

# Optimization of Converter Cooling Technology Based on Cost Control

Min Yang

China Baowu Steel Group Corporation Limited, Shanghai  
Email: yangmin@baowugroup.com

Received: May 17<sup>th</sup>, 2017; accepted: Jun. 16<sup>th</sup>, 2017; published: Jun. 19<sup>th</sup>, 2017

---

## Abstract

A cost calculation model of converter raw materials was established based on converter material balance and heat balance, and the effect of the cooling agents on the cost of raw materials was investigated. The results showed that it is beneficial to reduce the cost of raw materials through reducing scrap ratio, increasing ore ratio and limestone ratio, and the substitution of scrap with ore is more remarkable for cost reducing. Considering the cooling effect and the stability during blowing synthetically, the optimization principle of converter cooling was established, and it is that reducing scrap ratio firstly, then using ore and limestone to balance converter heat in sequence, and the inferior limit of the scrap ratio and the superior limit of the ore ratio were set. The results of industrial experiments and the cost accounting showed that the blowing process was stable, and the steel temperature of the blowing endpoint can be controlled accurately, and the chemical compositions of steel and slag of the blowing endpoint were stable. Furthermore, the dephosphorization effect was improved, and the raw materials cost of converter was reduced significantly.

## Keywords

Converter, Cost Control, Cooling Technology, Optimization Design

---

# 基于成本控制的转炉冷却工艺优化

杨敏

中国宝武钢铁集团有限公司, 上海  
Email: yangmin@baowugroup.com

收稿日期: 2017年5月17日; 录用日期: 2017年6月16日; 发布日期: 2017年6月19日

---

## 摘要

以物料平衡和热平衡为基础建立了转炉原料成本计算模型, 并考察了冷却剂结构变化对转炉物料平衡和

原料成本的影响作用规律。结果表明,降低废钢比、提高矿石比和石灰石比均可有效降低转炉原料成本,且矿石替代废钢的降本效果更为显著。综合考虑转炉冷却效果和吹炼过程的稳定性,确定了“先降低废钢比,依次用矿石和石灰石平衡转炉热量”的冷却工艺优化设计原则,并设定了废钢比下限和矿石比上限。工业试验和原料成本核算表明,冷却工艺优化后,转炉吹炼过程平稳,冶炼终点钢水温度和成分及终渣成分控制准确、稳定,且脱磷效果有所改善,转炉原料成本显著降低。

## 关键词

转炉, 成本控制, 冷却工艺, 优化设计

Copyright © 2017 by author and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

钢铁生产工艺技术与流程优化是实现降本增效的重要方向之一。对于转炉炼钢工序,其原料成本占炼钢总成本的70%以上[1],且中国90%以上为转炉钢[2],降低转炉工序原料成本对于提高企业经济效益具有重要意义。

为平衡转炉炼钢过程的能量富余,需要加入冷却剂来实现转炉终点的准确控制。目前,废钢是转炉炼钢中使用的主要冷却剂,此外,在转炉炼钢过程中加入铁矿石,由于其被还原可起到额外的冷却效应[3][4][5][6],以部分石灰石代替石灰,由于其分解吸热也可起到额外的冷却效应[7][8][9][10]。比较而言,废钢的价格通常远高于铁矿石和石灰石的价格,石灰的价格也显著高于石灰石的价格,在保证冶炼效果的前提下,通过优化冷却剂结构进而降低炼钢原料成本是可行的。在实际生产中,不同企业根据实际情况加入一种或者多种冷却剂,但冷却剂结构对成本的影响作用规律并不明晰。

本研究首先建立了转炉原料成本计算模型,考察了冷却剂结构变化对转炉原料成本的影响作用规律。在此基础上,以成本控制为目标,优化设计了转炉冷却工艺制度,并依托国内某钢铁厂转炉炼钢工艺和原料条件,通过工业试验考察了优化冷却工艺的转炉冶炼效果和成本控制效果。

## 2. 转炉原料成本影响因素分析

### 2.1. 转炉原料成本计算模型

转炉炼钢过程是质量和能量守恒的过程,转炉原料结构的变化必然引起转炉物料平衡和热平衡的改变。对于特定钢厂、特定钢种的转炉冶炼来说,有着特定的转炉出钢成分和温度要求,以满足精炼和连铸的要求。也就是说,转炉原料结构的调整必须满足转炉出钢成分和温度的要求。本模型首先通过转炉物料平衡和热平衡计算,获得包括冷却剂在内的各种冶炼原料的种类及其加入量,再根据各原料价格,计算原料成本。转炉物料平衡和热平衡即是转炉原料加入量的计算方法,同时也是转炉原料结构调整的限制条件。

