首钢京唐钢铁厂炼钢—连铸工艺的设计研究, 应用动态精准设计体系, 优化配置铁水预处理、转炉冶炼、二次精炼、连铸等单元工序, 构建了基于动态有序生产体系的高效率、低成本、高质量洁净钢生产平台。

关键词 炼钢 连铸 洁净钢 铁水预处理 二次精炼

Optimization and Integration of Function on New Generation Steelmaking Plant

Zhang Fuming Cui Xingchao Zhang Deguo

(Beijing Shougang International Engineering Technology Co., Ltd., Beijing, 100043)

Abstract This paper analyzes the technology for clean steel production in modern steelmaking plant, a philosophy with production efficiency, manufacturing cost and product performance in its core. It also makes a review on functions of high-efficiency, low-cost and high-quality steel products manufactured by the new generation steelmaking plant, in combination with the study on design of steelmaking – continuous casting process of Shougang Jingtang Iron & Steel Plant. By applying precise and dynamic design system to optimize and allocate systems and working procedures of hot metal pretreatment, converter smelting, secondary refining, continuous casting process, etc, a platform of high-efficiency, low-cost and high-quality clean steel production is built.

Key words steelmaking, continuous casting, clean steel, hot metal pretreatment, secondary refining

1 引言

首钢京唐钢铁厂是我国“十一五”规划的重点工程, 是按照循环经济理念, 设计建设的新一代可循环钢铁厂, 具有优质产品制造、能源转换和消纳废弃物的三项功能。产品定位于高档次精品板材, 设计产能 927.5 万 t 钢。建设 2 座 5500m³ 高炉年产铁水 898.15 万吨, 一个炼钢厂配置 2 座 300t 脱磷转炉、3 座 300t 脱碳转炉和 3 台板坯连铸机, 建设 2250mm 和 1580mm 两条热连轧生产线, 配置 2230mm、1700mm 和 1550mm 3 条冷轧生产线, 冷热轧转换比为 57.2%, 涂镀比为 65.7%。

热轧主导产品为高品质汽车板, 特色产品为管线钢、压力容器钢和造船用钢。高强度钢抗拉强度最高可达 1200MPa, 管线钢级别为 X100。冷轧产品包括固溶型、析出型、烘烤硬化型、DP 钢及 TRIP 钢等高强度钢, 最高强度级别为 780MPa, 热镀锌产品最高强度级别为 590MPa, 彩色涂层产品最高强度级别为 440MPa。

首钢京唐钢铁厂的设计建设, 遵循“工艺现代化、流程高效化、效益最佳化”的设计理念, 在炼钢—连铸工序采用铁水“全三脱”预处理设计模式, 对铁水进行全量脱硫、脱硅、脱磷预处理, 应用动态精准设计

体系，优化高炉铁水运输—铁水预处理—转炉冶炼—二次精炼—连铸各单元工序的流程，构建了基于动态精准生产体系的高效率、低成本、高质量洁净钢生产体系。

2 洁净钢生产体系的设计理念

在钢铁工业的发展中，洁净钢的生产加速了工艺流程的优化和产品质量的提高，社会对洁净钢生产需求的日益提高，迫切需求建立一种全新的、大规模、高效率、低成本生产洁净钢的生产体制。

洁净钢是指对钢中夹杂物和杂质元素含量的控制达到能够满足钢材加工过程和使用过程的性能要求，一般是钢中杂质元素磷、硫、氮、氢、氧（有时包括碳）和非金属夹杂物含量很低的钢。产品的洁净度是保障钢铁产品新能的基本要素，也是炼钢—连铸生产过程中控制产品性能的基本功能。因此，建立洁净钢生产平台的基本目标是保证炼钢厂生产的全部钢材洁净度能达到洁净钢的基本要求。

洁净钢概念的提出，并非单纯追求钢的洁净度，必须与钢材的用途、性能以及市场需求密切关联，洁净钢生产平台的构建要统筹考虑钢材档次、用途、市场等多元因素。因此，探索能够高效率、低成本、批量化生产优质钢材的有效技术途径、建立以生产效率、制造成本和产品性能为核心的洁净钢生产体系，是当前洁净钢生产的亟待研究解决的课题^[1]。

