

INNOVATIVE PROWESS

04.

创新力

以 **低碳冶金** 技术 **创新** 为锚，

创造更大 **价值**，

加快建设 **世界一流企业**。

1. 陆鹏程：中钢国际坚定不移以技术创新为驱动，推动钢铁绿色低碳转型

a

“中钢国际将坚定不移以技术创新为驱动，以开放包容的态度与国内外同行广泛开展合作，为中国宝武、为钢铁行业乃至全人类的生态文明做出贡献。”

在“钢铁绿色低碳转型的技术路径”圆桌论坛上，中钢国际工程技术股份有限公司董事长陆鹏程这样说到。

2023年10月15日，第十二届中国国际钢铁大会暨2023年全球低碳冶金创新论坛在上海成功举办，中钢国际董事长陆鹏程应邀出席大会，并在同期举办的“钢铁绿色低碳转型的技术路径”圆桌论坛上与全球知名钢铁产业链相关企业领导人碰撞思路、共话钢铁的绿色低碳转型。

“低碳冶金是中钢国际技术创新的主要方向。”陆鹏程介绍。作为一家工业工程技术公司，中钢国际走出去比较早，早在2016年就承接了阿尔及利亚第一套250万吨的DRI（直接还原铁）项目，随后又成功建设了第二套，目前正在建设第三套。中钢国际在直接还原铁领域，积累了雄厚的技术和工程实践经验。“基于此，我们又参与到河钢宣钢的氢冶金项目，并承担了中国宝武湛江氢基竖炉项目的核心技术集成。”陆鹏程表示，目前，中国宝武富氢碳循环高炉HyCROF、氢冶金电熔炼工艺HyRESP两项主要低碳冶金技术，均由中钢国际承担工程化集成与创新，为钢铁长、短流程的减碳、降碳提供切实可行、经济高效的解决方案。“不仅如此，在原料制备上，我们拥有全球领先的带式焙烧机球团技术；在流程创新上，正在运用自主技术建设绿色低碳薄带铸轧产线。”

“虽然有国际地缘政治冲突加剧等因素的影响，但可以感受到全球钢铁业低碳转型的态度非常坚决，这是未来的大方向。再加上现在能源、焦炭价格高企，我相信HyCROF技术将不仅是一个降碳技术，还会是经济上具有竞争力的技术。”陆鹏程表示，未来，中钢国际将坚定不移以技术创新为驱动，以开放包容的态度与国内外同行广泛开展合作，为中国宝武、钢铁行业乃至全人类的生态文明做出贡献。

需求结构与产业协同，也是陆鹏程关注的，“作为一位老钢铁人，我深切体会到钢铁行业存在大量跨界合作的场景。以前，我们和化工行业基本上‘老死不相往来’，但最近这几年，我们都感受到，要解决钢铁行业的碳中和问题，仅靠自身的力量是不够的，还要通过多行业联合协同降碳。”陆鹏程提出，钢铁行业要推进与化工、石化、建材等行业的协同降碳。

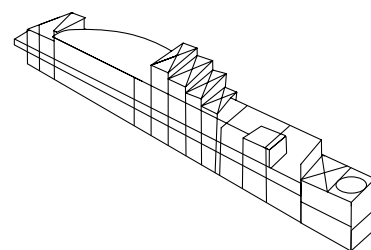
“低碳冶金是中钢国际技术创新的主要方向。”



为钢铁长、短流程的减碳、降碳提供切实可行、经济高效的解决方案。



全球领先的
带式焙烧机球团技术



中钢国际董事长陆鹏程：

“二十大报告指出，科技是第一生产力，人才是第一资源，创新是第一动力。中钢国际要深入学习领会和贯彻落实习近平总书记关于科技创新的重要论述和指示要求，以久久为功的毅力和决心，加大创新力度、推动高质量发展，打造‘全球工业工程技术服务引领者’。”

b

“中钢国际将继续坚定不移践行‘一带一路’倡议，坚持把中国的技术、装备、标准推向海外，丰富‘一带一路’的内涵。”

在论坛召开间隙，中钢国际董事长陆鹏程还向媒体介绍了企业在共建“一带一路”倡议提出十年来取得的成绩。“2023年，中钢国际的海外业务已超过国内业务份额。这也支撑了我们在钢铁下行周期下继续保持增长。”陆鹏程介绍，中钢国际一方面立足“绿色化”，秉承绿色发展理念，助力共建国家的钢铁业绿色转型升级；另一方面立足“智慧化”，以数字化赋能绿色化，提升整体装备水平，提高建设效率。此外，中钢国际还与当地企业紧密合作，关注当地社会发展，为共建国家的百姓创造更好的发展环境。“未来，中钢国际将继续坚定不移践行‘一带一路’倡议，坚持把中国的技术、装备、标准推向海外，丰富‘一带一路’的内涵。”陆鹏程表示，绿色发展是钢铁行业参与“一带一路”的必然要求。中钢国际期待与各方合作，让更多中国技术装备“走得出去”、“站得稳当”、“扎得下根”，打造更多“一带一路”钢铁绿色标杆项目，为共建国家的可持续发展和民生改善做出新贡献，为全球钢铁业的减碳、降碳贡献智慧。

谈到钢铁行业未来如何参与高质量共建“一带一路”，陆鹏程认为，有不少共建国家正处于工业化加速发展阶段，这为中国企业加速“走出去”提供了机遇。“中钢国际在先进技术、装备、管理等方面具有较强优势，可以为共建国家的钢铁业转型升级贡献力量，助力当地经济发展。同时，基于自身丰富的国际化经验，中钢国际有能力且期待为更多中国钢铁企业‘走出去’保驾护航。”



钢铁 x 化工 x 石化 x 建材
协同降碳



2. 合力探索低碳冶金关键共性技术

立足国家“双碳”目标、面向钢铁行业绿色低碳转型需求，中钢国际以宝武集团低碳冶金技术路线图为蓝本，聚焦绿色低碳工艺的颠覆式创新，加快构建以带式球团焙烧、高炉低碳化（HyCROF）、直接还原铁、氢冶金、薄带铸轧、减污降碳协同增效为核心的低碳冶金工程技术体系。中钢国际在充分发挥整合式集成创新优势模式的同时，进一步加强前沿技术和基础理论研究工作，提高公司整体科技创新水平。

中钢国际与北科大合作共建低碳冶金创新研究中心

2023年5月12日，中钢国际与北京科技大学（简称“北科大”）举行合作交流暨低碳冶金创新研究中心共建合作签约仪式，双方将携手打造全国知名、引领行业绿色发展的低碳冶金创新研究平台，合作迈上新台阶。中国工程院院士、北科大碳中和研究院院长毛新平，北科大冶金与生态工程学院院长张建良，能源与环境工程学院院长邢奕，碳中和研究院教授朱荣等；中钢国际董事长陆鹏程，宝钢工程董事、总经理赵恕昆，中钢国际董事董达，常务副总经理化光林等出席仪式。仪式由中钢国际副总经理唐发启主持。

立足国家“碳达峰、碳中和”目标，面向钢铁行业绿色低碳转型需求，中钢国际与北科大作为冶金行业的重要参与者和贡献者，充分发挥校企各自优势，共同组建“中钢国际—北京科技大学低碳冶金创新研究中心”（简

“中钢国际发展得非常好，北科大的冶金工程学科居世界首位，材料科学与工程、采矿工程等专业也名列前茅。双方的合作，覆盖了‘科学到技术、技术到工程’的完整创新链条，可谓强强联合。”
——中国工程院院士、北科大碳中和研究院院长毛新平



中钢国际与北京科技大学举行签约仪式

称“研究中心”)；以市场为导向、以平台为载体、以项目为依托，强化科技创新与产业发展的高效协同，让前端技术通过工程实施，实现真正的技术创新和转化，持续为钢铁节能减排、能效极致利用提供技术支撑和解决方案。

北科大作为中国“双一流”著名高校，拥有雄厚的科研实力以及十多个国家级研发平台，在冶金、材料和矿业等专业居于国内引领地位。2022年4月，碳中和研究院正式揭牌，结合钢铁工业低碳发展技术路线和学校学科优势，设置七大研究方向。

合作内容

重点围绕科技研发、人才培养和平台共建开展全方位合作，促进技术、人才、平台的有机融合和全面发展，引领低碳冶金技术发展，促进科技成果快速转化为现实生产力。

技术研发

重点围绕低碳炼铁工程关键技术，转炉、电炉炼钢技术，轧钢技术，低碳冶金技术，固废资源化，钢铁企业能源流和碳素流分析诊断等开展技术研发。

人才培养

加强在人才培养方面的沟通与合作，打造高水平科技创新人才培养基地。

平台与机制

以研究中心为双方低碳科技创新共建平台，联合共建，推动双方科技资源相互开放、共享共用、互利共赢。



中国工程院院士、北科大碳中和研究院院长毛新平在致辞中表示：

“钢铁是一种基础结构材料，在国民经济建设和社会发展中发挥了重要作用。中国粗钢产量已经达到10亿吨以上，在满足经济社会发展快速增长需求的同时，钢铁工业也是制造业领域的碳排放大户。实现‘双碳’目标是一场广泛而深刻的变革，中国钢铁工业的绿色低碳转型面临巨大挑战。”

“去年8月发布了中国钢铁‘双碳’的六大技术路径，即系统能效提升、资源循环利用、流程优化创新、冶金工艺突破、产品迭代升级以及捕集封存利用。六大路径相辅相成，协同互补，而技术创新与发展是其核心。”

毛院士对双方合作充满期待：“中钢国际发展得非常好，北科大的冶金工程学科居世界首位，材料科学与工程、采矿工程等专业也名列前茅。双方的合作，覆盖了‘科学到技术、技术到工程’的完整创新链条，可谓强强联合，对冶金工艺、装备和技术的创新发展具有重要意义和价值。我们的合作前景非常广阔。希望双方本着务实的合作原则，高效运作，尽快拟定第一批合作项目。今天的研讨会和签约是一个良好开端，预祝双方合作圆满！”



中钢国际董事长陆鹏程在总结发言中表示，今天非常荣幸邀请到了毛院士等专家大咖的到来，大家共话绿色低碳、共绘合作蓝图。生态文明建设是关乎中华民族永续发展的根本大计。钢铁业的绿色低碳转型发展，是贯彻落实习近平生态文明思想的重要举措，也是可持续发展的必然要求，这其中蕴含了巨大的机遇和挑战。中钢国际坚定不移投身绿色低碳转型发展，贯彻习近平生态文明思想，参与构建人类命运共同体。

陆鹏程指出，“绿色是钢铁的底色，要把钢铁的底色亮出来，要加快创新步伐，以科技创新引领全球钢铁业低碳发展。中钢国际作为中国宝武的一份子，积极践行习近平生态文明思想，聚焦高质量发展，坚持科技是第一生产力，围绕‘绿色制造、制造绿色’，强力打造中国低碳冶金技术领军企业。我们与北京科技大学携手打造全国知名、引领行业绿色发展的研究平台，传递了双方向国家重大需求、引领技术发展、促进成果转化的决心，也是中钢国际致力于推动产学研高效协同深度融合的行动。”

