

# 板坯连铸机优化切割控制模型研究与实践

孙 丹<sup>1</sup>, 钱宏智<sup>1</sup>, 王胜东<sup>2</sup>, 赵 鹏<sup>1</sup>, 廖 慧<sup>1</sup>

(1. 北京首钢自动化信息技术有限公司自动化研究所, 北京 100041;  
2. 首钢京唐钢铁联合有限公司炼钢部, 河北 唐山 063200)

**摘要:**针对首钢京唐钢铁联合有限责任公司4号板坯连铸机的切割工艺流程特点,建立优化切割模型,根据浇注过程中不同的生产情况,对生产计划中的板坯进行切割长度优化或作为废坯进行标记处理。利用VC++开发优化切割模型控制程序,并应用于生产现场。实践表明,该模型适用于双流板坯铸坯机连铸过程全流程的多定尺范围的优化切割控制,起到了提高炼钢作业区钢水收得率的作用。

**关键词:**连铸机;板坯;优化切割;数学模型

**文献标志码:**B **文章编号:**1000-7059(2015)05-0041-05

## Research and application of length optimization model for slab caster

SUN Dan<sup>1</sup>, QIAN Hong-zhi<sup>1</sup>, WANG Sheng-dong<sup>2</sup>, ZHAO Peng<sup>1</sup>, LIAO Hui<sup>1</sup>

(1. Institute of Automation, Beijing Shougang Automation & Information Technology Co., Ltd., Beijing 100041, China;  
2. Steelmaking Department, Shougang Jingtang United Iron & Steel Co., Ltd., Tangshan 063200, China)

**Abstract:** According to the characteristics of the cutting process of No. 4 slab caster in Shougang Jingtang United Iron & Steel Co., Ltd., the length optimization model for the slab caster is established. According to the different production conditions of the casting process, the cutting length of the slab in the production plan is optimized or the slab is marked as deserted slab. The control programme of the length optimization model is developed by using VC++ language and is put into use. It is shown that the model can be used in the length optimization control for the process of double stands casting with different length plans and is useful for increasing the yield of liquid steel.

**Key words:** caster; slab; length optimization; mathematical model

## 0 引言

优化切割是现代连铸关键技术之一,对金属收得率与连铸生产综合成本有重要影响<sup>[1]</sup>。传统优化切割理论多关注单流单定尺、单流多定尺或多流单定尺切割等常规生产问题,对于当前经常出现的多流多定尺范围切割问题涉及较少<sup>[2-4]</sup>,有些研究只针对停浇阶段对未切割的尾坯进行算法优化<sup>[5]</sup>,形成控制模型系统参与现场

实施的例子更是少之又少。

基于此,笔者根据首钢京唐钢铁联合有限责任公司实际生产要求、连铸机铸坯生产工艺及有关参数,建立适用于双流板坯铸坯机连铸过程全流程的多定尺范围的优化切割模型。模型于2010年7月与主体设备同步投运,该模型的投运,提高了京唐公司板坯连铸生产的自动化水平和炼钢作业区的钢水收得率。

1 优化切割控制模型原理及实现流程

优化切割模型(后简称模型)的作用是监控板坯切割动作,并自动减少铸坯损失。优化准则是通过修改相关铸坯计划,利用可改变的坯长范围替换计划坯长,以生产“最适宜”长度和数量的铸坯。当结晶器内没有钢水的时候,优化切割模型计算铸流内板坯的总长度(结晶器到切割机的距离加上出切割机的板坯长度)。模型从对设定长度和可选长度的所有排列组合中选择切割后不能作为正常坯的材料损失长度最小的方案,如果多于一种方案的排列组合都得到材料损失最小的结果,则优先考虑具有如下特点的方案:(1)最大数量的标准板坯长度;(2)最小的板坯数量;(3)较长的板坯切割长度。

优化切割控制模型原理是:模型从过程跟踪数据库中的生产计划列表获取当前炉次的切割板坯信息(浇注的产品数量、计划坯长和可改变

的坯长范围),从冶金数据库中读出坯尾长度、热膨胀系数、熔化损失长度、取样长度等信息,其中,坯尾长度用于更换中间包和浇次停浇的切割优化计算。开浇后,模型开始循环判断是否是头坯、更换中间包、在线调宽、成分出格和浇次停浇情况,如果其中一种情况发生,则进入该生产情况的优化算法,即通过改变切割铸坯的数量和坯长来改变切割程序。随后,模型输出修改的铸流切割程序表,即后面坯料的要求切割长度和尾坯的计划切割长度清单,并将清单内容发送到一级系统。铸流切割程序表在过程控制系统的铸流切割界面上显示,最后由操作员决定是否采用模型下发的切割程序自动切割或按需要修改相应的板坯切割信息。当新的切割完成时,模型重新启动优化计算,如果该结果与上次优化结果不一致,则向操作员发送信息。

