

试验研究

# 转炉一次烟气半干法除尘技术升级优化 及数值模拟分析

杨军瑞<sup>1</sup>, 杨晓琼<sup>2</sup>

(1.中冶东方工程技术有限公司, 山东 青岛 266555

2.中铁十九局集团第五工程有限公司 辽宁大连 116110)

**摘要:**目前国内大多数转炉一次除尘系统采用的是二文三脱湿法除尘(即 OG 法),由于国家环保标准的提高,这种除尘系统的除尘效果已达不到最新的环保标准要求,因此必须对现有的转炉一次除尘系统进行升级改造。目前采用的最多的改造方式是将该系统改造为半干法除尘系统(即洗涤塔+环缝+脱水器的形式)。使转炉生产过程中产生的一次烟气经除尘设施净化后排放烟气中含尘浓度小于国家相关规范规定的排放标准。但是,半干法除尘系统也存在很多不足之处,除尘效果也是差强人意。本文在现有的半干法除尘系统基础上,再次进行技术升级改造,提出一种新型的半干法除尘系统,尽可能提高除尘设施的除尘效果,并且做到节水节电、降低能耗。

**关键词:**转炉;一次除尘;半干法除尘系统;环保标准

中图分类号:X701

文献标识码:A

文章编号:1006-8759(2017)04-0041-05

## UPGRADE OPTIMIZATION AND NUMERICAL SIMULATION ANALYSIS OF THE CONVERTER HALF DRY DEDUSTING TECHNOLOGY

YANG Jun-rui<sup>1</sup>, YANG Xiao-qiong<sup>2</sup>

(1.Beris Engineering and Research Corporation, Qingdao Shandong 266555, China)

(2.No.5 Engineering Corporation of China Railway 19 Bureau Group,  
Dalian Liaoning 116110, China)

**Abstract:** At present domestic most once dusting system of converter is in two venturis-three dehydrators wet dust removal (OG), due to the improvement of national environmental protection standard, the effects of dust removal system has amounted to less than the latest environmental protection standard requirements, so we must to upgrade the existing converter dust removal system transformation. Currently the most retrofit way is to transform the system to half dry dedusting system (Washing tower + girth + dehydrator). Make the production process of converter after a flue gas purification by dust collecting dust concentration in flue gas emissions is less than the relevant national standards of the prescribed discharge standards. However, the half dry dust removal system also has many shortcomings, dust removal effect is poor. The article will be based on the existing half dry dust removal system, again to upgrade technology and puts forward a new type of half dry dust removal system, as far as possible to improve the dust removal effect of dust removing facilities, and achieve the goal of water-saving and power-saving, reduce energy consumption.

**Key words:** the converter; once dust removal; half dry dedusting system; environmental protection standard.

中国钢铁产业正处于结构调整和优化升级的时期,面临着日益严峻的资源和环境压力,必须走资源节约型、环境友好型的可持续发展之路。回收和利用好转炉煤气对于炼钢节能降耗,减轻环境污染意义重大。

## 1 技术背景及国内外发展现状

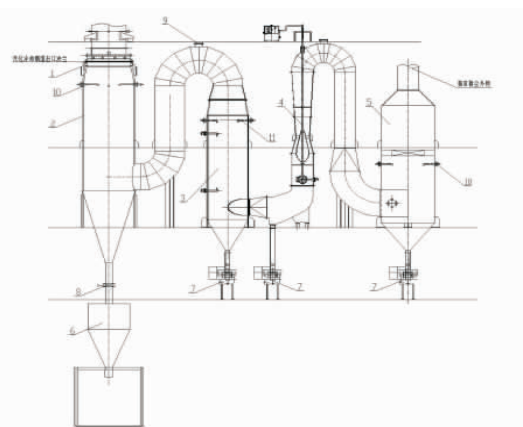
在炼钢工艺中,转炉是最主要的炼钢设备,而转炉一次除尘是保障转炉正常生产的基础。目前,国内很多钢铁企业炼钢转炉一次除尘系统采用的是二文三脱湿法除尘(即 OG 法),由于国家环保标准的提高,这种除尘系统的除尘效果已达不到最新的环保标准要求,因此必须对现有的转炉一次除尘系统进行升级改造<sup>[1-4]</sup>。