会上，陆鹏程还针对未来合作提出具体要求：一是各级领导干部深刻认识此次合作的意义，凝聚共识、统一思想、迅速行动。二是要秉承积极主动、虚心学习、克服困难的态度。三是要以解决低碳冶金工程中的难点为引领，用正确方法加大与北科大在更细分领域的合作，让前端技术通过工程实施，实现真正的技术创新和转化。四是要注重合作模式、同时加大人才培养力度，打造在细分领域的领军人物。

陆鹏程表示，今天的签约是一个良好开端，希望双方形成“你中有我、我中有你”的务实合作，将中钢国际打造成中国宝武在工程技术服务领域的一张闪亮名片，为行业高质量发展作出更大贡献！研讨会上，北科大碳中和研究院副院长汪水泽，冶金与生态工程学院党委书记、院长张建良，碳中和研究院教授朱荣，分别就碳中和研究院情况、低碳炼铁前沿技术、低碳炼钢前沿技术分享真知灼见。

坚持科技是第一生产力，围绕“绿色制造、制造绿色”，强力打造中国低碳冶金技术领军企业。



此次合作共建“低碳冶金研究中心”，是优势互补、强强联合、合作创新的重要体现，也是双方携手同心解决钢铁冶金绿色工程化技术等方面难题新的开端。

宝钢工程与上海大学携手打造“低碳冶金研究中心”

2023年7月5日，宝钢工程与上海大学材料科学与工程学院（简称“上大材料学院”）正式签订“低碳冶金研究中心”共建合作协议，开启了双方战略合作的崭新起点，全力为钢铁行业绿色低碳高质量发展作出新的贡献。

上海大学党委书记成旦红，科技管理部副部长李辉，材料科学与工程学院党委书记黄健，材料科学与工程学院副院长钟云波等；宝钢工程董事长、中国宝武设计院院长陆鹏程，宝钢工程总经理赵恕昆等出席会议。仪式由宝钢工程副总经理、马钢设计院董事长陈孝文主持。

赵恕昆对出席仪式的上海大学领导和教师致以热烈欢迎。他表示，为贯彻国家创新驱动发展战略，落实国家“双碳”目标，践行中国宝武低碳转型发展路径，宝钢工程与上海大学共建“低碳冶金研究中心”，将充分利用上海大学在低碳冶金领域的科技、装备、人才等方面的优势，同时依托宝钢工程低碳冶金工程化能力和平台，共同促进高校科技成果转化，助力宝钢工程不断攻克低碳冶金前沿技术工程化难题，实现“产学研用”合作共赢，携手为钢铁冶金绿色低碳高质量发展，为早日实现我国“双碳”目标作出新的贡献。

成旦红向此次合作表示热烈祝贺，他表示，上大材料学院设有省部共建高品质特殊钢冶金与制备国家重点实验室，以钢铁冶金国家重点学科和材料科学上海市重点学科为基础，上海大学围绕钢铁行业国际前沿进行战略布局，特别在低碳冶金和绿色冶金关键技术新理论、新工艺、新技术方面，积累了雄厚的研究基础和技术储备。“今天双方正式签约，上海大学将发挥自身在低碳冶金领域的技术积累和研发实力，并依托宝钢工程的工程化能力，实现优势互补、强强联合，开展低碳冶金新工艺、新装备和新技术研究，并推动系列科技成果在钢铁行业的工程化应用。‘低碳冶金研究中心’已列入上大材料学院重点支持的科研平台进行布局，未来学校计划将其纳入长三角新材料产业研究院体系进行建设，为中国钢铁工业的发展作出应有的贡献。”

陆鹏程感谢上海大学一直以来对宝钢工程的支持，感谢成旦红书记一行的到来。他表示，宝钢工程是中国宝武旗下研发成果工程化、产品化的工程技术平台公司，要坚决把握钢铁冶金绿色低碳未来发展方向，勇担中国宝武产业生态圈低碳冶金技术工程化的战略使命，更要学促干落实习近平总书记提出的“坚持科技是第一生产力、人才是第一资源、创新是第一动力”工作要求。“此次合作共建‘低碳冶金研究中心’，是优势互补、强强联合、合作创新的重要体现，也是双方携手同心解决钢铁冶金绿色工程化技术等方面难题新的开端。后续，随着务实合作机制落地运行和创新载体项目高效推进，双方持续加大科技创新资源投入，共享合作成果，不断锻炼、培养更多高水平人才及行业领军人物，为行业高质量发展作出更大贡献。”

3. 达到国际领先水平:中钢天澄自主技术通过科技鉴定破解烧结机头烟气袋式除尘难题

2023年2月8日, 由中钢国际子公司中钢集团天澄环保科技股份有限公司(简称“中钢天澄”)自主研发, 与新余钢铁股份有限公司、太原钢铁(集团)有限公司、山钢莱芜钢铁集团银山型钢有限公司共同申请的“烧结机头(球团)烟气袋式除尘技术与应用”通过科技成果评价(鉴定)。

此次成果评价(鉴定)会由中国环境保护产业协会与中国金属学会共同组织在京召开。评审委员会由钢铁研究总院殷瑞钰院士、清华大学郝吉明院士、浙江大学高翔院士, 以及来自生态环境部科学技术委员会、中国金属学会、中国钢铁工业协会、中科院过程工程研究所、首钢集团、北京航空航天大学、中国环境科学研究院、中国宝武中央研究院等单位的11位资深专家学者、行业代表组成, 殷瑞钰院士担任评审委员会主任, 郝吉明院士和高翔院士担任副主任。

a 突破行业共性难题

国内外大型烧结机头烟气治理均采用电除尘器, 由于其运行除尘效率不稳定、出口颗粒物浓度超标, 导致了后续脱硫、脱硝、活性炭吸附等装置无法高效稳定运行、材料寿命短、检修工作量大等问题。而高效袋式除尘器, 因其无法解决烧结烟气结露、滤袋板结、火星、高负压等瓶颈, 被行业视为“禁区”, 成为一个世界难题。

2015年起, 中钢天澄研发团队聚焦聚力该掣肘难题, 历经多年研发和热态工业试验, 自主研发了**烧结机头袋式除尘工艺、袋式除尘装备、耐高温耐腐蚀抗板结过滤材料、除尘器安全结构**等核心技术、装备和材料, 并成功建成投运了**全球首台套大型烧结机头烟气袋式除尘示范工程**, 实现了颗粒物高效去除和脱硫脱硝系统稳定超低排放。该成果, 结束了国内外烧结机头袋式除尘“禁区”的历史, 形成了自主知识产权的原创技术和装备, 是我国在烧结领域环保技术上的重大突破。



钢铁研究总院
殷瑞钰院士

截至目前, “烧结机头(球团)烟气袋式除尘技术”已先后在新余钢铁、莱钢银山型钢等6台烧结机上应用。作为全球首台套的新余钢铁7#360m²烧结机头袋式除尘超低排放改造项目, 自2021年9月投运以来, 系统运行稳定, 烧结生产保产增产, 综合能耗下降40%以上。经第三方检测, 达到超低排放:

- ▶ 颗粒物浓度5.4mg/m³
- ▶ 平均阻力650Pa
- ▶ 漏风率<2%

由中钢天澄EPC总承包建设的莱钢银山型钢400m²大型烧结机头烟气袋式除尘改造升级项目于2022年5月25日投产。截至目前, **袋式除尘系统安全稳定运行, 综合能耗降低50%, 成为北方地区烧结机头袋式除尘成果应用的范例。**

b 达到国际领先水平

评审会上, 评价委员会听取了中钢天澄姚群教授代表项目团队作的技术研发和应用情况汇报, 审阅了相关材料, 观看了工程应用视频, 并在质询和讨论后, 一致认为:

- ▶ “**烧结机头(球团)烟气袋式除尘技术与应用**”技术成果整体达到国际领先水平
- ▶ 建议加快“**顶部垂直进风袋式除尘器**”在工业烟气净化领域的推广应用

评审委员会还形成了如下评价意见:

烧结机头(球团)烟气袋式除尘技术与应用

- ▶ 针对烧结机头烟气特征, 开发了高效袋式除尘技术, 突破了行业共性难题, 并为下游脱硫脱硝系统稳定、高效运行创造了有利条件。
- ▶ 开发了具有预除尘、耐“火星”、抗高负压和低阻力等功能的顶部垂直进风袋式除尘器。
- ▶ 研制出具有耐高温、耐腐蚀、抗结露和阻燃等功能的纤维过滤材料。
- ▶ 该项目成果获授权发明专利7项、实用新型专利1项, 软件著作权2项, 在新余钢铁建设投运了全球首台套烧结机头袋式除尘生产示范工程, 并在山钢莱芜钢铁、盛隆钢铁等大中型烧结机头烟气除尘中应用, 为促进钢铁工业高炉-转炉流程的超低排放改造提供了先进技术选择。

“技术成果整体达到国际领先水平”

“顶部垂直进风袋式除尘器”产品

- ▶ 采用顶部垂直进风方式和惯性冲击器, 赋予了袋式除尘器预除尘和“火星”捕集的功能, 延长了滤袋寿命, 扩展了袋式除尘器的应用范围。
- ▶ 借助从顶部进口直至底部内置于除尘器中心的惯性冲击器, 实现气流分布更均匀, 流程更短, 从而显著降低流动阻力, 降低了能耗。
- ▶ 采用正方体箱体和内部三维网架支撑结构设计, 节省了除尘器钢材使用量, 提高了除尘器抗高负压能力。
- ▶ 该产品在烧结机头和熔炉烟气除尘以及原料输送、饲料加工酵母废气净化等行业得到应用。

“加快该产品在工业烟气净化领域的推广应用”





4. 双能XRT智能拣选技术分选复合铁矿石应用研究

作者/马钢集团设计研究院有限责任公司：孙业长

关键词：双能XRT、智能拣选、复合铁矿石、选矿

摘要

为推动双能XRT智能拣选技术在复合铁矿石高效预选中的应用，在分析了双能XRT检测复合铁矿石的理论依据基础上，开展了复合铁矿石双能XRT智能拣选试验。结果表明：

- ① 对安徽霍丘矿区某复合铁矿石中的50-10mm粒级进行预选，可抛出产率不低于14.64%、TFe品位约不高于8%的尾矿，即双能XRT智能拣选机可作为复合铁矿石的干选设备；
- ② 对安徽庐枞矿区某含铜高硫复合铁矿石细碎筛上弱磁干选尾矿进行有用矿物回收，获得的粗精矿作业产率为36.81%，Cu、TFe、SS富集比达2.0-1.6，回收率分别为68.82%、65.79%和62.03%，尾矿mFe、TFe品位均低于现场磨选作业磁选尾矿，即通过双能XRT智能拣选，共（伴）生铜硫复合铁矿石中有用矿物得到有效回收，显著减少了金属流失。对双能XRT智能拣选技术在铁矿选矿厂的应用进行的分析探讨。

