

智能调度如何提升钢水运输效率？——钢包智能配包技术解析

Optimizing Liquid Steel Transport: Intelligent Ladle Dispatch System in Steelmaking

供稿|彭飞, 段富春, 张臣, 姜威 / PENG Fei, DUAN Fuchun, ZHANG Chen, JIANG Wei

内容导读

炼钢主要包含转炉炼钢、炉外精炼以及连铸3个工艺,其中钢包作为承载钢水的关键“容器”,其传递速度(周转效率)直接影响整个工厂的节能降耗和高效运行。传统钢包调度依赖人工经验,在设备众多(如7座转炉、11个精炼位、8台连铸机)、钢包使用量大(26~32个)的复杂生产环境下,容易出现信息滞后、匹配错误、效率低下等问题,导致钢水温度下降、能耗增加、生产延误。本文介绍的钢包智能配包技术通过实时采集炼钢各环节(从连铸结束、钢包清洁处理到转炉接钢)的设备状态、钢种要求、钢包位置等信息,利用智能算法自动规划最优的钢包调度路径。这套系统显著减少了人为干预和判断错误,有效缩短了钢包闲置时间,提高了钢包利用率和匹配准确性,从而最大限度地减少了钢水在运输过程中的热量损失。最终实现节能降耗、降低成本、提升钢水质量和生产效率的目标,对于超大规模、设备密集的钢铁企业尤为关键。

炼钢生产过程中,转炉与连铸之间通过钢包进行钢水运输,并完成炉外精炼任务,其中钢包的周转效率是衡量炼钢生产效能的主要指标之一。由于温度损失为温度损失速率与时间的乘积,最大限度缩短钢水在转炉与连铸之间的传递时间,可达到减少温度损失、降低成本的目的^[1]。钢包既是运输钢水的重要载体,又是炉外精炼的容器,合理的钢包周

转数量及有效的运行控制是实现炉机匹配的基础,对保持连铸机恒拉速浇铸、提高炼钢厂运行效率具有重要意义^[2]。李勤等^[3]对钢包周转运行的各个阶段进行分析,通过理论计算与实践生产相结合,制定合理的生产工艺路径及钢包周转制度;李公田^[4]、肖茂元等^[5]、黄帮福等^[6]、石鑫越等^[7]提出钢包周转效率提高会导致热损失降低的结论;杨明清等^[8]提出

作者单位:鞍钢集团本钢板材炼钢厂,辽宁 本溪 117021

配合应用行车定位技术和钢包管理系统,实现了钢水浇铸的温度稳定性及生产过程的提质增效;张启东等^[9]、刘炜^[10]在应用实践方面探究钢包智能管理技术,发现钢包智能管理系统能够提高转炉冶炼终点炉后钢水温度的命中率。本文从炼钢厂生产实践出发分析钢包包配中存在的问题,探究适合实际生产情况的钢包智能配包方案,以满足高效的生产需求,进而降低能耗。由于鞍钢集团本钢板材炼钢厂在同一厂房内的转炉数量、精炼处理工位数量、连铸机数量在国内外均为最高,导致实际生产组织难度极大,基于当前实际生产情况提出的智能配包方案,可以有效解决复杂生产条件下的配包问题,降低配包难度,且在业内普适性较强,具有较高的参考及实际应用价值。

目前,板材炼钢厂有7台转炉、11个精炼处理位、8台连铸机、8台倾翻机等主要工艺设备,设备数量多且布局较分散,钢包日常使用数量较多(通常为26~32个),复杂的工艺导致钢包很难实现高效周转。由于生产品种较多、铸机型式不一致、浇注周期存在差异等多重因素,新旧区转炉与铸机在生产匹配上存在交叉情况,同时考虑到设备定修等因素的影响,使得钢包使用面临技术要求高、操作难度大等问题。除此之外,钢包每次使用前需考虑与之相关的所有信息,包括耐材的寿命、前一炉铸机生产的钢种、成分以及是否脱硫、含磷等情况。炉次钢种成分对钢包的使用要求、天车的作业状态、倾翻机的处理状态等信息数据的掌握与传递,均需调度人员通过电话、对讲等方式与原料、钢包、天车、精炼、铸机等工序的工作人员沟通联系并确认信息,部分数据甚至需要耗时查询。该过程涉及信息量大,时间滞后性强,人为干扰因素多,人员素质和能力直接影响生产系统运行,且操作步骤繁琐,极易出现错误。钢包在使用过程中还涉及更换渣罐、钢包交修、废料排放、地坑清理、渣钩额头定位以及大车引流剂添加等相关工作,这些均需通过调度协调吊车执行,进一步增加钢包周转的难度。如果钢包无法高效周转,不仅会导致钢包区域的匹配工作滞后或出现钢包积压的问题,还会影响转炉和铸机的生产顺行,引发连锁反应,降低生产效率,同时会因钢包滞留增加生产成本。