针对转炉一次除尘系统的改造方法大多分为两种,第一:彻底拆除原有的二文三脱湿法除尘系统(即 OG 法),新建干法除尘系统(即 LT 法),改造完成后能够彻底解决转炉一次烟气排放不达标状况,但是这种改造形式存在造价高、投资大、占地面积大和自动化控制繁杂等缺点,因此很多企业对该种改造形式存在顾虑<sup>[5-6]</sup>。第二:将原有的二文三脱湿法除尘系统(即 OG 法)改造为半干法除尘系统,即塔(洗涤塔)文(环缝喉口)系统,这种改造形式主要对转炉车间内系统进行局部改造,风机房等设施大多可利旧,因此节省了很大的投资,是目前大多数企业所采用的主要改造形式。改造后,使转炉生产过程中产生的一次烟气经除尘设施净化后排放烟气中含尘浓度小于国家相关规范规定的排放标准。但是,半干法除尘系统也存在很多不足之处,除尘效果也是差强人意,本项目将在现有的半干法除尘系统基础上,再次进行技术升级改造,提出一种新型的半干法除尘系统,尽可能提高除尘设施的除尘效果,并且做到节水节电、降低能耗。

## 2 研究内容

### 2.1 升级优化后的半干法除尘系统工艺流程

改造后的转炉一次烟气半干法除尘系统流程如图 1 所示,在转炉吹氧过程中,1 500 ℃的高温烟气携带 120~150 g/Nm<sup>3</sup> 的粉尘从炉口溢出进入烟罩,通过汽化冷却烟道将烟气的温度降至 800 ℃左右。汽化烟道出口烟气通过溢流水封进入一级蒸发冷却塔冷却和粗除尘。一级蒸发冷却器上



1、溢流水封 2、一级蒸发冷却塔 3、二次冷却段 4、环缝文氏管  
5、复合脱水器 6、灰仓 7、排水水封 8、气动双翻板阀  
9、泄爆阀 10、喷雾装置 11、喷水装置

图 1 半干法除尘工艺优化升级流程

设置水雾喷枪,将水滴充分雾化,雾化的水滴与高温烟气接触后迅速汽化,带走大量烟气温度的,将温度降至 220 ℃左右;雾化的水滴与大颗粒粉尘接触后,增加粉尘重量,沉降于下部灰斗起到粗除尘的作用。水雾喷枪供水总管上设置控制阀,当烟气温度小于 180 ℃时减小阀门开度,当烟气温度大于 250 ℃时增大阀门开度,保证水雾的充分汽化,确保出干灰。一级蒸发冷却塔除下的干灰进入灰仓储存定期外运。

经一级蒸发冷却塔粗除尘和降温后的高温烟气通过管道进入二级蒸发冷却塔,二级蒸发冷却塔上设置水喷枪,将烟气从 220 ℃降温至 60 ℃左右,降温后的烟气进入环缝文氏管进行精除尘,二级蒸发冷却塔和文氏管底部粉尘混合在浊环冷却水中从排水水封流出经由污水溜槽排至转炉浊环水处理系统。经精除尘后的烟气含尘量  $\leq 30$  mg/m<sup>3</sup>,温度 60 ℃,进入脱水器进行除雾后通过管道输送至风机房,合格煤气进入煤气柜回收,不回收的煤气和烟气通过烟囱燃烧后放散。

### 2.2 升级优化后的半干法除尘系统技术特点

本文创新性的提出,采用两级蒸发冷却塔和干湿两步法的除尘技术。一次蒸发冷却塔水滴完全充分的汽化,能以少量的水迅速降低烟气温度,干灰在灰仓储存通过汽车外运,本段除尘设施出干灰,减少转炉污水处理系统的处理量。二次冷却段可对已降温的烟气进一步降温和除尘,污水通过排水水封排至污水溜槽排至转炉污水处理系统中。

一级蒸发冷却塔在塔体的入口处设置一层水雾喷枪,在烟气的向下运输的过程中充分与水雾接触,从而降低温度,同时大颗粒的粉尘达到除尘的目的。二级蒸发冷却塔内设置多层喷嘴,上层向下喷水、下层向上喷水、通过这种单双向的喷水方式,使蒸发冷却塔内的烟气彻底达到紊流状态,通过增大雾化颗粒的速度,在实现冷却的同时,达到较好的除尘效果。