我国铁矿资源储量较大，但禀赋差，主要表现为贫矿多、富矿少、矿石类型复杂、伴（共）生有益组分多、综合利用难度大等，因而铁精矿生产成本较高，产品缺乏竞争力^[1]。

磨前增设预选作业，被业界认为是当前提高贫铁矿石产品的竞争力的最有效手段之一，通过践行“能收早收、能抛早抛”理念，可以达到降本增效的目标。

铁矿石预选一般采用（弱、强）磁选或重选方法。磁铁矿石的预选多采用干式磁滑轮和大块磁选机，弱磁性铁矿石主要采用重选（重介质或跳汰）或强磁选^[2]。磁铁

矿石的大块预选具有设备单台处理量大、工艺简单的优势，因而在国内磁铁矿得到全面推广使用。弱磁性大块矿石的重力预选，需要湿式选别，存在工艺复杂、作业成本较高等不足，因而工艺应用受到一定限制；弱磁性矿石的强磁干式预选一般需要窄级别入选，存在设备单体处理能力较低、抛尾品位较高、工艺较复杂等缺点。

拣选是利用不同矿物的光学性质、导电性、磁性、放射性及不同射线辐射下的反射与吸收特性的差异，通过逐一检测后机械分离的选矿方法。拣选可分为光度拣选、激发光拣选、磁性检测拣选、核辐射拣选、红外线拣

选、电极法拣选、复合法拣选、辅助法拣选^[3]，其中光选机、激发光拣选机和核辐射拣选机等多种智能拣选设备正迅速走向智能化^[4]。核辐射拣选中的双能X射线透射(Dual Energy X-Ray Transmission,DE-XRT)智能拣选技术是近年迅速发展起来的新技术，是基于X射线透射技术和物质识别技术，依靠外力（高速气排枪）将矿石和废石分离的一种物理分选技术，具有智能化程度高、工艺简单、不用水、成本低、效率高等突出优点，已在煤矿、有色金属、贵金属、非金属矿预选方面获得了广泛应用^[5-9]。

近年来，国内开始进行黑色金属矿石中铬铁矿、赤铁矿的双能XRT智能拣选研究^[10-12]，并有部分应用实践。而对复合铁矿石、伴生（共生）复合铁矿石，若采用高效的弱磁干选抛尾工艺，会造成有用矿物损失，但也鲜见采用双能XRT智能拣选技术抛尾的报道。本研究以安徽霍丘矿区某复合铁矿石和安徽庐枞矿区某伴生铜硫复合

铁矿石为对象，开展了双能XRT智能拣选试验，为“弱磁干选+DE-XRT智能拣选”工艺在冶金矿山复合铁矿石预选中的应用提供依据。

1 双能XRT拣选技术的原理

自1953年Jacobson率先提出双能X射线成像技术以来，双能X射线透射分析技术已广泛应用于骨密度测量、医疗和工业CT、机场和客运站点安检、无损检测、显微层析等领域，以及煤矸石预选、废金属分选、金属矿和非金属矿（萤石、磷灰石）预选。智能拣选装备主要由振动布料系统、信号检测系统、计算机软件算法系统、动作执行装置4大模块组成^[13]。在智能拣选过程中，排布成单层的矿物进入信号检测区，检测信号经过算法系统处理后利用动作执行装置实现矿物颗粒的选择性分离。根据物质质量吸收系数随X射线光子能量变化的规律，以及不同原子序数物质的质量衰减系数差异，发现低原子

表1 矿石的主要矿物含量 %

成分	磁铁矿	假象赤铁矿	镜铁矿	石英	方解石、白云石	阳起石	绿泥石	白云母
含量	12.4	7.6	13.7	35.7	2.9	4.8	8.0	14.1

表2 双能XRT智能拣选试验结果 %

产品	产率	TFe品位	TFe回收率
粗精矿	85.36	26.38	94.94
尾矿	14.64	8.20	5.06
50-10 mm粒级	100.00	23.72	100.00

序数物质的质量衰减系数随能量增加下降较快，高原子序数物质的质量衰减系数随能量增加下降较缓慢。在双能量方式下，同一原子序数物质对低能和高能X射线的吸收程度不同，这样通过对低能、高能两个不同射线吸收系数的比较与运算，就可以从2种不同物质组成的、不同厚度产生的或相互重叠的图像中将不同种类的物体区分开^[14-15]。

对于单一铁矿石，铁一般赋存在铁氧化物、铁硫化物和碳酸铁中，主要以磁铁矿、赤铁矿、黄铁矿、碳酸铁形式存在；脉石矿物主要为铝、镁、硅等低原子量的矿物，主要以石英、长石、绿泥石、绿帘石、云母等形式存在。双能XRT技术检测的金属矿物的有效原子序数要高于脉石矿物的有效原子序数，对共（伴）生多金属的铁矿石，伴生的金属矿物主要是硫化物或氧化物，其有效原子序数一般高于脉石矿物；金属矿物或金属矿物与脉石矿物的富连生体的有效原子序数 > 金属矿物与脉石矿石连生体的有效原子序数 > 脉石矿物的有效原子序数，由于拣选是逐一根据矿石单颗粒某特征值进行分选。

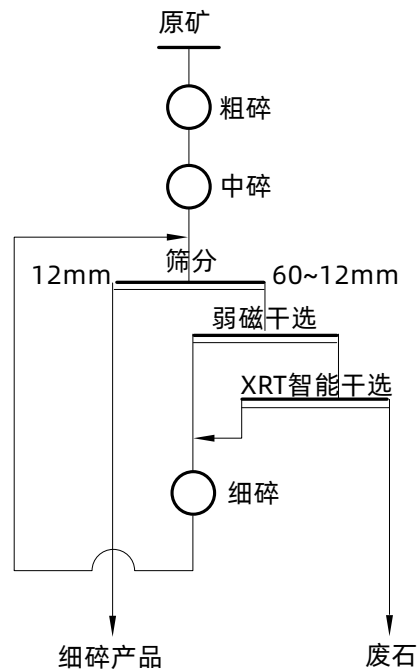


图1 双能XRT智能拣选工艺流程

2 双能XRT拣选试验

2.1 复合铁矿石

为了解双能XRT智能拣选工艺对复合铁矿石的预选效果，对安徽霍丘矿区重新集铁矿石进行了双能XRT智能拣选试验。矿石中主要铁矿物是磁铁矿和镜铁矿，次为假象赤铁矿，褐铁矿微量；金属硫化矿黄铁矿含量很低；脉石矿物以石英居多，其次是绿泥石、白云母、方解石、白云石、阳起石和电气石，主要矿物含量见表1。

试验对50-10mm粒级进行双能XRT智能拣选。试验采用XNDT-104双能XRT智能选矿机，试验结果见表2。

从表2可以看出，50-10mm粒级智能拣选抛尾产率为14.64%，尾矿TFe品位8.20%，粗精矿TFe品位提高2.66个百分点。可见，双能XRT智能拣选工艺可以对50-10mm粒级复合铁矿石进行高效预选，抛尾TFe品位较低，说明双能XRT智能拣选技术对复合铁矿石进行大块预选抛尾是可行的。

2.2 共（伴）生复合铁矿石

矿石取自安徽马钢罗河铁矿，为含铜高硫复合铁矿石。选矿厂采用带细碎筛上弱磁干选抛尾作业的三段一闭路破碎（产品粒度为12-0mm）、高压辊磨超细碎、两段阶段磨矿、磁浮联合选别的碎磨选工艺流程。

矿石中主要金属矿物为磁铁矿、假象赤铁矿、赤（褐）铁矿，金属硫化矿物主要有黄铁矿、黄铜矿。主要元素含量TFe 31.57%、Ts7.33%、Ss3.95%、Cu0.03%，矿石中磁性铁占总铁的65.78%，赤褐铁占总铁的13.06%，矿石中硫元素主要为黄铁矿形式的硫和硫酸钙形式的硫，分别占53.16%和42.26%。

2.2.2 预选工艺方案及试验结果

由于该铁矿石为非单一磁铁矿石，采用单一的弱磁干选工艺预选抛尾会造成赤褐铁矿、硫化矿物损失在尾矿中。因此，试验采用XNDT-104型双能XRT智能分选机从弱磁干选尾矿中回收有用矿物^[16]（图1），试验结果见表6。

表6 高硫复合铁矿石弱磁干选尾矿双能XRT智能拣选试验结果 %

产品	产率	品位				回收率					
		Cu	TFe	mFe	TS	SS	Cu	TFe	mFe	TS	SS
粗精矿	36.81	0.079	26.47	2.68	12.62	9.71	68.82	65.79	63.34	58.17	62.03
尾矿	63.19	0.021	8.02	0.90	5.29	3.46	31.18	34.21	36.66	41.83	37.97
弱磁干选尾矿	100.00	0.042	14.81	1.56	7.99	5.76	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

3 铁矿石的双能XRT智能拣选技术探讨

3.1 工艺确定

对单一磁铁矿石，尽管可以采用双能XRT智能拣选技术进行预选，但与弱磁大块干选技术相比，其性价比低；对赤铁矿石，与湿式粗粒重选和干式强磁粗粒预选相比，双能XRT智能拣选技术因具有不用水、入选粒级宽、选别指标好、作业成本低、生产管理方便等优点，因而性价比较高。如力拓集团（Riotinto Group）Tomprice铁矿若将31.5-6.3 mm粒级重介质鼓型选矿机抛尾工艺^[17]改为双能XRT智能拣选工艺，则可简化作业流程、降低作业电耗及介质消耗。

对复合铁矿石或共（伴）复合铁矿石，宜采用弱磁干选+双能XRT智能拣选联合工艺，既充分发挥弱磁干选设备处理量大、性价比高的优势，降低拣选工艺系统的规模，又能发挥双能XRT智能拣选工艺对有用成分回收精度高且充分的优势，达到投资省、作业成本低、选别指标好的效果。

3.2 作业位置的选择

双能XRT智能拣选技术应用应考虑合适的粒度比，及增加该作业的难易度。国内大中型铁矿通常采用三段一闭路破碎工艺，中碎产品粒度上限一般在70mm左右，最终产品粒度上限为12mm左右。对采用了高压辊磨超细碎系统的选矿厂，若常规碎矿系统为三段一闭路工艺，则高压辊磨的给矿粒度上限一般在12-30mm；若常规碎矿系统为两段一闭路工艺，则高压辊磨的给矿粒度上限一般在25-50mm，双能XRT智能拣选宜选择处理细碎筛上产品。

3.3 强化多产品及细粒级分选设备的研制

(1) 研发多喷吹方式的设备，可灵活实现将给矿一分为三的生产模式，把获得铁品位在50%以上的合格块状精矿与抛弃合格尾矿融合在一个作业，从而简化粗粒干选流程，提高粗粒干选效率，降低投资及作业成本。

(2) 研制适应处理粒度在+3mm以上物料的新型设备，发挥拣选分选精度高、尾矿品位低的优越性，从而拓宽双能XRT拣选技术在铁矿的应用范围。



3.4 优化双能XRT智能拣选设备的工作参数

通过进一步优化双能XRT智能拣选设备的工作参数，以适应高品位铁矿石（密度大、品位高）预选的精度要求。X射线的穿透深度与射线的强度及矿石中矿物的组成有关，与双能XRT智能拣选设备应用于有色金属矿或非金属相比，由于铁矿石的原矿密度大、铁品位高，需要较高的能量才能穿透矿石颗粒，对高品位铁矿石的拣选宜提高X射线的强度。X射线能量范围集中在20-300 keV，X射线探测器低能探测范围集中在40-100 keV，高能探测范围集中在150-300 keV，过高的能量则需要提高防护等级^[14]。