模型的实现流程如图 1 所示。

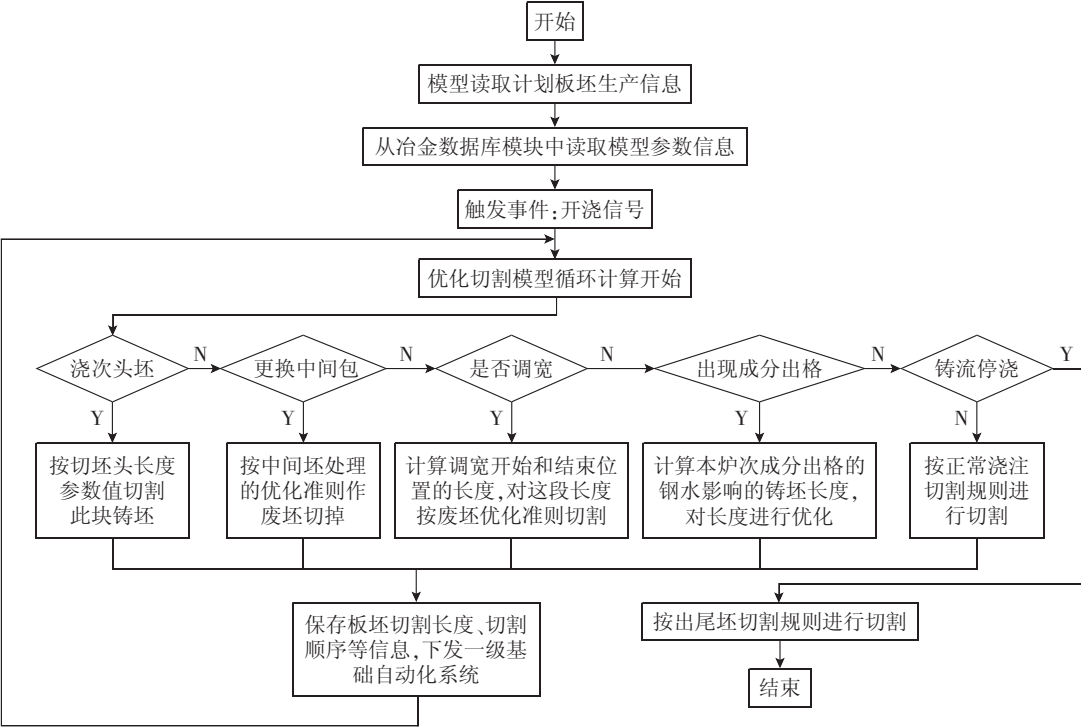


图 1 优化切割模型流程图

Fig. 1 Flow chart of length optimization model

2 针对不同情况的优化方法

如图 1 所示,优化切割模型针对生产工艺过程中的以下铸坯进行优化切割:坯头和坯尾及头

坯、成分出格(偏离目标成分)铸坯、快速更换中间包时的中间坯、在线调宽时的铸坯、最后一炉正常停浇时的铸坯。

2.1 对坯头和坯尾及头坯的优化

正常浇注时,坯头、坯尾一般会有不同程度的质量问题,需要根据不同的钢种设定一个浇次的坯头长度切割范围。坯头、坯尾长度可以根据生产钢种的要求进行修改。京唐原一级设定坯头长度 500 mm、坯尾长度 1 000 mm,但是实践证明,这样的设定影响了头坯(浇次的第 1 块正常坯)和最后一块尾坯的质量。通过在切割模型界面进行参数维护,将坯头长度改为 600 mm、坯尾长度改为 2 000 mm,有效降低了头坯和最后一块尾坯的废品率。

头坯与坯头的优化准则类似,其切割长度根据不同钢种进行优化。对于质量要求较高的钢种,例如汽车板品种,则将切割下来的头坯改判为低一级钢种的铸坯,并标记为下线待查铸坯。