洁净钢生产平台的构建不仅是单纯的脱硫、脱磷、脱碳、脱氧等工艺技术和品种质量问题，应该包括工艺、设备、技术管理和生产运行等诸多因素，实现高效、优质和低成本的目标。洁净钢生产平台必须采用高效、稳定的运行模式。炼钢—连铸制造流程中整个系统的产能不仅取决于单元工序的产能，还取决于单元工序之间物流的流通能力和效率，因而通过解析各单元工序的功能，改变传统的单元工序静态生产能力核算的设计理念，建立动态精准设计体系，通过对单元工序冶金功能的解析与集成是实现炼钢—连铸工艺流程优化的重要方法，也是构建高效率、低成本洁净钢生产平台的基本理念^[2]。

3 新一代洁净钢生产体系的构建

首钢京唐炼钢厂通过对炼钢—连铸各工序功能的解析与集成，按照铁水“全三脱”的设计理念，建立了动态有序、紧凑连续、高效稳定的洁净钢生产系统。炼钢厂配置 4 套 KR 铁水脱硫装置，配置 2 座 300t 转炉用于铁水脱硅—脱磷预处理，设 3 座 300 高效转炉，配置 1 台多功能 LF、2 台多功能 RH 和 2 台 CAS 钢水二次精炼装置，3 台高效板坯连铸机，建立了铁水短流程运输—铁水预处理—高效转炉冶炼—二次精炼—高效连铸优化的生产工艺流程，炼钢厂工艺流程见图 1，主要工序配置见表 1。

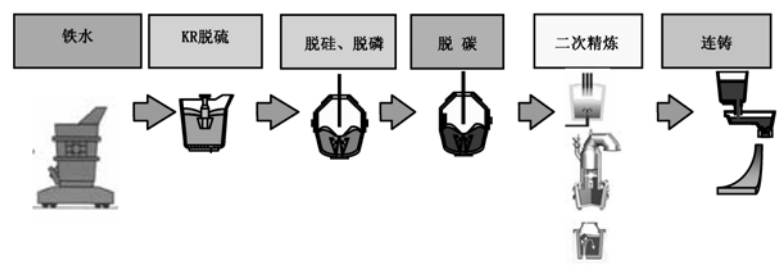


图 1 首钢京唐钢铁厂炼钢—连铸生产工艺流程

表 1 炼钢厂主要工序配置

单元工序	数 量
铁水KR脱硫装置	4套
300t铁水脱磷转炉	2座
300t顶底复吹转炉	3座
CAS精炼装置	2套
双工位LF钢包精炼炉	1座
RH真空处理装置(双工位)	2台（预留1台）
2150mm双流板坯连铸机	2台
1650mm双流板坯连铸机	1台（预留1台）

3.1 炼铁-炼钢界面技术优化

铁水运输采用“一包到底”技术，取消了鱼雷罐车，高炉铁水直接兑入铁水包运送到炼钢厂。这项技术减少铁水倒罐操作，缩短工艺流程，避免烟尘污染，提高铁水温度，有利于铁水脱硫处理，有利于转炉多加废钢，降低铁水消耗和能源消耗，有效地降低生产运行成本。实践表明，采用铁水“一包到底”直接运输技术，铁水温度比鱼雷罐运输提高约 25℃。

3.2 铁水预处理工艺

铁水预处理工序包括铁水脱硫、脱硅、脱磷的“全三脱”预处理，配置 4 套 KR 脱硫装置及 2 座 300t 脱硅—脱磷转炉。

3.2.1 铁水脱硫预处理

铁水脱硫采用 4 套 KR 机械搅拌脱硫装置，可高效、稳定地满足洁净钢板材对硫含量的要求，KR 脱硫工艺流程见图 2，主要技术参数见表 2。KR 脱硫工艺的主要技术特点是：

- (1) 具有良好的动力学条件，脱硫效率高，脱硫率为 90%~95%；
- (2) 脱硫剂采用石灰及少量萤石，价格低廉，降低生产成本；
- (3) 采用活性石灰套筒窑生产的石灰粉剂，采用气力输送方式运输，生产成本低；
- (4) KR 脱硫工艺可以有效地防止铁水回硫现象产生，脱硫效果稳定；
- (5) KR 脱硫工艺采用二次扒渣，处理周期为 38~42min，操作时间与脱磷转炉相匹配。

