

文章编号:1007-6735(2012)05-0505-06

# 超大直径盾构上穿越运营隧道监护分析

袁 晨

(上海轨道交通维保中心 监护工作部, 上海 200070)

**摘要:** 通过对上海外滩通道近距离穿越并已运营的地铁 2 号线工程施工的监测分析,总结了地铁 2 号线在穿越过程中的隆沉变形规律,分析认为盾构施工土体卸载为变形主要因素,堆载为控制被穿越隧道隆起的有效措施,为今后类似工程提供借鉴。

**关键词:** 超大直径型土压平衡盾构; 穿越施工; 信息化施工; 土体卸载  
**中图分类号:** U 45      **文献标志码:** A

## Technology of Guardianship on Super-large Diameter Shield Crossing over Existing Adjacent Tunnel

YUAN Chen

(Guardianship Work Department, Shanghai Rail Transit Maintenance Support Center, Shanghai 200070)

**Abstract:** The influence of tunnel shield crossing over an adjacent operating metro has attracted much attention of lots of domestic and foreign. Technology of guardianship used in the case of guarding the Bund channel of Shanghai was discussed detailedly. The conclusion would be helpful for the future similar shield tunneling projects.

**Key words:** *super-large diameter shield tunneling; crossing construction; information construction; unloading capacity of soil*

上海外滩通道工程为地下两层机动车通道,是上海中心城区规划的 3 条南北向主干道之一的东线重要组成部分。外滩通道北段工程盾构从天潼路工作井出发,沿大名路下穿苏州河后,继续沿中山东一路,向福州路工作井推进。该工程采用直径为 14.27 m 的超大直径土压平衡盾构机“外滩通泰号”施工,遭遇了许多世界级难题。其中便包括了穿越运营中的地铁 2 号线,这是国内盾构法隧道施工史上第一次超大直径土压平衡盾构穿越既有运营隧道。本文综合国内外其它盾构穿越的研究成果,针对该

次穿越分析了超大直径盾构上穿越施工对既有运营隧道的影响变形规律及监护控制要点。

### 1 工程概况

外滩通道工程隧道与地铁 2 号线平面基本呈十字相交,穿越区隧道中心线的水平面投影夹角为 75°(见下页图 1),穿越段盾构顶部覆土为 7.9 m,盾构底部距离地铁 2 号线隧道顶部最近仅有 1.4 m,如下页图 2 所示。

**收稿日期:** 2012-03-14  
**作者简介:** 袁 晨(1985-),男,助理工程师。研究方向:岩土工程。E-mail:rex\_capricorn@126.com

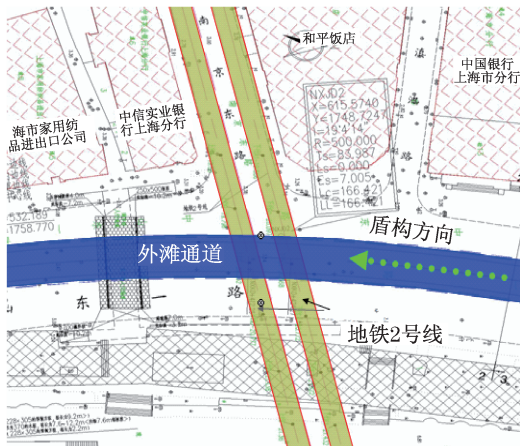


图1 穿越平面示意图  
Fig.1 Plan view of project

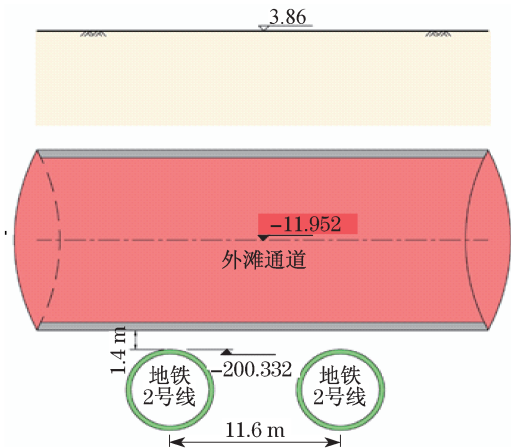


图2 穿越剖面示意图  
Fig.2 Sectional view of project

图3为穿越地质分布图,图中可见盾构上穿越的地铁2号线隧道位于⑤<sub>1</sub>层灰色黏土和⑤<sub>3</sub>层灰色粉质黏土,外滩通道盾构位于②<sub>0</sub>江滩土,④层灰色淤泥质黏土和⑤<sub>1</sub>层灰色黏土.②<sub>0</sub>江滩土饱和、松散、局