在模型中,以废钢比(废钢加入量与铁水兑入量的比值)、矿石比(铁矿石加入量与铁水兑入量的比值)和石灰石比(石灰石分解的CaO量与造渣所需全部CaO量的比值)作为变量来考察废钢、矿石和石灰石加入量对转炉原料成本的影响。在物料平衡和热平衡计算中,作了如下假设:加入矿石中的铁氧化物全部

还原进入钢水，脉石全部进入渣中；加入的石灰石完全分解，CaO 和脉石全部进入渣中，分解生成的 CO<sub>2</sub> 按炉气中 CO<sub>2</sub> 与 CO 比例进入炉气。

## 2.2. 冷却剂对转炉原料成本的影响

计算以国内某钢铁厂批量生产的 Q235B 为目标钢种，计算所需基础数据均以该钢铁厂实际原料成分和价格为准，其中铁水、废钢和终点钢水化学成分平均值如表 1 所示，转炉终渣成分平均值如表 2 所示，原料价格如表 3 所示。另外，渣中含铁量、喷溅铁损、烟尘量等设为定值。

### 1) 废钢比对原料成本的影响

图 1 为铁水温度为 1350℃、不加入石灰石条件下，废钢比对吨钢原料质量和成本的影响。从图 1(a) 中可以看出，随着废钢比的升高，吨钢所需铁水质量显著降低，导致碳和硅的吨钢入炉量降低，进而使得吨钢需氧量降低；随着入炉废钢比的升高，由废钢所平衡的转炉富余热量逐渐增多，需要矿石平衡的转炉热量逐渐减少，所需矿石质量随废钢比升高而减少。同时，在保证终渣碱度不变的条件下，随吨钢入炉硅量和矿石带入脉石量的降低，造渣所需石灰量相应降低。从图 1(b) 中可以看出，废钢比由 3% 升高到 15%，铁水量、石灰量、矿石量和耗氧量减少可分别降低吨钢原料成本 245.64 元、2.80 元、35.26 元和 0.88 元，而废钢量增加可增加吨钢原料成本 316.34 元。综合来看，废钢比每升高 1% 吨钢原料成本升高 2.64 元。

### 2) 矿石加入比例对原料成本的影响

图 2 为铁水温度为 1350℃、不加入石灰石条件下矿石加入比例对吨钢原料质量和成本的影响。从图 2(a) 中可以看出，随着矿石比的升高，矿石所平衡的热量逐渐增多，吨钢所需废钢质量显著减少，而吨钢所需铁水质量显著增多；吨钢入炉铁水质量的升高，导致碳和硅的吨钢入炉量升高，进而导致吨钢耗氧量逐渐升高；另外，在保证终渣碱度不变的条件下，随着吨钢入炉硅量和矿石带入脉石量的增加，导致吨钢所需石灰量相应增加。

从图 2(b) 中可以看出，矿石比由 0% 升高至 2.8%，废钢量的减少可降低吨钢原料成本 516.86 元，而铁水量、石灰量、矿石量和耗氧量的增加可分别增加吨钢原料成本 433.8 元、4.39 元、38.13 元和 5.81 元。

**Table 1.** Compositions of hot metal, scrap and liquid steel at blowing endpoint (mass, %)

**表 1.** 铁水、废钢和终点钢水成分(质量百分数, %)

	C	Si	Mn	P	S
铁水	4.58	0.45	0.20	0.065	0.027
废钢	0.18	0.20	0.42	0.022	0.024
终点钢水	0.08	0.00	0.09	0.013	0.016

**Table 2.** Slag compositions at blowing endpoint (mass, %)

**表 2.** 转炉终渣成分(质量百分数, %)

项目	CaO	MgO	SiO <sub>2</sub>	FeO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
平均值	44.7	10.1	13.8	12.5	3.0