钢包包配过程及存在问题

钢包包配过程

人工需根据经验确定钢包使用数量,先确认倾翻机处钢包是否完成处理并具备使用条件,再通过系统查询转炉吹炼是否需要钢包,然后查询钢包上次使用的钢种是否满足本炉次要要求,最后根据人工记录的耐材使用寿命,安排钢包坐入转炉钢包车。此流程中,配包准确率受岗位人员素质影响较大,班组操作差异性显著,时常出现因钢包因素影响生产的情况。钢包使用过程见图1。

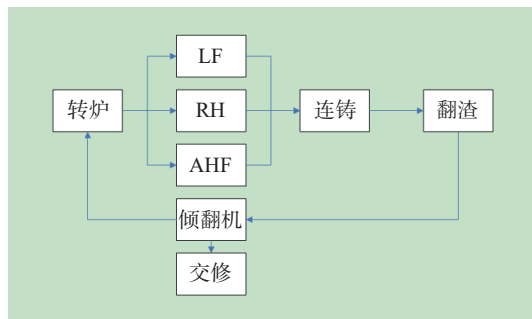


图1 钢包使用过程

存在的主要问题

由于存在8台连铸机(包括双流、单流),且薄板坯铸机需考虑钢水钙处理对滑板使用的影响,再加上浇钢周期不一致,导致钢包使用量波动较大。人员操作的差异性进一步加剧生产不均衡,此类影响生产的情况时常发生。钢种成分的差异性也会干扰生产,成分相差较大的钢包若混用,易导致成分不合,影响产品质量。生产信息传递主要通过广播、电话、对讲等方式,岗位人员劳动强度较大,易出现沟通不畅或理解错误影响生产的情况。

智能配包技术

优化钢包使用数量

为了优化钢包使用数量,提高钢包周转率,降本增效,通过制造执行系统(MES)和各工序二级系统收集当前炉次钢包所在位置及状态信息,结合钢种生产所需的配包原则,对数据进行综合处理,实现钢包的高效使用。通过合理标定各类生产数据,完善配包方法,形成初步配包方案,后续通过

实时的数据采集、动态更新数据和调整,持续优化配包方案,最终实现智能配包。智能配包技术能够降低劳动强度,实现岗位信息共享,消除各工序的信息不对称,直观、系统地显示钢包相关信息,为调度排布计划提供依据。

通过单浇次钢包周转数量计算模型^[11]初步计算所用的钢包周转数量,如式(1)所示:

$$n_{lad}^{CC} = \left\lceil 1 + \frac{t_{hea}^{lad} + t_{emp}^{lad}}{t_{cast}^{CC}} \right\rceil \quad (1)$$

式中: n_{lad}^{CC} 为满足单台连铸机单浇次浇铸所需周转的钢包数; $t_{cys}^{lad} = t_{hea}^{lad} + t_{emp}^{lad}$ 为实际钢包周转周期, min; t_{hea}^{lad} 为重钢包运行时间, min; t_{emp}^{lad} 为实际空包时间, min; t_{cast}^{CC} 为连铸机单炉浇钢时间, min。