### 2.3 升级优化后的半干法除尘系统优点

半干法除尘系统是在湿法系统中利用了蒸发冷却技术,同时又利用湿法大部分的原工艺流程和主要设备,该系统有洗涤塔、二次冷却段、环缝文氏管和旋风复合脱水器组成。该系统的优点是系统阻力降低了,除尘效果比湿法有了显著的提高,循环水量减少,风机的维修周期延长,运行费用低。

半干法除尘系统一次蒸发冷却塔水滴完全充分的汽化,能以少量的水迅速降低烟气温度,起到节水的目的。收集的干灰可运至烧结厂二次利用,同时可减少污水的量,起到节能减排的目的。因该方式采用蒸发冷却技术,比传统的OG湿法系统耗水量少,起到了节水的目的。

## 3 数值模拟分析

### 3.1 数学模型的建立<sup>[7-8]</sup>

蒸发冷却塔内汽-水两相流换热,传热方式应考虑对流传热,这样其中就有 $\mu, v, w, P, T, \rho$  6个变量,需要对这6个变量建立独立的方程,因此,需要用到流体力学中的连续性方程、动量方程和能量方程,但是由于6个未知数,5个方程,方程组不封闭,因此,需要添加水的热力学状态方程,作为封闭方程。又由于蒸发冷却塔内雷诺数大于105,所以需要按照湍流进行计算,其中有湍流粘性系数,需要提供湍流模式解决,本文采用最常用的湍流模型来得到湍流粘性系数,因此还用到了方程,最终形成8个未知数,8个方程的封闭方程组。

根据上述分析,本课题所用到流体力学基本方程有:

连续性方程:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{V}) = 0$$

$$\nabla \cdot (\rho \vec{V}) = \frac{\partial}{\partial x} (\rho u) + \frac{\partial}{\partial y} (\rho v) + \frac{\partial}{\partial z} (\rho w)$$

其中

动量方程:

$$\rho \frac{du}{dt} = \rho F_x - \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} (\mu \frac{\partial u}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (\mu \frac{\partial u}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z} (\mu \frac{\partial u}{\partial z}) + \frac{\partial}{\partial x} [\frac{\mu}{3} (\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z})]$$

$$\rho \frac{dv}{dt} = \rho F_y - \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} (\mu \frac{\partial v}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (\mu \frac{\partial v}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z} (\mu \frac{\partial v}{\partial z}) + \frac{\partial}{\partial y} [\frac{\mu}{3} (\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z})]$$

$$\rho \frac{dw}{dt} = \rho F_z - \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} (\mu \frac{\partial w}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (\mu \frac{\partial w}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z} (\mu \frac{\partial w}{\partial z}) + \frac{\partial}{\partial z} [\frac{\mu}{3} (\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z})]$$

能量方程:

$$C_p \frac{DT}{Dt} = Q + \frac{k}{\rho} (\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}) + \frac{\phi}{\rho} + \frac{1}{\rho} \frac{Dp}{Dt}$$

其中 $\phi$ 是耗散函数,其指流体为抵抗变形的粘性力而作的功,即将流体的机械能转化为热能的部分<sup>[14]</sup>,此转化为不可逆过程,其完整表达式如下:

$$\begin{aligned} \phi = \rho \mu & \left[ \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right]^2 = \mu \left[ \left( \frac{\partial u_1}{\partial x_1} \right)^2 + \left( \frac{\partial u_2}{\partial x_2} \right)^2 + \left( \frac{\partial u_3}{\partial x_3} \right)^2 + \left( \frac{\partial u_2}{\partial x_3} + \frac{\partial u_3}{\partial x_2} \right)^2 \right. \\ & + 2\mu \left[ \left( \frac{\partial u_1}{\partial x_2} \right)^2 + \left( \frac{\partial u_2}{\partial x_1} \right)^2 + \left( \frac{\partial u_1}{\partial x_3} \right)^2 + \left( \frac{\partial u_3}{\partial x_1} + \frac{\partial u_1}{\partial x_3} + \frac{\partial u_2}{\partial x_3} + \frac{\partial u_3}{\partial x_2} \right)^2 \right. \\ & \left. \left. + \mu \left( \frac{\partial u_2}{\partial x_1} + \frac{\partial u_1}{\partial x_2} \right)^2 + \mu \left( \frac{\partial u_3}{\partial x_1} + \frac{\partial u_1}{\partial x_3} \right)^2 + \mu \left( \frac{\partial u_2}{\partial x_3} + \frac{\partial u_3}{\partial x_2} \right)^2 \right. \right. \\ & \left. \left. + \frac{2}{3} \mu \left[ \left( \frac{\partial u_1}{\partial x_1} - \frac{\partial u_2}{\partial x_2} \right)^2 + \left( \frac{\partial u_1}{\partial x_1} - \frac{\partial u_3}{\partial x_3} \right)^2 + \left( \frac{\partial u_2}{\partial x_2} - \frac{\partial u_3}{\partial x_3} \right)^2 \right] \right] \end{aligned}$$