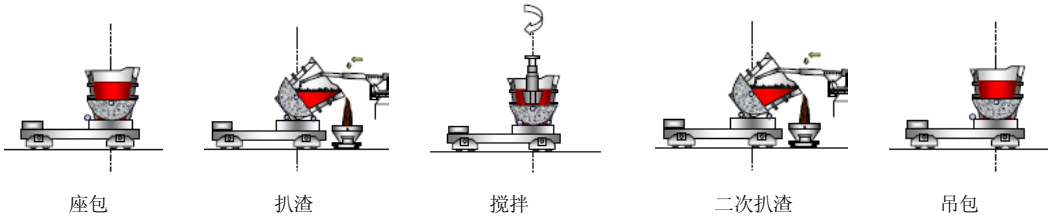


图 2 KR 铁水脱硫处理工艺流程

表 2 KR 脱硫工艺主要技术参数

项 目	数 值
年处理铁水量/(10 ⁴ t/a)	898.15
每罐铁水平均处理量/t	287
每罐铁水处理时间/min	38~42
年处理铁水能力/(10 ⁴ t/a)	~1100
起始硫含量/%	≤0.07
终点目标硫含量/%	≤0.002,20
	≤0.005,50
	≤0.010,30
脱硫剂消耗/(kg/t)	6~10

3.2.2 铁水脱硅—脱磷预处理

通过对转炉冶炼功能的解析和集成，为进一步提高生产效率和钢水洁净度，采用转炉分阶段冶炼的技术理念，将传统转炉脱硅、脱磷、脱碳集成一体的功能优化为采用专用的转炉进行铁水脱硅、脱磷预处理，而顶底复合吹炼转炉则专用于脱碳升温，这样进一步提高了冶金反应效率和钢水洁净度。实现转炉分阶段冶炼，改变了传统转炉的操作模式，原来一座转炉的冶炼功能由 2 座转炉串联作业来实现^[3]。操作模式是采用 2 座转炉前后串联作业，即用于铁水预处理的转炉，主要进行铁水脱硅、脱磷操作，称其为脱磷转炉；用于脱碳

的转炉接受来自脱磷转炉的“半钢铁水”，主要完成脱碳操作。这种优化了的“全三脱”冶炼模式缩短了转炉冶炼周期，提高了转炉冶炼效率和钢水洁净度。

炼钢厂配置 2+3 座 300t 转炉，可实现铁水“全三脱”预处理，工艺流程优化，主要技术特点是：

（1）转炉内脱磷反应空间大，能够实现大气量底吹搅拌，加速脱磷反应，创造良好的动力学条件，生产成本低，可以经济地获得低磷铁水；

（2）优化转炉入炉原料，实现精料操作；

（3）脱磷时间短，简化转炉冶炼工艺，高速吹炼，实现快节奏生产^[4]；

（4）分阶段冶炼，有利于脱碳转炉采用锰矿，减少 Fe-Mn 合金的消耗，降低生产成本；

（5）脱碳炉精炼渣可作为脱磷剂使用，节省成本；

（6）转炉少渣冶炼，减少钢渣处理量，节能环保，实现绿色生产；

（7）可以适度利用高磷铁矿，利于降低原料的采购成本。

因此，采用专用转炉进行铁水脱硅、脱磷预处理，不仅有利于低磷钢的生产，还有利于了优化工艺流程、提高生产效率、降低运行成本，体现了现代化炼钢厂发展循环经济、减量化生产的发展方向，是钢铁厂经济运行的一个系统化工程，有利于提高产品的市场竞争力。

铁水预处理工序采用 4 套 KR 脱硫装置和 2 座脱硅-脱磷转炉，采取 2 对 1 操作模式，即 2 套 KR 与 1 座脱硅-脱磷转炉匹配，总处理量约 1100 万吨/年，满足转炉年产 927.5 万吨/年钢水的要求。根据不同钢种的要求，铁水经“全三脱”预处理以后，铁水中的硅、磷、硫含量可以达到表 3 的设定标准。

表 3 铁水预处理后的质量目标

铁水质量	[Si]/%	[P]/%	[S]/%
普通铁水	0.05~0.23	<0.015	<0.01
低磷、低硫铁水	0.05~0.23	<0.015	<0.005
超低磷铁水	0.05~0.23	<0.01	<0.01

3.3 转炉冶炼工艺

转炉冶炼工序配置 3 座 300t 脱碳转炉，由于采用铁水“全三脱”预处理工艺，转炉工序的主要任务是脱碳升温，冶炼周期缩短，可由常规冶炼的 36~38min 缩短到 30min 以下，实现转炉的高效冶炼和少渣冶炼。为保证钢水的洁净度，采用顶底复吹、副枪、挡渣出钢、钢包渣改质处理等技术。根据不同钢种的要求，转炉冶炼终点钢水成分可以达到表 4 的质量水平。

