

文章编号:1007-6735(2012)05-0494-05

烧结余热发电系统的㧘分析

毕德贵, 张忠孝, 蔡海军, 朱 明

(上海理工大学 能源与动力工程学院, 上海 200093)

摘要: 以某厂烧结余热利用系统为例,建立整个热力系统的一般性㧘效率数学模型,根据现场测试的数据进行㧘分析,结果表明,系统的实际运行㧘效率只有 4.6% 左右;提出了烧结系统的余热分级回收和阶梯利用原则,通过对烧结烟气的㧘分析,采用双压余热发电系统对余热进行动力回收,使㧘效率达到原来的 2~4 倍,极大地提高了余热利用率,研究结果可为整个烧结系统的设计与改造提供较为科学的依据。

关键词: 余热; 㧘分析; 阶梯利用

中图分类号: TK 229

文献标志码: A

Exergy Analysis of Sintering Waste Heat Power Generation System

BI De-gui, ZHANG Zhong-xiao, CAI Hai-jun, ZHU Ming

(School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: Taking the sintering waste heat utilization system of a steel corporation as an example, a general mathematical model of exergy efficiency for the entire thermodynamic system was established. The results of an exergy analysis calculated with the field test data show that the running exergy efficiency is only about 4.6%. In this consideration, the idea of grade recovery and cascade utilization of waste heat of sintering system was proposed, and the dual pressure waste heat power generation system was used for waste-heat power recycle based on the exergy analysis of sintering gas. It results in an increase of exergy efficiency by 2~4 times of the original efficiency, and the waste heat utilization is improved greatly. The research results provide scientific basis for the entire sintering system's design and reformation.

Key words: waste heat; exergy analysis; cascade utilization

钢铁部门能耗最大的系统是炼铁系统,能耗占比约为 69.41%,而炼铁系统中能耗最大的工序是高炉工序,其次是烧结工序。烧结工序能耗占钢铁生

产总能耗的 10% 左右^[1],所以,合理回收利用烧结工序中的余热资源是整个钢铁部门节能减排的有效措施。目前烧结余热利用有余热锅炉及动力回收、热

收稿日期: 2011-12-12

作者简介: 毕德贵(1981-),女,硕士研究生。研究方向:余热回收利用。E-mail: bidegui1103@163.com

张忠孝(联系人),男,教授。研究方向:清洁燃烧技术。E-mail: zhzhx222@163.com

风烧结、热风点火助燃、预热原料等4种回收方式^[2],但余热利用率依然很低,仅为45.6%,而日本新日铁却高达92%以上^[3],所以余热回收潜力依然很大,且烧结及环冷各区段废气的品质有所不同^[4],如何合理利用烧结余热有待研究.本文以某厂烧结余热利用系统为研究对象,通过对热工测试数据的计算,分析该系统 λ 效率低的主要原因,并提出余热“分级回收,阶梯利用”的思想方法,为提高烧结余热利用系统的 λ 效率提供参考.

1 烧结系统 λ 回收利用的热力学分析

1.1 稳流系统 λ 流模型

稳流系统 λ 流模型即烧结系统 λ 平衡方程,烧结系统输入的 λ 量 $\sum E_{in}$ 等于系统输出的 λ 量 $\sum E_{out}$ 和系统损失的 λ 量 $\sum \Delta I_i$,通过该平衡方程来计算系统的 λ 效率^[5].稳流系统 λ 平衡图如图1所示.

