

2011 钢铁共性技术协同创新中心  
工艺与装备研发平台顶层设计(二)

2011 钢铁共性技术协同创新中心由北京科技大学与东北大学两所核心协同单位,以及国内主要钢铁行业科研院校、企业等共同组建。目前,该中心已正式通过国家认定。该中心由关键共性工艺与装备研发平台和重大工程高端产品开发平台组成。其中,关键共性工艺与装备研发平台由东北大学 RAL 为主体,协同东北大学材料与冶金学院、北京科技大学、中国钢研科技集团、上海大学、武汉科技大学、宝钢、鞍钢、首钢、武钢等单位组建而成。该平台的任务是研发冶、铸、轧等工序的新工艺、新技术、新装备,实现“钢铁绿色制造”。针对工艺与装备研发平台的顶层设计内容,本报特组织相关报道,以飨读者。

## 新一代钢包喷射冶金工艺技术

## 1 研究背景

目前,随着科学技术和经济的发展,钢材用户对钢材质量的要求越来越严格。钢中杂质元素、夹杂物等对钢的性能影响极大。1962 年 Kiessling 首次提出了洁净钢一词。直到 20 世纪 70 年代末至 80 年代初,洁净钢才转向量化生产。此后,洁净钢的生产拓展到从超低碳钢到高碳钢的广泛领域。洁净钢的生产水平已成为企业综合竞争能力的重要表现之一。高效率、低成本洁净钢平台建设作为一项具有普适性、基础性、事关钢厂效率、质量、成本的共性关键技术,对提高企业市场竞争力具有重要意义。近十几年来,国内外对洁净钢的研究给予了高度重视和极大关注。

在钢铁生产过程中,由于硫对钢的性能有着多方面的不利影响,因此其成为主要的脱除或控制元素。不同钢种对硫含量有着严格的规定,如普通钢要求硫含量  $[S] \leq 0.05\%$ , 优质钢  $[S] \leq 0.02\%$ , 低硫钢  $[S] \leq 0.001\%$ , 超低硫钢  $[S] \leq 0.0005\%$ 。为了减少铸坯的内部质量缺陷和提高表面质量,要求钢中的含硫量应小于  $0.020\%$ 。为了减少结构钢的各向异性,使其具有良好的机械性能,钢的含硫量应小于  $0.010\%$ 。特别是输油管、天然气输送管、厚铝板、航空钢等,其要求含硫量都要小于  $0.005\%$ , 磷含量小于  $0.01\%$  或  $0.005\%$ 。此外,为了降低氧气的生产成本和实行少渣炼钢,也要求铁水磷含量小于  $0.015\%$ 。尤其在长流程中,要生产出低硫(磷)钢和超低硫(磷)钢,对铁水进行预处理是一种行之有效的解决方法。铁水预处理对于优化钢铁冶金工艺、提高钢的质量、发展优质钢种、提高钢铁冶金的综合效益起着重要作用。

铁水炉外脱硫现在已有数十种处理方法。目前所采用的大致可分为分批处理法和连续处理法两大类,其中分批处理法又可分为铺撒法、倒包法、机械搅拌法、吹气搅拌法、喷射法、镁脱硫法等等。目前广泛用于生产的是机械搅拌法和喷吹法。

由于喷吹法是在喷吹气体、脱硫剂和铁水三者之间充分搅拌混合的情况下进行的,因此脱硫效率高、处理时间短、操作费用较低,并且处理铁水量大、操作方便灵活,受到极大重视,成为应用最广泛的铁水脱硫处理方法。值得注意的是,日本和韩国钢厂普遍改用 KR 脱硫预处理,国内新建的大型钢厂也大量采用了 KR 法脱硫。但无论是哪种方法都具有一定的局限性,具体表现在:①转炉炼钢时的回硫现象削弱了铁水预脱硫的实际效果;②搅拌器或喷枪会污染铁水;③铁损较大。

