

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20211120044

城市能源隧道开发潜力及效益分析*

毕金锋^{1,2}, 姜弘¹, 丁文其², 包鹤立¹

(1. 上海市城市建设设计研究总院(集团)有限公司, 上海 201300; 2. 同济大学土木工程学院, 上海 200092)

摘要: 城市地区土地资源稀缺, 使得20世纪以来城市地下空间的开发利用得以蓬勃发展。地下基础设施除了实现结构功能外, 还可以作为浅层地热能采集系统与地层进行热量交换。在城市地区, 交通隧道比建筑基础具有更广阔的作为能源地下结构的利用空间。以上海地铁为例, 根据上海市的水文和地质环境, 研究以城市尺度进行能源隧道建设的地热能开发潜力及其经济与社会效益。结果表明, 与上海市2030年规划地铁线路同等规模的能源隧道的年度采集能量总量可达35亿kWh, 经济收益超过15亿元, 每年可减少CO₂排放量200万t以上, 相当于上海市20%的住宅取暖或制冷所需的总能量, 投入成本在10年左右可回收, 说明能源隧道拥有巨大的开发潜力和广泛的应用前景。

关键词: 城市地铁; 能源隧道; 开发潜力; 效益分析

中图分类号: TU443 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2022)05-0897-08

Analyses on Potential and Benefit of Urban Energy Tunnel Development

BI Jinfeng^{1,2}, JIANG Hong¹, DING Wenqi², BAO Heli¹

(1. Shanghai Urban Construction Design and Research Institute (Group) Co. LTD., Shanghai 201300, China;

2. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Due to land constraints in urban areas, the development of urban underground space has flourished since the 20th century. In addition to fulfilling structural functions, underground infrastructure can also serve as a shallow geothermal energy harvesting system for heat exchange with the ground. In urban areas, transportation tunnels have a much wider scope for utilization as energy geostructures than building foundations. Based on the geological and hydrogeological environments of Shanghai metro, the geothermal energy development potential and economic and social benefits of energy tunnel construction are studied at the urban scale in this paper. The results show that the total annual energy harvesting of energy tunnels of the same scale as the planned metro lines in 2030 in Shanghai can reach 3.5 billion kWh; the economic return is nearly 1.5 billion RMB and the CO₂ emissions can be reduced by more than 2 million tons per year; the energy collected is equivalent to the total energy required to heat or cool 20% of the homes in Shanghai, and the investment cost can be recovered in about 10 years. These indicate the huge exploiting potential and the broad application prospects of energy tunnels.

Keywords: urban subway; energy tunnel; geothermal potential; benefit analysis

* 收稿日期: 2021-10-20; 修回日期: 2021-12-07

基金项目: 上海市科学技术委员会科研计划项目(19DZ1200903)、国家重点研发计划项目(2016YFC0401908)资助

作者简介: 毕金锋(1988—), 男, 助理研究员, 博士。主要从事地下空间结构方面的研究。E-mail: jf.bi@qq.com

通讯作者: 姜弘(1969—), 男, 教授级高工, 硕士。主要从事城市隧道建设方面的研究。E-mail: jianghong@sucdri.com

引言

目前,全球正在面临着环境破坏、气候变暖等方面的严峻挑战,能源需求也正在成为影响人类社会发展的关键制约条件。为应对气候变化,2020年9月,习近平主席在第七十五届联合国大会一般性辩论上提出了“2030年前实现碳达峰、2060年前实现碳中和”的重大战略目标,也为我国带来了一场清洁能源技术发展的能源革命。

地热能作为一种可再生的清洁能源形式,已经在全世界内不同国家不同地区得到了广泛应用。能源地下结构将结构功能与地热采集功能相结合,是一种采集地热能的常见方式,深基础、浅基础、地下连续墙、隧道衬砌和锚杆等均可作为地下能源结构使用,采集的地热能不仅可以在冬季从地下提取热量进行供暖,也可以在夏季将热量注入地下实现制冷功能。

城市是能源消耗主体,全世界约有80%的能量消耗集中在城市内,所以加快推进城市地热能等清洁能源的利用,可有效降低城市碳排放量、解决环境污染问题。由于城市的土地资源紧张,在现有环境下难以利用能源桩或能源墙大规模进行地热能开采,而近年来,随着地下空间的开发,地下公路、铁路隧道的可利用空间更为广泛,使得通过衬砌结构进行采热的能源隧道成为一个新的研究热点。与能源桩或能源墙相比,能源隧道内具有大量可用于换热的结构—土壤接触面,具有传热效果好、换热效率高、占地面积小、建设成本低等优点。

钱七虎^[1]在对城市地下空间发展的综述中将能源隧道视为绿色建筑与绿色城市建设的一个重要举措。严金秀^[2]也认为能源隧道是世界隧道工程技术发展主流趋势之一。目前能源隧道技术在很多国家中得到了发展和应用。世界上第一个能源隧道是2004年建设的奥地利维也纳的Lainzer隧道,换热管路安装在土工布内,并将土工布设置在初期支护与二次衬砌之间,同时实现换热和防水的作用;据预测,在每一个采热周期内可收集的能量达到214 MWh,该工程也作为示范工程推广应用到其他奥地利的新建地铁项目中^[3-4]。2007年11月德国也在某高速铁路隧道中安装了五环换热管片,并于2009年5月至9月进行了现场试验^[5]。试验结果被应用在奥地利Jenbach市的12 m管径的双向高铁隧