3.5 以综合技术经济指标确定改造方案

在计划实施双能XRT智能拣选前，应进行综合技术经济比较，以确定改造的可行性和方案。如对文中的含铜高硫复合铁矿石进行弱磁预选+双能XRT智能拣选改造（选矿厂规模500wt/a），改造前后废石的质和量、金属矿物的回收量、生产成本等发生了变化，改造后增加了铜精矿、硫精矿和铁精矿的产量，减少了块状尾矿量，增加了磨选及拣选作业成本。估算的改造投资为1200万元，年增加销售收入2500.49万元，增加成本712.58万元，年创收1787.91万元，投资回收期为0.67 a^[10]。

4 结语

- (1) 双能XRT智能拣选技术可用于铁矿山选矿厂块矿的拣选作业，具有尾矿品位低、选别指标好的优势。
- (2) 对复合铁矿石、共（伴）生含铜高硫复合铁矿石宜采用弱磁预选+双能XRT智能拣选联合工艺，该工艺可以充分发挥弱磁干选设备处理能力大的优势，降低双能XRT智能拣选规模，具有投资低、分选指标好、综合效益高的优势，适合类似性质矿石的高效预选。
- (3) 双能XRT智能拣选作业的入选粒度和预选工艺应根据给料性质和后续工艺来选择合理的工艺流程。

参考文献

- [1]赵立群,王春女,张敏,等.中国铁矿资源勘查发现现状及供需形势分析[J].地质与勘探, 2020(3):635-643.
- [2]王运敏.中国黑色金属选矿实践[M].北京:科学出版社, 2008.
- [3]崔国治.拣选技术 [M].北京:中国建材工业出版社, 1993.
- [4]罗仙平, 宁湘茵, 王涛, 等.智能分选拣选技术的发展及其在应用[J].金属矿山,2019(7): 113-117.
- [5]韩子彬,王丽宏,申志刚,等.基于X射线分选方法在选煤厂中的应用[J].煤炭科学技术,2022(51):327-332.
- [6]孙照焱,蒋康生,尹华功,等.XNDT-104智能分选系统在闪星锦业的应用[J].有色金属设计,2019(3):128-131.
- [7]崔丽娜,彭雪清.双能量X射线透射预选用于广西某低品位铅锌矿的试验研究[J].矿业工程,2020(4):30-32.
- [8]刘志超,李春风,张新,等.X射线透射技术分选铀矿石试验研究[J].金属矿山,2022(4):102-107.
- [9]李宇新,田孟杰,瞿定军,等.X射线拣选-反浮选工艺在宜昌中磷层磷矿选矿中的应用[J].矿产保护与利用,2020(6):52-57.
- [10]孙业长.一种低品位铬铁矿的干式预选系统及其工艺[P].中国专利, CN2020109994699.3, 2021.06.25.
- [11]雷永顺,展仁礼,陈铁军,等.X射线智能分选机应用于镜铁山矿难选铁矿预选工艺的试验研究[J].矿山机械,2020(7):56-60.
- [12]黄开伟,陈铁军,展仁礼,等.镜铁山V矿体铁矿石智能与强磁干式联合预选试验研究[J].金属矿山,2022(3):99-104.
- [13]王龙,林兴浩,王彬.智能拣选装备在矿物加工中的应用现状与发展趋势[J].金属矿山,2022(10):113-121.
- [14]杨斌.基于双能X射线透射技术的废金属分选系统设计[D].南京:南京航空航天大学, 2015.
- [15]原培新, 赵秉军, 孙丽娜, 等.X射线安检设备中双能量方式下R值的提取[J].机械与电子, 2005 (9) : 25-27.
- [16]孙业长.一种高硫复合铁矿石的选矿工艺及其预选生产系统[P].中国专利, ZL202110708793.2,2021.06.25.
- [17]孙业长.哈默斯利铁矿公司矿物加工厂的生产及管理技术[J].国外金属矿山, 1999 (6) , 51-57.
- [18]孙业长.XRT智能拣选在含铜高硫复合铁矿石中的研究与应用[R].马鞍山: 马钢集团设计研究院有限责任公司, 2021.

5. 气基直接还原铁还原气生产技术研究

第一作者/中钢设备有限公司低碳冶金与能源工程部: 刘西琨 金锋 付艳鹏 陈树华 程立 林青林
第二作者/中国石油大学(北京)新能源与材料学院: 余长春

关键词: 干重整 双重重整 还原气 煤炭 含甲烷气体 气基直接还原铁

摘要

从原料组成和物料平衡分析和模拟计算了以各种含甲烷工业气体和不同品质煤炭为原料制取高品质气基直接还原铁还原气的可行性。结合工业实践数据的分析表明，无论是富氢的含甲烷原料气，还是富碳的沼气，都可以经干重整或双重重整一步直接转化制得竖炉工艺所需的直接还原铁还原气。不同煤阶的煤炭为原料，采用氧气气化，必须采用补氢或水气变换进行原料气组成的调节和相应的预处理，才能满足竖炉工艺直接还原铁对还原气的要求。

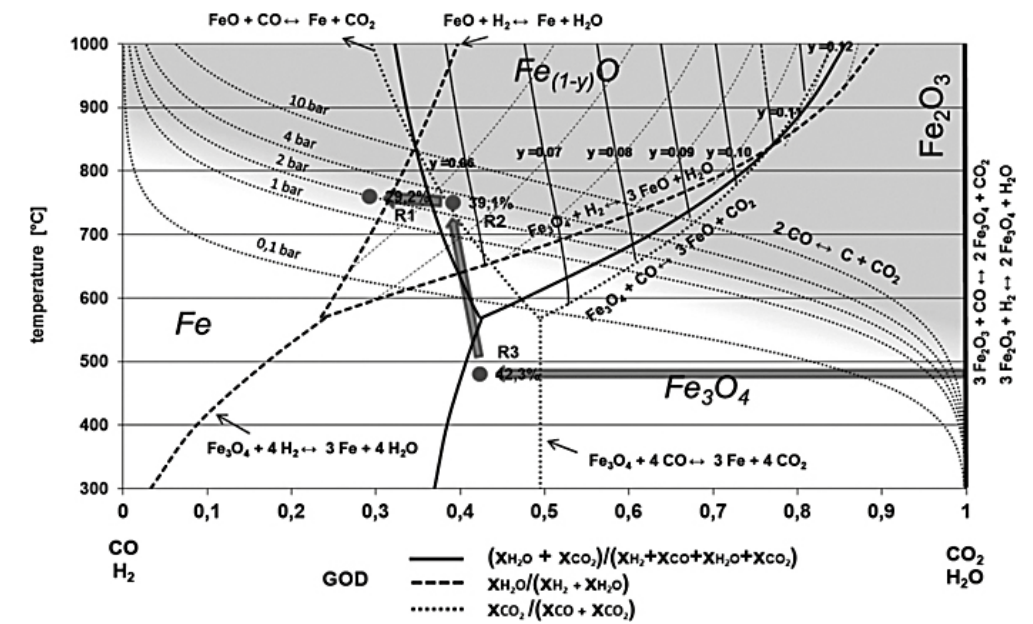


图1 不同温度-还原气的氧化铁还原与CO歧化平衡线



1 直接还原铁概述

以商业化的气基直接还原铁(DRI)主要工艺有米德雷克斯, HYL, PERED, FASTMET/FASTMELT, ITmk3, SL/RN, Finmet, Circofed, Redsmelt等^[1, 2], 还原气原料采用天然气或煤炭制取^[3-5]。近年来, 随着全球对二氧化碳排放的关注, 对于DRI过程的低碳化也在积极研究, 主要是现有商业DRI过程的二氧化碳脱除或者采用可再生能源制还原气^[6-10]。米德雷克斯统计数据显示, 2019年全球DRI产量达到1.081亿t, 其中采用竖炉工艺技术的DRI产量为8194万t^[11], 占了76%的市场份额。不同温度-还原气的氧化铁还原与CO歧化平衡线^[12]见图1。

为了满足DRI过程生产需求, 尽可能提高还原速度和效率, 高温高还原度还原气的制备是DRI的关键。通常用作气基直接还原的还原气的主要成分为CO和H₂, 高还原度还原气制备和使用过程中, 高还原度还原气中的

CO在热力学上不可避免的存在强烈的积碳平衡推动力^[12, 13]。关于CO的积碳:

- ▶ 在还原氧化铁球团过程中, 积碳与还原铁一起离开系统, 不存在累积问题;
- ▶ 在高温还原气制备过程, 积碳是一种固态物质, 存在堵塞设备、管道和阀门等的风险, 直接影响生产过程;
- ▶ CO的积碳区还与压力有直接相关。此外, 不同原料或同类原料生产的还原气中H₂和CO含量可以有很大差别, 所适用的直接还原工艺也不同, 因此还原气制备过程的积碳控制是需要关注的关键技术之一。

图2^[12]表明制备DRI还原气的原料可以是天然气、煤炭, 就我国的资源而言, 还可以包括焦炉气、各种非常规天然气、一些工业生产过程尾气, 如甲醇尾气等。另一方面, 根据还原炉和还原的金属凝聚态不同, DRI工艺还可以细分出8种不同类型。其中, 由于CO还原特

