

# 南京地铁旁通道冻结实测分析研究\*

李大勇<sup>1,2</sup> 吕爱钟<sup>1</sup> 张庆贺<sup>2</sup> 陈裕康<sup>3</sup>

(<sup>1</sup>山东科技大学土木建筑学院 泰安 271019) (<sup>2</sup>同济大学地下系 上海 200092) (<sup>3</sup>上海隧道工程股份有限公司 上海 200032)

**摘要** 南京地铁一期工程旁通道采用了冻结法施工, 施工中对冻结盐水温度、冻土温度、地表变形以及隧道变形等方面进行了监测。对监测成果进行分析研究, 指出依据某些监测成果可对冻土墙是否达到设计要求进行判别, 以此决定旁通道土体最佳开挖的时间; 并且获得了冻结盐水温度、冻土温度、地表变形以及隧道变形的变化规律, 在此基础上提出了旁通道冻结施工的建议。

**关键词** 隧道工程, 地铁, 旁通道, 冻结法

**分类号** TU 472.9, U 456 **文献标识码** A **文章编号** 1000-6915(2004)02-0334-05

## ANALYSIS OF FREEZING METHOD FOR CONSTRUCTION OF CONNECTED AISLE IN NANJING METRO TUNNELS

Li Dayong<sup>1,2</sup>, Lu Aizhong<sup>1</sup>, Zhangqinghe<sup>2</sup>, Chen Yukang<sup>3</sup>

(<sup>1</sup>Institute of Civil and Architecture Engineering, Shandong University of Science and Technology, Tai'an 271019 China)

(<sup>2</sup>Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092 China)

(<sup>3</sup>Shanghai Tunnel Engineering Construction Co. Ltd., Shanghai 200032 China)

**Abstract** The freezing method for the construction of connected aisle in Nanjing metro project is studied. During construction, the temperature in the salty water and frozen soil, the deformation of ground surface and tunnel were measured. Based on the measurement, the variation rules of the above variables are revealed and investigated and a guidance on the freezing method for the construction of connected aisle is proposed.

**Key words** tunneling engineering, metro, connected aisle, freezing method

## 1 前言

南京地铁 TA4 标盾构法区间隧道, 北起钓鱼台工作井北侧, 南至三山街车站南端头井, 由左线(下行线)和右线(上行线)隧道组成。隧道外径 6.2 m, 内径 5.5 m, 每块管片宽为 1.2 m, 厚为 0.35 m。旁通道位于两站区间隧道中间, 隧道中心埋深 13.13 m。旁通道及泵站采取合并建造模式, 它既保证上、下行隧道间的联络作用和必要时乘客安全疏散的功

能, 又起到地铁运营中两车站之间的集、排水作用。工程结构由两个与隧道相交的喇叭口、通道以及集水井等组成。旁通道土体开挖前, 必须对其周围土体进行加固, 土体加固的方法常用的有深层搅拌法和冻结法。目前, 冻结法在国内地铁建设中得到了广泛应用<sup>[1~3]</sup>, 积累了一定的成功经验。南京地铁一期工程 TA4 标旁通道采用了冻结施工, 并取得了圆满成功。本文根据南京地铁旁通道的现场监测资料, 分析研究了土体最佳开挖时间, 并且获得了冻结盐水温度、冻土温度、地表变形以及隧道变形的

2003年5月24日收到初稿, 2003年7月3日收到修改稿。

\* 中国博士后科学基金(2003033333)及国家自然科学基金(50279018)资助项目。

作者 李大勇 简介: 男, 1971年生, 博士, 1998年毕业于浙江大学土木系水工结构专业, 现任副教授、在站博士后, 主要从事岩土工程的科研与教学工作。电话: 013053878871; E-mail: ldy@sdust.edu.cn。

变化规律, 在此基础上提出了旁通道冻结施工的建议, 希望能对以后的旁通道冻结法施工提供借鉴和指导。

## 2 工程地质状况

旁通道工程地质资料如表 1 所示。地下水主要为孔隙潜水或弱承压水, 埋藏浅, 水位一般于地下 1~2 m。

## 3 水平冻结设计

### 3.1 冻结管的布置

从表 1 看出, 土层平均渗透系数小, 透水性差, 并且含有粉砂层, 比较有利于采用冻结法施工。经研究采用“隧道内钻孔冻结加固, 矿山法暗挖构筑”的施工方案。根据冻结帷幕设计及旁通道的结构, 冻结孔的倾角采用上仰、近水平、下俯 3 种角度布置, 开孔间距为 0.6~0.7 m, 冻结孔数 58 个。冻结孔的布置见图 1 所示。