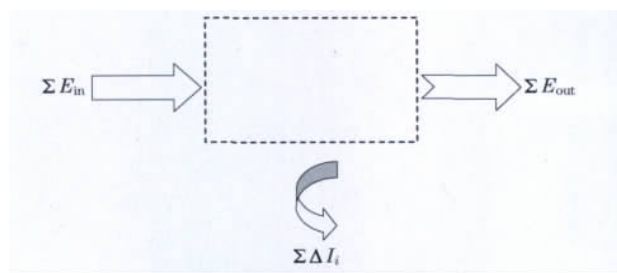


图1 稳流系统 λ 平衡图

Fig.1 Exergy equilibrium graph of steady flow system

烧结系统 λ 平衡方程式为

$$\sum E_{in} = \sum E_{out} + \sum \Delta I_i \quad (1)$$

对 λ 平衡方程式进行变形,两边同时除以 $\sum E_{in}$,得到

$$\sum \xi_i = 1 - \eta_e \quad (2)$$

$$\xi_i = \frac{\Delta I_i}{\sum E_{in}} \times 100\%$$

式中, η_e 为 λ 效率; ξ_i 为 λ 损系数.

λ 效率的定义是系统输出的 λ 量占系统输入的 λ 量的百分比^[5],数学公式为

$$\eta_e = \frac{\sum E_{out}}{\sum E_{in}} \times 100\% \quad (3)$$

通过对系统输入和输出的各项 λ 进行累计计

算,并根据 λ 平衡方程计算出系统总的 λ 损失,最后计算出系统的 λ 效率和各项 λ 损系数.

1.2 烧结系统 λ 回收方式的判定方法

余热的利用既要保证“量”的要求又要保证“质”的要求,“量”主要指热能的数量,而对“质”的要求必须通过能级匹配的原则给予鉴别指导.

所谓能级是指能量中 λ 所占的比例,它反映了能量品质的高低,用 λ 表示,数学表达式为

$$\lambda = \frac{E_x}{E} \quad (4)$$

式中, E_x 为介质的 λ 量; E 为介质总能量.

余热介质的降温过程可以看作是等压降温过程,从而推导出能级与温度之间的关系式,数学表达式为

$$\lambda = 1 - \frac{1}{\frac{T}{T_0} - 1} \ln \frac{T}{T_0}$$

式中, T 为余热介质的初始温度; T_0 为环境温度.

当介质的 $\lambda = 1$,其具有的能量为高级能; $0 < \lambda < 1$,为中级能; $\lambda = 0$,为低级能.

根据热力学第二定律可知,热源和用户所用能的能级差值要尽量小.电能和机械能的能级为1,所选基准状态下的能级为0,当 $\lambda = 1/2$ 时为临界值,用 λ_{cr} 表示,其物理意义为该能量采用动力回收和热利用的效果一样.当能级 $\lambda < 1/2$ 时,其能量应用于热利用;当能级 $\lambda > 1/2$ 大时,其能量应用于动力回收^[6].

2 某厂烧结系统 λ 回收分析

某厂烧结系统主要包括烧结机、环冷机、余热锅炉3大子系统,如图2(见下页)所示.

由图2可知,该厂烧结余热回收系统采用的是传统的、单一的热利用回收方式,仅仅把环冷机高温段的循环废气(250~300℃)送去余热锅炉产生蒸汽供给热用户,烧结机排出的废气以及环冷机排出的部分废气全部对外排空,没有考虑动力回收,从而造成烧结余热很大的浪费.通过对现场热工测试数据的计算可得出整个热力系统实际运行的 λ 流分布图,整个 λ 流图依次分为烧结机1、环冷机2、余热锅炉3及烟气循环系统4等4个子系统,每个子系统为一个独立的计算单元,每个单元的百分基准以其子系统的输入 λ 量为准(即上一个子系统输出的有效 λ 量), λ 流分布图如图3(见下页)所示.