道中,能源隧道总长54 m,可为市政大楼提供40 kW功率的能量^[5-6]。意大利也在都灵地铁一号线的南部延伸段中使用了能源隧道,该隧道为TBM隧道,在位于Lingotto—Bengasi段内的两环管片进行了现场试验,功率达到 $51.3 \text{ W/m}^{2[7-11]}$ 。

国内也有学者对能源隧道进行了研究,夏才初等^[12-13]利用数值模拟方法,分析了利用地源热泵对隧道洞口段初衬和排水系统进行加热的效果,以及换热管路对隧道结构的影响;张国柱等^[14-16]及G. Zhang等^[17-19]对内蒙古博牙高速林场隧道地源热泵供热系统进行了理论及试验研究,分析了不同参数对能源隧道换热能力的影响;张国柱等^[20]在内蒙古扎敦河隧道内进行了200 m取热段的试验,其换热管路埋设在隧道初衬与复合式防水板之间,预计在整个供暖期间每平米的取热量可达到93.92 MJ。G. Zhang等^[21-22]还对能源隧道进行了室内试验,研究了不同影响因素下能源隧道的换热性能,为能源隧道的性能提供了大量的试验成果。目前国内外的能源隧道的建设仍处于试验阶段,还没有实际工程大规模应用的案例。

上海市目前地铁线路里程数达到772 km,位居全球第一,根据上海市城市轨道交通第三期建设规划,至2030年上海市地铁运营规模将达到1 055 km。本研究从城市尺度对上海城市地铁的地热能采集潜力进行分析,根据上海市地下水和地层温度分布情况,初步估算了与上海市2030年规划地铁同等规模的能源隧道的年采热量及经济效益,为评估城市能源隧道的地热能开发潜力及其带来的经济与社会效益提供参考。

1 上海市地热能及地下水分布特点

影响能源隧道采热效率的环境因素有很多,如地层物理特性、隧道埋深、隧道内空气流速、地下水渗流情况、地层温度等,在特定的地层内,地下水渗流以及地层温度是对采热效率影响最为显著的两个因素^[9,23]。

1.1 上海市地层温度分布特点

图1为2020年上海市的月平均气温变化曲线。图2~图4分别为上海市规划和自然资源局公布的《2016年上海地质环境公报》^[24]中,上海市不同深度下的地层温度、恒温层的温度分布图和百米温升分

布图。因为目前通往崇明区的地铁尚在建设中,所以在分析中不包括上海市崇明区。图中的上海市代表上海市中心城区,包括黄浦区、徐汇区、长宁区、杨浦区、虹口区、普陀区、静安区七个行政区域。

从图2中可以看出,离地表越深,温度的变化幅度越小,且随着深度的增加,温度极值的出现越滞后,从地表往下6 m的地层中,温度已经趋于稳定,平均温度为17.4 °C,最高温度与最低温度的差约为0.5 °C。而上海市地铁区间的埋深在10 m以上,所以可以认为所有地铁隧道均处于恒温层内。若需要变温层内的温度分布,可根据图2监测数据插值获取,也可以根据R.Lemmela等^[25]提出的变温层温度计算公式得到。

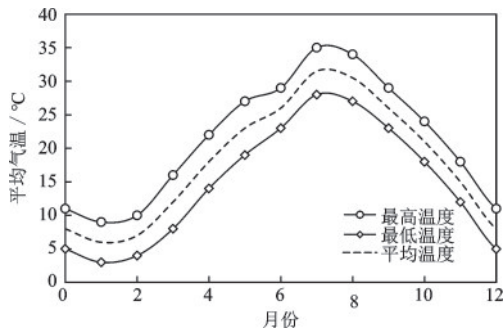


图1 2020年上海市月平均气温变化曲线

Fig.1 Monthly average temperature in Shanghai in 2020

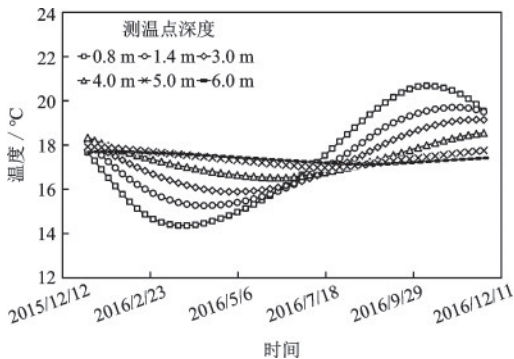


图2 典型监测孔变温层温度动态变化曲线^[24]

Fig.2 Temperature of typical monitoring holes in the variable temperature formation^[24]