2.2 对成分出格铸坯的优化

精炼出钢取样或者中间包取样检测到钢水成分不合格时,在连续浇注过程中会产生成分出格的铸坯。优化切割模型需要获得过程跟踪系统中中间包钢水混合计算模型输出的成分出格的钢水在铸坯长度上的开始点和结束点,开始点即此成分出格炉次与上一炉次钢水的混钢开始点,结束点即此成分出格炉次与下一炉次钢水的混钢结束点。优化切割模型对成分出格的铸坯,只判断其归属炉次,不优化定尺,混钢开始点和结束点之间的铸坯以及开始点和结束点所在铸坯都归属于成分出格炉次,被标记为废坯。废坯由工艺人员确定为改判坯进行后续处理。

2.3 对快速更换中间包时中间坯的优化

快速更换中间包时的中间坯包括更换前一炉的尾坯和更换后一炉的头坯。优化切割逻辑是:优化切割模型在读取到一级控制系统发来的快速更换中间包信号时(如图 2 所示),计算前一炉尾坯与后一炉头坯的接缝点到出切割机的未切割铸坯头部之间的距离  $L_z = L_{mc} + L_{em}$  ( $L_{mc}$  为弯月面到切割机起始点距离,  $L_{em}$  为出切割机的未切割铸坯长度)。对接缝点所在的中间坯按目标长度  $L_{aim}$  加 0.5 m 的长度进行切割,使得接缝

点位于距中间坯坯尾 0.5 m 左右的位置,即中间坯优化后的长度为  $L_{zjp} = L_{aim} + 0.5$ 。对接缝点所在的中间坯之前的未切割铸坯(长度  $L_{az}$ )按优化准则进行优化切割,得到快速更换中间包之前的板坯优化切割长度和块数信息。将接缝点所在中间坯标记为“换包铸坯”,此块铸坯下线后切去“坯尾长度 + 0.5 m”,仍然能作为正常坯进入后续热轧环节。采取优化切割控制,中间坯通过切除“坯尾长度 + 0.5 m”长度的废坯后,仍能成为一块正常坯,不但最大限度地保证了正常坯的长度,而且减小了废坯的长度和数量。

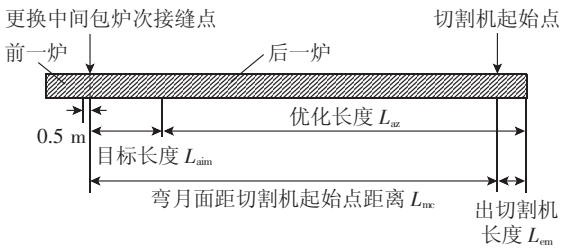


图 2 快速更换中间包板坯切割示意图

Fig. 2 Slab cutting diagram of fly tundish process

2.4 对在线调宽时铸坯的优化

在线调宽铸坯切割示意图见图 3。为了减小结晶器在线调宽过程导致的废坯长度和数量,提高钢水收得率,对在线调宽时产生的铸坯优化切割逻辑是:优化切割模型获取结晶器在线调宽铸坯的开始位置和结束位置,对调宽起始点之前的铸坯(长度  $L_{aw}$ )进行优化切割,同时,尽量把调宽开始点和调宽结束点之间的铸坯优化在一块目标长度  $L_{aim}$  的铸坯中。对于在线调宽之前的铸坯,不改变切割计划和长度;对于在线调宽期间产生的铸坯,标记为“调宽铸坯”,然后作为废坯切割。

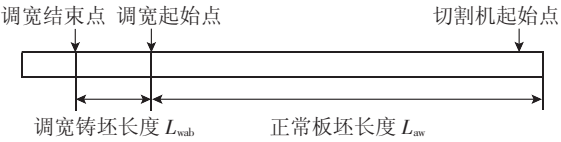


图 3 在线调宽铸坯切割示意图

Fig. 3 Slab cutting diagram of width adjustment process

若调宽范围在 0 ~ 150 mm 之内,根据调宽速率,可算出开始点与结束点之间的长度  $L_{wab}$ ,且

根据  $L_{aim}$  的范围,有  $L_{wab} < L_{aim}$ ,则把开始点和结束点之间的铸坯切到一块正常坯内;若调宽范围超过 150 mm,则把开始点和结束点之间的铸坯分别切在两块正常长度铸坯中。