### 3.2 冻结参数

选用 YSLGF300 II 型螺杆压缩机一台套, 设计制冷量为 20 833 kJ/h, 电机功率 110 kW。地层冻结供冷工艺参数和指标为: 积极冻结盐水温度为 -28~-30℃; 冻结孔单孔流量不小于 4 m<sup>3</sup>/h; 设计冻结帷幕交圈时间为 20 d, 达到设计厚度时间为 30 d; 积极冻结时间为 30 d, 维护冻结时间为 35 d。

测温孔 10 个(4 个兼作卸压孔)。冻结系统辅助设备: (1) 盐水循环泵选用 IS125-100~200 型 2 台, 流量 200 m<sup>3</sup>/h, 电机功率 45 kW, 其中一台备用; (2) 冷却水循环选用 IS125-100~200C 型 2 台, 流量 120 m<sup>3</sup>/h, 电机功率 30 kW, 其中一台备用。冷却塔选用 NBL-100 型一台, 补充新鲜水 15 m<sup>3</sup>/h。

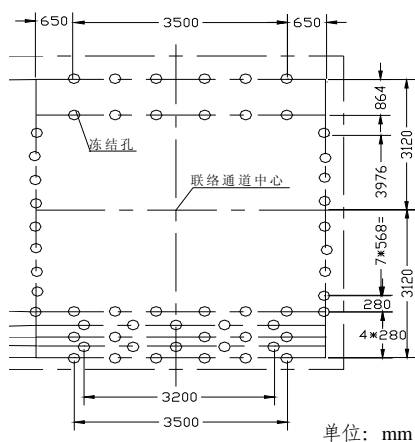
## 4 测试的内容及目的

(1) 冻结孔施工中, 由于土体开挖会引起地表的沉降; 在冻结过程中由于冻土的冻胀性反而引起地表的隆起。较大的地表沉降或隆起都会导致地面或地下设施的破坏, 为了控制地表的变形量不至于过大, 保护其他设施免遭破坏, 在旁通道地面进行

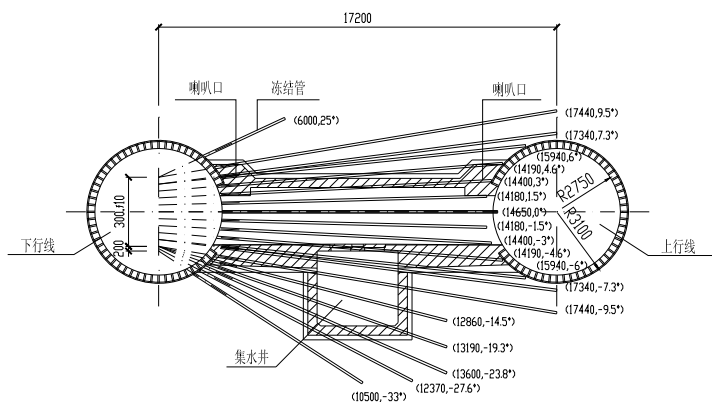
表 1 土层物理力学参数

Table 1 Physico-mechanical parameters of soils

土层名称	土层厚 / m	含水量 $\omega / \%$	天然重度 $\gamma / \text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$	压缩模量 $E_s / \text{MPa}$	粘聚力 $c / \text{kPa}$	内摩擦角 $\varphi / (^\circ)$	渗透系数 $k / 10^{-6} \text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$
杂填土①-2b3-1	3.5	34.7	18.0	4.36			12.7
粉土②-1-1c3	2.1	33.5	18.3	7.04	23	22.8	4.23~7.02
淤泥质粉质粘土②-2-1b3-4	6.4	37.8	17.7	3.71	11	9.6	1.03~6.67
粉砂②-2-2d3	3.8	32.1	18.5	9.63	11	30.7	7.31~256
粉质粘土③-2-3c2-3	4.5	28.0	19.1	7.06	61	9.1	2.6