图3显示了上海市恒温地层中的温度分布情况,在嘉定区、宝山区和上海市城区的交界处温度较高,而在浦东新区的南部温度较低。从图4中可以看出地层的百米温升率分布与温度分布没有直接关系,在奉贤区和松江区的中部以及嘉定区和宝山区的交界处的温升较大,而在闵行区、松江区及奉贤区的交界处以及浦东新区的中部的温升较小。

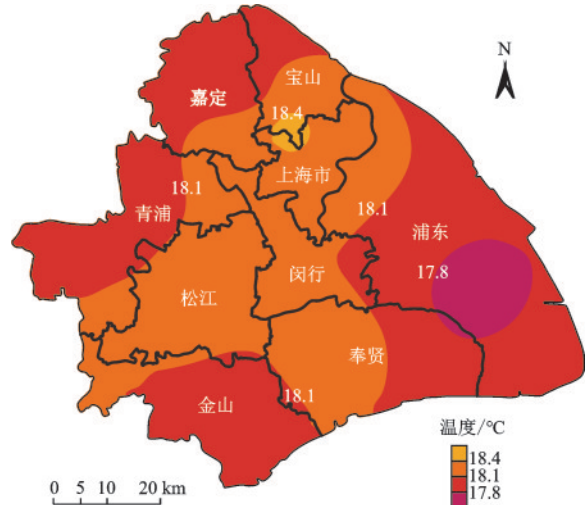


图3 上海市恒温层温度分布^[24]

Fig.3 Temperature distribution contour of the thermostatic layer in Shanghai^[24]

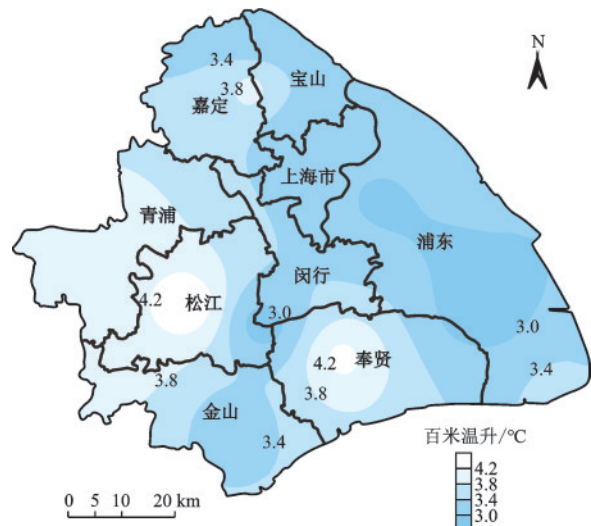


图4 上海市地层百米温升率^[24]

Fig.4 Shanghai stratigraphic temperature rise rate in 100 m^[24]

1.2 上海市地下水位分布特点

图5为上海市潜水含水层地下水位的分布图,数据来源于《2016年上海地质环境公报》^[24]。除了金山区和浦东新区靠近杭州湾一侧出现了低水位区之外,在城区及浦东新区的北部还出现了两个低水位漏斗区。上海市的潜水层厚度约为20~50 m,所有地铁隧道均位于潜水层内。

2 上海市地铁隧道地热能开发潜力

2.1 上海市地铁分布

上海市是我国内地第三座开通地铁的城市,第

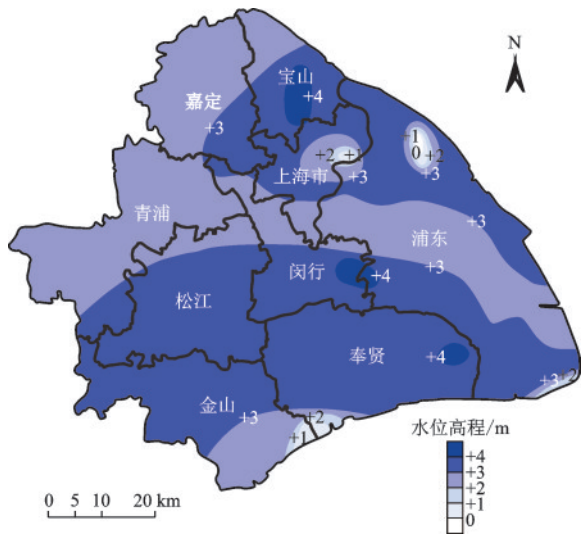


图5 低水位时上海市潜水含水层地下水位分布^[24]

Fig.5 Distribution of groundwater levels in the Shanghai submerged aquifer at low water levels^[24]

一条地铁线路地铁1号线于1993年5月28日正式运营。目前已经建好的地铁线路包括1~18号线及位于8号线延长线上的浦江线;在建项目包括2号线西延伸段、13号线西延伸段、17号线西延伸段、崇明线一期;拟建线路包括1号线西延伸段、19号线、20号线一期、21号线一期、23号线一期和崇明线2期;规划中的路线包括22号线、24号线、25号线和26号线。根据上海市城市轨道交通第三期建设规划,至2030年,上海市地铁运营规模将达到1 055 km。图6为上海市地铁1~18号线及浦江线的分布图。