由图3可知,整个系统实际运行的 λ 效率为余

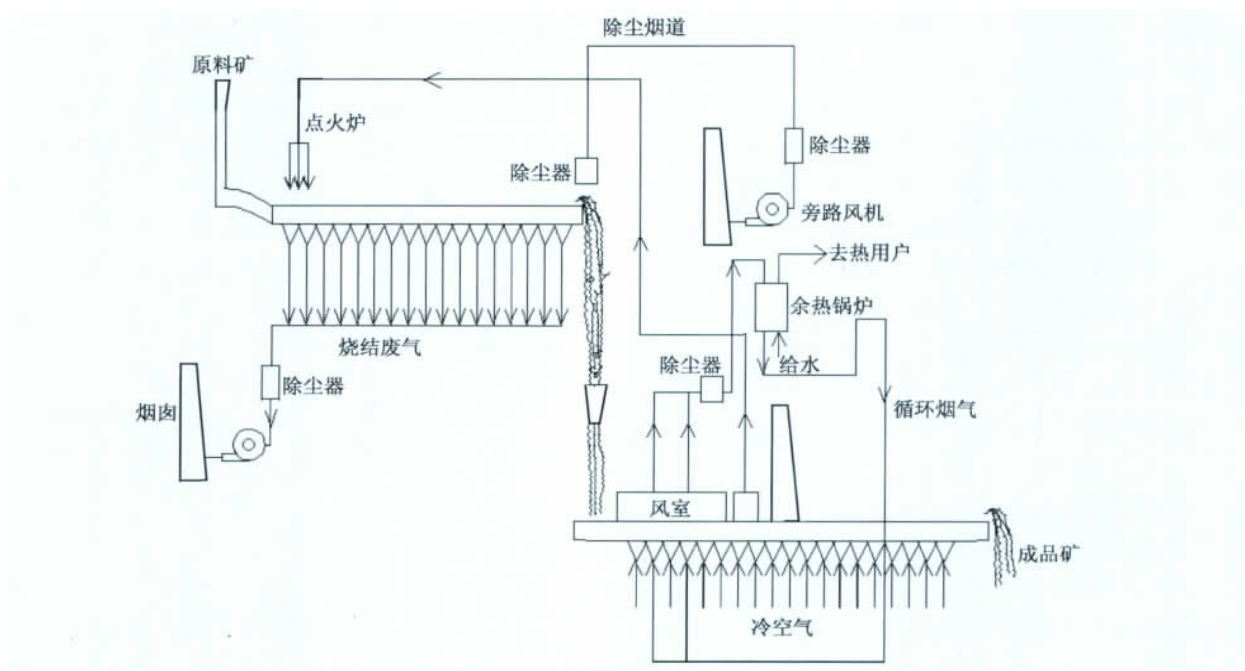


图 2 某厂烧结余热回收系统流程图

Fig. 2 Flowchart of sintering waste heat recovery system in a corporation

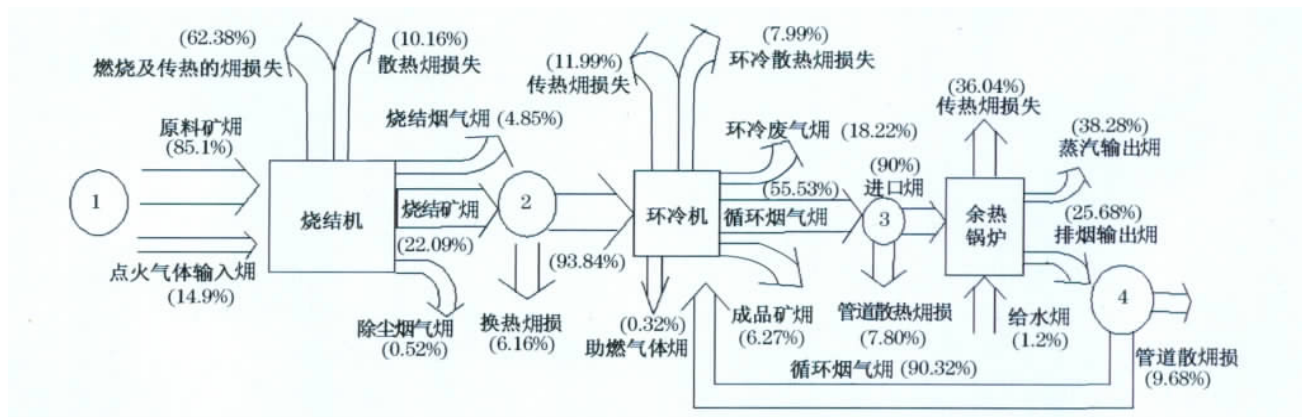


图 3 烧结系统烟流分布图

Fig. 3 Exergy flow distribution of sintering system

热锅炉输出的蒸汽烟量与烧结机输入总的烟量之比,通过计算得出仅为 4.6%,而烧结机、环冷机对外排出的废气烟分别占据整个热力系统输入烟的 4.85% 和 4.02%,这两部分的烟损之和达到 8.87%。因此,要提高系统循环烟效率,其关键就是回收烧结机、环冷机排出的废气余热。

3 烧结、环冷尾部废气余热分级回收和阶梯利用

3.1 余热分级回收和阶梯利用原则

烧结系统中,烧结废气的温度分布不均匀。传统的热利用仅仅是单一模式的热利用,不考虑动力利用,而分级回收和阶梯利用的思想是兼顾热的“量”和“质”两方面的利用,这种方法遵循的原则是“温度对口,阶梯利用”,尽量实现“量”和“质”的匹配^[7],最大限度提高整个热力系统的烟效率。

3.2 烟气分级回收和阶梯利用的实施过程

根据式(4)计算出回收余热介质的能级分布表,如表 1 所示。

根据以上的分析,采用双压余热发电系统进行余热回收,如图 4 所示。将烧结排出的高温废气(260~350℃)引入环冷机的高温段,吸收高温矿的

显热,被加热到 350~450 °C ($\lambda > 1/2$),去锅炉生产高温高压蒸汽,以驱动汽轮机做功发电;将烧结机排出的中温废气(150~230 °C)引入环冷机中温段继续吸收矿的显热,被加热到 250~330 °C ($\lambda < 1/2$),去锅炉低温段生产低压蒸汽,以满足各生产部门对蒸汽的需求,这样既满足了动力回收,又实现了热利用. 双压余热发电系统图如图 4 所示.

表 1 回收余热能级分布表
Tab.1 Energy level distribution of waste heat

余热介质	进口温度/°C	出口温度/°C	能级
高温循环烟气	260~350	350~450	$>1/2$
中温循环烟气	150~230	250~330	$<1/2$