**Table 3.** Price of main raw materials (yuan/t)

**表 3.** 主要原料价格(元/吨)

	铁水	废钢	白云石	石灰	石灰石	矿石	氧气	炉衬
价格	2400	2580	100	264	55	1253	850	240

综合来看，矿石比每升高 1% 可降低吨钢原料成本 11.71 元。

### 3) 石灰石加入比例对原料成本的影响

图 3 为铁水温度为 1350℃、不加入矿石条件下，石灰石加入比例对吨钢原料质量和成本的影响。从图 3(a) 中可以看出，与加入矿石相类似，随着石灰石加入比例的升高，吨钢所需废钢质量显著减少，而吨钢所需铁水质量显著增多，吨钢耗氧量逐渐升高；另外，在保证终渣碱度不变的条件下，吨钢所需石灰量相应降低。从图 3(b) 中可以看出，废钢量和石灰量的减少可分别降低吨钢原料成本 387.14 元和 9.54 元，铁水量、石灰石量和氧气量增加可分别增加吨钢原料成本 368.50 元、5.07 元和 10.67 元。综合来看，石灰石加入比例每升高 1% 可降低吨钢原料成本 0.15 元。

## 3. 转炉冷却工艺优化设计与冶炼效果

### 3.1. 冷却工艺优化设计

由上述分析可知，降低废钢比、提高矿石和石灰石加入比例均有利于转炉原料成本的降低，也就是说，以矿石和石灰石代替废钢作为冷却剂，均可在一定程度上降低转炉的原料成本，且矿石的降本效果更为显著。为保证转炉吹炼过程的稳定，防止矿石加入量过多而引起的溢渣、喷溅和除尘效果差等现象