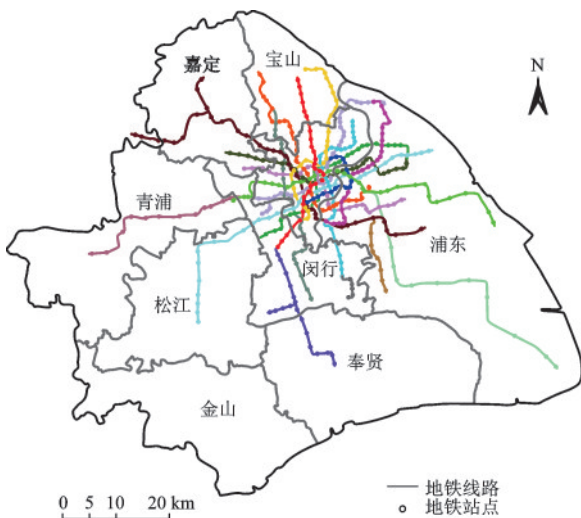


图6 上海市已建地铁线路分布

Fig.6 Distribution of existing metro lines in Shanghai

2.2 城市能源隧道采效率计算方法—以上海为例

因为仅利用图3~图5中的等值线,不能很好地

描述上海地区的温度场及渗透场分布,下面将利用有限元法估计上海市的温度 T 和地下水位 H 的分布情况。

对于低速的多孔介质渗流而言,其连续性方程可表示为:

$$\frac{\partial(\phi\rho_w)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_w \mathbf{u}) = Q_f \quad (1)$$

式中, ϕ 为土体的孔隙率; ρ_w 为水的密度; \mathbf{u} 为地下水渗流的速度矢量; Q_f 为源项。

而多孔介质中的热传导方程可表示为:

$$(\rho C_p)_e \frac{\partial T}{\partial t} + \rho_w C_{pw} \mathbf{u} \cdot \nabla T - \nabla \cdot k_e \nabla T = Q_h \quad (2)$$

式中, $(\rho C_p)_e$ 为土体的单位体积的等效比热容; C_{pw} 为水的比热容; k_e 为土体的等效导热系数; T 为温度; Q_h 为热源。

观察可以发现,在材料参数为常数时,无论是热传导还是地下水渗流的控制方程,可以近似通过下式表达:

$$\alpha \frac{\partial A}{\partial t} + \beta \mathbf{u} \cdot \nabla A - \kappa \nabla \cdot \nabla A = Q \quad (3)$$

式中, α 、 β 和 κ 分别为材料的热传导参数或渗流特性参数; \mathbf{u} 为速度矢量; Q 为源项 Q_f 或 Q_h ;A为因变量,对于热传导A为温度 T ,对于渗流过程A为压力 p 。

因为地层温度及地下水位分布的时间变异性较小,所以假设为稳态;在上海地区表层软土以黏土和粉质黏土为主,土体的渗透系数较小,故在热传导过程中忽略地下水流的作用,且令源项 Q 等于0,则无论是温度场还是压力场,都可以利用Laplace方程表达:

$$\Delta A = 0 \quad (4)$$

在有限元计算中,以公式(4)为控制方程,以图3和图5中的等值线为内部边界约束条件,外侧边界设置为绝热或不透水边界条件,分别计算恒温层温度场 T 和地下水压 p 。因为是稳态计算,初始值不影响计算结果,这里设置为 $A = 0$ 。图7为温度场计算模型的边界设置情况及网格尺寸分布情况。图7中的颜色深浅代表网格大小,在靠近模型中间位置的网格略粗,最大尺寸达到1.2 km,而在边界处,为了拟合复杂的边界形态,网格较细,尺寸在0.2 km以下。整个模型的网格均为三角形网格,总网格125 711个。在进行地下渗流场的模拟中,模型设置与温度场类似。

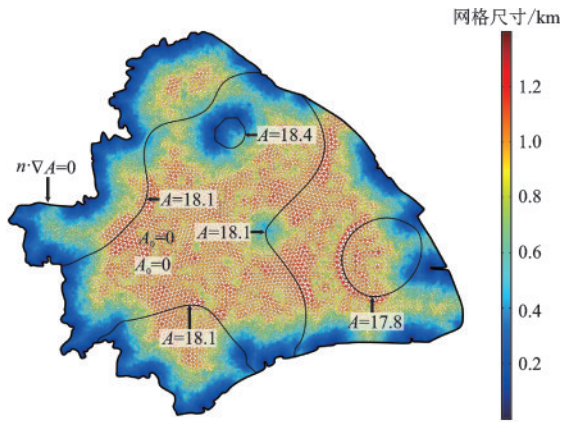


图7 温度场计算模型边界设置及网格尺寸
Fig.7 Model boundary settings and mesh size (km) for temperature modelling

根据上海地层特性,模型中所涉及到的材料参数取值如下:土体的渗透系数 $\kappa = 1 \times 10^{-6}$ m/s,密度 $\rho = 2000$ kg/m³,孔隙率 $n = 0.2$,热导率 $\lambda = 1$ W/(m·K),比热容 $C = 1000$ J/(kg·K),水的密度 1000 kg/m³,粘滞系数 $\mu = 1 \times 10^{-3}$ Pa·s。