部以淤泥质粉质黏土为主,有时为砂质粉土,中高压缩性.④层灰色淤泥质黏土流塑,夹薄层粉土,局部为淤泥质粉质黏土,高压缩性.⑤<sub>1</sub>层灰色黏土和⑤<sub>3</sub>层灰色粉质黏土有时可塑,夹薄层粉土,局部较多,有时为黏土,中偏高压缩性.具体土体物理特性见表1、表2.表2中, $\alpha$ , $E_s$ 为压力间隔在0.1~0.2 MPa时土的压力系数和压缩模量.

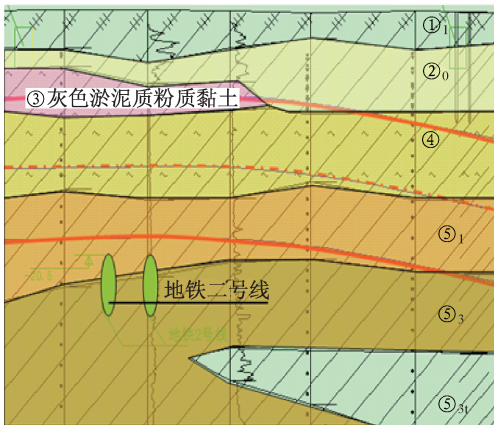


图3 穿越地质分布图  
Fig.3 Profile of geological distribution

| 表1 土层力学性质表1                        |         |            |                                              |         |              |                     |                     |               |
|------------------------------------|---------|------------|----------------------------------------------|---------|--------------|---------------------|---------------------|---------------|
| Tab.1 Soil mechanical parameters 1 |         |            |                                              |         |              |                     |                     |               |
| 层号                                 | 土层名称    | 含水量<br>W/% | 重度<br>$\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$ | 比重<br>C | 孔隙比<br>$e_0$ | 液限<br>$\omega_L/\%$ | 塑限<br>$\omega_P/\%$ | 塑性指数<br>$I_P$ |
| ② <sub>0</sub>                     | 江滩土     | 34.7       | 18                                           | 2.72    | 0.986        | 34.5                | 19.9                | 14.5          |
| ④                                  | 灰色淤泥质黏土 | 49.4       | 16.9                                         | 2.75    | 1.386        | 44.2                | 22.9                | 21.3          |
| ⑤ <sub>1</sub>                     | 灰色黏土    | 36.7       | 17.8                                         | 2.74    | 1.065        | 39.4                | 21.4                | 18.0          |
| ⑤ <sub>3</sub>                     | 灰色粉质黏土  | 34.0       | 17.9                                         | 2.73    | 1.005        | 36.0                | 20.4                | 15.5          |