对于超低硫钢生产,在铁水预处理和转炉冶炼的基础上,还需要进行钢水二次深脱硫,方法主要有 LF 搅拌脱硫、RH 喷粉脱硫、钢包喷粉脱硫。二次精炼的喷粉装置按载具与钢水的接触方式可简单分为两类,一类为直接接触型,如 SL、TN、KIP、V-KIP、VOD-PB、RH-PB 等,即喷枪插入钢液中与液体接触;另一种是非接触式如 RH-PTB,喷枪不与钢液接触。通过浸入式喷枪,即通常所称的顶枪,向钢水喷吹合金粉或精炼粉剂,该工艺反应速率快、处理周期短,但其存在喷溅、钢液二次污染严重、操作稳定性和灵活性较差等问题,其应用受到了限制。对于非接触式喷粉如 RH-PTB,即 RH 顶喷粉法在顶吹氧循环真空脱气法(RH-KTB)的基础上配备喷粉系统,通过顶枪向真空室钢水内喷吹脱硫粉剂,构成 RH-PTB(或 RH-KTB/PB)工艺,可实现真空喷粉脱硫。但其存在诸多问题:①RH 内的枪位过高,影响脱硫效果,枪位过低,喷头易结冷钢,且易被钢水烧坏;②粉气流会冲击 RH 内壁,缩短内壁耐火材料的使用寿命;③水冷喷枪是由多层无缝钢管制成,价格昂贵;④若突然停水或停电等极易引发重大事故。

因此,开发高效、低成本的炉外处理新工艺、新技术显得十分重要而迫切。

通过安装在钢包底部的透气砖吹氩已是最为普遍而简捷的炉外精炼手段,如果能开发出通过安装在钢包底部透气砖

位置的元件喷吹精炼粉剂或合金化的合金粉的精炼新工艺,即新一代钢包喷射冶金工艺技术 L-BPI(Ladle-Bottom Powder Injection),如图 1 所示,可以克服传统工艺的缺陷。

此新工艺技术具有以下优点:

- (1) 与其相关的各种配套技术成熟,易于实现;
- (2) 气量可调节的范围大;
- (3) 改造投资低,不改变原有工艺;
- (4) 搅拌效果比传统的顶吹理想。

L-BPI 属于一种全新的炉外精炼工艺,不同与传统的喷射冶金工艺如 IR-UT、TN、SL、RH-IJ 等,该工艺的成功开发,将对钢的炉外处理和生产流程产生变革。L-BPI 工艺技术将明显提升二次精炼效率与效果,这样不仅可以考虑不需要进行铁水脱硫预处理工艺,而且也可以考虑不进行 LF 处理,从而缩短整个生产工艺流程,提高生产效率,降低成本,对钢铁工业的节能减排也意义深远。

虽然国内外学者自 20 世纪 70 年代以来对喷射冶金工艺技术进行了大量的理论和实验研究及工业实践,但粉剂的喷吹都是通过由耐火砖制成的顶枪插入铁水或钢水来实现的。钢包底喷粉工艺则是将粉剂用载气经喷粉元件送入钢水深部,使粉剂与钢水充分接触,在上浮时完成精炼过程。因此,与传统的钢包底吹氩精炼相比较,钢包底喷粉用喷粉元件的要求更加严格。

从可行性角度考虑,要求喷粉元件的缝隙足够大,保证输送过程的稳定性和连续性,不发生脉动和堵塞现象;粉剂的浓度和流量在一定范围内可

以调节和控制;气固混合物具有较大的喷出速度,使颗粒能进入金属液中以提高其利用率,同时反应过程又不发生喷溅。

从安全性角度考虑,要求喷粉元件的缝隙尺寸足够小,以防止熔钢渗透。底喷粉用的元件所处的环境较吹氩透气砖更加苛刻,在高温粉气流环境下,其表面受强烈的机械磨损,同时因喷吹粉粒的作用,导致侵蚀,而且在实际操作中还需要承受因温差作用而产生较大的热应力。

因此,此新工艺技术要实现实际应用,需解决钢水渗漏(安全性)、粉剂堵塞(稳定性)、喷吹元件使用寿命(可靠性)、底喷气-粉-钢液多相流行为与脱硫动力学(精炼的效率与效果)等关键技术问题。