因为喷枪内水的流动为湍流,因此粘性系数为层流粘性系数与湍流粘性系数之和,其中湍流粘性系数是由方程给出,即湍动能方程和湍动能耗散率方程。

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \langle U_j \rangle \frac{\partial k}{\partial x_j} = P_k + D_k - \varepsilon$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \langle U_j \rangle \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} = P_\varepsilon + D_\varepsilon + E_\varepsilon$$

$$P_k = -\langle u_i' u_j' \rangle \frac{\partial \langle U_i \rangle}{\partial x_j}$$

$$D_k = \frac{\partial}{\partial x_k} \left[ (v + v_T) \frac{\partial k}{\partial x_k} \right]$$

$$P_\varepsilon = -C_{\varepsilon 1} \langle u_i' u_j' \rangle \frac{\varepsilon}{k} \frac{\partial \langle U_i \rangle}{\partial x_j}$$

$$D_\varepsilon = \frac{\partial}{\partial x_k} \left[ (v + v_T / \sigma_\varepsilon) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_k} \right]$$

$$E_\varepsilon = C_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon^2}{k}$$

$$v_T = C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}$$

$$\text{上式中 } C_\mu = 0.09, \sigma_\varepsilon = 1.3, C_{\varepsilon 1} = 1.45, C_{\varepsilon 2} = 1.90$$

状态方程

$$\rho - \rho_0 = -\beta(T - T_0) \quad \text{即} \quad \beta = -\frac{\partial \rho}{\partial T}$$