## 2.5 对最后一炉正常停浇注坯的优化

对于最后一炉正常停浇的情况,最优的算法是在正常出尾坯的过程中先停止铸流中的其中一流,保证先停止浇注的这一铸流的铸坯长度正好能被分成  $N$  块目标长度,中间包中剩下的钢水流入另外一流,此时对剩下的钢水能浇注的长度加上另一铸流中未切割的铸坯长度进行长度优化。优化逻辑是:以最后一炉大包关闭信号为优化计算触发信号,对后停浇的另一流剩余铸坯长度在最大、最小铸坯长度范围内进行优化。优化算法步骤如下。

(1) 浇次最后一炉大包浇注停止后,计算当前中间包中能进行浇注的钢水质量  $m_l$ 。

$$m_l = m_{tot} - m_{rem}$$

式中:  $m_{tot}$  为当前中间包的钢水质量;  $m_{rem}$  为结束浇注时设定中包剩余钢水质量。

(2) 计算两个铸流当前拉速下的钢水分别折算到两个铸流中的长度  $L_{w1}$ 、 $L_{w2}$ 。

$$L_{w1} = [m_l / (\rho W_1 T_1)] V_1 / (V_1 + V_2)$$

$$L_{w2} = [m_l / (\rho W_2 T_2)] V_2 / (V_1 + V_2)$$

式中:  $\rho$  为钢水的密度;  $W_1$ 、 $W_2$  为铸流 1、2 的结晶器下口宽度;  $T_1$ 、 $T_2$  为铸流 1、2 的结晶器下口厚度;  $V_1$ 、 $V_2$  为铸流 1、2 的实时拉速。

(3) 从一级得到当前每个铸流中未切割的铸坯长度  $L_{a1}$ 、 $L_{a2}$ ,算出每流能进行优化的总长度  $L_1$ 、 $L_2$ 。

$$L_1 = L_{w1} + L_{a1}$$

$$L_2 = L_{w2} + L_{a2}$$

(4) 将  $L_1$ 、 $L_2$  分别代入式(1)、式(2),考虑每个铸流是否有取样要求,分别算出切除目标长度铸坯后每流的剩余长度  $L_{e1}$ 、 $L_{e2}$  (保证  $L_{e1}$  和  $L_{e2}$  小于  $L_{aim}$ ) 以及相对应的切割块数  $N_1$ 、 $N_2$ 。

$$L_{e1} = L_1 - \sum_{i=1}^{N_1} (L_{aim} + k_1 L_S + L_{Melt}) - L_{Tail} \quad (1)$$

$$L_{e2} = L_2 - \sum_{i=1}^{N_2} (L_{aim} + k_2 L_S + L_{Melt}) - L_{Tail} \quad (2)$$

上述式中:  $k_1$ 、 $k_2$  分别为铸流 1、2 的取样数量;  $L_S$  为取样长度;  $L_{Melt}$  为切割熔化损失长度;  $L_{Tail}$  为坯尾长度。

(5) 比较  $L_{e1}$  与  $L_{e2}$ ,若  $L_{e1} \leq L_{e2}$ ,则先关 1 流的中包塞棒;若  $L_{e1} > L_{e2}$ ,则先关 2 流的中包塞棒。

(6) 计算铸流关闭的最佳质量  $m_c$ 。

$$m_c = L_{e1} \rho W_1 T_1 + L_{e2} \rho W_2 T_2 + m_{rem}$$

当中间包的可浇注质量  $m_l > m_c$  时,每 1 s 循环周期重复第 1~5 步的运算,直到  $m_l = m_c$ ,二级系统的画面弹出对话框提醒操作工停浇 1 流(或 2 流),操作工点击确认后,1 流(或 2 流)按目标长度切割。

(7) 未停浇的铸流长度按现有铸流停浇的算法进行优化。

## 3 优化切割模型应用效果

利用 VC++ 计算机语言对模型算法和与其他设备的通信进行编程实现,同时开发了模型的人机交互界面,便于现场工艺技术人员查看模型的输出结果、修改模型的工艺参数和选择控制的工艺过程。优化切割模型画面上提供优化类型的选择框,包括:对坯头和坯尾及头坯的优化、对成分出格铸坯的优化、对快速更换中间包时中间坯的优化、对在线调宽时铸坯的优化、对最后一炉正常停浇注坯的优化。操作工勾选优化类型后,优化切割模型针对勾选的类型进行优化计算;操作工通过编辑坯头、坯尾长度等信息,改变优化输入参数。修改完的优化信息通过“设定”和“保存”按钮进行确定。