东北大学朱苗勇教授及其研究团队在国家自然科学基金重点项目资助下,对新一代钢包喷射冶金工艺(L-BPI)进行了探索性研究,从理论上揭示了底喷粉元件缝隙内粉气流的运动规律,提出了防钢液渗漏和粉剂堵塞的钢包底喷粉元件设计理论,研制出既可钢包底喷粉又可喷吹气体的元件,设计出了底喷粉工艺装置,授权了“狭缝式钢包底喷粉工艺及装置”、“棱台缝隙式防堵钢包底喷粉装置”、“一种金属缝隙式钢包底吹喷粉装置”、“一种旋风护流蓄气室钢包底吹喷粉装置”、“求取钢包底喷粉元件缝隙长宽的方法”、“钢包底吹喷粉漏钢检测装置及漏钢检测法”、“一种 RH 真空精炼底吹喷粉装置(RH-BPI)”等 7 项国家发明专利,成功实施了实验室冷态和热态试验,为开发新一代钢包喷射冶金工艺技术奠定了坚实基础。

## 2 关键共性技术内容

L-BPI 工艺首先要解决钢水渗透和粉剂堵塞的问题。使用狭缝以克服钢水的渗透是一种较佳途径,狭缝型供气元件的防渗透能力、气体可控能力强的特点已得到实际验证。狭缝型喷粉元件作为底喷粉新工艺重要功能元件,在二次精炼底喷粉领域是属于一种新的尝试。因此,研究设计既能防钢水渗漏又能防粉剂堵塞的底喷粉元件结构进行底喷粉以实现钢水脱硫,乃至脱氧合金化处理是首先要解决的关键问题;其次,粉气流对喷粉元件的狭缝会产生摩擦和磨损,喷粉元件工艺的稳定性及其使用寿命以适应钢包精炼炉次的要求是需解决的第二个关键问题;涉及钢包底喷粉精炼效率与效果的传输现象及反应工程理论探索与描述是需要解决的又一个关键问题。

针对此新工艺所涉及的重大理论与关键技术问题开展深入研究,以奠定此新精炼工艺技术工业化的理论和应用基础。为此,需要解决以下 L-BPI 工艺开发所面临的关键技术难点。

## 2.1 提出底喷粉元件的设计理论

揭示钢包底喷粉的钢液渗漏和粉剂堵塞机理,提出底喷粉元件的设计理论,这是 L-BPI 精炼新工艺能否实现的前提条件,也是此新工艺技术研究开发的基础。要实现钢包底喷粉,既要保证输送过程粉气流稳定和连续,不发生脉动现象,喷粉元件不发生堵塞,压力损失小,粉剂的浓度和流量在一定范围内可以调节和控制,气固混合物具有较大的喷出速度,使颗粒能进入金属液中以提高其利用率,又要保证喷粉元件安全可靠,不发生漏钢的危险。为此,需要从理论上研究分析决定钢包底喷粉元件中缝隙内钢液渗漏的极限力以及影响钢液向缝隙内渗透的影响因素,揭示钢液渗漏速度和渗漏深度随时间的变化规律;需要从理论上对粉气流在喷粉元件内的运动规律作出描述,揭示粉粒速度、气流速度与