由上述的所列的方程可以看出,8个方程,8个未知数,方程组封闭,连续性方程、能量方程、动量方程联立求解。

### 3.2 二级蒸发冷却塔几何模型建立

#### 3.2.1 单排喷嘴模型(图2)

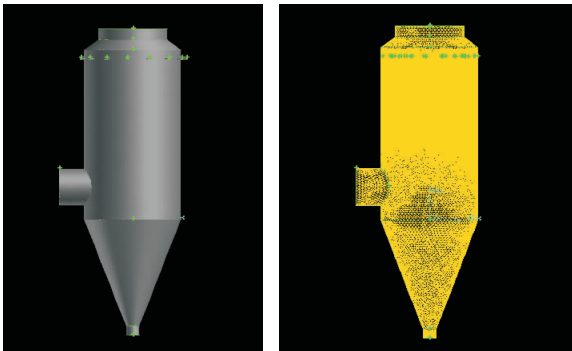


图2 单排喷嘴蒸发冷却塔模型及网格

#### 3.2.2 双排喷嘴模型(图3)

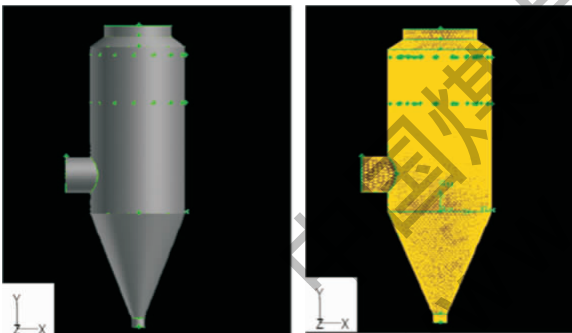


图3 双排喷嘴蒸发冷却塔模型及网格图

#### 3.2.3 三排喷嘴模型(图4)

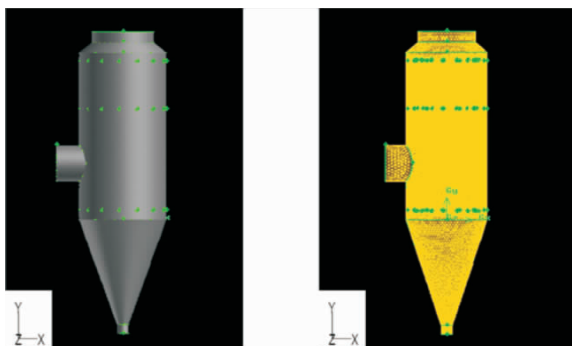


图4 三排喷嘴蒸发冷却塔模型及网格图

本次模型采用了三种形式,其一,在蒸发冷却塔上部设一层喷枪,并向下喷,如图2所示;其二,在蒸发冷却塔内上部和中部分别设两层喷枪,上

层喷枪向下喷,中间喷枪水平喷,如图3所示;其三,在蒸发冷却塔上部,中部及下部分别设置喷枪,上部向下喷,中部水平喷,下部向上喷,如图4所示。通过以上三种形式的设置,使水雾在蒸发冷却塔内形式多层封闭膜,流过该层膜的烟气与水雾充分接触碰撞,使水雾与含尘颗粒凝并状态,自然沉降。

### 3.3 二级蒸发冷却塔的 FLUENT 计算

#### 3.3.1 二级蒸发冷却塔内温度场云图

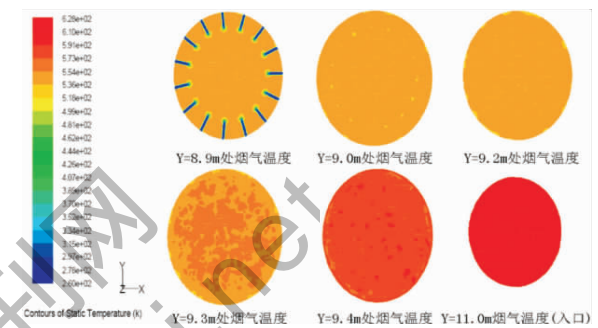


图5 二级蒸发冷却塔内温度场云图

#### 3.3.2 二级蒸发冷却塔内喷枪处温度场云图

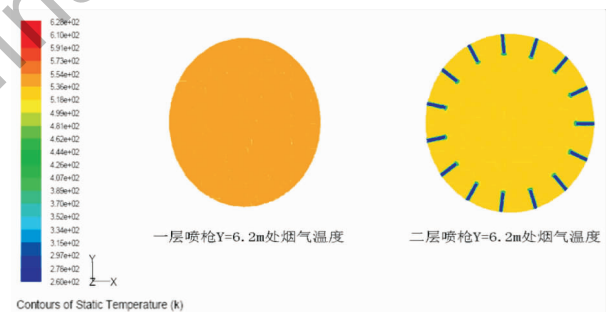


图6 二级蒸发冷却塔内喷枪处温度场云图

#### 3.3.3 二级蒸发冷却塔内速度场云图

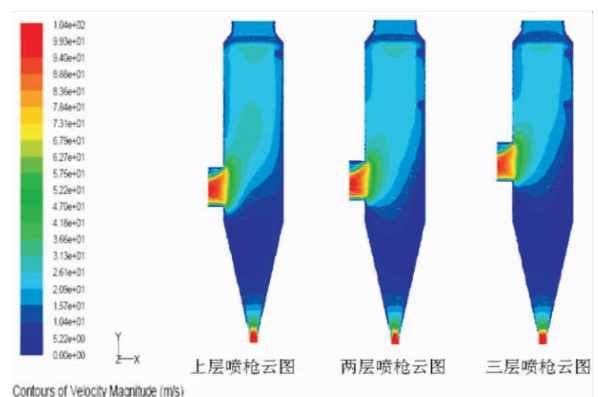


图7 二级蒸发冷却塔内速度场云图

### 3.3.4 二级蒸发冷却塔内压力场云图

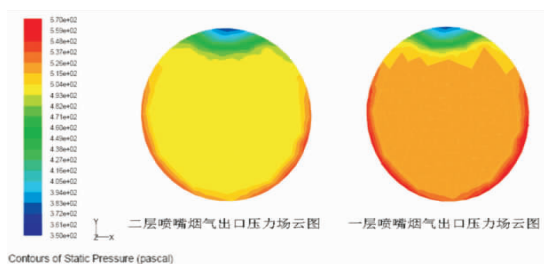


图8 二级蒸发冷却塔内压力场云图

### 3.4 二级蒸发冷却塔模拟结果分析

由图5可知烟气经过一层喷枪前后温降在250℃左右,经过二层喷枪后温降在100℃左右,烟气在进入二级蒸发冷却塔入口时温度一般在400℃左右,煤气进气柜前要求的温度为60℃以下,所以二级蒸发冷却塔内设置两层喷枪时,处理后的煤气可以直接进气柜。