(a) 冻结孔布置的横断面图



(b) 冻结孔布置的纵断面图(括号内数字为孔长及倾角)

图 1 冻结孔布置

Fig.1 Installation of freezing holes in soils



布点跟踪监测。

(2) 为了对去回路盐水温度控制, 以及保证冷冻设备正常进行, 对盐水温度进行监测, 同时, 在一定程度上也能反映土体的冻结情况。

(3) 为了掌握土体的冻结情况, 进行冻土柱交圈的判断, 以及评判冻土墙厚度、强度是否达到冻结设计的要求, 以确定钢管片打开的时间、土体开挖的时间, 对冻土温度进行检测。

(4) 为了掌握冻土冻涨、冻融对隧道的影响, 对管片进行布点检测了解其水平与竖向位移变化情况。

### 5 监测成果分析

整个工程实际施工工期主要为: 58 个钻孔施工历时 12 d, 土体开挖前积极冻结时间为 39 d, 维护冻结时间为 34 d, 冻结时间总共为 73 d, 跟踪注浆时间为 2 d, 设备拆除用时 2 d。

#### 5.1 盐水温度监测分析

冻结工程于 2002 年 11 月 29 日开机冻结, 以 2# 冻结管为例(其余冻结管类似), 其去、回路盐水降温曲线如图 2 所示。从图 2 中可看出, 最初降温幅度较大, 到 2003 年 1 月 7 日(冻结第 39 d)盐水的去、回路温度差降低到低于 0.5℃, 去、回路盐水温度相差无几, 说明地层的热负荷降低较少, 冻土帷幕形成良好。

#### 5.2 土层温度监测分析

在上、下行线隧道旁通道洞口两侧共布置 10 个测温孔(在下行隧道中布置了 4 个, 上行隧道中布置了 6 个), 土体开挖是从下行隧道开始的, 每个测温孔内设 3 个测点, 每个测点间距 600 mm, 测温孔深为 2 m。测温孔布置如图 3 所示。

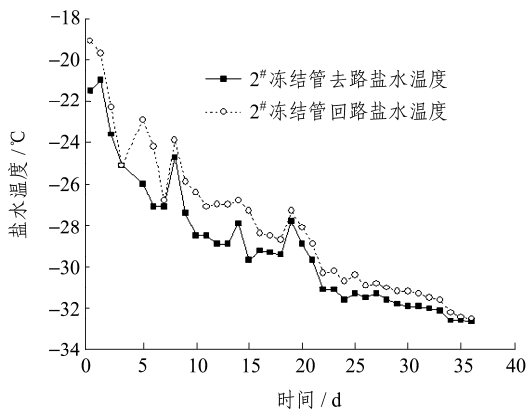


图 2 2#冻结管盐水温度与时间关系

Fig.2 Correlation between the temperature of salty water in freezing pipe and time

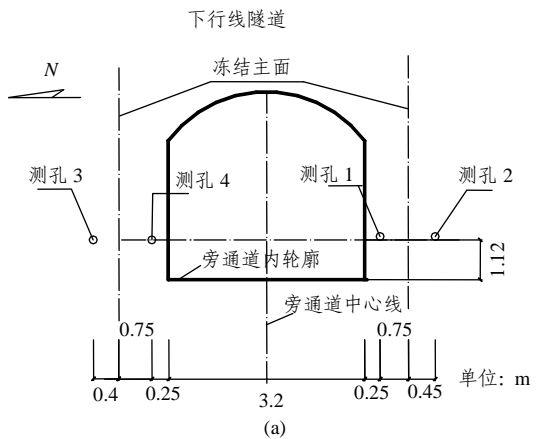
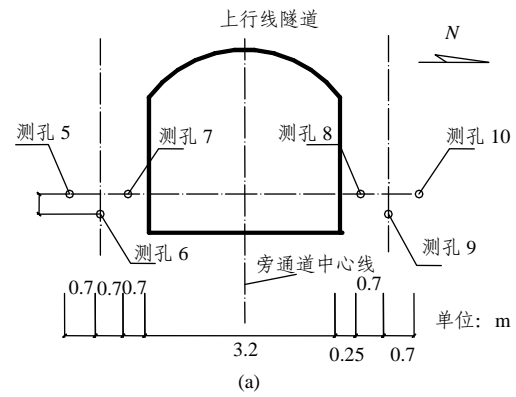