若钢包周转时间为 190 min, 铸机浇钢时间为 35 min, 通过式(1)可计算出理论投入钢包数量为 6.4 个, 向上取整得到钢包使用数量为 7 个。通过连铸浇钢时间与钢包周转的最优数量匹配关系(见表 1, 其中标准空包时间为 90 min, 标准受钢时间为 100 min), 此时钢包实际周转周期变为 245 min, 实际空包时间比标准时间增加 20 min, 需进一步优化连铸浇钢时间。

表 1 连铸浇钢时间与钢包周转数量的关系

浇钢时间/min	理论投入钢包数/个	实际投入钢包数/个	实际钢包周转周期/min	实际空包时间/min	增加空包时间/min
35	6.4	7	245	110	20
36	6.3	7	252	116	26
37	6.1	7	259	122	32
38	6.0	6	228	90	0
39	5.9	6	234	95	5
40	5.8	6	240	100	10
41	5.6	6	246	105	15
42	5.5	6	252	110	20
43	5.4	6	258	115	25
44	5.3	6	264	120	30
45	5.2	6	270	125	35

为了进一步确定生产最优成本方案, 优化钢包数量, 需参考浇钢时间与实际空包时间(见图 2)。通过表 1 和图 2 可知, 连铸浇钢 38 min 为最优时间, 此时钢包匹配数量为 6 个, 钢包周转时间最佳且热周转效果最好。为了保证钢包周转数量最优,

应首先参考浇钢时间与实际空包时间关系, 使其与连铸浇钢时间合理匹配。

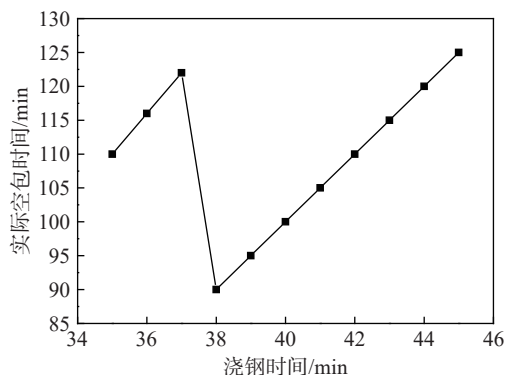


图 2 浇钢时间与实际空包时间

根据铸机生产周期进行同类合并分组, 再次优化钢包使用数量, 确定最终使用数量。生产中将铸机分为 4 大组, 分组情况如下。

第 1 组: 1#铸机、2#铸机, 常规双流板坯铸机;

第 2 组: 3#铸机、4#铸机, 薄板坯单流铸机;

第 3 组: 5#铸机, 矩形坯连铸机;

第 4 组: 6#铸机为双流宽板坯铸机, 7#铸机、8#铸机为单流宽板坯铸机。

当第 1~2 组中任意一台铸机未参与生产, 其余铸机将自动并入第 3 组; 当第 4 组中任意一台铸机未参与生产, 其他 3 组将自动组成新组合; 出现单机生产时, 将进入单机循环模式。此方案可以避免钢包在使用过程中因钢种频繁转换而不断更换滑板, 降低耐材成本, 缩短倾翻机处理周期, 有效减少生产中座罐交叉的次数, 从而提高钢包周转效率。

计算分组后钢包的最终使用数量, 确定出最优方案, 计算模型^[12]如式(2)所示:

$$\sum_{i=1}^n t_i^T = \sum_{i=1}^n t_i + \sum_{i=1}^n t_i' \quad (2)$$

$$\sum_{i=1}^n t_i = \sum_{k=1}^p t_k^{BOF} + \sum_{j=1}^m t_j^{LF} + \sum_{h=1}^w t_h^{RH} + \sum_{i=1}^n (t_i^{CC} + t_i^{RP}) \quad (3)$$

$$\sum_{i=1}^n t_i' = \sum_{k=1}^p \sum_{j=1}^m t_{kj} + \sum_{j=1}^m \sum_{h=1}^w t_{jh} + \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n t_{ji} + \sum_{h=1}^w \sum_{i=1}^n t_{hi} + \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^p t_{ik} \quad (4)$$