表 4 转炉冶炼终点钢水质量

钢水质量	[C]/%	[Mn]/%	[P]/%	[S]/%
普通钢水	0.06	0.6	<0.01	<0.01
超低硫钢水	0.06	0.8	<0.01	<0.004
超低磷钢水	0.03	0.6	<0.005	<0.01

3.4 精炼工艺

根据热轧、冷轧的产品要求以及不同精炼装置的功能，精炼工序配置 2 座 RH、1 座 LF、2 座 CAS 精炼站，按照产品的质量要求，各精炼设施可单独使用或采取双重精炼处理工艺。

3.4.1 RH 精炼工艺

采用 2 台多功能 RH 真空处理装置，可单独或与 CAS、LF 炉进行串联作业，实现钢水二次精炼功能。多功能 RH 处理主要应用在脱碳、真空脱氧（轻处理）、脱氢和脱氮上，进一步实现对钢水成分和温度的精确调整。经过多功能 RH 真空处理装置处理后的钢水成分可达到[C]<15ppm，[H]<2ppm，[N]<30ppm，[O]<30ppm 的质量水平。

多功能 RH 真空精炼工艺特别适合现代转炉冶炼和板坯连铸生产，用以大规模生产低碳优质钢种，如超低碳 IF 钢、硅钢等。处理低碳钢、超低碳钢和对气体含量控制要求较高的钢种，如 DQ、DDQ、EDDQ 系列钢板，可通过 RH 真空自然脱碳或强制脱碳、真空脱氧、脱气处理。RH 真空处理装置采用双工位，配置多功能顶枪，通过顶枪吹氧生产超低碳钢；加铝吹氧进行化学升温；顶吹燃气和氧气为真空槽补充加热，减少 RH 处理时温降，消除真空槽内冷钢，避免钢种之间污染，RH 主要技术参数见表 5。

表 5 RH 主要技术参数

项 目	参 数
公称容量/t	300
处理周期/min	23~55（平均31）
钢水罐升降	液压缸顶升
真空泵能力(0.5torr)/(kg/t)	1250
钢水循环率/(t/min)	250(max)
处理能力/(10 ⁴ t/a)	768（2套）
冶金效果	[C]<15ppm, [H]<2ppm, [N]<30ppm, [O]<30ppm

3.4.2 LF 精炼工艺

LF 炉具有如下精炼功能：

- (1) 通过加热功能，可协调炼钢和连铸工序生产，保证多炉连浇的顺利进行；
- (2) 通过还原性气氛造碱性渣，冶炼超低硫钢；
- (3) 通过加合金及渣料进行脱氧、脱硫及合金化，控制钢水成分，提高钢水质量；
- (4) 通过底吹氩搅拌均匀钢水温度和成分。

对要求低氧、低硫的钢种，如低合金钢、低牌号管线钢等，可采用 LF 炉处理。配置双工位、电极旋转式 LF 钢包精炼炉 1 台，LF 主要技术参数见表 6。

表 6 LF 主要技术参数

项 目	参 数
公称容量/t	300
平均处理周期/min	40
变压器额定容量/MV·A	45
电极调节方式	电液比例阀
钢水平均升温速度/(℃/min)	≥4.5
年处理钢水能力/(10 ⁴ t/a)	333
脱硫率/%	≥60

3.4.3 CAS 精炼工艺

CAS 可作为 LF 精炼的并列或替代工艺，除脱硫功能外，CAS 可完成 LF 的大部分功能，对于普通热轧产品，如 SS400、SM490 等，可以单独采用 CAS 精炼工艺。采用 2 台配置顶枪、具有加热功能的 CAS 精炼装置，主要技术参数见表 7。

表 7 CAS 主要技术参数

项 目	参 数
公称容量/t	300
处理周期/min	28~40
年处理钢水能力/(10 ⁴ t/a)	666（2套）

3.4.4 双重处理精炼工艺

对某些有特殊质量要求的钢种，如高牌号管线钢、高强度结构钢等，可经 LF 和 RH 双重处理。对于大部分 LCAK 钢（[Si]<0.03%）热轧产品，可以采取 CAS 和 RH 双重处理，发挥其高效、低成本的特点。