图 3 土体测温孔平面图

Fig.3 Plan of temperature holes in soils

实测结果如图 4~6 所示。以 1# 测孔为例, 图 4 表, 同一孔内 3 个测点的温度虽相差不大, 但也呈现出孔越深温度降低得越大的趋势, 这主要是由于孔越浅, 即距离外部环境越近, 热交换就越大的缘故; 图 5, 6 显示的土体各点处的降温趋势相似, 3# 测孔距冻结主面 400 mm, 降温幅度最大, 到 2002 年 12 月 14 日其温度降到 -0.5℃, 此时冻结 15 d, 经计算, 冻土平均发展速度为 26.7 mm/d; 2# 测孔距冻结主面 450 mm, 12 月 19 日其温度降到 -0.2℃, 此时冻结 20 d, 冻土平均发展速度 25.0 mm/d; 上行线隧道测温孔呈对称布置的, 图 6 反映

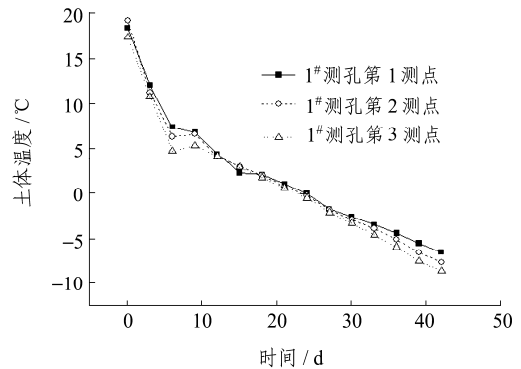


图 4 1# 测温孔 3 个测点温度与时间的关系

Fig.4 Correlation between soil temperature and time in hole 1#

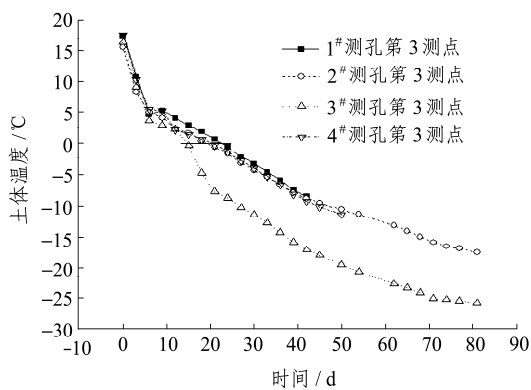


图5 下行线土体测孔温度随时间的关系

Fig.5 Correlation between soil temperature and time in down-tunnel

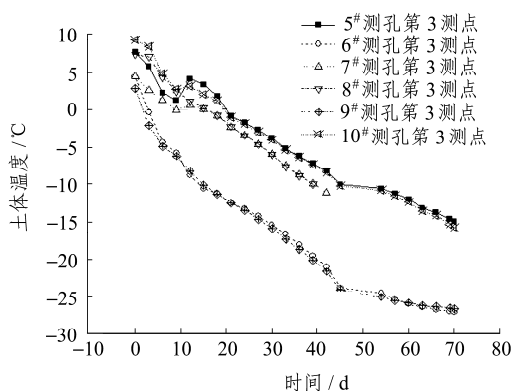


图6 上行线土体测孔温度随时间关系

Fig.6 Correlation between soil temperature and time in up-tunnel

处对称孔的温度，几乎一致，说明冻结是均匀的，冻土情况良好；5#测孔距冻结主面 700 mm，12月27日其温度降到 $-0.2^{\circ}\text{C}$ ，此时冻结 27 d，冻土平均发展速度 27.8 mm/d。到实际开挖时间 2003 年 1 月 8 日(冻结时间 39 d)，冻土发展厚度 2.06 m，超过设计厚度 0.46 m。

### 5.3 地表变形监测分析

测点布置如图 7 所示，各测点之间的距离为 5 m。从图 8 可以看出，在钻孔、安装冻结管阶段地表呈逐渐沉降现象，直至达到最大沉降值，这是由于钻孔挖土造成的。从冻结初期，随后出现隆起现象，这符合冻土冻结特性，积极冻结 26 d 时(12月24日)，地面隆起变形趋于稳定，说明冻土结构的扩展速度变缓慢，可判断冻土帷幕已经形成、并达到了足够的强度。地表变形的变化规律与文[2]的结果有一致性，文[2]测试结果中，冻结过程地表也表现了隆起，但隆起幅度没有本工程大，即没有出现正值，与初始地面标高比仍处于沉降状态。这说明地表的变形大小与旁通道的埋深有关(也即与冻结