由图7可知在蒸发冷却塔内设置不同形式的喷枪时,塔内流体速度分布较为均匀,波动在100 Pa以内,塔内进出口压差在500 Pa左右。原湿法除尘采用的二文阻力在10 000 Pa以上,所以采用二级蒸发冷却塔取代文氏管系统阻力将相对减小。

由图8可知蒸发冷却塔内在设置两种形式的喷枪,其出口处压力波动范围不大,在50~100 Pa之间,所以增加喷枪对系统阻力影响较小,不会对风机耗电量产生较大影响。

## 4 结论

本课题提出的升级优化后的转炉一次半干法除尘技术,车间内主要设备包括:一级蒸发冷却器、储灰仓、环缝洗涤装置、二级蒸发冷却器、复合脱水器等,车间外包括除尘风机、切换站、水封逆

(上接第52页)

控制系统,实现了互冲洗滤池的自动运行与冲洗,可实现无人值守。

示范工程运行半年多来,系统对水中悬浮物、铁锰离子的去除效果非常好,出水浊度可达0.3~0.8 NTU,总铁可达0.02~0.13 mg/L,总锰可达0.02~0.04 mg/L,满足了配制乳化液用水水质要求。主要经济指标为每年可节约水处理成本57.82万元,节省排水费用75.50万元,综合经济效益可达133.32万元。因此,该示范工程对济三矿乃至

止阀、烟囱及电气设备等可根据实际情况进行改造。该半干法系统具有以下特点:1)升级优化后的半干法除尘系统采用两级蒸发冷却搭,经该系统处理后的煤气温度在60℃以下,可直接进气柜;2)二级蒸发冷却塔内不同部位设置喷枪对系统阻力影响较小,所以煤气温度的控制可以通过合理设置喷枪来实现;3)对环缝洗涤装置做了局部的优化改造,改造后的环缝洗涤装置流场更加顺畅,系统阻力更小;4)采用两级蒸发冷却搭+环缝洗涤装置的除尘方式,除尘效果更佳,经该系统净化处理后的转炉煤气含尘浓度<30 mg/m<sup>3</sup>,远低于国家现行环保标准。5)由于升级改造后的转炉一次烟气半干法除尘系统提高了除尘效率,煤气含尘排放浓度<30 mg/m<sup>3</sup>,经煤气柜储存后的煤气可直接供用户使用,省去了旧有湿法除尘系统气柜后的电除尘设施,减少了投资。

## 参考文献

- [1] 刘晨. 转炉第二代半干法除尘技术 [J]. 世界金属导报. 2012.12.27.
- [2] 李昌德. 我国转炉烟气净化技术进入世界先进水平[J]. 冶金环境保护. 2007(1):47-46.
- [3] 刘晨, 裴丽苗, 宋汇江. 转炉烟气半干法除尘工艺[J]. 冶金动力, 2007(3):27-29.
- [4] 崔明远, 翟玉杰. 转炉煤气净化回收技术发展现状[J]. 工业安全与环保. 2006. 32(5):41-42.
- [5] 梁广, 张杰. 炼钢转炉煤气干法净化回收与利用技术[J]. 钢铁技术. 2006(6):3941.
- [6] 刘凯, 仵宗贤, 李学海. LT干法除尘在120 t转炉中的应用[J]. 莱钢科技. 2007:20-22.
- [7] 赵振兴, 郭建春, 敬加强等. FLUENT流体分析及仿真实用教程[M]. 北京:人民邮电出版社, 2010.
- [8] 李进良, 李承曦, 胡仁喜等. 精通 FLUENT6.3 流场分析[M]. 北京:化学工业出版社, 2009.

全国矿井水井下处理利用有着积极的推动意义。

## 参考文献

- [1] 曹祖民, 高亮, 崔岗等. 矿井水净化机资源化成套技术与装备[M]. 北京:煤炭工业出版社, 2003:1-5.
- [2] 周如禄. 压力式气水相互冲洗滤池 [P]. 中国专利: 201120193340.2, 2012-01-11
- [3] 周如禄, 高亮等. 煤矿矿井水井下直接处理及循环利用. 中国给水排水, 2013, 29(4):71-79.
- [4] 周如禄等. 压力式气水相互冲洗滤池的开发与应用, 煤矿科学技术, 2013, 41(2):113-115.