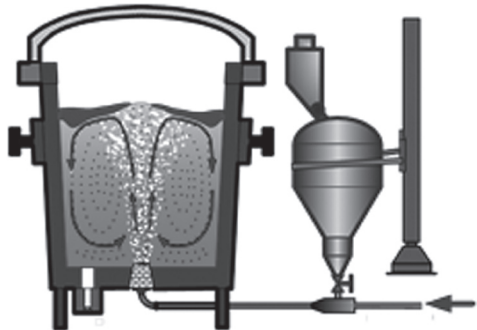


图 1 新一代钢包喷射冶金工艺(L-BPI)示意图



## 上接 B04 版

气流密度、颗粒尺寸、气体黏度等的定量关系,以及粉气流行为与喷粉元件内缝隙尺寸之间的内在关系。

### 2.2 研制出抗磨损和耐高温侵蚀的喷粉元件

揭示钢包底喷粉元件磨损与高温侵蚀机理,研制出抗磨损和耐高温侵蚀的喷粉元件,这是此新工艺技术成功开发的关键。底喷粉元件所处的环境较传统的钢包底吹氩透气砖更加苛刻,在实际工作条件下,其表面将受强烈的机械磨损,同时喷吹粉粒与其作用,导致化学侵蚀,而且实际还需要承受因温差而产生的热应力作用。为此,研究粉气流行为对不同材质喷粉元件磨损的影响规律,研究喷粉元件在实际高温工作环境条件下承受热冲击、钢水搅拌冲刷侵蚀以及高温熔渣侵蚀的能力,掌握其材质、性能、使用条件或环境对其工作状态的影响规律。

### 2.3 揭示钢包底喷粉射流行为、多相流行为和精炼动力学

揭示钢包底喷粉射流行为、多相流行为和精炼动力学,这是此新工艺技术实现工业应用的重要理论基础。喷枪喷粉与狭缝元件喷粉其射流形态会有很大差异,必然会带来不同的熔池特性,进而影响粉剂在钢液中的行为。需要定量描述各工艺参数对底喷粉过程鼓泡流和射流形成的影响规律,揭示颗粒粉剂粒度、固气比、狭缝几何参数、载气操作参数、钢包参数等对粉剂的穿透比、气粉流在钢液中行为的影响规律,以及与精炼效率之间的内在关系。同时,通过钢包底部喷入精炼粉剂,将在钢包熔池内进行气—固—液的多相流,其行为极其复杂,不仅直接对钢包底喷粉的效果和效率产生直接影响,而且在一定程度上会对底喷粉元件的寿命产生影响,需要全面真实揭示钢包底喷粉过程中熔池的多相流行为和反应动力学,为工业试验和应用提供依据和指导。

### 2.4 L-BPI 工艺的可靠性

#### 与应用可行性

L-BPI 工艺的可靠性与应用可行性,这是此新工艺应用和推广的技术保障。需要在实验室理论与实验研究的基础上,进行中间规模的现场试验,重点研究考察研制的钢包底喷粉元件的工作状态、喷粉工艺参数对喷粉元件工作状态及效果的影响规律,为工业试验积累数据和经验。在此基础上,对底喷粉元件和喷吹参数进行进一步完善,进行实际生产的应用试验研究,研究探讨工业应用的可能性和可操作性,并实现工业应用。

### 3 研究技术路线与实施方案

L-BPI 新工艺技术研究开发将涉及现代冶金学、冶金反应工程学、多相流体力学、数值仿真等多学科方面的理论知识,需要实验室实验研究(高温热态模拟和冷态模拟实验)、实验室理论分析(理论解析和数值模拟)与现场试验的有机结合开展相关关键技术的研究与开发,即利用多相流理论,建立描述粉气流在喷粉元件内的运动规律的理论模型,通过理论计算揭示粉粒速度、气流速度与气流密度、颗粒尺寸、气体黏度等的定量关系;利用界面理论和物理模拟并结合高温热态实验,研究钢液渗漏和粉剂堵塞机理,研究设计底喷粉元件;通过冷态和热态实验,研制具有抗粉气流磨损和耐高温侵蚀的喷粉元件;通过冷态和热态实验、数学模拟并结合现场,研究底喷粉过程鼓泡流和射流的行为机理,钢包底喷粉精炼动力学和应用可行性。

3.1 开展防钢液渗漏和粉剂堵塞的设计理论、底喷粉元件内粉气流行为、底喷粉元件磨损与高温侵蚀机理等方面的研究工作

L-BPI 工艺成功的关键是底喷粉元件的研制。

对于钢包底喷粉元件设计理论的研究,需要结合钢包精炼的实际工作环境和条件,利用物理学和力学理论,建立底喷粉元件的重要参数与钢液物理性能及钢包熔池工作条件之间的关系,从安全性角度提