假设地层温度梯度 G_T 也满足式(4),则整个地层的温度分布可由下式计算:

$$T = T_i + \frac{z}{h} G_T \quad (5)$$

式中, z 为地层中任意点到恒温层上表面的距离;因为 G_T 为百米温升率,所以 $h = 100$ m。

由公式(5)计算得到的恒温层 100 m 范围内的温度分布如图 8 所示。

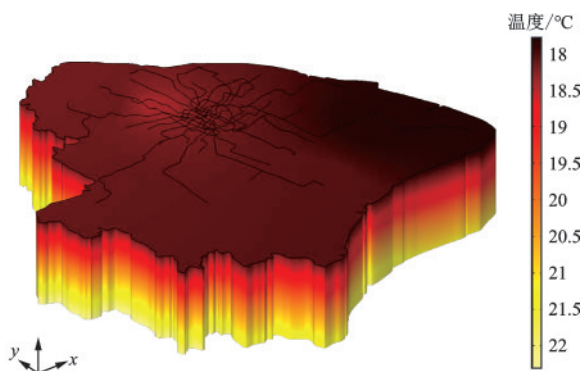


图8 恒温层 100 m 深度范围内的温度分布情况
Fig.8 Temperature distribution within 100 m depth

由公式(4)得到的地下水位如图 9 所示。

从图 9 中可以看出,在数据有限的情况下,利用这种方法可以初步估计温度场或者地下水位的分布,尤其是对地下水的渗流方向可以得到一个基本

判断。但是在闭合的最高或最低等值线转成的区域内,形成了等值区域,如图 9 中三个地下水位为 4 的等值线范围内,以及模型中间被地下水位为 3 的等值线与模型边界围成的区域内,因为地下水位在整个区域内没有梯度,所以没有地下水流动。

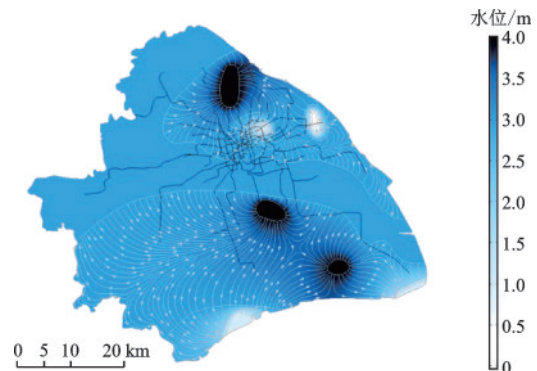


图9 利用有限元法计算得到的地下水位分布情况
Fig.9 Distribution of groundwater levels obtained using the finite element method

意大利都灵理工大学的 A.Di Donna 等^[23]对不同热导率、地层温度和地下水流速情况下盾构能源隧道的换热效率进行了数值分析,并提出了冬季采暖和夏季制冷两种情况下能源隧道的换热效率图,如图 10 所示。

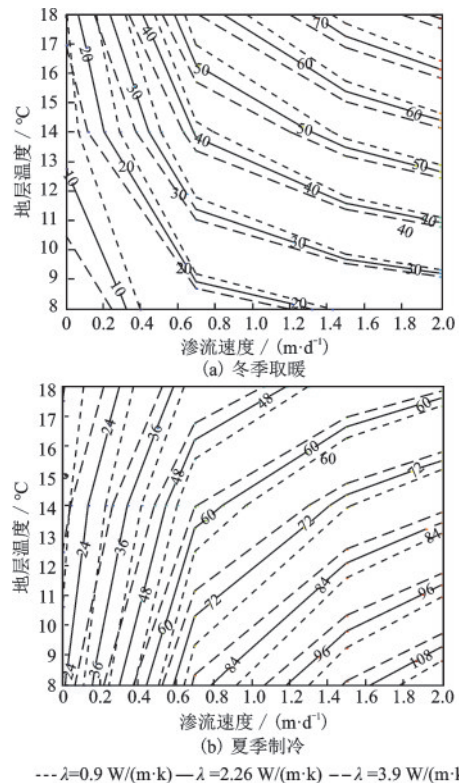


图10 冬季采暖和夏季制冷模式的换热效率 P_e (W/m²)^[23]
Fig.10 Heat transfer efficiency P_e (W/m²) in winter heating and summer cooling modes^[23]

图 10 中的结果为渗流方向与隧道走向垂直的情况,得到的换热效率 P_e 为能源隧道可达到的上限值。对于特定的地层条件下,地下水的流动方向可能与隧道走向呈一定夹角,假设地下水流动方向与隧道走向平行时,能源隧道的换热效率与地下水无流动的情况下相同,则通过计算得到渗流方向后,可通过地层温度、渗流速度和土体的热导率插值计算出不同情况下的单位面积的换热效率 P_s 为:

$$P_s = P_e(T, |\hat{n} \cdot \hat{v}|, \lambda) \quad (6)$$

式中, \hat{n} 为隧道的单位法向; v 为渗流速度矢量; \hat{v} 为归一化后的渗流速度矢量; $v = \|v\|$ 为渗流速度的大小。

由此可以通过内积 $\hat{n} \cdot \hat{v}$ 获得隧道走向与渗流方向的角度:当二者相互垂直时, $|\hat{n} \cdot \hat{v}| = 1$; 当二者平行时, $|\hat{n} \cdot \hat{v}| = 0$ 。