表2 土层力学性质表2  
Tab.2 Soil mechanical parameters 2

| 层号             | 土层名称    | 渗透系数温度 20℃                          |                                     | 液性指数 $I_L$ | 固结快剪               |                    | 比贯入阻力 $P_s/\text{MPa}$ | 压缩系数 $\alpha/\text{MPa}^{-1}$ | 压缩模量 $E_s/\text{MPa}$ |
|----------------|---------|-------------------------------------|-------------------------------------|------------|--------------------|--------------------|------------------------|-------------------------------|-----------------------|
|                |         | $K_V/(\text{cm}\cdot\text{s}^{-1})$ | $K_H/(\text{cm}\cdot\text{s}^{-1})$ |            | 黏聚力 $C/\text{kPa}$ | 内摩擦角 $f(^{\circ})$ |                        |                               |                       |
| ② <sub>0</sub> | 江滩土     | $4.74\times10^{-5}$                 | $8.27\times10^{-5}$                 | 1.08       | 11                 | 22                 | 1.43                   | 0.29                          | 6.85                  |
| ④              | 灰色淤泥质黏土 | $2.03\times10^{-7}$                 | $4.79\times10^{-7}$                 | 1.25       | 14                 | 9.5                | 0.60                   | 0.99                          | 2.41                  |
| ⑤ <sub>1</sub> | 灰色黏土    | $1.97\times10^{-6}$                 | $4.59\times10^{-6}$                 | 0.85       | 17                 | 13.0               | 0.89                   | 0.54                          | 3.85                  |
| ⑤ <sub>3</sub> | 灰色黏土    | $6.32\times10^{-6}$                 | $1.18\times10^{-5}$                 | 0.88       | 17                 | 17.0               | 1.39                   | 0.41                          | 4.94                  |

隧道衬砌结构外径 13.950 m,内径 12.750 m,厚 600 mm,环宽 2 m.衬砌圆环分为 9 块,即 6 块标准块、2 块邻接块和 1 块封顶块.采用错缝拼装通用

衬砌结构.  
施工盾构采用日本三菱公司设计制造的  $\Phi 14.270\text{ m}$  的土压平衡盾构,全长约为 95 m.其中

盾构机本体长 13.585 m,1 号车架长约 25 m,联系钢梁长约 34.6 m,2 号车架长约 22 m(见图 4)。

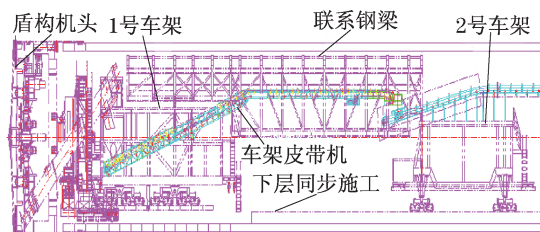


图4 施工盾构结构图

Fig.4 Structural drawing of the tunnel shield machine

该次穿越盾构直径迄今最大,上穿土体卸载量大,且距离运营中的地铁2号线隧道非常近,故工程上穿越施工要求的保护技术标准很高:地铁2号线路保护等级为一级;隧道结构纵向沉降与隆起控制值为 $\pm 10\text{ mm}$ ;土层损失率小于1%。当监测值超过总变形控制量的60%时要求报警,并采取应急措施。

## 2 监测措施及施工控制

### 2.1 监测措施

采用自动和人工监测系统作为信息化施工的依据。自动化实施实时监测,并在穿越后进行长期监测跟踪。自动监测主要以盾构穿越地铁2号线隧道中心线为基准,沿地铁2号线线路向东、向西50 m范围内安排50支长为2 m的电子水平尺,每隔5 min测一次数据,沉降监测精度可达0.3 mm。人工复核点则利用常规光学测量仪器,每4~6 m或更长距离布设一个监测点(见图5)。

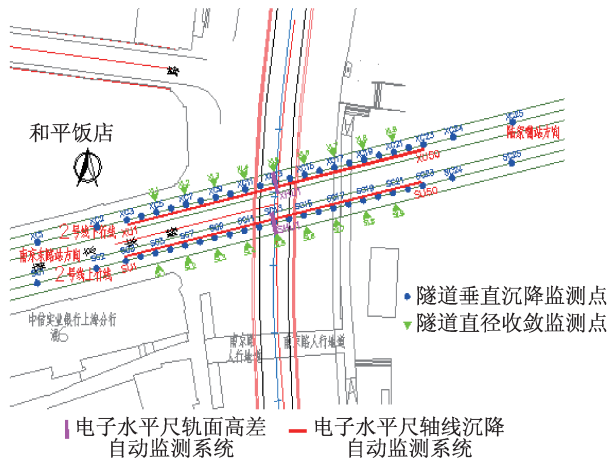


图5 沉降监测布点图

Fig.5 Distribution map of metro line 2 monitoring points

### 2.2 施工参数

盾构穿越期间,总的原则是尽可能减少对地层的扰动,优化并匹配盾构施工参数,使盾构推进对运营隧道的影响控制在最小的范围内,其施工参数主要为土舱内压力、出土量、推进速度、同步注浆量和注浆压力等<sup>[1]</sup>。在盾构穿越地铁2号线之前,设置穿越试验段,位于中山东路下,长度为15环,主要就以上几点施工参数与地面沉降关系进行分析,掌握此段区域盾构推进土体沉降变化规律以及摸索土体性质,以便正确设定穿越地铁2号线的施工参数和采取相应措施减少土体沉降。通过分析,得出以下监护控制要点。