首钢京唐炼钢厂精炼工序设施齐全，实际生产中可按转炉、连铸的产品分工，形成转炉—精炼（LF/RH/CAS）—连铸特定的专业化生产线，按照产品专项化生产的理念，实现炼钢厂各单元工序的专一组合，有利于生产稳定及运行管理。

3.5 连铸工艺

连铸工序配置 3 台高效板坯连铸机，设计年产 904.3 万吨坯。在保证钢水洁净度、提高铸坯的表面和内部质量、提高连铸生产率和可靠性、板坯高温热送、节能环保及综合利用等方面采用了 30 余项先进技术，体现了当今国际连铸技术的发展水平和技术特点，表 8 为板坯连铸机的主要技术参数。

3.5.1 采用直弧型连铸机

采用分节密排辊列、连续弯曲、连续矫直的连铸机机型，满足高拉速下铸坯内部洁净度的要求，减小铸坯的弯矫变形，保证铸坯的内部质量。

3.5.2 结晶器钢水电磁制动

结晶器钢水电磁制动技术特别适合 2.0m/min 以上的高拉速浇注，电磁制动技术控制钢水的流速和方向，使结晶器内的钢水流场始终保持在合理状态，避免卷渣，保证高拉速条件下铸坯的表面质量和内部质量，有效改善连铸坯的洁净度。

3.5.3 结晶器液压振动

结晶器液压振动可以在浇注过程中改变振幅和振频，实现正弦和非正弦振动，有效地减少铸坯振痕深度，特别适合高拉速条件下保护渣的有效供给，提高铸坯的表面质量。

3.5.4 铸坯动态轻压下技术

通过建立二冷水控制模型，实时判断铸坯内部的液芯位置，在铸流导向段的适当位置，控制系统自动调整扇形段的辊缝开度，从而对铸坯实施轻压下。铸坯轻压下技术可以有效地改善铸坯内部的中心偏析、中心疏松，获得良好的铸坯内部质量，在消除铸坯中心偏析方面取得的显著效果。

表 8 板坯连铸机的主要技术参数

项 目		参 数	
连铸机种类		2150mm板坯连铸机	1650mm板坯连铸机
机型		直弧型，连续弯曲、连续矫直	直弧型，连续弯曲、连续矫直
台数×流数		2×2	1×2
基本弧半径/m		9	9
浇注 断面	厚度/mm	230	230
	宽度/mm	1100~2150	900~1650
切割定尺长度/m		9~11	8~10.5
拉坯速度/(m/min)		1.0~2.5	1.2~2.5
冶金长度/m		~48	~48
连浇炉数/炉		10~12	10~12
连铸机产量/(10 ⁴ t/a)		624.3	280

首钢京唐炼钢厂铁水运输—铁水预处理—转炉炼钢—钢水二次精炼—高效连铸，多工序均配置了国际一流的技术与装备，保证了生产的高效率和产品的高质量，为生产高品质、高档次、高洁净度产品奠定了坚实的基础。

4 首钢京唐炼钢厂洁净钢生产体系的特点

4.1 工艺流程优化

首钢京唐炼钢厂采用优化的工艺路线，从铁水一包到底运输—铁水“全三脱”预处理—转炉炼钢—钢水二次精炼—高效连铸，整个工艺流程紧凑合理，KR 脱硫装置独立设置、脱磷与脱碳转炉分跨设置，流程紧凑连续、物流运行顺畅、运行高效稳定，炼钢厂平面布置图见图 3。

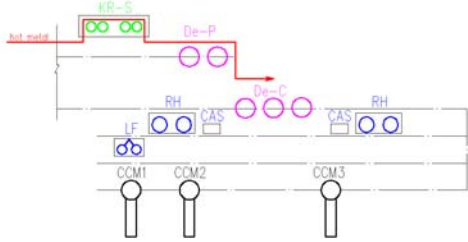


图 3 首钢京唐炼钢厂平面布置图

4.2 生产高效化

首钢京唐炼钢厂工艺流程的优化，加快了生产节奏。各工序按照动态精准的设计理念，前后工序协调匹配，实现炼钢厂的高效稳定、快节奏连续生产。

炼钢厂配置 4 套 KR 脱硫装置与 2 座脱硅-脱磷转炉，采取 2 对 1 操作模式，使全量铁水实现“全三脱”预处理，为洁净钢的生产奠定了基础；2 座脱磷转炉与 3 座脱碳转炉协调匹配，可以按照 1 对 1、1 对 2 或 2 对 3 的模式组织生产；为实现高效率、低成本、高质量、快节奏的生产创造了有利条件；3 座脱碳转炉与 3 台高效板坯连铸机 1 对 1 匹配，整个炼钢厂以连铸为中心，各工序间相互协调，实现工序间的动态精准生产。表 9 是 No.2 板坯连铸机专线化生产冷轧用低碳钢的时间程序，图 4 是生产典型的低碳钢的时间管理图。