出缝隙参数确定的理论依据,并根据喷粉元件的透气量、粉剂输送速度、粉气比最终确定喷粉元件的缝隙参数。在此基础上对喷粉元件缝隙的分布进行研究,以设计出穿透深度较大、射流能力强、温度分布均匀、无热应力集中、不因聚合而产生大气泡和粉剂结团的缝隙布局。利用粉体运动理论,对喷粉元件的结构进行研究,以达到缓冲粉体颗粒,降低阻力损失,防止粉剂沉降回落阻塞的目的。对底喷粉元件设计的理论研究结果,通过冷喷实验和感应炉热态实验,验证底喷粉元件的设计理论,检验根据设计理论制作喷粉元件的安全性、可操作性和喷吹效果。

对于粉气流在钢包底喷粉元件内运动行为规律的研究,利用多相流理论,通过受力分析建立粉气流在喷粉元件中运动的理论模型,对粉气流在喷粉元件内的运动规律作出描述,揭示粉粒速度、气流速度与气流密度、颗粒尺寸、气体黏度等的定量关系,揭示粉气流行为与喷粉元件内缝隙尺寸之间的内在关系。并利用实验检测检验理论模型的准确性,分析底喷粉元件工作过程压力损失和磨损情况,完善修正喷粉元件的结构。

对于钢包底喷粉元件磨损与高温侵蚀机理的研究,首先在冷态条件下,选择不同材质的喷粉元件进行喷粉实验,同时变化喷吹参数和时间,通过对喷粉元件工作前后的重量、缝隙尺寸的定量分析,研究粉气流行为对不同材质喷粉元件磨损的影响规律;利用感应炉模拟实际钢包底喷粉过程,通过观测喷粉元件工作前后的形状和内部结构的变化,考察喷粉元件在实际高温工作环境条件下承受热冲击、钢水搅拌冲刷侵蚀以及高温熔渣侵蚀的能力,掌握其材质、性能、使用条件或环境对其工作状态的影响规律。

通过对钢包底喷粉元件设计理论研究、冷态热态实验检验,粉气流在喷粉元件内运动行为的理论实验研究和喷粉元件结构完善、以及喷粉元件磨损与高温侵蚀机理的实验研究,最终在实验室条件下研制出具有防钢液渗漏和粉剂堵塞、抗粉气流磨损和耐高温侵蚀的钢包底喷粉元件。

### 3.2 对钢包底喷粉射流行为和精炼动力学等开展研究工作

L-BPI 工艺应用的关键是其效果与效率,为此需要对钢包底喷粉射流行为和精炼动力学等方面开展研究工作。

对于钢包底喷粉射流行为的研究,首先根据相似理论建立钢包底喷粉的物理模拟系统,测定底喷粉过程中粉剂的穿透比,研究颗粒粉剂粒度、固气比、缝隙几何参数、载气操作参数、钢包参数等对粉剂的穿透比的影响规律,同时采用高速摄像、均混时间测定等手段,揭示气粉流和粉粒在钢液中的运动行为以及喷粉元件参数、喷粉操作参数的影响规律。

对钢包底喷粉精炼动力学的研究,首先进行实验室条件下的热态实施,选择一定容量的感应炉模拟钢包,选择石灰粉剂,通过专门设计制作具有较好计量和控制功能的喷粉装备,将粉剂通过自行研制的喷粉元件喷入炉内,每间隔一定时间取出钢样,通过分析钢样中硫的变化以及冶金热力学和动力学理论,研究底喷粉脱硫动力学,揭示底喷粉参数、元件结构参数与脱硫效率之间的内在关系。同时,利用多相流、流体力学、反应工程学的理论知识,在物理模拟和热态研究工作的基础上,建立描述钢包底喷粉熔池内多相流和精炼脱硫过程的数学模型,采用现代数值求解方法和理论,采用商用软件与自编计算程序结合的方法,对此过程的气泡行为、粉粒行为、钢液流场、硫的变化及分布进行数值仿真,用物理模拟和热态实验的结果对数值模拟结果的准确性进行验证,在模型得到检验和完善的基础上,考察喷粉元件、喷吹参数对熔池内传输行为及精炼效果的影响规律,从而为此工艺的现场试验及应用提供指导和奠定理论基础。