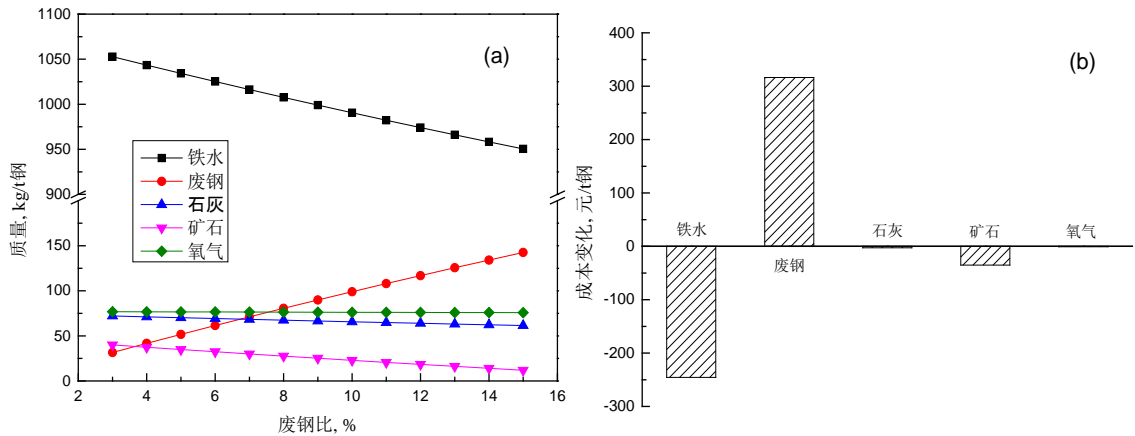


Figure 1. Variation of mass and cost of main raw materials with scrap ratio

图 1. 主要物料质量和成本随废钢加入比例的变化

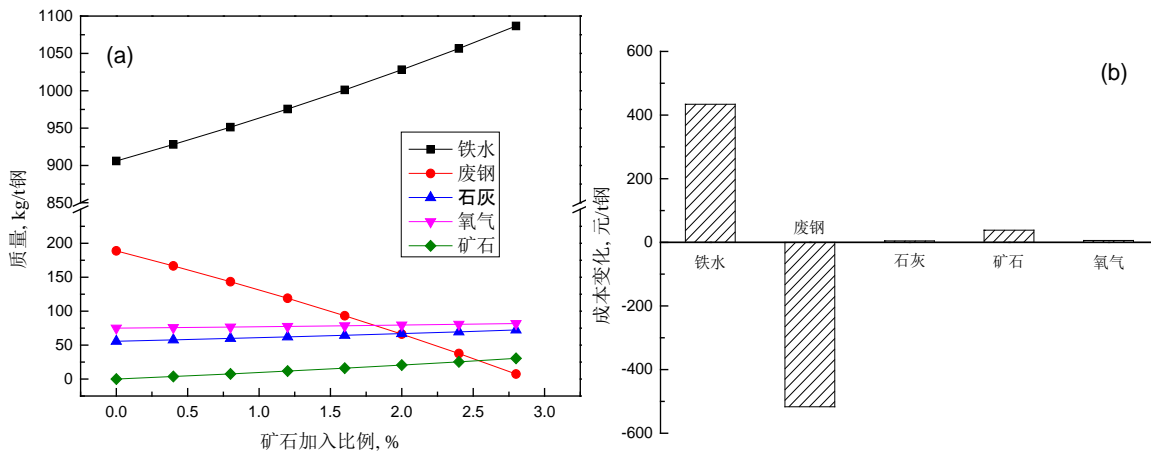


Figure 2. Variation of mass and cost of main raw materials with ore ratio

图 2. 主要原料质量和成本随矿石加入比例的变化

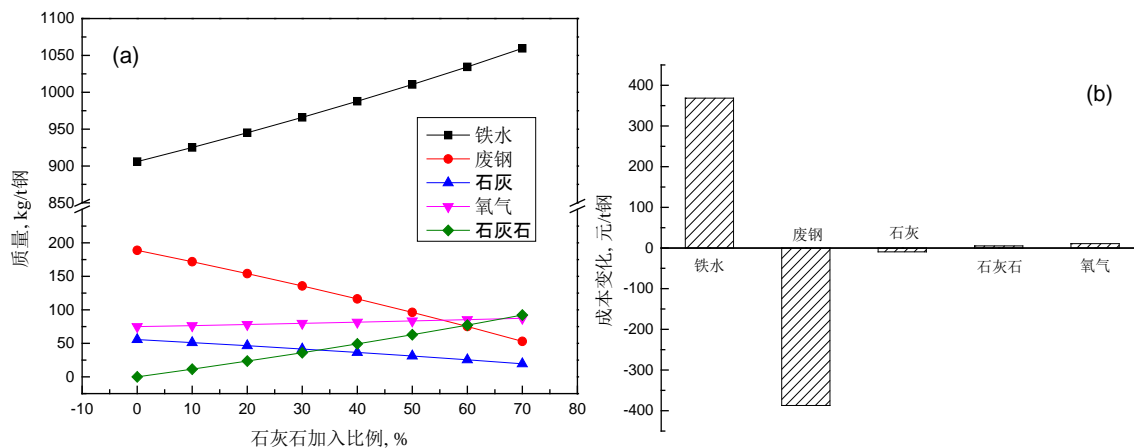


Figure 3. Variation of mass and cost of main raw materials with limestone ratio  
图 3. 主要物料质量和成本随石灰石加入比例的变化

的发生, 必须合理控制废钢和矿石的加入比例, 既需要确定合适的废钢比下限和矿石比上限。据此, 可确定基于成本控制的转炉冷却工艺优化方向, 即首先降低废钢比, 然后优先以矿石来平衡剩余热量, 如果超过矿石比上限, 则采用石灰石来平衡剩余热量。参考国内钢铁厂矿石加入比例[11][12], 矿石比上限设为 1.5%。废钢比下限需根据钢铁厂铁水条件和冶炼钢种确定。

根据以上转炉冷却工艺优化原则, 在转炉成本计算模型的基础上, 进一步开发了基于成本控制的转炉物料平衡计算软件, 该软件采用 Visual Basic 语言编译以适合现场应用, 可实现不同冶炼钢种、不同铁水条件下转炉物料的计算与输出, 以确定各种冷却剂的加入量, 最终达到控制转炉原料成本的目的。

### 3.2. 转炉冶炼效果

为考察优化转炉冷却工艺的冶炼效果, 开展了 20 炉次的工业试验, 冶炼钢种为 Q235B, 废钢比下限为 11%, 矿石比上限为 1.5%。试验炉次铁水温度在 1252℃~1380℃ 范围内, 铁水硅含量在 0.22%~0.59% 范围内。当铁水  $w[\text{Si}] \leq 0.40\%$ , 采用一批料方式, 开吹 5~6 分钟内多批次、小批量加完; 当铁水  $w[\text{Si}] \geq 0.40\%$ , 采用二批料方式, 头批料加入总料量的 80%~90%, 余料第二批加入; 其中矿石主要在供氧 2~3 min 内加入, 控制炉温以利于脱磷。在转炉冶炼终点进行测温、定氧和取样, 采用等离子体发射光谱仪检测终点钢样化学成分, 采用 X 射线荧光光谱仪检测渣样化学成分。