#### 2.2.1 稳定正面土压力

盾构掘进过程中,当水平支护应力小于原始侧向应力时,开挖面内土体向盾构内移动,引起地层损失而导致盾构上方地面沉降;反之,引起盾构前上方土体的隆起<sup>[2]</sup>。为此,合理控制切口平衡压力对减少周边土体扰动效果明显。为稳定正面土压力,现场采用了如下措施:

##### a. 设定土压

理论正面平衡压力为

$$P = k_0 \gamma h$$

式中, $k_0$ 为土体侧向静止平衡压力系数,取为0.75; $\gamma$ 为土体的平均重度,取为 $18\text{ kN/m}^3$ ; $h$ 为隧道埋深,m;并得出盾构穿越地铁2号线阶段理论土压值为0.195~0.193 MPa。

在实际操作过程中,盾构随着推进标高逐步上升,土压力设定也随之逐步降低,在管片拼装时,土压力损失为10%左右,穿越时主要根据穿越过程中深层沉降点的监测数据逐环进行调整。

##### b. 土体改良

采用在开挖面注入泡沫材料的方式进行土体改良,可确保舱内土砂的柔性和流动性,混合物的移出更容易,从而使盾构前方土体均匀;加大土的坍塌度;降低土的渗透系数,有效降低土舱内压力值的波动,从而减少对土体及地铁2号线的扰动。

##### c. 出土控制

根据盾构及管片之间的建筑间隙及各土层特性合理控制出土量,大约为开挖断面的98%~100%。并通过土体称重系统实测数据,结合土压力设定值,严格控制出土量。

#### 2.2.2 控制推进速度

盾构推进速度对运营隧道的隆沉变形有明显的影响,因综合考虑土舱正面土压力、千斤顶推力及土体性质等因素<sup>[3]</sup>。要求均匀慢速推进,控制在

10~15 mm/min内,且尽量保持推进速度稳定,确保盾构均衡、匀速地穿越地铁2号线,以减少对周边土体的扰动影响。

### 2.2.3 控制姿态调整

盾构推进会带来额外的地层损失,由于受土层地质不均匀性的影响,人工操作上的误差,甚至盾构机械本身的精度等,盾构掘进的中心线可能会与设计的轴线不一致,从而到一定阶段必须对盾构姿态进行纠偏,满足设计上的要求。而盾构姿态的变化将在盾构四周产生空洞区和挤压区,会对周围土体产生较大扰动<sup>[4]</sup>。所以,在盾构推进中,要求“分小段、多次、均匀纠偏”,单次纠偏量不超过2 mm,单环纠偏次数不少于10次,杜绝大幅度纠偏,以减少地层损失和对周围土体的扰动,降低对运营隧道的影响。

### 2.2.4 控制同步注浆量

同步注浆的目的是为了能够及时填充盾尾空隙,防止周围土体的坍塌,同时提高管片的耐久性,增强隧道的防水能力。浆液采用单液可硬性浆液,主要材料为砂、粉煤灰、石灰、膨润土、外加剂和水,浆液坍落度控制在12左右。

根据分析,盾构上穿地铁2号线区域时由于覆土浅,易产生隧道上浮的现象。为了有效控制隧道上浮,在盾构推进进入试验段时,先进行模拟注浆,通过布置的深沉沉降监测点监测数据进行分析。

单环理论注浆量为

$$V = 2\pi \frac{D^2 - d^2}{4} = 14.1 \text{ m}^3$$

式中, $D$ 为盾构外径,m; $d$ 为衬砌外径,m。

根据前期推进地面监测情况实际注浆量应为理论注浆量的130%~135%,即18.33~19 m<sup>3</sup>。要求同步注浆流量要与推进速度相匹配,“及时、均匀、足量”,保证盾尾不漏浆。因推进后续结构施工,二次注浆极为困难,注浆的重点放在同步注浆一次到位。