为简化计算,在模拟过程中将隧道简化为一维模型。则按双线隧道计算,能源隧道的线功率可表示为:

$$P_L = 2CP_s \quad (7)$$

式中,系数 2 代表两条线路; $C = 2\pi R$ 为隧道周长, R 为隧道半径,根据上海地铁隧道的规格,取 3 m。全部地铁隧道的总功率为:

$$P_t = \int_l P_L dl \quad (8)$$

式中, l 为地铁隧道长度。

在指定工作模式下,在时间 t_w 工作时间内的总能量可通过取暖和制冷的工作时长计算得到:

$$E_t = P_{th}t_h + P_{tc}t_c \quad (9)$$

式中, P_{th} 和 P_{tc} 分别为取暖和制冷模式下的总功率; t_h 和 t_c 分别为取暖和制冷模式下的工作时间,且满足 $t_h + t_c = t_w$ 。

采热量的计算流程如图 11 所示。

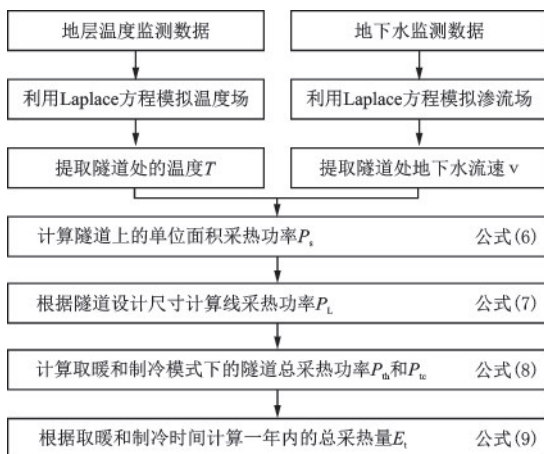


图 11 能源隧道采热效率计算流程

Fig.11 Flow chart for calculating the thermal efficiency of energy harvesting

2.3 上海市地铁同等规模能源隧道采热量及效益

上海市地铁区间地下隧道埋深最浅为 11 m,越江段最深达 35 m,但是每一区间段的具体埋深数据不详,为了简化分析,在分析中,不区分地上部分和地下部分,将所有地铁隧道的埋深设置为相同值,分析不同埋深下的能源隧道采热量。按保守情况估计,如果将地层温度取为 18°C ,地下水渗流速度取为 0,地层的热导率取为 $1\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 时,根据公式 (6) 计算得到的冬季采热和夏季制冷功率 P_s 分别为 $12.46\text{ W}/\text{m}^2$ 和 $8.85\text{ W}/\text{m}^2$,对应的线功率 P_L 分别为 $470\text{ W}/\text{m}$ 和 $334\text{ W}/\text{m}$ 。

下面对不同环境参数情况下的能源隧道采热效率进行分析,隧道埋深 D 取 15、20、25 m,土体的渗透系数 κ 取 $1 \times 10^{-4}\text{ m/s}$ 、 $1 \times 10^{-5}\text{ m/s}$ 和 $1 \times 10^{-6}\text{ m/s}$,土体的热导率 λ 取为 1、2、3 $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 。图 12 和图 13 分别为 $D=15\text{ m}$ 、 $\kappa=1 \times 10^{-4}\text{ m/s}$ 和 $\lambda=1\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 时的能源隧道在取暖和制冷下的线功率 P_L 在不同地铁线路上的分布情况。

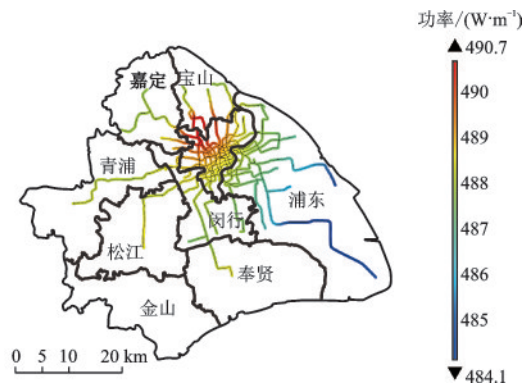


图 12 $D=15\text{ m}$ 、 $\kappa=1 \times 10^{-4}\text{ m/s}$ 、 $\lambda=1\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 时能源隧道取暖的线功率 P_L

Fig.12 Line power P_L (W/m) for energy tunnel heating at $D=15\text{ m}$, $\kappa=1 \times 10^{-4}\text{ m/s}$ and $\lambda=1\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$