图 4~图 7 分别为工业试验炉次冶炼终点钢水温度、碳含量、溶解氧含量和磷含量的分布情况。从终点温度控制情况来看, 除 3 个炉次外, 均在 Q235B 钢种终点温度的内控标准 1680℃~1694℃ 范围内。从终点碳含量来看, 除 1 炉次碳含量较高外, 其余炉次均在  $0.0757\% \pm 0.05\%$  范围之内, 满足该钢种终点 C 含量控制目标要求。从终点溶解氧含量来看, 与优化前平均溶解氧含量平均值 452 ppm 相当, 且波动范围一致。从终点钢水磷含量来看, 其中有 15 个炉次的磷含量低于优化前 0.0133% 的平均水平, 平均脱磷率达到了 82.4%, 较优化前提高了 3.7%。另外, 冶炼终点炉渣碱度在  $R = 3.13 \pm 0.2$  范围内波动, 炉渣中 FeO 含量为 12.30%, 与优化前的平均值 12.34% 相当。

总体上看, 冷却工艺优化后, 转炉终点温度、钢水成分和炉渣成分控制稳定, 满足钢种控制标准要求, 且在一定程度上改善了脱磷效果。

## 4. 原料成本分析

为进一步考察优化冷却工艺的转炉原料成本, 包括工业试验 20 炉次在内, 共跟踪了 934 炉次的 Q235B

钢种的生产数据。优化前主要使用废钢作为冷却剂，优化炉次的冷却剂可分为“废钢 + 矿石”和“废钢 + 矿石 + 石灰石”两种情况，具体原料成本核算信息如表 4 所示。根据表中数据计算可知，与优化前相比，吨钢原料成本最多可降低 23.4 元，最少可降低 11.6 元，平均吨钢原料成本降低了 14.8 元。以该钢厂年产 Q235B 钢种 300 万吨估算，每年可降低原料成本 4400 万元以上，当然成本降低幅度还要受到废钢等原料价格波动的影响。