式中： t_i^T 为第 i 个连铸机的钢包周转周期，min； t_i 为第 i 个连铸机的钢包运行刚性时间，min； t'_i 为第 i 个连铸机的钢包运行柔性时间，min； t_k^{BOF} 为钢包在第 k 个转炉的出钢时间，min； t_j^{LF} 为钢包在第 j 个钢包精炼（LF）炉的精炼时间，min； t_h^{RH} 为钢包在第 h 个脱气循环精炼（RH）炉的精炼时间，min； t_i^{CC} 为钢包在第 i 个连铸机的浇注时间，min； t_i^{RP} 为第 i 个连铸机的钢包修水口时间，min； t_{kj} 为由第 k 个转炉到第 j 个 LF 炉的重包吊运时间，min；

t_{jh} 为由第 j 个 LF 炉到第 h 个 RH 炉的重包吊运时间，min； t_{ji} 为由第 j 个 LF 炉到第 i 个连铸机的重包吊运时间，min； t_{hi} 为由第 h 个 RH 炉到第 i 个连铸机的重包吊运时间，min； t_{ik} 为由第 i 个连铸机到第 k 个转炉的空包吊运时间，min。

1#和 2#铸机、3#和 4#铸机合并后钢包周转数量分别见图 3~4，可见合并分组后，通过优化生产数据，钢包的周转数量可以减少 1~2 个，从而提高钢包的周转效率。

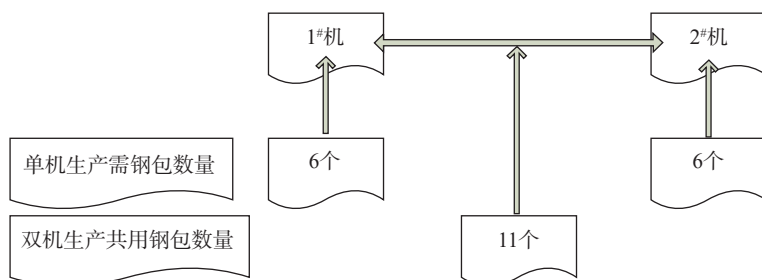


图 3 1#和 2#铸机合并后钢包周转数量

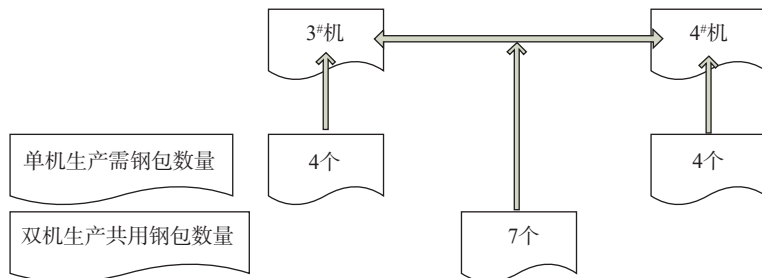


图 4 3#和 4#铸机合并后钢包周转数量

智能配包方案

从制造执行系统获取转炉生产计划和开始吹炼信号、铸机浇铸情况和结束信号、倾翻机开始和结束信号后，完成“钢包从铸机浇注结束→进倾翻机处理→炉前接钢”的自动配置，以最大限度缩短钢包下线时间，优化钢包周转，同时结合倾翻机、铸机等设备的实际状态及技术标准对钢包的要求配置钢包计划。钢包配包的核心主要包括以下 2 步：在下线钢包中筛选出符合钢种使用要求的钢包；对符合要求的钢包进行优化，选出该炉次的最佳使用钢包。

➤ 选出符合钢种使用要求的钢包

采集数据判断钢包优先进入倾翻机的顺序：若计划钢种有成分限制（如 GCr15、GCr15SiMn、低硅钢、低硫钢/硅钢等特殊钢种对前炉钢包的要求），系统将依据配置参数优先为该计划选配合适

的钢包；系统依次检查安排的倾翻机是否可用，若不可用则切换至下一台，若所有倾翻机均不可用，则延迟 10 min 后重新安排，直至排出计划；每间隔一段时间，根据现场实际生产情况不断优化配包方案；固化倾翻机处理时间，可根据生产实际随时调整；默认倾翻机连续处理钢包的间隔时间，应根据处理需求制定合理的间隔时间。