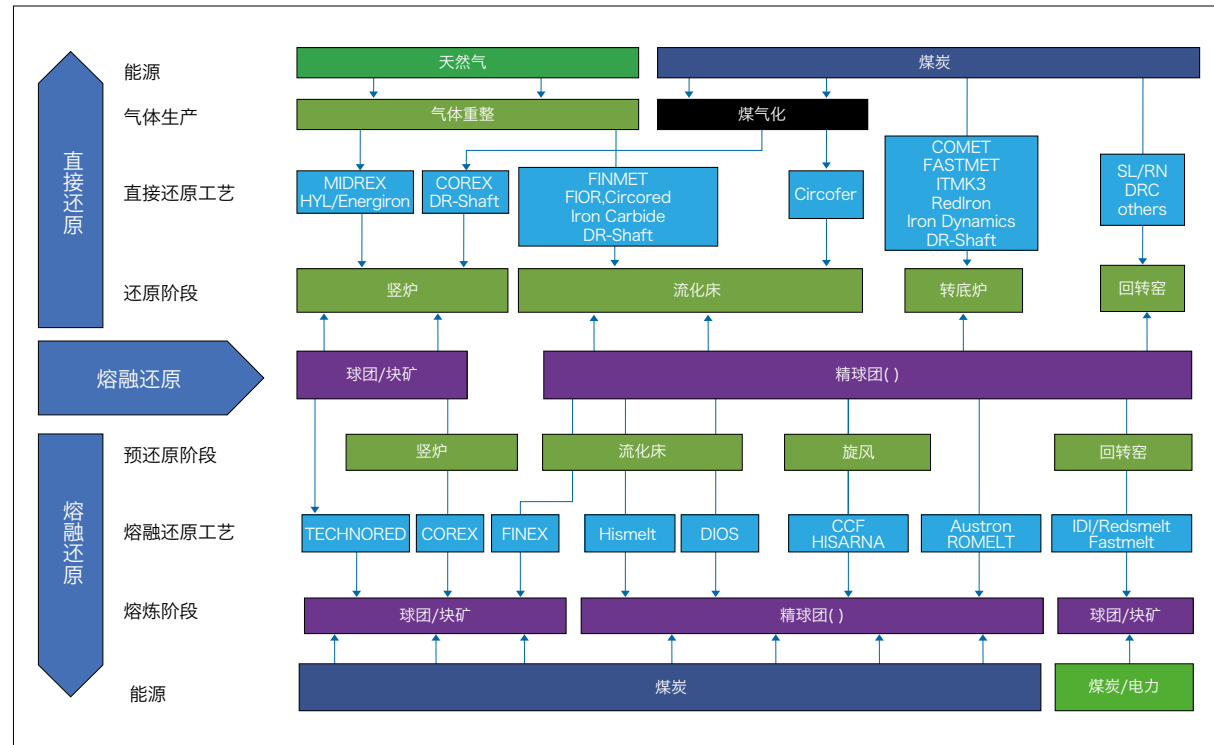


图2 直接还原和熔融还原分类

表1 两种主流DRI竖炉工艺还原气典型工艺条件

工艺包方	温度, T / °C	P / (×10 ⁵ MPa)	组成 / v %			n(H ₂)/n(CO) / mol/mol	生产能耗 / tDRI (GJ·t ⁻¹)
			ψ(H ₂)	ψ(CO)	ψ(H ₂ + CO)		
特诺恩	约930	约5	约68	约22	约90	约3	约10.4
米德雷克斯	约900	约1.5	约55	约35	约90	约1.6	约10.4

表2 两种主流DRI竖炉工艺还原气C-H-O原子比值

工艺包方	n(C) / mol	n(H)/ mol	n(O) / mol
特诺恩	1	6.18	1
米德雷克斯	1	3.14	1

性, 高含CO气体的煤气化制DRI大多采用熔融还原, 高含H₂的天然气制DRI大多采用竖炉还原。表1中列出了米德雷克斯和HYL III两种市场主流竖炉DRI工艺的还原气工艺条件。

表1数据显示, 商业化竖炉的还原气含量保持在约90%, 压力并不高, 温度很高, 这有利于制取高品质还原气。同时, n(H₂)/n(CO)在1.6-3.0, 结合近年来成为热点的氢冶金和图1还原平衡曲线, n(H₂)/n(CO)不存在上限限制。基于已商业的竖炉DRI还原气工艺参数, 本文就竖炉工艺适合的还原气制备进行探讨, 寻求适合我国DRI工艺的还原气制备技术。

2 直接还原铁还原气制备

就我国的资源特点, 原料选择可以是比较丰富的煤炭和各种廉价的含甲烷的气体资源, 其中煤炭可以采用国家鼓励使用的低阶煤, 如褐煤。廉价含甲烷气体资源可以

是天然气、页岩气、炼厂气、焦炉气、煤层气, 甚至沼气等气体。

DRI还原气的制备, 参考表1的商业DRI工艺过程数据, 以C原子数(或物质的量, 摩尔)为基准, 按照两种经典的竖炉工艺还原气组成, C-H-O三种元素的原子比可以简化为表2数据。采用化工的原子矩阵方法, 以表2数据和原料组成制作原子矩阵, 可以从理论上判断所采用的原料是否可以一步制取DRI还原气。

由此, 可以采用原子矩阵, 根据物料平衡的原则, 对气体制DRI还原气和煤炭制DRI还原气的进料进行粗略的估算, 如果进料的元素组成偏离表2的元素组成太大, 则意味着要考虑增加中间过程进行还原气生产的合理调节。此外, 实际的工业生产过程中, 扣除真正的惰性气体组分N₂和Ar等, 通常还有为转化的CH₄, 以及部分CO₂和H₂O, 会使得实际的C-H-O组成与表2数据有一定的偏离。

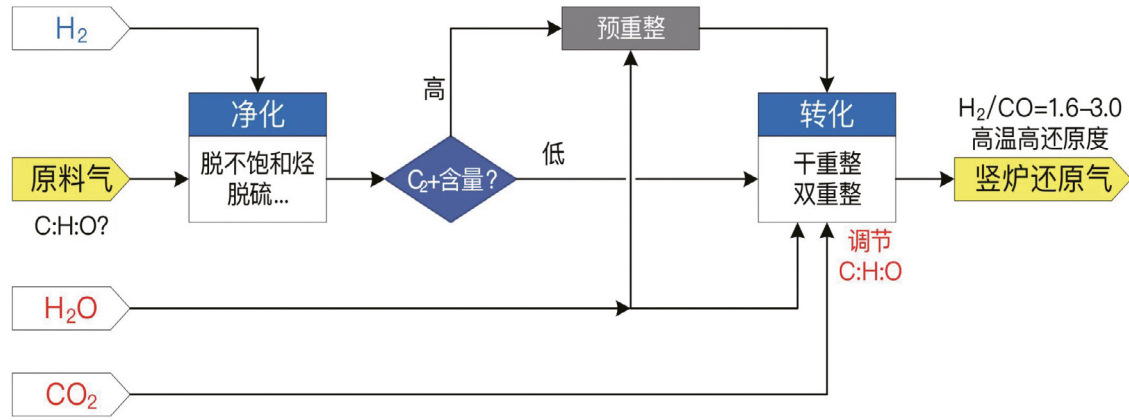


图3 含甲烷气体原料转化制DRI还原气流程框图

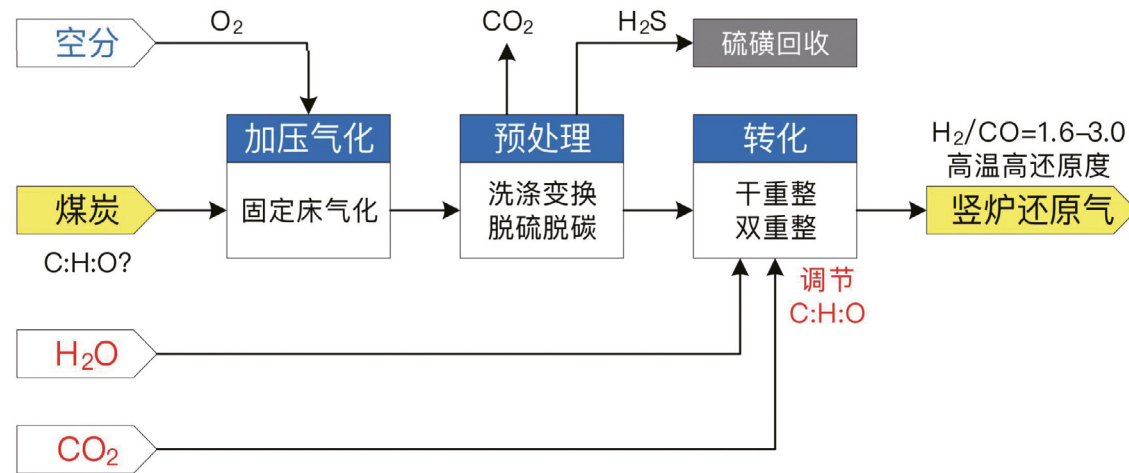


图5 基于固定床气化的煤制DRI还原气流程框图

2.1 气体原料制DRI还原气

基于上述物料平衡的分析，富含CH₄的气体原料通常可以添加CO₂和/或H₂O进行系统工艺气的C-H-O调节^[15, 16]，以适应制取n(H₂)/n(CO)为1.6-3.0，甚至更宽范围的物料组成，经干重整或双重重整一步直接制取适合下游竖炉的高温高还原度的DRI还原气。依据气体原料元素组成，制取竖炉工艺DRI还原气的工艺流程框图，如图3所示。

基于表2的C-H-O物料平衡和图3的原则流程，采用原子矩阵对典型的气体原料制DRI还原气进行简单分析，采用干重整或双重重整一步直接制DRI还原气，可以得到表3的结果。

对于理论分析计算的表3数据是否真实可行，采用Gibbs反应器，P-R方程，对关键的干重整或双重重整转化过程进行热力学模拟，以获得接近实际生产条件下的产品气体是否满足用于竖炉的气基直接还原铁还原气组成。工艺条件采用较为苛刻的HYL III工艺条件（参见表1），即温度为930℃，表压为5×10⁵ MPaG。模拟结果汇总到表4。

由表4的模拟结果整理得到的数据可知，从最富氢的气体原料甲醇尾气和最富碳的沼气都可以经过干重整或双重重整一步制得有效还原气ψ(H₂ + CO) (mol%) 超过90%，氧化度低于10%，n(H₂)/n(CO)(mol/mol) 约在1.6-3.0（甲醇尾气略偏高，沼气略偏低，但非常

接近)的DRI还原气，可以满足商业竖炉对原料气组成的要求。说明采用原子矩阵和物料平衡是有效的进行DRI原料气制备的理论分析的方法。

2.2 煤炭原料制DRI还原气

依据煤炭原料的典型元素组成（见表5），不同煤炭的C-H-O元素组成如表3所示。

由表5可知，褐煤到无烟煤的C-H-O原子比范围约为1.00:0.88:0.29到1.00:0.46:0.02，褐煤约为1.00:0.72:0.24，烟煤平均约为1.00:0.80:0.10。煤炭气化制还原气通常采用O₂或O₂ + H₂O为氧化剂，可以通过控制氧气的量制的高还原度的还原气，根据煤炭的C-H-O原子比，以纯O₂为氧化剂气化，理论上的n(H₂)/n(CO)(mol/mol)比值范围约为：0.44到0.23，褐煤n(H₂)/n(CO)(mol/mol)约为0.36，烟煤n(H₂)/n(CO)(mol/mol)约为0.40。由此可见采用氧气为主的煤炭气化的还原气H₂/CO比值偏低，CO含量太高，并不适合典型的竖炉工艺。要想将煤炭气化用于制取竖炉工艺的DRI还原气，需要中间过程进行物料的调整，重点是补氢脱碳。煤炭气化工艺很多，从技术经济来讲，采用固定床加压气化是一种低成本制DRI还原气的气化工艺，基于固定床的煤炭制竖炉工艺DRI还原气的工艺流程框图如图5所示。

煤炭原料制DRI还原气需要注意，由于煤炭本身碳含量高，氢含量偏低，经济的气化工艺通常采用氧气或富养气体气化，引入了大量氧。煤炭气化的产品气中必然存在过量的氧和碳，直接使用并不适合竖炉工艺。如果煤炭气化生产DRI还原气，要么引入大量的氢，要么脱除部分碳和氧。由此可以分为两种调整煤炭气化的富碳气体的方法：