### 2.2.5 控制土体卸载

超大直径盾构穿越施工的一大显著特点在于其土体卸载量大,本次穿越达到平均285 t/m,可能直接导致地铁2号线隧道上浮。考虑到口字件安放及两旁边混凝土的浇捣紧跟盾构施工(见图6),且在穿越段口字件内放置钢锭(约100 t/m),外加盾构机架自重,这些重量可对隧道产生压重效应,对防止隧道的上浮起到一定的作用。遂根据整个盾构穿越的4个阶段,即盾构机头主体、1号车架、联系梁、2号车架分别穿越地铁2号线作卸载计算,得出:

a. 机头穿越时卸载量约为136 t/m;

b. 1号车架穿越时的卸载量约为148 t/m;

c. 联系梁穿越时卸载量约为170 t/m;

d. 2号车架穿越时卸载量约为152 t/m。

可见最大风险点是在联系梁位于地铁2号线隧道上部之时,应尽量缩短这段时间,遏制隧道上浮。在实际施工中,于2号车架之后再次放置钢锭铁锭进行堆载,约100 t/m,明显缓解地铁2号线隧道上浮趋势。

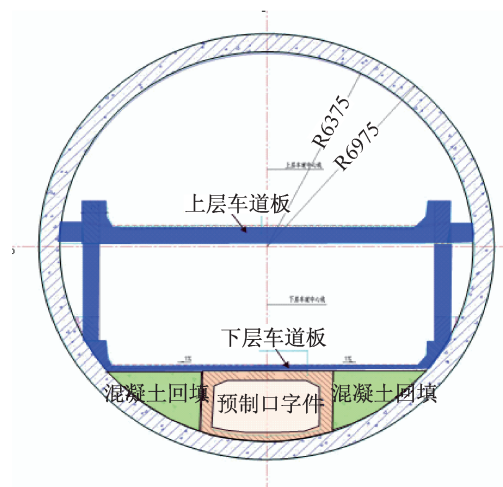


图6 圆隧道内部结构剖面图

Fig.6 Profile the internal structure of building tunnel

## 3 监测数据分析

### 3.1 穿越地铁2号线下行线隧道监测数据分析

对地铁2号线下行自动沉降监测的数据进行时程图(见图7)及沉降分布图(见图8)分析。

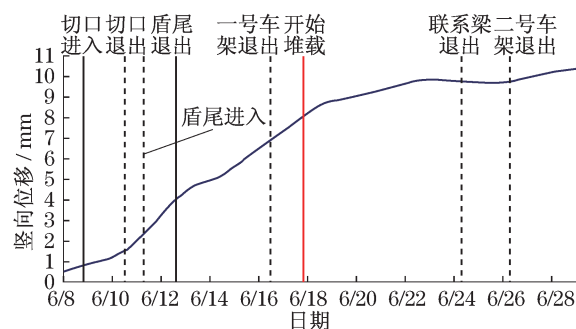


图7 地铁2号线下行线隧道竖向位移时程图

Fig.7 Time chart of vertical displacement of metro line 2 downlink tunnel

a. 盾构本体经过隧道期间,隧道隆起量2.59 mm,占累计隆起值27.85%,切口退出后速率明显增加,达到0.41 mm/环。

b. 1号车架经过期间,隧道隆起量为2.79 mm,

此阶段隆起幅度相对较大,占累计隆起量约 30%,  
隆起速率达到 0.25 mm/环。

明显呈现前期速率大,堆载后有所减缓的形态,隆起  
速率由 0.20 mm/环降至 0.07 mm/环。