### 5. 结论

1) 基于转炉物料平衡和热平衡建立了转炉原料成本计算模型，计算结果表明，以矿石和石灰石代替

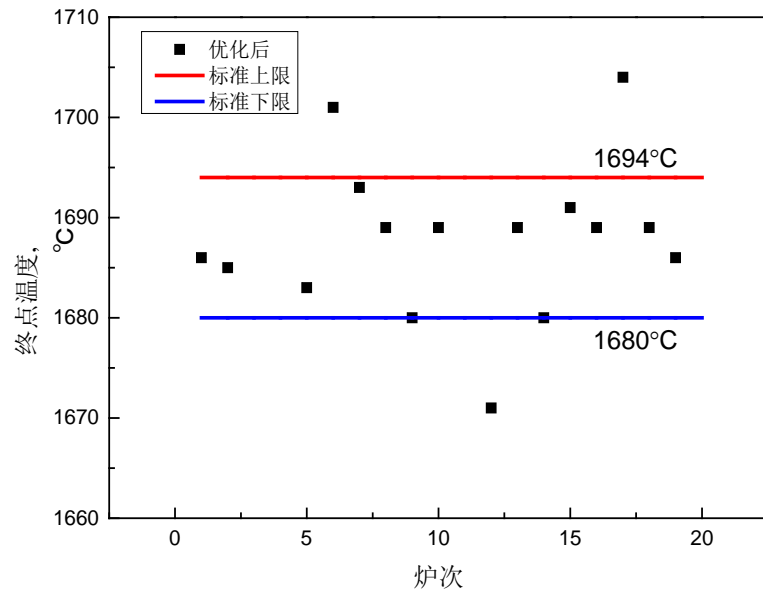


Figure 4. Distribution of converter endpoint temperature

图 4. 转炉终点温度分布

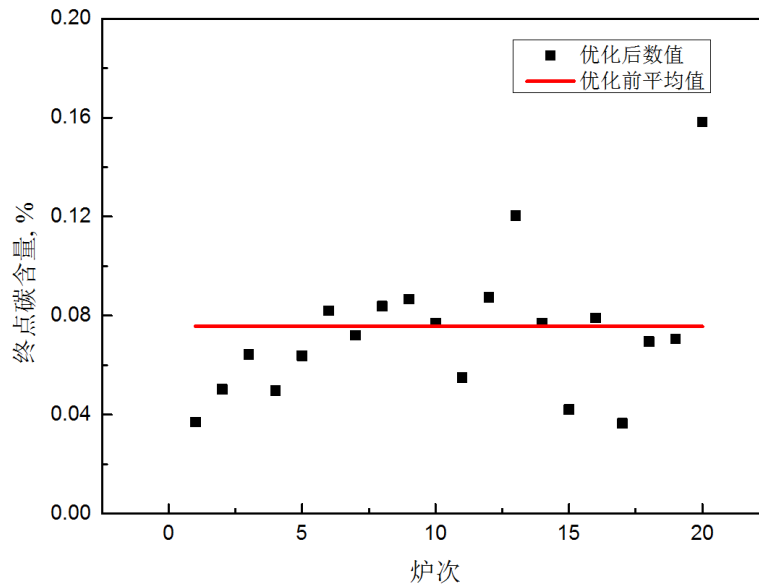


Figure 5. Distribution of converter endpoint carbon content

图 5. 转炉终点碳含量分布

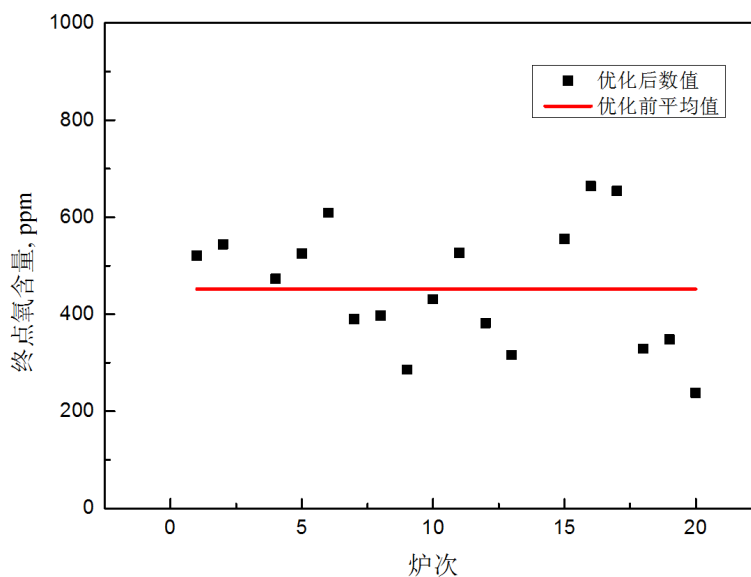


Figure 6. Distribution of converter endpoint oxygen content

图 6. 转炉终点溶解氧含量分布

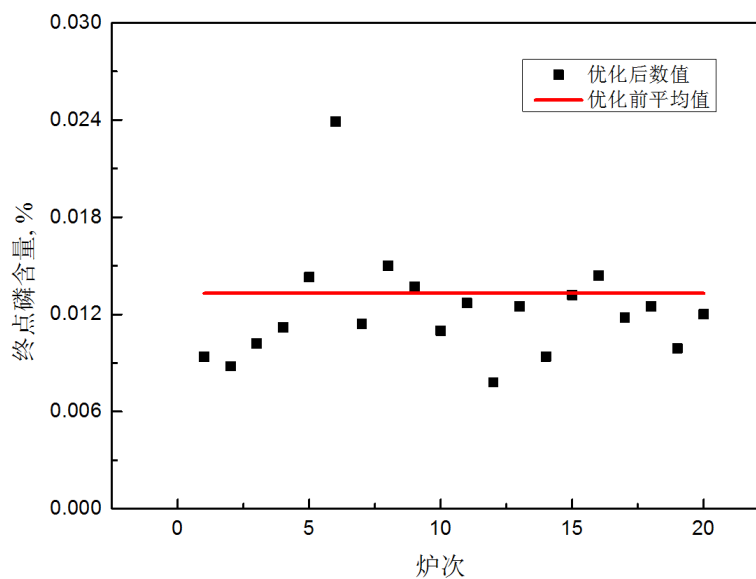


Figure 7. Distribution of converter endpoint phosphorus content

图 7. 转炉终点磷含量分布

Table 4. Comparison of raw materials cost before and after optimization

表 4. 优化前后吨钢原料成本对比

冷却剂种类	w[Si] < 0.4%		w[Si] = 0.4%~0.6%		w[Si] > 0.6%		
	炉数	成本(元/t 钢)	炉数	成本(元/t 钢)	炉数	成本(元/t 钢)	
优化前	废钢	168	2667.8	360	2674.5	58	2689.0
优化后	废钢 + 矿石	146	2651.7	330	2662.9	37	2673.0
	废钢 + 矿石 + 石灰石	96	2644.4	277	2660.1	48	2670.4



废钢作为冷却剂，均可在一定程度上降低转炉的原料成本，且矿石的降本效果更为显著。

2) 根据转炉原料成本影响因素及其变化规律，综合考虑转炉冷却效果和吹炼过程的稳定性，确定了“先降低废钢比，依次用矿石和石灰石平衡转炉热量”的冷却工艺优化原则。

3) 工业试验结果表明，冷却工艺优化后，转炉吹炼过程平稳，冶炼终点钢水温度控制准确，终点钢水成分和终渣成分控制稳定，且脱磷效果有所改善，转炉原料成本显著降低。

## 参考文献 (References)

- [1] 范鼎东. 炼钢金属炉料的经济性研究[J]. 炼钢, 1999, 15(3): 46-49.
- [2] 王勇, 杨宁川, 王承宽. 我国转炉炼钢的现状和发展[J]. 特殊钢, 2005, 26(4): 1-5.
- [3] 袁章福. 转炉内铬矿的熔融还原及热力学讨论[J]. 铁合金, 1989(4): 10-17.