- 1) 就实际过程来讲，如果有廉价的氢气气源，直接给煤气化的气体补氢最简单。这个方法需要有合适的工业副产氢的地方，如轻烃脱氢制烯烃企业或氯碱企业等，这样可以充分利用这些工业副产氢气，用于煤气化富CO气体调节H₂/CO比值，满足下游竖炉工艺的DRI生产。
- 2) 向富CO气化产品气中，引入蒸气，通过水气变换反应，将大量CO转化为H₂和CO₂，调节n(H₂)/n(CO) (mol/mol)比值，然后通过脱碳将CO₂脱除，降低气体氧化度，满足竖炉工艺的DRI生产。



一旦煤炭气化产品气使用补氢或者水气变换+脱碳工艺，DRI还原气n(H₂)/n(CO)(mol/mol)比值和还原气中氧化性气体(H₂O + CO₂)都可以按下游需求进行精准调节，使得气体组成完全满足下游竖炉工艺所需的高品质还原气。

表3 气体原料加入H₂O或CO₂一步直接制DRI还原气的物料组成表

原料气	进料组成 / % mol					氧化剂 / % mol		原子比		
	ψ(CH ₄)	ψ(CO ₂)	ψ(H ₂)	ψ(CO)	ψ(C ^{2+*})	ψ(CO ₂)	ψ(H ₂ O)	n(C)	n(H)	n(O)
焦炉气	22.7	2.6	65.0	9.0	0.7	22.0	-	1	3.82	1.01
天然气	94.8	-	-	-	5.2	50.0	56.0	1	3.16	1.00
甲醇弛放气	12.6	6.1	77.2	4.1	0.0	11.0	-	1	6.07	1.13
沼气	60	40	-	-	-	-	37.0	1	3.14	1.17



表4 依照表3数据和图4流程模拟的DRI还原气 (930 °C, 5×10⁵ MPa) 组成和物性

原料气	产品气 / %					$\psi(\text{H}_2 + \text{CO}) / \%$	$n(\text{H}_2)/n(\text{CO}) / \text{mol/mol}$	$\psi(\text{GOD}) / \%$
	$\psi(\text{CH}_4)$	$\psi(\text{H}_2)$	$\psi(\text{CO})$	$\psi(\text{CO}_2)$	$\psi(\text{H}_2\text{O})$			
焦炉气	3.6	60.8	31.7	1.1	2.9	92.4	1.92	4.09
天然气	3.6	57.3	35.2	1.2	2.7	92.5	1.63	3.99
甲醇弛放气	2.3	69.3	22.6	1.1	4.7	91.9	3.07	5.94
沼气	1.5	54.3	35.9	2.6	5.7	90.2	1.51	8.43

表5 不同煤炭的煤质分析

煤			工业分析, %				元素分析, %			低位热值		
国家	地区	分级	固定碳	挥发分	水分	灰分	C	H	O	N	S	MJ/kg
德国	莱茵河	褐煤	17.3	20.0	60.0	2.7	67.5	5.0	26.5	0.5	0.5	26.2
美国	北达科他州	褐煤	27.8	24.9	36.9	10.4	71.0	4.3	23.2	1.1	0.4	26.7
美国	蒙大拿州	重质沥青	43.6	34.7	10.5	11.2	76.4	5.6	14.9	1.7	1.4	31.8
美国	伊利诺伊州	沥青	39.3	37.0	13.0	10.7	78.4	5.4	9.9	1.4	4.9	33.7
波兰	典型	沥青	54.9	35.6	5.3	4.2	82.8	5.1	10.1	1.4	0.6	36.1
南非	典型	沥青	51.3	32.7	2.2	13.8	83.8	4.8	8.4	2.0	1.0	34.0
中国	大唐	沥青	50.9	28.1	11.9	9.1	84.4	4.4	9.5	0.9	0.8	33.4
印度	典型	沥青	30.0	23.0	7.0	40.0	75.5	6.4	15.2	1.5	1.4	32.1
澳大利亚	典型	沥青	44.9	41.1	4.5	9.5	81.3	5.8	10.0	2.0	0.9	33.8
德国	鲁尔	无烟煤	81.8	7.7	4.5	6.0	91.8	3.6	2.5	1.4	0.7	36.2

3 结论

根据我国国情，廉价含甲烷工业气体甚至沼气，以及褐煤等低阶煤都可以用于生产竖炉工艺的气基直接还原铁所需的还原气：

- 1) 采用廉价的含甲烷气体，可以直接制取满足竖炉工艺的高温高还原度DRI还原气，有效还原气 $\psi(\text{H}_2 + \text{CO}) > 90\%$ ， $n(\text{H}_2)/n(\text{CO})(\text{mol/mol})$ 约为1.6-3.0，氧化度低于10%。
- 2) 采用廉价的煤炭气化，可以通过补氢或水气变换结合脱碳工艺来调节产品气C-H-O成分，精确控制产品气 $n(\text{H}_2)/n(\text{CO})(\text{mol/mol})$ 比值和氧化度，满足下游竖炉工艺对气体成分的要求。

参考文献

[1] Hasanbeigi A, Arens M, Price L. Alternative emerging ironmaking technologies for energy-efficiency and carbon dioxide emissions reduction: A technical review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2014, 33: 645-658.

[2] Fatemeh Mahnaz Mohsenzadeh H P, Mohammad Ali Abdoli, Zahra Abedi. An environmental study on persian direct reduction (PERED) technology: Comparing capital cost and energy saving with 米德雷克斯 technology[J]. *Foundation Environmental Protection & Research-FEP*, 2018, 27 (106) : 959-967.

[3] Mousa E A, Babich A, Senk D. Reduction Behavior of Iron Ore Pellets with Simulated 焦炉气 and 天然气[J]. *steel research international*, 2013, 84 (11) : 1 085-1 097.

[4] Mousa E A, Babich A, Senk D. Utilization of 焦炉气 and Converter Gas in the Direct Reduction of Lump Iron Ore[J]. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 2013, 45 (2) : 617-628.

[5] Mukherjee A, Maity A, Chatterjee S. Enabling a gasification and carbon capture economy in India: An integrated techno-economic analysis[J]. *Fuel*, 2020 (2) 263.

[6] Fu J-X, Zhang C, Hwang W-S, et al. Exploration of biomass char for CO₂ reduction in RHF process for steel production[J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2012, 8: 143-149.

[7] Guo D, Zhu L, Guo S, et al. Direct reduction of oxidized iron ore pellets using biomass syngas as the reducer[J]. *Fuel Processing Technology*, 2016, 148: 276-281.

[8] Ho M T, Bustamante A, Wiley D E. Comparison of CO₂ capture economics for iron and steel mills[J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2013, 19: 145-159.

[9] Chen Q, Gu Y, Tang Z, et al. Assessment of low-carbon iron and steel production with CO₂ recycling and utilization technologies: A case study in China[J]. *Applied Energy*, 2018, 220: 192-207.

[10] Hammerschmid M, Müller S, Fuchs J, et al. Evaluation of biomass-based production of below zero emission reducing gas for the iron and steel industry[J]. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 2020, 11 (1) : 169-187.

[11] 2019 world direct reduction statistics, <https://www.米德雷克斯.com/wp-content/uploads/米德雷克斯-STATSbook2019Final.pdf>.

[12] Skorianz M, Mali H, Pichler A, et al. Reduction Behavior and Structural Evolution of Iron Ores in Fluidized Bed Technologies[J]. Part 1: Method for the Determination. *steel research international*, 2016, 87 (5) : 633-641.

[13] Nishihiro K, Maeda T, Ohno K-i, et al. Effect of H₂ Concentration on Carbon Deposition Reaction by CO-H₂ Gas Mixture at 773 K to 973 K[J]. *ISIJ International*, 2019, 59 (4) : 634-642.

[14] 余长春, 李然家, 王伟, 等. CO₂/CH₄重整转化催化剂的积碳控制研究[J]. *石油化工*, 2020, 49 (10) : 925-930.

[15] Li Z, Lin Q, Li M, et al. Recent advances in process and catalyst for CO₂ reforming of methane[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2020, 134.



6. RH单工位双钢包车工艺布置的工程实践

作者/宝钢工程技术集团有限公司：丁永鐸

关键词：RH 工艺布置 解决方案

摘要

多功能高效RH精炼技术在中国已有二十多年的应用实践，从中演化出多种工艺布置方案。单工位RH主要分为单钢包车、双钢包车等形式，双工位RH主要分为两车三位、两车四位、三车五位和四车六位等形式。

追求“性价比”是业主投资项目永恒的主题，即花较少的投资产生较大的效益。那么“单工位双钢包车”这种形式的RH因具备这一特点，被广泛采用。从而又演化出多种形式的布置方案，如：垂直交叉轨、45°交叉轨、横向一字轨、纵向一字轨（顶升和提升）、双平移台车等形式。

本文就着重介绍单工位双钢包车RH的几种典型的布置方案和特点。

1 现状和问题

1.1 标准单工位RH处理周期长

标准单工位RH是指传统意义上的一个处理工位和一套钢包台车的RH真空精炼装置，其主要的问题就是处理周期长，在现代快节奏炼钢车间中很难起到游刃有余的承上启下作用，往往成为整个炼钢车间的瓶颈工序。处理周期（TTT）详见表1：

根据处理周期计算表，单工位（TTT）56min，双工位（TTT）31min。但是表中的三种等待时间（3+4.5+4.5=12）一般不会同时发生在一炉上，将其打对折为6min。这样单工位（TTT）50min，比双工位长19min。也就是说，单工位的处理周期比双工位长60%左右。

1.2 双工位RH项目投资大

表2是单工位和双工位RH的主要设备组成和建设内容：

根据上表的比较，双工位的机械设备、三电设备、配管配线及土建设施都比单工位多，总投资约是单工位的1.5-1.7倍，即投资较单工位增加50%-70%。

1.3 双工位RH其它的问题

- ①设备运行成本高。如：机械设备冷却水耗量、电耗和燃气耗量等。
- ②设备维护成本高。
- ③占地面积大。在寸土寸金的车间内，这是很不划算的。若是在现有车间内新增双工位RH，更是困难重重。
- ④真空槽更易粘冷钢。因双槽交替作业，备用槽虽有预热装置保温，但还是有一定的温降，没有单工位单槽连续作业槽温高。
- ⑤真空漏点多。因抽气管道长和有真空切换装置，真空外泄漏的概率变大。

2 解决方案

2.1 单工位双钢包车RH的特点

①处理周期短

根据表3单工位双钢包车RH的处理周期和双工位一样长，较标准单工位有明显的优势。

②投资省

由表4得知，单工位双钢包车RH除了钢包车和喂丝和保温剂投入装置各多一套外，三电设备、土建设施和各种配管配线也略有增加，其它设备数量和标准单工位是一样

的。估计项目投资较单工位增加~15%。

③比较结果

单工位双钢包车RH有着和双工位RH一样的快速的生产节奏，较标准单工位RH有明显的优势。然而，投资只增加约15%。同时，还几乎避免了1.3节中提到的双工位RH的所有缺点。可谓是一种“性价比”极高的RH工艺布置方案。

