

城市地下深部空间探测技术现状分析研究

刘茂

中铁第一勘察设计院集团有限公司

摘要：研究目的：随着向地球深部国家战略的实施，城市深部地下空间成了利用研究的热点。本文对城市地下空间进行了竖向分层，筛选了城市强烈人文干扰环境下适用的勘探技术方法，并对其适用性进行了分析，讨论研究了城市深部大空间开发勘探技术的发展方向。研究结论：（1）城市地下空间按竖向深度可分为浅、中、深三层；（2）现阶段的勘探手段可满足深部大空间开发的要求，但受制约因素较多，与城市内快速、高效探测的要求不相适应；（3）深部大空间开发勘探技术应从钻探技术、物探仪器设备、高精度多维度物探技术等方面取得发展突破。

关键词：城市；深部大空间勘察技术

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2024.07.037

一、前言

地下空间是国土宝贵的空间资源之一，目前，“向地球深部国家战略”实施已进入快车道^[1]。尤其是城市地下空间，其对缓解城市土地资源紧张、改善城市环

境、优化城市空间结构和管理格局、提高城市综合承载能力、推动城市由外延扩张式向内涵提升式转变具有重大意义^[2]。

国内各城市地下空间利用深度层次划分尚无统一标准，目前各城市根据自身地质环境条件、开发利用现状、城市现有规划，采取了一城一策的划分方法^[3-6]。作者根据埋深、拓展用途、岩土体特征及受地表环境影响程度探讨划分如下表1：

二、城市地下空间的探测要素

地下空间主要由液、固象物质（介质）组成，并具有温压梯度、应力变化等多重场元的平衡系统，一旦开发扰动，地下空间将产生破坏或再平衡^[7]。总体而言，岩石圈中的较完整硬质岩自身结构强度高，相对较为适合开发大深度地下空间，而土层、软质岩、岩石风化层、构造破碎带等则存在开挖扰动大、再平衡位成本高昂等问题。

开发利用地下深部空间，需对地质环境全要素进行规划开发前的精细探测，并在开发与使用中实时监

表1 城市地下空间竖向分层表

城市地下空间竖向分层		埋深 (m)	目前城市拓展用途	特征
浅层	浅表层	0 ~ 10	地铁、地下道路、地下街、地下住宅、地下建筑、车库、泵站、变电所、共同沟、综合管廊（上部）等	与地表环境联系紧密，岩土体一般松软
	浅层	10 ~ 30	地下隧道、综合管廊（下部）、地下河流、地下干道、地下物流、地下仓储等。	与地表环境联系较紧密，岩土体一般较松软
中层	浅中层	30 ~ 50	地下隧道、地下物流、地下仓库等	与地表环境联系一般较弱，岩土体一般较密实
	深中层	50 ~ 100	地下隧道、地下物流	与地表环境联系弱，岩土体一般为密实
深层	深层	100 ~ 500	-	基本不受地表环境影响
	超深层	> 500	-	

测。相对而言，开发前的全要素探测质量及研究成果对于城市地下深部空间的规划利用具有先决性地位。城市地下深部空间探测研究要素及目的可按下表分类：

表2 城市地下深部空间探测要素表

探测要素	主要探测研究目的
地质构造	区域地质构造，场地稳定性及区域变形特征
地层结构	影响深度地层岩性、物理力学特征及化学特征
地震效应	发震断裂的震源、震级与震距；地震波传导、反射、折射特征及能量耗散特征
应力场	地应力分布特征（分自重应力和构造应力）
流体场	液体化学特征，赋存特征，地层岩性渗透性及流体转移特征
地温场	各向地温梯度场，划分各向地温带（季节影响带、常温带、低高温带、中高温带和极高温带等）
有害气体	有害气体化学特征、赋存特征及气体运移特征等
辐射	天然场电离辐射、岩体放射性等

三、主要探测方法现状

探测技术方法可分为直接探测与间接探测。直接探测可直接获取探测对象的液、固象物质或多重场元数据，直接探测包含钻探、原位测试等，间接探测是利用物质的物性（如密度、磁导率、电导率、弹性、热导率、放射性等）差异，通过物探手段观测地球物理场（人工场或天然场）的分布和变化特征信息，推断地质性状。

（一）钻探装备技术发展现状

钻探作为直接探测技术，在城市地下空间开发利用中拥有重要地位和作用，通过钻探取芯、原位测试、水文观测测试、综合测井、取样室内试验等，能直接揭示岩土体的岩性岩相、岩土体展布和空间变化特征、工程基础持力层与软弱层的立体结构、地下水分布赋存及地下径流特征，准确定位活动断裂等构造特征。