➤ 选出最佳使用钢包

系统通过采集、处理各工序的数据，结合配包原则和预设参数，自动生成转炉与钢包的最优匹配方案：当系统识别钢包进入倾翻机后，确定倾翻机的标号和罐号；采集上炉次钢包的生产数据和对应的生产区域，对数据进行整理运算；系统自动识别转炉计划信号，根据转炉吹炼时间、钢包浇注完成时刻以及钢水吊运时间，为最先开始吹炼的转炉动

态匹配最优钢包；调度确定系统推荐的钢包准确无误后点击确认，与各工序一键共享信息；若转炉已经开始吹炼，但还未配包，则优先为此炉配包；当转炉完成吹炼计划且已配包，但此钢包尚未处理完毕

时，系统将在对应区域内重新优选匹配合适的钢包。

图 5 为钢包智能配包的生产界面，相应的生产信息和钢种信息均能从此界面中查询，方便操作岗位及时安排工作，提高生产效率。

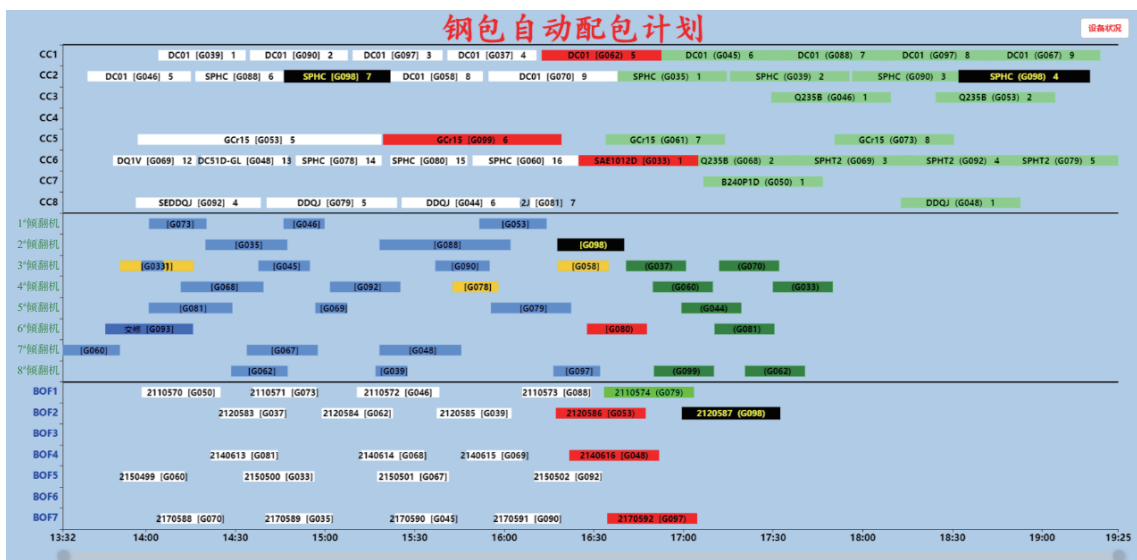


图 5 钢包智能配包计划显示界面

➤ 补罐或甩罐

补罐判定方法：系统根据当前参与生产的铸机及其数量计算出所需钢包数量，再结合当前在线使用数量计算出差量，最终获得补罐数量。以实际生产所需钢包数量为依据，当下达转炉计划后，倾翻机无合适钢包匹配时，系统以优选对应区域为原则，从离线烤包器中选出符合条件的钢包补入倾翻机。

甩罐判定方法：系统根据当前参与生产的铸机及其数量计算出所需钢包数量，再结合当前在线使用数量计算出差量，最终获得甩罐数量。以甩罐数量为依据，结合下线时间合理安排钢包下线并回

烤，确保钢包周转的良性循环，有效减少热损失，降低电耗。

数据对比分析

真空循环脱气精炼路径钢种生产

真空循环脱气精炼（RH）路径钢种生产过程数据对比见表 2，可见 RH 路径钢种钢包下线时间缩短 8 min，氩前温度提高 8℃，升温铝用量减少 19.7 kg，节约生产成本的同时减少了钢水中夹杂物的数量，提高了钢水质量。