c. 联系梁经过期间,隧道隆起量为 2.41 mm,

d. 2 号车架经过期间,隧道变形趋于稳定。

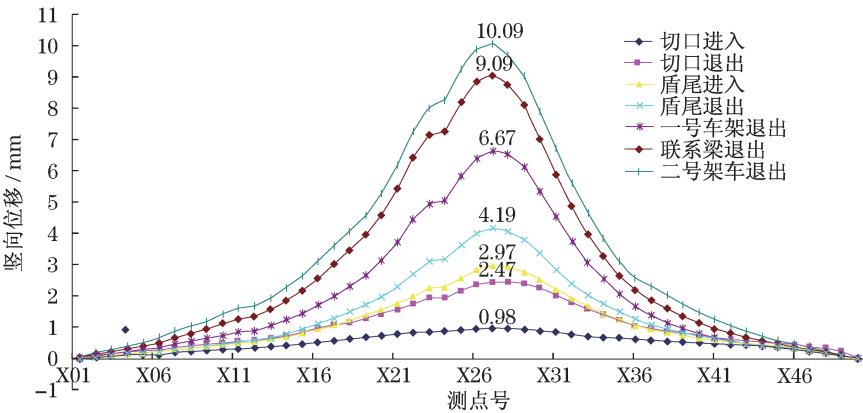


图 8 地铁 2 号线下行线隧道隆沉分布图

Fig.8 Distribution graph of vertical displacement of metro line 2 downlink tunnel

3.2 穿越地铁 2 号线上行线隧道监测数据分析

对地铁 2 号线上行自动沉降监测的数据进行时程图(见图 9)及沉降分布图(见图 10)分析。

- a. 盾构本体经过隧道期间,隧道隆起量 3.19 mm,占累计隆起值 33.26%,切口退出后速率明显增加,达到 0.49 mm/环。
- b. 1 号车架经过期间,隧道隆起量为3.37 mm,此阶段隆起幅度相对较大,占累计隆起量约 35.14%,隆起速率达到 0.28 mm/环。
- c. 联系梁经过期间,隧道隆起量为 2.88 mm,明显呈现前期速率大,堆载后有所减缓的形态,隆起速率由 0.24 mm/环降至 0.09 mm/环。
- d. 2 号车架经过期间,隧道变形趋于稳定。

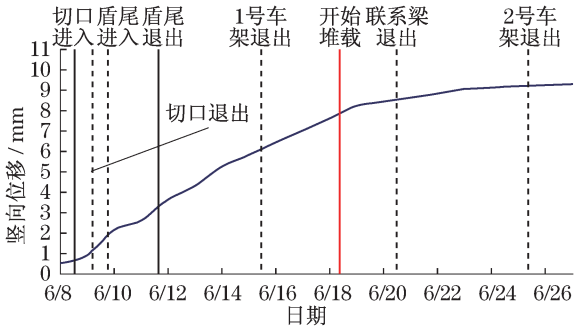


图 9 地铁 2 号线上行线隧道竖向位移时程图

Fig.9 Time chart of vertical displacement of metro line 2 uplink tunnel

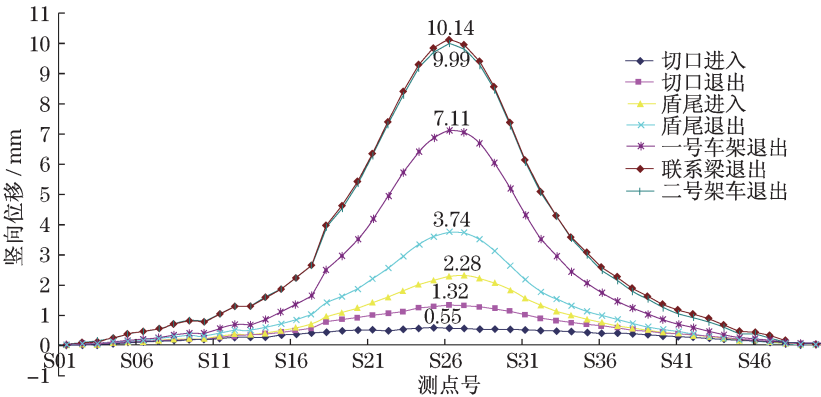


图 10 地铁 2 号线上行线隧道隆沉分布图

Fig.10 Distribution graph of verical displacement of metro line 2 uplink tunnel

## 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, 张方炜, 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.