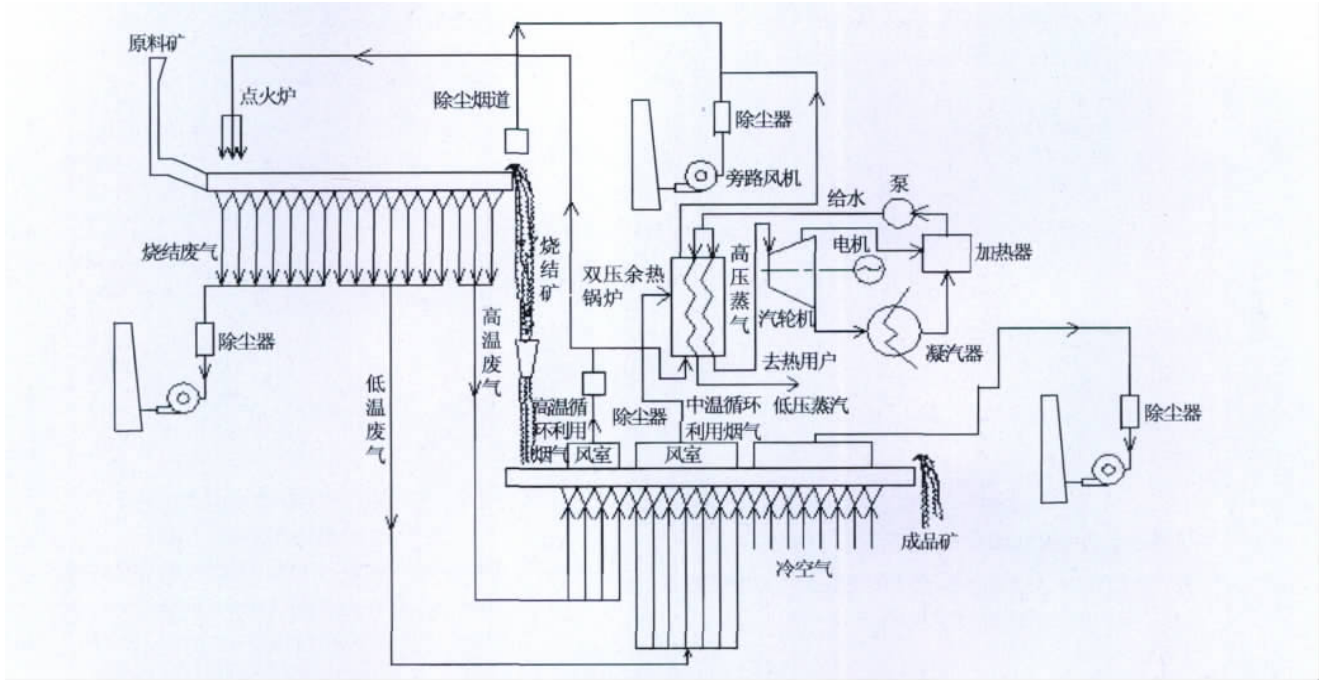


图 4 双压余热发电系统图

Fig.4 System diagram of dual-pressure waste heat power generation

双压余热发电系统烟的输出部分包括电功率、低压蒸汽的烟流,所以要计算整个热力系统的烟效率及烟损情况,就必须先计算输出电功率、低压蒸汽的烟流以及汽轮机的烟损.

3.2.1 电功率与高温循环烟气温度、流量的关系

高温循环烟气的温度、流量决定了烟气所带显热的大小(数量)和烟值(品位),不同的烟气品位具有不同的

热电转换率,根据热电转换率可以计算出电机输出的电功率,公式为

$$W = \psi Q$$

式中, W 为电功率; ψ 为废气的热电转换率; Q 为余热介质总的热量.

基于目前国内烧结合余热利用情况,余热品质与热电转换率^[8-9]大致有以下关系,如表 2 所示.

表 2 余热温度与热电转化率的关系

Tab.2 Relationship between waste heat temperature and thermoelectric conversion rate

余热温度/°C	480	440	410	380	350	320	290
热电转换率/%	19.50	19.27	19.05	18.89	18.08	17.99	17.60

文中共计算了 5 个高温循环烟气温度(480, 440, 410, 380, 350 °C)和 3 种烟气流量(100, 60, 35 Nm³/s)下的电功率,其中,Nm³/s 表示标准状态下的气体流量,计算结果如图 5(见下页)所示.

由图 5 可见,温度越高,同一折线中各点之间的

直线斜率就越大,高温循环烟气的流量越大,折线就越陡峭,电功率越高,由此可见,回收高温区的废气能极大地提高余热利用率.

3.2.2 低压余热锅炉出口蒸汽烟流与中温循环烟气温度的关系

余热锅炉的排烟温度设计值为 130°C , 保持锅炉的负荷不变, 仍维持 100% 的负荷 (22.24 t/h), 这样就可以根据热平衡计算出蒸汽的出口焓, 然后根据水蒸汽的焓-温图, 查取出口过热蒸汽的温度, 从而计算出蒸汽的焓流, 计算结果如图 6 所示。

由图 6 可知, 余热锅炉产生的蒸汽量与中温烟气的温度和流量成正比, 所以要增加蒸汽产量, 提高烧结余热利用率, 需提高回收的中温烟气温度及流量, 而减少余热回收系统的漏风是其关键技术。