城市地下深部空间钻探装备技术需求：城市空间建

筑物、障碍物、各类管线等密布，人文环境复杂，场地条件受限。为适应城市地下深部空间探查需要，需采取竖向取芯钻探与定向取芯钻探结合的钻探技术方案，并朝着小型化、高功率、高取芯率、定向钻探、智能化控制等方向发展。

国内外钻探装备技术发展现状：国外以全液压式钻机为主，系列完整，拥有水平长距离定向钻探和取芯能力。水平长距离定向钻探与取芯已在芬兰、新加坡等国实现，英国、法国、加拿大、美国及日本等国对智能钻进、随钻测量技术研发活跃。

随着2009年国家重大科技项目“深部探测”实施以来，经过近十几年的发展，国内石油、矿产等行业的勘探技术及水平，已逐步赶上、甚至在某些方面达到了国际先进水平。我国已成功研发钻进过程监测系统（DPM），可实时监测钻进过程，实现钻进过程的识别，建立了典型地层识别模型，可对地层及结构进行精准识别，对地质和地球物理数据进行测量，测量的参数包括井斜、方位、工具面、钻压、扭矩、异常地层压力、伽马射线、地层电阻率、密度和中子孔隙度等，并开展了典型地层钻进响应特性等基础理论研究。

近几年来，因川藏铁路、引水隧洞及穿越江河湖海隧道等一批重大工程的落地实施需求，国内以中铁一、

二院、中国地质大学（武汉）、中国地质科学院探矿工艺研究所等为代表的“产、学、研”单位紧密合作，在超长、超深取芯钻探装备技术方面取得了突破^[8]，采用金刚石绳索取芯钻探工艺在川藏铁路勘探中成功实施多个千米级工勘取芯钻探孔，其中超深竖直钻孔多木格隧道3DSSZ-15-6号孔终孔达2219m，超深定向水平钻孔拉月隧道CSDXZ-1号孔终孔达1631.6m。

2023年，中国地质学会制定发布了团体标准《超长距离工程地质勘察水平定向钻探规程》（T/GSC 005-2023），标志着我国工程地质钻探千米级超长距离水平定向钻探已进入实质性体系建设和应用阶段。

（二）地球物理勘探发展现状

地球物理勘探发展至今，已形成6大技术方向：①重力勘探；②磁法勘探；③电法勘探；④地震勘探物探；⑤放射性勘探；⑥地热勘探等，国内外各类装备改进研发一致处于活跃状态。

在城市环境中，除天然的地质背景条件外，各种人为干扰、交通噪声及电磁波干扰、大量的混凝土建构筑物等对常规的电法和磁法勘探带来的影响较大，城市区域对爆炸物的限制也使得地震等一些常规勘探方法已不适应在城市里进行。作者对城市环境物探方法的特点、适用条件、探测精度进行归纳汇总：