表 9 典型的低碳钢生产时间程序

项 目	数 值
铸坯规格/mm	230×1500
工作拉速/(m/min)	1.9
浇注时间/min	30
RH轻处理时间/min	25
转炉冶炼周期/min	30
脱磷炉处理周期/min	25
KR脱硫处理周期/min	25（2套KR处理节奏）

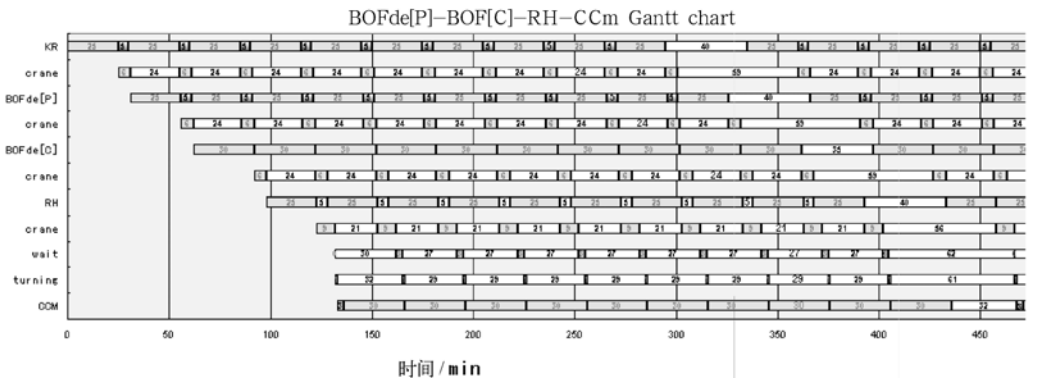


图 4 生产低碳钢时的时间管理图

4.3 产品洁净化

铁水采用“全三脱”预处理、转炉精料操作、多功能钢水精炼、连铸中间包/结晶器钢水冶金,为高效率、低成本、批量化生产杂质含量低的洁净钢创造了有利条件,构建了高效率、低成本的洁净钢生产体系。

转炉工序采用全自动吹炼和全流程计算机监控,精炼工序配置 LF、RH、CAS 精炼站,在洁净钢批量生产的基础上减小钢水成分与温度的波动,稳定产品性能,提高产品质量。铁水“全三脱”预处理可以降低白灰、合金料消耗,脱碳转炉渣回收用作脱磷转炉的脱磷剂,低成本生产洁净钢,实现资源循环利用,降低生产成本。

5 结语

(1) 提高钢材洁净度是未来钢铁工业的重点课题。洁净钢的生产是一项复杂的系统工程,是建立在工艺流程、技术装备、生产操作和质量管理基础之上的技术体系。新一代钢铁厂应构建洁净钢的生产平台,通过优化工艺流程、提高技术装备、改善生产操作、提高质量水平,实现高效率、低成本大批量生产用户需要的洁净钢材。

(2) 首钢京唐炼钢厂采用铁水“全三脱”预处理设计理念,通过工艺流程、技术装备的优化,构建了基于动态有序、紧凑连续、高效稳定的洁净钢生产体系,具有高质量、高效率、低成本、可循环的洁净钢生产技术特征。首钢京唐钢铁厂洁净钢生产体系的构建,提出了 21 世纪一种高效率、低成本、可循环生产洁净钢的技术发展模式 and 方向。

参 考 文 献

- [1] 殷瑞钰. 冶金流程工程学 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 2005: 325~328.
- [2] Yin Ruiyu. State of the Art and Process Technology in Clean Steelmaking [M]. Beijing: Metallurgical Industrial Press, 2009: 121.
- [3] 刘浏. 转炉炼钢技术的发展 [J]. 中国冶金, 2004, 14(2): 7~11.
- [4] 刘浏. 中国转炉炼钢技术进步 [J]. 钢铁, 2005, 40(2): 1~5.