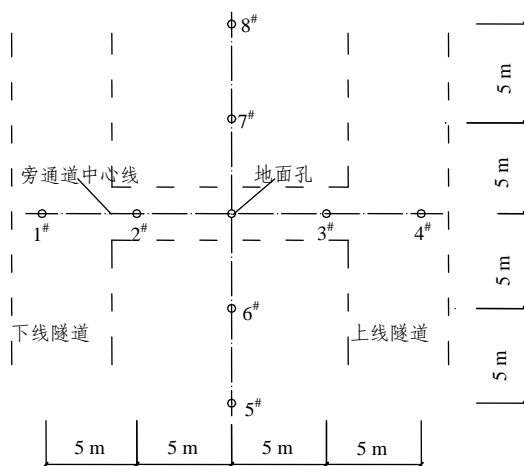
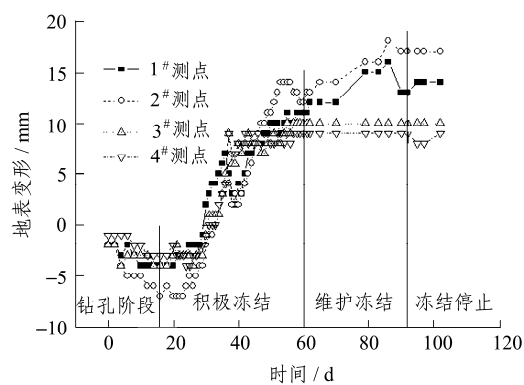
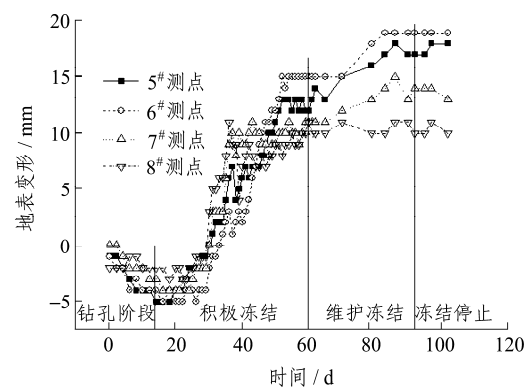


图7 旁通道地表变形测点布置

Fig.7 Distribution of survey points on the ground surface above aisle



(a) 纵向测点



(b) 横向测点

图8 地表变形随时间的变化关系

Fig.8 Correlation between deformation of ground surface and time

管的埋深有关)，文[2]报道的旁通道埋深为 23.2 m，属于较大埋深。另外，图 7 中不同测点的变形不同，这与冻结管的布置是有关，冻结管密度较大的地方沉降较大，同时，冻结过程中隆起的幅度也较大。在维护冻结阶段进行土体开挖，临时支护与 2

次支护，此间仅 3<sup>#</sup>，4<sup>#</sup> 测点变化较小，其余各地呈不同程度的隆起，说明在土体开挖过程中，土体并没有因为卸载而发生沉降，所有的土压力仍被冻土墙所承担，而支护结构并没受力，因此，对于土体开挖具有足够的安全保证。冻结停止阶段，由于采取了注浆措施地表变形平稳，说明注浆效果较好。

### 5.4 隧道衬砌变形监测分析

隧道变形通过量测管片的水平和垂直位移来反映。测点位于隧道冠顶，间距为 3 m。图 9 说明冻结过程中，隧道受冻土膨胀的冻土力影响，发生相对旁通道的外移，解冻过程中又有复位的趋势。图 10 也说明，受冻土膨胀力的影响，隧道发生了上浮现象，并且上浮最大位移达到 32 mm，隧道上浮主要由下覆冻结土体的膨胀引起的，同样在解冻过程中发生了复位现象。目前，在旁通道冻结施工中，为了减少冻胀对地表及隧道的影响，通常采用开挖断面内设置 2 个卸压孔的方法<sup>[2]</sup>，本工程也进行了如此设置。其实这种施工措施的效果不大，土体冻结过程中冻土是向四周方向膨胀的，在开挖断面内设置卸压孔只能对旁通道内土体压力有所减轻，利于挖土，但对隧道及地表的变形影响较小。从图 9，