表 3 城市环境物探方法汇总表

物探方法	探测深度	应用范围	适用条件	干扰源	备注	
管线探测（管线仪）	0~10米	地下管线探测追踪	管线埋深不宜过大	探测现场的电磁干扰	城市管网普查、地铁施工前的地下管线探测	
地质雷达法	0~15米	探测覆盖层厚度和分层；探测不良地质体、岩溶、空洞；地下管线探测；隧道衬砌检测等	测地层与相邻地层之间、不良地质体与围岩之间，存在明显的介电常数差异	地下金属管线、电力电缆、地面交通设施、测线附近建筑物等	探测深度与地下介质的含水量直接相关	
CMPPC二维面波	5~20米	探测覆盖层厚度和分层；探测不良地质体、岩溶、空洞、黄土湿陷区等	被测地层与相邻地层之间、不良地质体与围岩之间，存在明显的波速和波阻抗差异	不明来源的持续震动，如工厂、建筑工地等	建筑物基础勘察	
管波	由钻孔深度决定	探测钻孔周围（0~1m）岩溶、空洞发育范围	探测目标体与围岩存在明显的波阻抗差异；钻孔中必须有水、井液	井液中岩粉含量及泥浆稠度会影响管波探测分辨率	广泛应用到建筑物桩基岩溶勘察	
地震	十几米到数百米	探测断裂、破碎带，地层、洞穴、岩溶、采空区、基岩面、岩土体的质量评定、滑坡等地质灾害调查等	探测物与周围介质至今存在明显的波阻抗差异，	测试时现场震动噪声等	广泛应用到断裂、采空区、溶洞等的勘察中	
微动	20~200米	探测覆盖层厚度；探测不良地质体、岩溶发育区、空洞、隐伏断层、滑坡	被测地层与相邻地层之间、不良地质体与围岩之间，存在明显的波速和波阻抗差异	不明来源的持续震动，如工厂、建筑工地等	建筑物基础勘察	
井间CT	井间地震CT	由钻孔深度及钻孔间距决定	探测钻孔之间岩溶、空洞发育位置及范围	探测目标体与围岩存在明显的波阻抗差异；钻孔中必须有水、井液	测试时现场震动噪声	铁路桥基岩溶勘察、城市地铁基础勘察
	井间电磁波CT	由钻孔深度及钻孔间距决定	探测钻孔之间岩溶、空洞、不良地质体发育位置及范围	探测目标体与围岩存在明显的电磁波吸收系数差异；钻孔中无须有水、井液	孔间及附近的电力管网、金属物体	铁路、公路、桥梁、城市道路、地铁、建构筑物基础勘察
	跨孔电阻率CT	由钻孔深度及钻孔间距决定	探测钻孔之间岩溶、空洞、不良地质体发育位置及范围	探测目标体与围岩存在明显的电阻率差异；钻孔中必须有水、井液	孔间及附近的电力管网、金属物体、离散电流等	铁路、公路、桥梁、城市道路、地铁、建构筑物基础勘察
高精度瞬变电磁法（HPTEM）	20~200米	探测覆盖层厚度；探测不良地质体、岩溶发育区、空洞、隐伏断层、滑坡；地下管线探测	探测目标体与围岩存在明显的电性差异	电磁干扰：电力线、地下金属管网、测线附近的金属物等	建筑物基础勘察	
环境噪音成像法	几十米到200米（与检波器频率有关）	岩土工程场地勘察、覆盖层划分、岩性界限勘察、其他工程勘察等	探测目标体与围岩存在明显的波阻抗差异	固定、持续的震动干扰	建筑物场地勘察、不良地质勘察	
航空瞬变电磁法	几十米到几百米	探测不良地质体隐伏断层、构造等	探测目标体与围岩存在明显的电性差异	电磁干扰：电力线、地下金属管网、测线下方的金属物等	目前应用到新建城区前期的勘探；城市地下空间勘探尚未有先例	

从表3中可看出,城市深部开发利用适用的物探方法有:震法中的可控连续震源或机械冲击震源的地震勘探、微动勘探(利用天然源面波的地震勘探)、井间CT、高精度瞬变电磁等。

四、城市深部物探装备技术缺点分析

(一) 可控连续震源的地震勘探

可控连续震源的地震勘探,包含震折射、反射和透射等各种专门的地震勘探工作,探测深度大,探测深度可达1000米,但试验场地需有保证震源车行走的道路(宽度不小于3.0米)或开阔场地,且要求周边的建筑物对震动的影响不敏感。

(二) 地微动勘探

地微动勘探是利用微动台阵接收天气、气压及海浪等变化产生,频率小于1Hz的低频信号源和人类生产生活产生一般大于1Hz高频信号源,提取瑞利面波的频散特性反演获得横波速度,以此推断地壳浅部的波速信息。对场地环境条件要求较高,其勘探深度与检波器布置的嵌套三角形半径相关,数据采集时,三角型内不能有干扰,检波器的一致性要好,否则采集到的数据不符合平稳随机的前提假设,勘探深度一般为嵌套三角形半径的2~5倍,观测系统内的震源点,到达各个检波器后空间自相关方法在对比相位时存在问题,导致使分辨率降低。

(三) 井间层析成像(井间CT)

井间层析成像可用于探查井间地质构造、岩溶裂隙、断裂、破碎带等不良地质的发育、分布及连通,也可进行岩土的分层、渗漏水的探测等。井间层析成像分为井间弹性波层析成像、井间电磁波层析成像、井间电阻率成像^[10]。

(1) 井间弹性波层析成像(井间地震CT)

将震源和检波器都布置在井中的井-井观测方式或同时布置在地面和井中的井地联测方式,观测角度比地面地震大,所采集到的数据资料也较地面地震完备,因而析成像的分辨率也比地面地震勘探高,岩溶区可分辨大于1/10跨孔间距的岩溶洞穴,对岩溶洞穴的定位误差小于跨孔间距的1/10,随着孔间间距的加大岩溶探测精度相应会降低。其城市使用受控于震源(炸药)难以获得,其他震源难以保证激发能量在观测井产生足够强的信号强度,且不破坏井壁管。