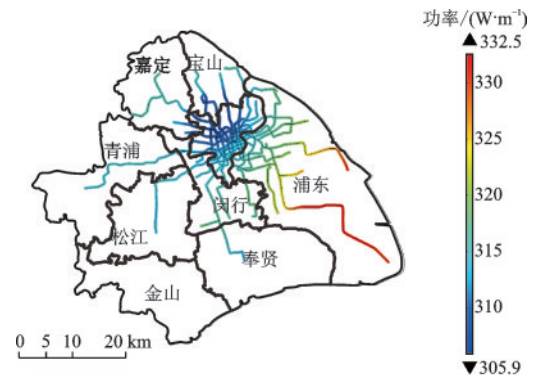


图 13 $D=15\text{ m}$ 、 $\kappa=1 \times 10^{-4}\text{ m/s}$ 、 $\lambda=1\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 时能源隧道制冷的线功率 P_L

Fig.13 Line power P_L (W/m) for energy tunnel cooling at $D=15\text{ m}$, $\kappa=1 \times 10^{-4}\text{ m/s}$ and $\lambda=1\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$

因为上海地势平坦,地下水位分布均匀,并且土层的渗透性较弱,所以地下水渗透速率随着渗透系数的变化并不明显,在不同渗透系数下能源隧道采集地热能的功率几乎不变。对于上海市已建地铁同等规模能源隧道,不同埋深和不同地层热导率下的计算结果列于表1中,其中采暖时间为4个月、制冷时间为8个月,热泵的性能系数(COP)为4,电价按0.6元/kWh计算。根据生态环保部发布的2019年度减排项目中国区域电网基准线排放因子,华东区域电网的区域电网基准线排放因子取0.792 1t CO₂/MWh。

表1 上海市已建地铁同等规模能源隧道一年内的采热量及效益情况

Table 1 Heat production and benefits of the same size energy tunnel in Shanghai's existing metro in one year

埋深/ m	热导率/ (W·(m·K) ⁻¹)	总能量/ 10 ⁹ kWh	价值/ 10 ⁸ 元	CO ₂ / 10 ⁶ t
15	1	2.58	11.61	1.53
15	2	3.31	14.90	1.97
15	3	4.45	20.03	2.64
20	1	2.57	11.57	1.52
20	2	3.30	14.85	1.96
20	3	4.44	19.98	2.63
25	1	2.60	11.70	1.54
25	2	3.29	14.81	1.95
25	3	4.44	19.98	2.63

从表1中可以看出埋深对采热量的影响不大,这是因为上海地区的恒温地层的温度梯度最大仅为4 °C/hm,而地铁隧道的埋深变化范围不大,在模型中,隧道埋深从15 m到25 m,平均温度的变化量不足0.5 °C,所以对能源隧道的采热量的影响不大。而土层的热导率的影响较为显著,这说明在地层热导率较大的地区采用能源隧道形式进行地热能开采的效率更高。

因为隧道埋深及地下水对能源隧道的采热量影响较小,对于上海市拟建和在建的地铁隧道按导热系数 $\lambda=1$ W/(m·K),根据表1数据估计其潜在的采热能力及效益,见表2。

表2 上海市拟建及在建地铁同等规模能源隧道一年内的采热量及效益情况

Table 2 Heat production and benefits of the same size energy tunnel in Shanghai's proposed and under-construction metro in one year

里程/ km	热导率/ (W·(m·K) ⁻¹)	总能量/ 10 ⁹ kWh	价值/ 10 ⁸ 元	CO ₂ / 10 ⁵ t
283	1	9.46	4.26	5.62

根据计算结果可以看出,按 $\lambda=1$ W/(m·K)、COP=4计算,已建地铁同等规模能源隧道的地热能年度开采量超过25.8亿kWh,在建及拟建地铁线路按能源隧道建设的年度采热量可达9.46亿kWh,每年可产生的经济效益分别为11.61亿元和4.26亿元,可减少CO₂排放量分别为153万t和56.2万t。

从能量的角度来说,根据长江流域地区供暖和制冷的耗电情况,冬季供暖耗电约为6 kWh/(m²·a),夏季制冷耗电约为15 kWh/(m²·a),全年按4个月供暖、8个月制冷计算,则平均耗电量为12 kWh/(m²·a),则全部上海市2030年规划地铁规模下的能源隧道年度采集总能量相当于约20%的住宅取暖或制冷所需要的能量总和。从成本的角度而言,地铁建设成本按10亿元/km计算,能源隧道增加投资金额按总投资的1%计算,考虑到能源隧道的附加运营成本,预计所有能源隧道的相关投入成本可在10年内回收。

3 结 论

(1) 通过Laplace方程估算了地层温度及地下水位分布,将隧道简化为一维模型,利用A. Di Donna等^[23]提出的设计图表,对上海市2030年规划地铁线路同等规模的能源隧道进行了分析,所使用的分析方法可为评估其他城市建设能源隧道的潜力及效益提供参考,需要注意的是,在地层参数及隧道埋深等数据更为精确的情况下,将进一步提高计算结果的准确性和可靠性。

(2) 在本研究中考虑了不隧道埋深、地层渗透率及热导率下上海市的采热效率,因为上海市恒温地层温度梯度较小且地下水位分布均匀,所以隧道埋深和地下水渗流对隧道的采热效率影响不大,在热导率为1~3 W/(m·K)时,平均采热功率不到20 W/m²,而已有研究成果表明,在地下水渗流速度和地层的热导率较高时,功率可达到70 W/m²以上,所以对于渗透率更高、导热性能更好的砂土或岩质地层地区更适于建设能源隧道。