表 2 RH 路径钢种生产过程数据对比

智能配包	炉数/个	钢包下线时间/min	钢包温度/℃	运输时间/min	氩前温度/℃	升温铝用量/kg
应用前	100	92	1637	28	1601	81.7
应用后		84	1640	25	1609	62

注：钢包温度为转炉出完钢后在氩站测量的温度值；氩前温度为钢包到 RH 工位后测量的温度值。

钢包精炼路径钢种生产

钢包精炼（LF）路径钢种生产过程数据对比见表 3，可见 LF 路径钢种钢包下线时间缩短 9 min，氩前温度提高 9℃，不仅节约了生产成本，缩短了

精炼时间，还提高了生产效率。

钢包周转效率

钢包周转效率数据见表 4，可见钢包周转率提高 0.6 个/d，不仅提升了钢包受钢前的温度，节约了

表3 LF路径钢种生产过程数据对比

智能配包	炉数/个	钢包下线时间/min	钢包温度/°C	运输时间/min	氩前温度/°C
应用前	100	98	1623	28	1581
应用后		89	1630	28	1590

注：钢包温度为转炉出完钢后在氩站测量的温度值；氩前温度为钢包到LF工位后测量的温度值。

生产成本，还提高了钢水质量。

表4 钢包周转效率数据

智能配包	炉数/个	钢包下线时间/min	钢包重罐时间/min	钢包周转率/(个/d)
应用前	100	108	120	6.3
应用后		89	120	6.9

结束语

(1) 钢包智能配包系统的应用，减少了钢包周转数量，解决了生产组织难度大的问题，提高了钢包周转率，延长了钢包使用寿命。

(2) 钢包在生产过程中的热损失减少，降低了钢水处理过程中的升温率和生产成本，提高了钢水质量。

(3) 配包系统应用画面直观便捷，数据查看简单明了，降低了岗位劳动强度。配包实现标准化，各工序信息共享，避免人为信息的传递错误，减少因调度人员素质能力问题对生产造成影响，从而提高了生产效率。

参考文献

[1] 姜成, 刘守杰, 冯振亮. 转炉钢包周转效率提升实践. 山西冶

金, 2023, 46(9): 137

- [2] 李永生, 胡显堂, 石树东, 等. 全板坯连铸钢厂钢包高效运行的研究与实践. 炼钢, 2020, 36(5): 63
- [3] 李勤, 王崇. 钢包高效化周转技术研究. 山西冶金, 2019, 42(3): 76
- [4] 李公田. 钢包跟踪与管理系统开发. 河北冶金, 2020(增刊 1): 103
- [5] 肖茂元, 王崇. 钢包周转的优化研究. 连铸, 2016, 41(4): 18
- [6] 黄帮福, 田乃媛, 施哲, 等. 钢包互用条件及影响因素. 重庆大学学报(自然科学版), 2017, 40(2): 52
- [7] 石鑫越, 杨荣光, 石树东. 排队论在炼钢-连铸区段钢包周转过程中的应用. 炼钢, 2021, 37(6): 59
- [8] 杨明清, 何腾, 金进文, 等. 行车定位技术和钢包管理系统的开发与应用. 宽厚板, 2022, 28(2): 46
- [9] 张启东, 钟凯, 贾培日, 等. 钢包智能管理技术在京唐公司的应用与实践. 连铸, 2021, 46(3): 59
- [10] 刘炜. 炼钢-精炼-连铸生产过程钢包智能调度方法及应用研究[学位论文]. 沈阳: 东北大学, 2018
- [11] 黄帮福, 马志伟, 麻德铭, 等. 炼钢厂钢包互用优化模型研究. 炼钢, 2016, 32(5): 48
- [12] 黄帮福, 田乃媛, 李广双, 等. 钢包管理系统的设计与实现. 冶金自动化, 2011, 35(1): 40

作者简介: 彭飞(1970—), 男, 辽宁省本溪人, 炼钢专业首席工程师, 1992年毕业于东北工学院钢铁冶金专业。主要研究方向: 炼钢。通信地址: 辽宁省本溪市平山区南兴路18号; E-mail: 1036785864@qq.com。