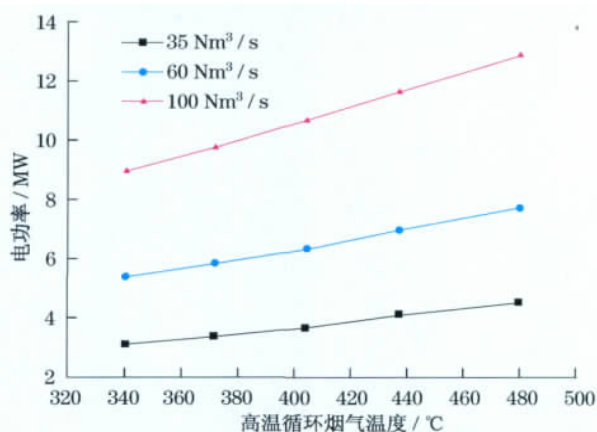


图 5 电功率与高温烟气温度、流量的关系

Fig. 5 Relationship of electric power with temperature and flow of high temperature flue gas

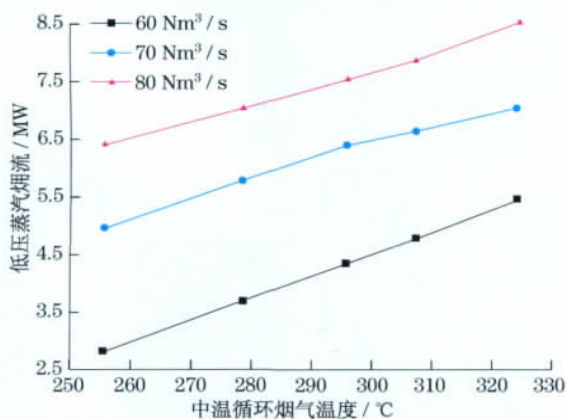


图 6 蒸汽焓流与中温循环烟气温度、流量的关系

Fig. 6 Relationship of exergy of steam with flow and temperature of medium temperature flue gas

3.2.3 整个热力系统焓效率与高、中温循环烟气温度、流量的关系

影响整个热力系统焓效率的主要因素是余热介质的数量和质量, 而余热介质包括高、中温两部分, 通过热力计算一共得到了 3 组数据, 每组数据取

5 个计算点, 结果如图 7 所示, 其中, V_H 为高温烟气流量, V_L 为中温烟气流量。

由图 7 可见, 随着高、中温循环烟气流量的同时增大, 3 条折线中相同两点之间的直线斜率越大, 而且随着高、中温循环烟气温度的升高, 这种趋势也就越明显, 而同一条折线中两点之间的直线斜率却不是一直增大的, 这是由于系统内部存在高、中温烟气温度及流量之间的匹配问题, 需要通过能级匹配原理给予指导, 整个热力系统的焓效率达到 $10\% \sim 20\%$, 是原来的焓效率 (4.6%) 的 2~4 倍。

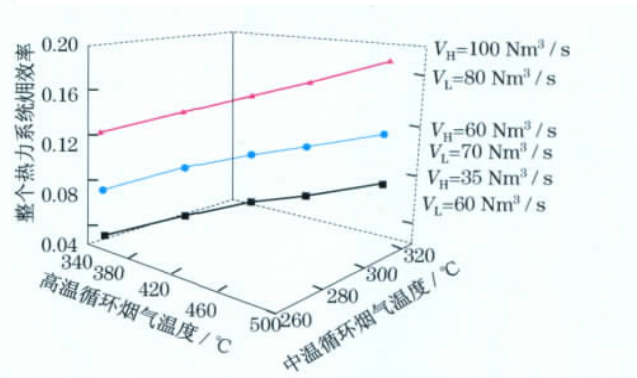


图 7 整个热力系统的焓效率与循环烟气温度、流量的关系

Fig. 7 Relationship of exergy efficiency of whole thermal system with temperature and flow of the circulatory flue gas