表1

处理过程	时间 (min)	
	标准单工位	双工位
钢包车开至处理位	1	-
钢包顶升，测渣厚、取样、测温定氧	3	3
真空切换	-	1
打开真空主阀，调整真空度	3	3
脱碳、合金投入、脱气	15	15
测温定氧取样送样分析	2	2
成份调整	5	5
破真空	1	1
钢包下降到钢包车	1	1
钢包车开至喂丝位	0.5	-
离线位测温取样	2	-
喂丝搅拌	5	-
钢包车开至起吊位	0.5	-
等起重机（平均）	3	-
等连铸机（平均）	4.5	-
本炉钢包吊走	2.5	-
等下一炉钢包（平均）	4.5	-
钢包放到钢包车上	2.5	-
合计	56	31

表2

主要设备和设施	数量 (套)	
	标准单工位	双工位 (三车五位)
钢包车	1	2
浸渍管维修车	1	2
喂丝和保温剂投入装置	1	2
自动测温取样装置	1	2
在线真空槽台车	2	3
在线真空槽	2	3
在线热弯管	1	2
真空切换装置	-	1
气冷器前抽气主管	1	2
真空系统	1	同左
多功能顶枪	1	2
预热枪或预热盖	2	3
真空加料装置	1	2
合金投料系统	1	同左
顶升装置	1	2
液压系统	1	同左
维修区设备	1	同左
三电设备	1	~1.5
土建设施 (桩、深基坑、基础、钢结构等)	1	~1.5
各种配管配线	1	~1.5
大约合计投资	1	1.5~1.7



表3

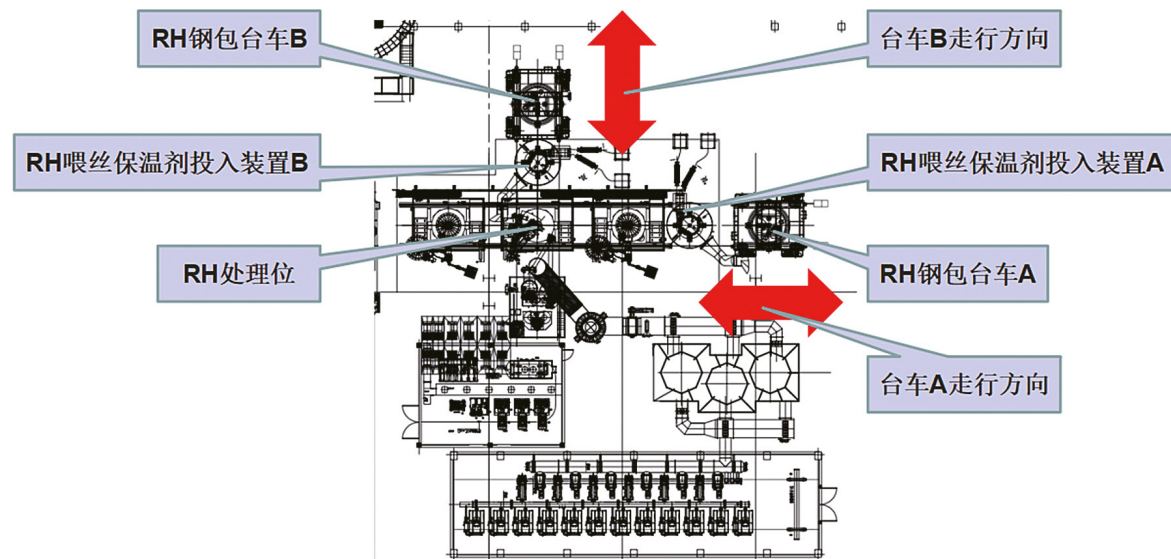
处理过程	时间 (min)		
	单工位双钢包车	标准单工位	双工位
钢包车开至处理位	0.5	1	-
钢包顶升, 测渣厚、取样、测温定氧	3	3	3
真空切换	-	-	1
打开真空主阀, 调整真空度	3	3	3
脱碳、合金投入、脱气	15	15	15
测温定氧取样送样分析	2	2	2
成份调整	5	5	5
破真空	1	1	1
钢包下降到钢包车	1	1	1
钢包车开至喂丝位	0.5	0.5	-
离线位测温取样	-	2	-
喂丝搅拌	-	5	-
钢包车开至起吊位	-	0.5	-
等起重机 (平均)	-	3	-
等连铸机 (平均)	-	4.5	-
本炉钢包吊走	-	2.5	-
等下一炉钢包 (平均)	-	4.5	-
钢包放到钢包车上	-	2.5	-
浸渍管清渣和喷补 (浸渍管后期)	(5)	-	-
合计	31 (36)	56	31

表4

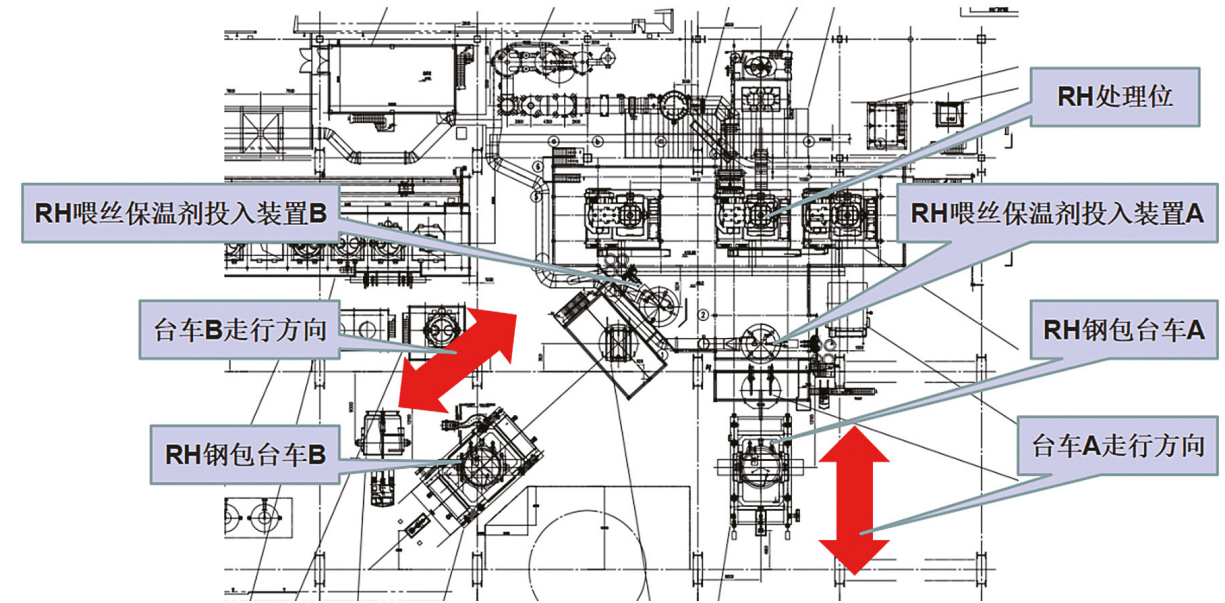
主要设备和设施	数量 (套)		
	单工位双钢包车	标准单工位	双工位 (三工位)
钢包车	2	1	2
浸渍管维修车	同右	1	2
喂丝和保温剂投入装置	2	1	2
自动测温取样装置	同右	1	2
在线真空槽台车	同右	2	3
在线热弯管	同右	1	2
真空切换装置	-	-	1
气冷器前抽气主管	同右	1	2
真空系统	同右	1	同左
多功能顶枪	同右	1	2
预热枪或预热盖	同右	2	3
真空加料装置	同右	1	2
合金投料系统	同右	1	同左
顶升装置	同右	1	2
液压系统	同右	1	同左
维修区设备	同右	1	同左
三电设备	1.1	1	~1.5
土建设施 (桩、深基坑、基础、钢结构等)	1.2	1	~1.5
各种配管配线	1.1	1	~1.5
大约合计投资	1.15	1	1.5~1.7