### 3.3 开展中间规模的现场试验工作和应用试验工作

L-BPI 工艺应用和推广的技术保障是其可靠性与应用可行性,为此,需要开展中间规模的现场试验工作和应用试验工作。

在实验室理论与实验研究的基础上,设计制作底喷粉元件和喷粉装置,确定喷吹参数,选择 5—20t 的钢包进行中间规模的试验,首先重点考察工业条件下所研制钢包底喷粉元件的工作状态(防渗透性、防堵塞性和耐磨损及侵蚀能力),其次考察底喷粉的效果、喷粉工艺参数对喷粉元件工作状态及效

果的影响规律,为后续的工业试验积累数据和经验。在此基础上,对底喷粉元件和喷吹参数进行进一步完善,设计制作适合 40—120t 钢包底喷粉的元件和喷粉装置,确定相应的喷吹参数,选择国内厂家进行生产规模的钢包底喷粉应用试验,继续考察喷粉元件的工作状态、底喷粉的效果与效率,研究探讨此新工艺工业应用的可能性和可操作性,为工业化应用奠定基础和提供技术保证。

### 4 研究计划

L-BPI 工艺技术研究开发在原工作的基础上,计划再用 4 年时间完成全部工作,具体计划包括:

◆ 2014 年: 开发钢包底喷粉精炼喷吹工艺、完善喷吹元件,提出符合高效精炼要求的钢包底喷粉喷吹工艺参数,研制出性能完备的底喷粉元件。

◆ 2015 年: 钢包底喷粉精炼新工艺中间规模工业试验和工艺完善,成功完成钢包底喷粉精炼新工艺中间规模工业试验。

◆ 2016 年: 钢包底喷粉精炼新工艺工业规模试验和工艺完善及应用,成功实施钢包底喷粉精炼新工艺工业规模试验、完善工艺应用。

◆ 2017 年: 钢包底喷粉新工艺行业推广应用,在 2 家以上企业得到应用,进一步检验应用效果。

### 5 预期效果

L-BPI 工艺属于国际首创的新一代钢包喷射冶金技术。该工艺的成功开发及应用,不仅给钢铁行业提供一项新的精炼技术,改变我国在精炼工艺方面长期以来依赖引进、跟踪、模仿而无原创性技术的局面,而且对钢铁生产流程的变革和节能减排的影响深远。首先体现在缩短流程方面, L-BPI 工艺的高效化和多功能化,不仅可以不用铁水预脱硫而实现低硫钢和超低硫钢的生产,而且为取消 LF 炉精炼处理开辟了一条新途径,从而大幅度提升生产效率。保守估计, L-BPI 工艺的应用可以缩短冶炼周期 15—25min、降低吨钢成本 15—20 元、吨钢节能 2.5—4.5 千克标准煤,对于千万吨级的企业年增效益在 2 亿元以上。如 BPI 与 RH 结合形成 RH-BPI 工艺(见图 2),其发展潜力巨大,将对高端产品的高效化、低成本生产产生极其重要的影响。

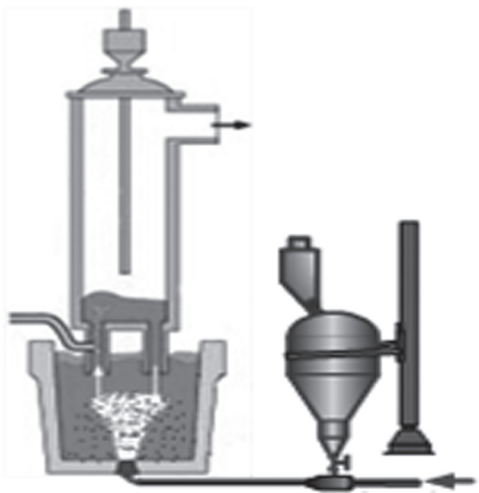


图 2 RH-BPI 工艺示意图



東北大學  
Northeastern University



RAL