(3) 尽管上海市地层情况使得能源隧道的采热效率偏低,但是保守估算,上海市2030年规划地铁同等规模的能源隧道,在每年中按4个月采暖、8个月制冷的运行模式下,一年内的采热量可达35亿kWh,经济收益逾15亿元,每年可减少CO₂排放量200万t以上,相当于上海市住宅取暖或制冷所

需总能量的20%,投入成本在10年左右可回收,说明能源隧道具有巨大的经济价值和社会效益。

由于能源隧道的巨大开发潜力,已成为能源地下结构的一个研究热点,但是若要在工程中大规模推广应用,仍有一些施工、技术及理论问题需要解决,如换热管路的安装问题、如何提高地热资源利用率、如何评价能源隧道对地层环境的影响、如何准确计算工程整体采热量等问题都需要进一步深入探讨。

参考文献:

- [1] 钱七虎. 利用地下空间助力发展绿色建筑与绿色城市[J]. 隧道建设, 2019, 39(11): 1737-1747.
Qian Q H. Underground space utilization helps develop green buildings and green cities[J]. Tunnel Construction, 2019, 39(11): 1737-1747. (in Chinese)
- [2] 严金秀. 世界隧道工程技术发展主流趋势——安全、经济、绿色和艺术[J]. 隧道建设, 2021, 41(5): 693-696.
Yan J X. Development trends in world tunneling technology: safe, economical, green and artistic[J]. Tunnel Construction, 2021, 41(5): 693-696. (in Chinese)
- [3] Brandl H. Energy foundations and other thermo-active ground structures [J]. Géotechnique, 2006, 56(2): 81-122.
- [4] Adam D, Markiewicz R. Energy from earth-coupled structures, foundations, tunnels and sewers [J]. Géotechnique, 2009, 59(3): 229-236.
- [5] Franzius J N, Pralle N. Turning segmental tunnels into sources of renewable energy[J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Civil Engineering, 2011, 164(1): 35-40.
- [6] Frodl S, Franzius J N, Bartl T. Design and construction of the tunnel geothermal system in Jenbach [J]. Geomechanics and Tunneling, 2010, 3(5): 658-668.
- [7] Barla M, Perino A. Energy from geo-structures: a topic of growing interest[J]. Environmental Geotechnics, 2015, 2(1): 3-7.
- [8] Barla M, Di Donna A, Perino A. Application of energy tunnels to an urban environment [J]. Geothermics, 2016, 61: 104-113.
- [9] Barla M, Di Donna A. Energy tunnels: concept and design aspects [J]. Underground Space, 2018, 3(4): 268-276.
- [10] Barla M, Di Donna A, Insana A. A novel real-scale experimental prototype of energy tunnel [J]. Tunneling and Underground Space Technology, 2019, 87: 1-14.
- [11] Insana A, Barla M. Experimental and numerical investigations on the energy performance of a thermo-active tunnel[J]. Renewable Energy, 2020, 152: 781-792.
- [12] 夏才初, 邹一川, 张国柱. 寒区隧道地源热泵加热系统埋管间距优化分析[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2012, 40(12): 1802-1807.
Xia C C, Zou Y C, Zhang G Z. Pipe distance optimization of geothermal resource heat pump in cold region [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2012, 40(12): 1802-1807. (in Chinese)
- [13] 夏才初, 杨勇, 张国柱, 等. 隧道内地源热泵热交换管与隧道结构相互影响[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2014, 42(1): 51-57, 150.
Xia C C, Yang Y, Zhang G Z, et al. Mutual influence between tunnel structure and heat exchange pipes of ground source heat pump in tunnel[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2014, 42(1): 51-57, 150. (in Chinese)
- [14] 张国柱, 夏才初, 孙猛, 等. 寒区隧道地源热泵供热系统及优化分析[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2012, 40(4): 610-615.
Zhang G Z, Xia C C, Sun M, et al. Tunnel heating system with heat pump in cold region and its optimization [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2012, 40(4): 610-615. (in Chinese)
- [15] 张国柱, 夏才初, 孙猛, 等. 寒区隧道地源热泵型供热系统取热段温度场解析[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(增2): 3795-3802.
Zhang G Z, Xia C C, Sun M, et al. Temperature fields analysis of absorbing section of tunnel heating system using heat pump in cold region [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(Sup2): 3795-3802. (in Chinese)
- [16] 张国柱, 夏才初, 马绪光, 等. 寒区隧道地源热泵型供热系统岩土热响应试验[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(1): 99-105.
Zhang G Z, Xia C C, Ma X G, et al. Rock-soil thermal response test of tunnel heating system using heat pump in cold region [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(1): 99-105. (in Chinese)
- [17] Zhang G, Xia C, Sun M, et al. A new model and analytical solution for the heat conduction of tunnel lining ground heat exchangers [J]. Cold Regions Science and Technology, 2013, 88: 59-66.

(本文责编:池营营)

(下转第960页)