说明: 单工位双钢包车RH, 钢包车是从喂丝位开至处理位的。标准单工位RH, 钢包车是从起吊位开至处理位的。所以, 两者时间不一样。

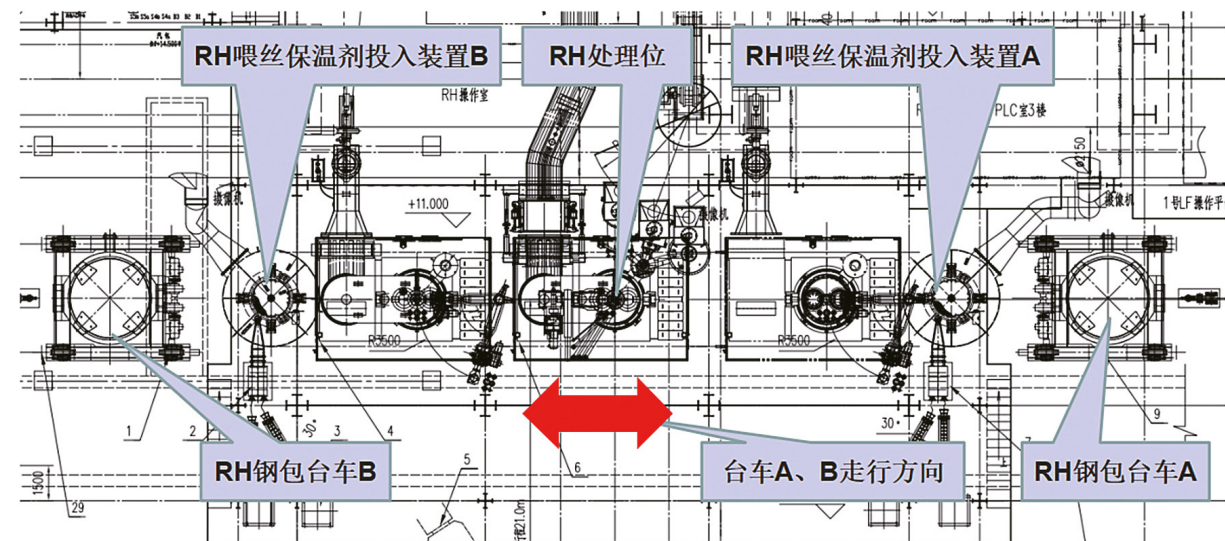
2.2 几种典型的单工位双钢包车RH的布置方案



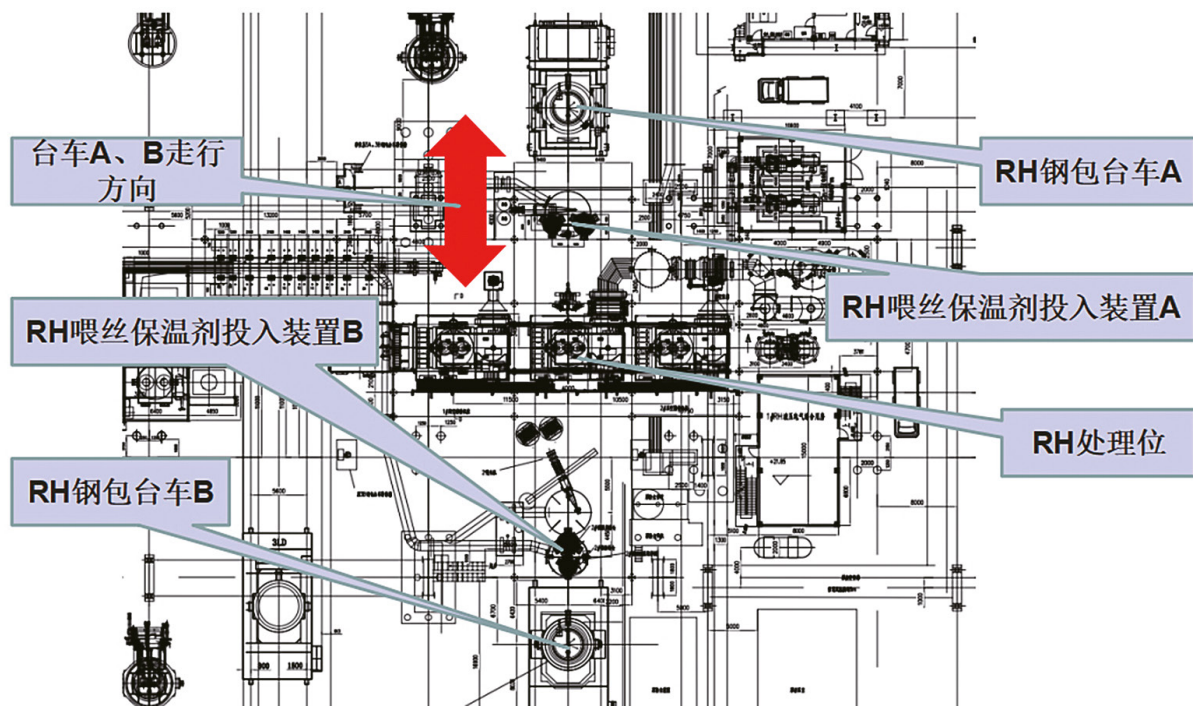
①垂直交叉轨 垂直交叉轨布置形式是两个钢包台车的轨道呈90°交叉, 在钢包起吊位和处理位之间各设置一套喂丝保温剂投入装置, 双车在钢包起吊位和处理位之间交替运输钢包, 此种形式适合布置在钢水接受跨。



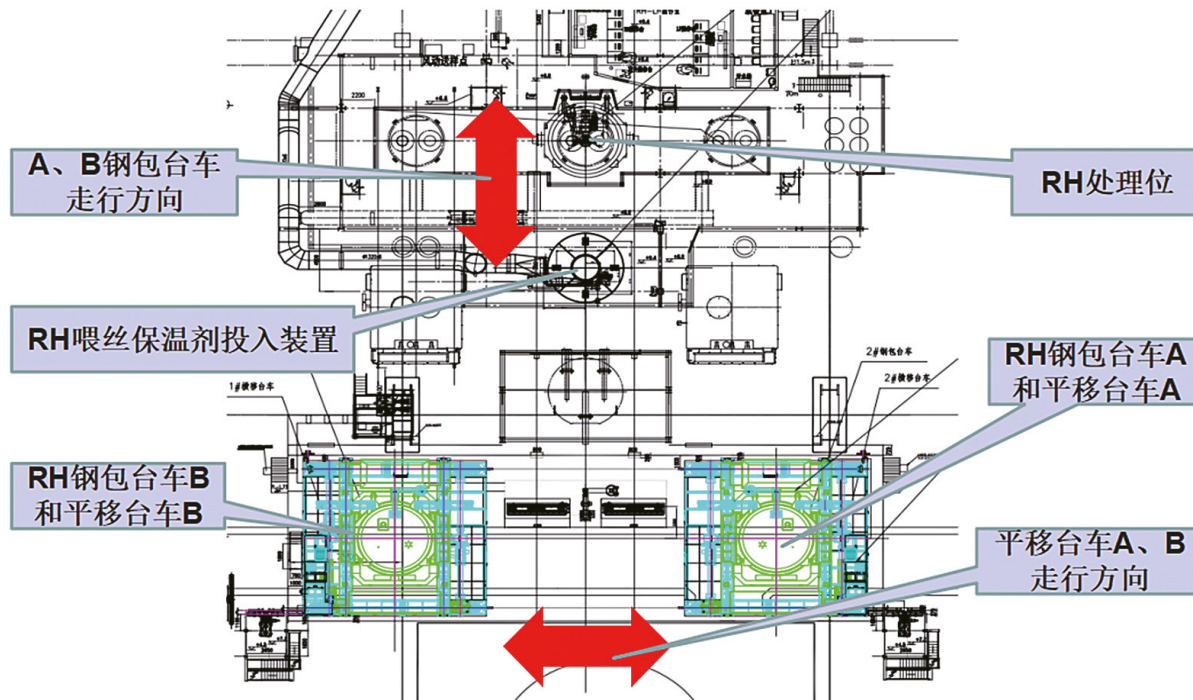
②45°交叉轨 45°交叉轨布置形式是两个钢包台车的轨道呈45°交叉, 在钢包起吊位和处理位之间各设置一套喂丝保温剂投入装置 (或钢包加盖装置), 双车在钢包起吊位和处理位之间交替运输钢包, 此种形式适用于精炼跨和钢水接受跨不同跨。



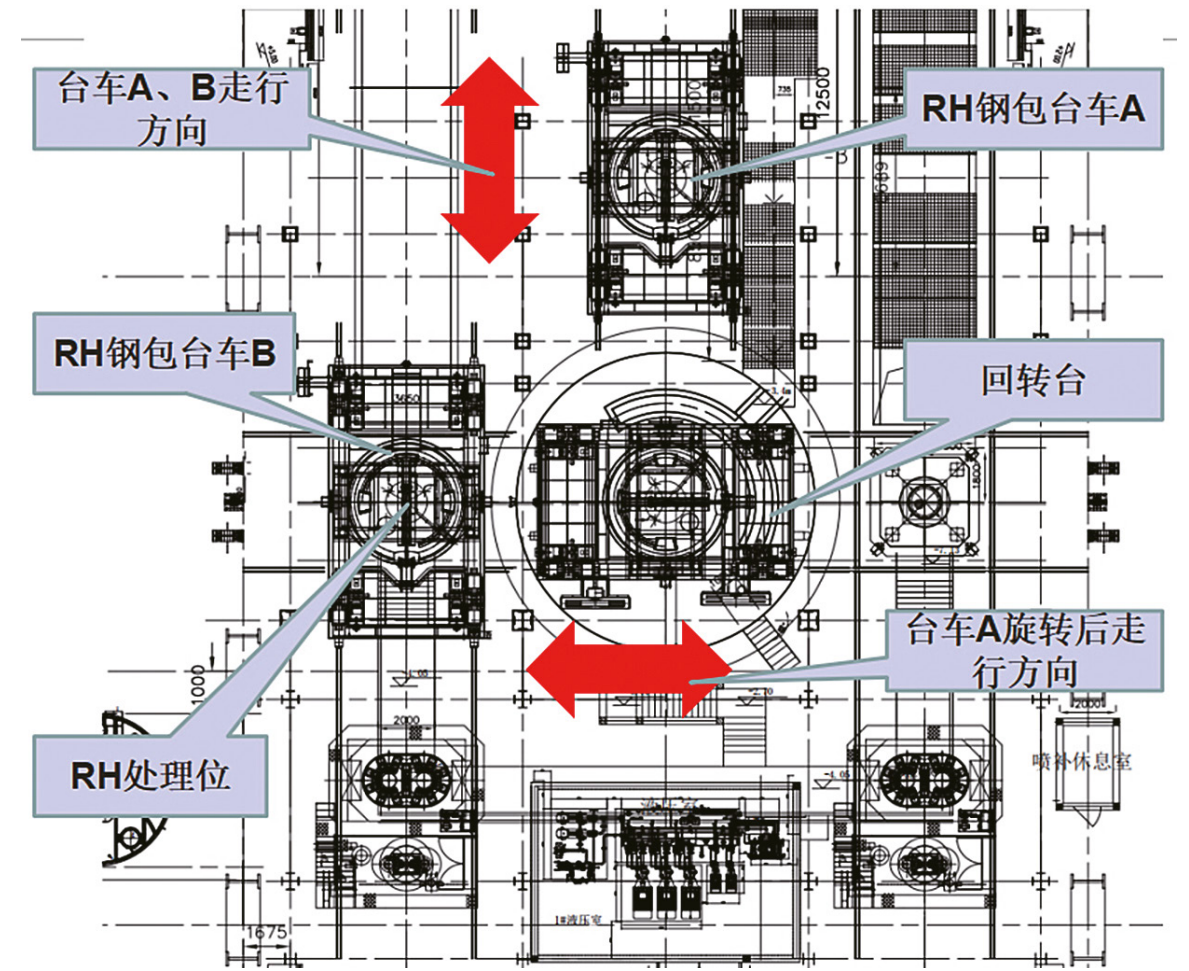
③横向一字轨 横向一字轨布置形式是两个钢包台车在横向同轨道上, 一个在左, 一个在右。在钢包起吊位和处理位之间各设置一套喂丝保温剂投入装置, 双车在钢包起吊位和处理位之间交替运输钢包, 此种形式适合布置在钢水接受跨。



④纵向一字轨 纵向一字轨布置形式是两个钢包台车在纵向同轨道上，一个在上，一个在下。在钢包起吊位和处理位之间各设置一套喂丝保温剂投入装置，双车在钢包起吊位和处理位之间交替运输钢包。此种形式适合两台连铸机在车间的不同方向，A车为A连铸机服务，B车为B连铸机服务；或者，RH轨道和转炉出钢轨道共轨，A车负责接转炉钢水，B车负责送连铸钢水，钢包采用提升形式。



⑤双平移台车 双平移台车布置形式是两个钢包台车分别在两台平移台车上，一个在左，一个在右，共用一条RH出钢线，平移台车布置在钢水接受跨。喂丝保温剂投入装置只有一套，两个钢包车在平移台车带动下交替对中RH出钢线，实现钢包起吊位和处理位之间的钢包运输。此种形式适用于精炼跨空间特别紧张的车间，由于共用一条出钢线，处理周期有所增加。



⑥旋转台车 这是垂直交叉轨布置形式的一种变体，由于RH处理位在精炼跨，A台车开出后需旋转90°，再开至钢水接受跨。

3 工程实绩

宝钢工程RH的业绩已达60套，各种形式的工艺布置方案都有实绩。然而，近期单工位双钢包车RH的工艺布置方案被频繁而又广泛的使用。主要的业主单位已有宝钢等五六家。

4 结语

单工位双钢包车RH的工艺布置方案近期被广泛的采用，是有其独特的优势。总结如下：

- ①处理周期和双工位一样短。满足快节奏的生产，做到炉机匹配，能很好地在上下道工序间起到缓冲作用。
- ②投资省。相对双工位大幅缩减投资，仅比标准单工位多约15%。
- ③设备运行成本低。
- ④设备维护成本低。
- ⑤占地面积小。能做到狭小空间的RH工艺布置。
- ⑥真空槽不易粘冷钢，因单槽连续作业槽温高。
- ⑦真空漏点少，易检漏。因抽气管道短，无真空切换装置，真空外泄漏的概率变小。

参考文献

[1]丁永铨 成功的个性化RH精炼工艺解决方案,宝钢洁净钢快速精炼技术 创刊号: 19