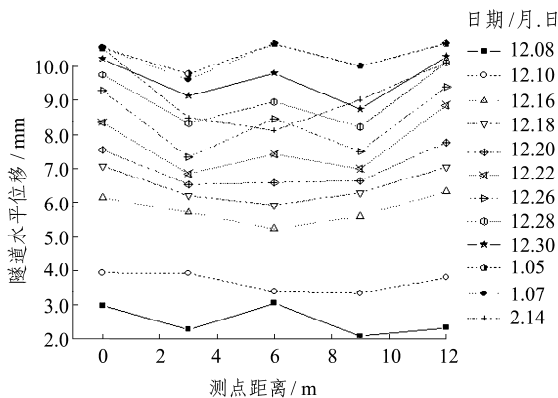


图 9 隧道水平位移

Fig.9 Horizontal displacements of tunnel

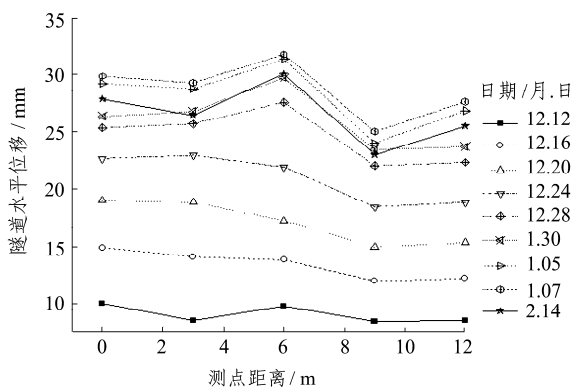


图 10 隧道竖向位移

Fig.10 Vertical displacements of tunnel

10 的隧道变形量中可以得到例证，如此大的变形，以致某些管片环缝处发生渗漏现象。但卸压孔能起到探孔的作用，即在打开钢管片之前，通过观察卸压孔流水、流泥情况，判断开挖断面内土体的含水情况，若无较大的流水或流泥现象，也可判断冻土帷幕形成良好。

## 6 结 论

(1) 对去、回路盐水温度监测，根据去、回路温差，可以初步判断冻土的冻结情况，即温差越小，土体冻结情况越好、越稳定。

(2) 对冻土温度直接监测可以获得可靠的冻土温度，合理的布点监测也能获得冻土温度分布，由此进行冻土墙厚度的判断。

(3) 旁通道地表点的沉降变化，反映了冻土的变化特性。冻土一直隆起，说明冻土范围逐渐扩大，温度逐渐降低；地表变形稳定说明，冻土体积膨胀稳定，冻土墙厚度不再扩展，冻土温度稳定；地表点沉降说明冻土温度上升。

(4) 根据以上 3 部分的监测情况可以确定旁通道土体的开挖时间，理想的土体开挖时间应为 2002 年 12 月 24 日，即积极冻结第 25 d，而实际开挖时间为 2003 年 1 月 8 日，应比实际开挖时间提前半月。在土体开挖过程中也证实了这一点，因为冻结时间过长，致使旁通道内土体的开挖困难，一天 24 h 连续作业，开挖进尺不足 1 m。在以后工程中要加以注意此问题，这就要求认认真真做好监测工作，细致分析好监测成果，让监测成果真正起到施工中的指导作用，避免工程过于保守而造成没有必要投入。

(5) 通常的卸压孔设置方法，对减少隧道及地表的变形几乎没有明显作用。笔者认为可以从地面沿隧道走向做一排竖向卸压孔，可有效减少隧道的水平与竖向位移，同时也要做好竖向卸压孔的保温问题，这也需要在以后工程中进行验证。

## 参 考 文 献

- 1 周晓敏, 苏立凡, 贺长俊等. 北京地铁隧道水平冻结法施工[J]. 岩土工程学报, 1999, 21(3): 319~322
- 2 马玉峰, 苏立凡, 徐兵壮等. 地铁隧道旁通道和泵站的水平冻结施工[J]. 建井技术, 2000, 21(3): 39~41
- 3 郭晓江. 冻结法在广州地铁二号线暗挖隧道中的应用[J]. 煤炭工程, 2001, (12): 27~29