下面以在模型上线调试初期,2010 年 8 月 25 日京唐 4 号机 7 流和 8 流正常停浇尾坯优化情况为例说明优化效果。正常停浇后,优化切割模型分别输出 7 流和 8 流中剩余铸坯的优化长度和切割块数信息,由于 8 流先停浇,8 流的铸坯长度能被分成  $N$  块目标长度,因此表 1 只列出 7 流停浇尾坯优化结果。由表 1 可见,如果采用优



化切割模型,则最后一块铸坯(铸坯号为 102A032654571)能增加 1 855 mm 的质量良好铸坯长度,从而提高钢水收得率。但是实际切割时,由于操作工未使用模型进行优化,因此造成了每个浇次停浇后由于尾坯长度过长导致的废坯的产生。

表 1 7 流优化切割模型与实际切割结果对比  
Table 1 Length optimization model and actual cutting result of stand 7

铸坯号	模型优化结果/mm	实际切割/mm
102A032654511	10 605	10 605
102A032654521	10 605	10 605
102A032654531	10 605	10 605
102A032654541	10 605	10 605
102A032654551	10 605	10 605
102A032654561	10 606	10 605
102A032654571	10 238	8 383
102A032654491(尾坯)	2 000	3 000~4 000

4 结束语

板坯连铸切割模型经过 1 年的设计和开发,于 2010 年 7 月与主体设备同步投运,经过 2 个

月的在线调试,各项指标都达到了设计要求。该模型适用于双流板坯铸坯机连铸过程全流程的多定尺范围的优化切割控制。该模型的投运,提高了炼钢作业区钢水收得率,有效降低了板坯库存,提高了热装热送比,缩短了产品交货周期,提高了京唐公司板坯连铸生产的自动化水平。

参考文献:

[1]郑沛然.连续铸钢工艺及设备[M].北京:冶金工业出版社,1991.

[2]张冬梅,董继霞,田宏.连铸切割的计算机控制及优化[J].包钢科技,2001,27(3):56-58.

[3]孙立根,张家泉.大方坯连铸优化切割模型的研究[J].连铸,2008,33(3):5-8.

[4]王兴后,周晓敏,刘乐.连铸板坯切割长度优化系统的研究[J].机械工程与自动化,2005(5):4-6.

[5]庞维成,陈松林.连铸自动化过程中尾坯优化切割模块设计[J].铸造设备研究,2005,24(2):14-16.

[编辑:薛 朵]

(上接第 40 页)

制;根据钢铁企业电网特点和经济运行要求,结合两部制电价中的需量电费和功率因数调整电费的约束,计算各子控制系统的控制目标值,根据制定的协调控制策略实现对调节设备的自动控制。该系统在某钢铁企业 2014 年投入运行后,实现了企业关口有功功率平衡、提升了地区电网电压质量、降低了企业需量电费和功率因数调整电费,为企业降低供电成本、提高能源利用效率提供了有力的技术支撑。

参考文献:

[1]李斌,郝飞.基于负荷预测平台的未来方式预测研究[J].新疆有色金属,2014(4):88-91.

[编辑:沈黎颖]

[2]郝飞,高权,姜彬.钢铁企业智能电力调度集成系统研究及应用[J].冶金自动化,2013,37(4):33-39.

[3]王金祥,沈军.基于成本分析的自发电负荷优化方法研究与应用[J].冶金动力,2012,152(4):1-4.

[4]郝飞,李伟,顾全.电网未来方式预测与分析研究[C]//中国电机工程学会 2011 年年会论文集.贵阳:中国电机工程学会,2011:141-142.

[5]郝飞,黄凯,仇孝国,等.电力需量控制系统的研究及应用[J].冶金自动化,2014,38(5):44-48.

[6]郝飞,黄凯,刘吉臻,等.电厂侧自动电压控制系统研究及应用[J].现代电力,2009,26(6):62-65.

[7]王治国,刘吉臻,谭文,等.基于快速性与经济性多目标优化的火电厂厂级负荷分配研究[J].中国电机工程学报,2006,26(19):87-92.

本刊启事

本刊已加入中国知网“中国学术期刊(光盘版)”数据库。如作者不同意将文章纳入上述数据库,请转投其他期刊。本刊开通微信查稿和网站在线查稿系统,微信查询,请登录微信公众号 yjzdh1976,点击右下角“文章查询”-“作者在线查稿”查询;网站查询请登录本刊网站 <http://www.yjzdh.com> 查询。登录后均可查询到稿件审查及处理情况。