(2) 井间电磁波CT

在钻孔中进行电磁波测量,电磁波通过钻孔之间的介质进行传播,被不同的介质吸收和衰减之后,在接收孔相应的接收点被接收,然后接收和发射对调,再次进行数据采集,最终形成井间电磁波吸收系数(β)剖面,从而获取两孔之间的地质信息。探测的距离受孔深的控制,现阶段工程探测间距20~30米。一般井间距不大于1/2钻孔深度,间距最大不超过孔深度。其使用受场地的电磁环境影响较大,影响测量精度。

(3) 井间电阻率CT

根据电阻率和岩层间的对应关系,把探测电极放入孔中采集信号,探测点更接近勘探目标,信号是异常的直接反映,传输路径简单,信号保真度大,跨孔电阻率CT要求孔间距一般不大于1/2钻孔深度,间距最大不超过孔深度。其使用受限于对成井工艺要求高,要求是裸井,且孔中需有井液。

(四) 高精度瞬变电磁(HPTM)

高精度瞬变电磁法勘探深度一般为几十到几百米。适合在干扰强烈的城区观测,但对于硬质岩出露地区,裸露岩石致密坚硬,会大大限制电偶极子场源送入地下的电流强度,并导致测量电极接地电阻过高,干扰信号过强、有效信号太弱等不利影响,因此在硬质基岩裸露地区不宜使用此类方法。

(五) 环境噪声成像法

环境噪声成像方法是利用多个三分量检波器沿直线排列,采集环境噪声信号,然后对采集到的信号进行互相关计算,从噪声数据中可以提取出丰富的信息,用于地质分析。此法既不依赖于自然地震的发生,也不依赖于人为地震震源,但环境震动噪声成像方法在城市工程勘探中尚处于测试试验阶段。

五、城市深部大空间开发勘探技术的发展方向

为了适应城市深部大空间的开发,准确可靠的地质资料是工程建设的基础,精细化的深层探测方法是取得可靠地质资料的基本保证。现阶段的勘探手段可满足深部大空间开发的基本勘察要求,但受制约因素较多、尚不相适应城市内快速、高效探测的需要,作者建议从以下几个方面取得重大装备技术进展:

(1) 实现钻探技术的智能化控制、钻进过程的层位识别、地质及地球物理数据的随钻测量和测试,提高卵砾石层、软弱层、破碎层采取率,研发深部原位测试新技术。

(2) 提高电磁法、地震勘探仪器设备自身的抗干扰性能,提高低信噪比环境下的分辨率,使勘探设备向小型化与便携化发展、实现智能化数据采集、处理与解释。

(3) 浅层地震反射勘探要从现阶段探测技术日渐完善的二维地质浅层地震勘探向“宽频、宽方位、高密度”的三维地震勘探方向发展。

(4) 加快高精度瞬变电磁法车载系统、环境噪声成像法的研发、验证并投入生产。

参考文献

- [1] 新华社. 深地、深海、深空: 中国“决战深部”, 国土资源报, 2016, 10.
- [2] 张嘉真等. 我国城市地下空间发展的现状及分析[J]. 理论观察, 2017, 8.
- [3] 赵凡. 特大城市“向下走”怎么面对地下可利用空间?[J]. 国土资源报, 2017, 1.
- [4] 白云飞. 城市地下空间利用与规划探究[J]. 建材技术与应用, 2017, 5.
- [5] 杨可等. 国际地下空间开发利用研究现状[J]. 城乡建设, 2017.
- [6] 中国城市地下空间开发利用的现状评价和前景展望, 上海市地下空间综合管理学术论文集, 钱七虎
- [7] 程光华等. 新时代城市地质工作战略思考[J]. 地质论评, 2018, 11.
- [8] 徐正宣, 刘建国, 吴金生等. 超深定向钻探技术在川藏铁路隧道勘察中的应用[J]. 工程科学与技术, 2022, 54(2): 21-29.
- [9] 李万伦等. 城市地球物理学综述[J]. 地球物理学进展, 2018, 33(5): 2134-2140.
- [10] 吴茂林等. 城市地下空间地质异常体井间综合CT探查[J]. 工程地球物理学报, 2018, 11.