4 结 论

根据某厂烧结工序的热工测试结果对其系统进行了焓分析, 提出了烧结余热“分级回收、阶梯利用”的回收原则, 采用双压余热发电系统对系统进行改造, 得出结论如下:

a. 采用单一余热锅炉回收环冷废气, 实际运行的焓效率仅有 4.6% 左右, 而烧结机、环冷机对外排出的废气焓分别占据整个热力系统输入焓的 4.85% 和 4.02% , 这两部分的焓损之和占整个系统的 8.87% , 余热回收潜力大;

b. 在双压余热发电系统中, 电功率及蒸汽量都与高温、中温循环烟气流量和温度成正比, 应尽可能多的回收高温段的废气, 提高中温段的温度和流量, 从而大大提高余热利用率;

c. 采用双压余热发电系统回收方案, 同时回收了烧结机、环冷机高温段的废气, 使得整个系统焓效率提高到原来的 2~4 倍, 极大地提高了废气资源的利用率。

(下转第 510 页)

4 结束语

通过对于超大直径盾构上穿越既有运营隧道的监护技术总结,以及施工过程的监测分析,可以了解到相比较普通直径盾构穿越,超大直径盾构因其施工时土体卸载量大,跨度较长,对被穿隧道将形成明显且长时的变形影响和扰动.研究表明:

a. 通过隧道隆沉分布图发现,该次上穿越工程对被穿越隧道产生的影响为隆起,线性呈草帽状分布,穿越轴线交点为最大值.

b. 通过隧道竖向位移时程图发现,在盾构开挖面穿过之后,隆起速率激增,而堆载是非常有效的缓解方法,明显地降低了隧道上浮的速率,加速了隧道的稳定.

c. 超大直径盾构上穿越已运营隧道工程施工各阶段引起的隆沉变形与正面土压力、出土量、土体卸载量等因素关系密切,为保证施工安全,必须通过稳定土压力、土体改良、控制卸载等要点实施有效的监护措施.

参考文献:

- [1] 邵华. 盾构近距离穿越对邻近地铁隧道的影响及其工程对策研究[D]. 上海: 同济大学, 2005.
- [2] 刘建航, 侯学渊. 盾构法隧道[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1991.
- [3] 叶耀东, 据娟, 王如路. 盾构穿越运营地铁隧道施工技术探讨[J]. 施工技术, 2005, 34(12): 67—68.
- [4] 邵华, 张子新. 盾构近距离穿越施工对已运营隧道的扰动影响分析[J]. 岩土力学, 2004, 25(增): 545—549.

(上接第 498 页)

参考文献:

- [1] 叶匡吾. 我国烧结能耗及节能对策[J]. 烧结球团, 1997, 22(5): 11—12.
- [2] 沈珂, 张忠孝, 代百乾. 烧结余能综合回收利用技术研究[J]. 烧结球团, 2010, 35(6): 1—4.
- [3] 王建军, 紫九菊, 陈春霞, 等. 我国钢铁工业余热余能调研报告[J]. 工业加热, 2007, 36(2): 1—3.
- [4] 魏婷. 烧结余能发电的热经济性分析[D]. 北京: 华北电力大学, 2010.
- [5] 沈维道, 蒋敏智, 童钧耕. 工程热力学[M]. 第三版. 北

京: 高等教育出版社, 2001.

- [6] 陈文威, 李沪萍. 热力学分析与节能[M]. 北京: 科学出版社, 1999.
- [7] 赵恩婵, 张方伟, 赵永红. 火力发电厂烟气余热利用系统的研究设计[J]. 热力发电, 2008, 37(10): 66—70.
- [8] 赵之军, 冯伟忠, 张玲, 等. 电站锅炉排烟余热回收的理论分析与工程实践[J]. 动力工程, 2009, 29(11): 994—997.
- [9] Butcher C J, Reddy B V. Second law analysis of a waste heat recovery based power generation system[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2007, 50: 2355—2363.