- [4] Soykan, O., Eric, R.H. and King, R.P. (1991) Kinetics of the Reduction of Bushveld Complex Chromite Ore at 1416°C, *Metallurgical Transactions B*, **22**, 801-810. <https://doi.org/10.1007/BF02651157>
- [5] Kishimoto, Y., Taoka, K. and Takeuchi, S. (1997) Development of High-Efficiency Stainless Steel-Making by Cr Ore Smelting Reduction Method. *Kawasaki Steel Technical Report*, **37**, 51-58.
- [6] Liu, Y., Jiang, M.F., Xu, L.X., et al. (2012) A Coupling Dynamic Model for Dissolution and Reduction of Chromium Ore in a Smelting Reduction Converter. *International Journal of Iron and Steel Research*, **19**, 5-10. [https://doi.org/10.1016/S1006-706X\(12\)60039-9](https://doi.org/10.1016/S1006-706X(12)60039-9)
- [7] 田志国, 汤伟, 潘锡泉. 转炉采用石灰石替代部分石灰冶炼的应用分析[J]. 中国冶金, 2012, 22(7): 47-51.
- [8] 李宏, 曲英. 氧气转炉炼钢用石灰石代替石灰节能减排初探[J]. 中国冶金, 2010, 20(9): 45-47.
- [9] 魏宝森. 石灰石在转炉炼钢中的应用[J]. 材料与冶金学报, 2012, 11(3): 157-159.
- [10] 雷岩岩, 刘义文, 王冰, 等. 张钢 120 吨转炉应用烧结返矿工艺研究[C]//中国金属学会. 2012 年全国炼钢连铸生产技术会论文集(上). 重庆: 中国金属学会, 2012.
- [11] 吴杰, 王晓晶. 转炉炼钢过程中烧结返矿应用的生产实践[J]. 天津冶金, 2012(2): 4-16.
- [12] 汪春雷, 赵和明. 转炉炉料结构调整计算和比较[C]//中国金属学会特钢分会. 特钢冶炼学术委员会 2009 年会论文集. 青岛: 中国金属学会特钢分会, 2009.

### 期刊投稿者将享受如下服务:

1. 投稿前咨询服务 (QQ、微信、邮箱皆可)
2. 为您匹配最合适的期刊
3. 24 小时以内解答您的所有疑问
4. 友好的在线投稿界面
5. 专业的同行评审
6. 知网检索
7. 全网络覆盖式推广您的研究

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: [meng@hanspub.org](mailto:meng@hanspub.org)