

# 地下空间 规划与设计

UNDERGROUND SPACE  
PLANNING AND DESIGN

谭卓英 编著



科学出版社

# 地下空间规划与设计

谭卓英 编著

科学出版社

北京

## 内 容 简 介

本书全面、系统地介绍地下空间规划设计的基本概念、理论与方法。全书共分 12 章:(1)绪论;(2)地下空间的基本形态与功能;(3)地下空间总体规划;(4)城市中心区及地下综合体;(5)城市地下街及步行系统;(6)城市地铁路网及地下公路交通;(7)地下停车场;(8)地下综合管廊;(9)防空地下空间;(10)地下物质仓储与物流空间;(11)资源及能源地下空间;(12)地下空间环境调控与灾害防护。本书内容涵盖了城市及非城市地下空间规划设计的基本理论、方法及最新技术与理论成果,全书论述严谨、深入浅出,并结合案例进行分析。此外,根据教材内容,每章附有习题、思考题和参考文献,易于阅读、理解和掌握。

本书可作为高等院校城乡规划、土木及建筑工程等相关专业的大学本科与研究生课程的教材,也可作为大学教师、科研设计人员的参考用书,还可为规划设计部门决策提供参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

---

地下空间规划与设计/谭卓英编著. —北京:科学出版社,2015.9

ISBN 978-7-03-045692-2

I. ①地… II. ①谭… III. ①城市空间-地下建筑物-空间规划 IV. ①TU984.11

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 233103 号

---

责任编辑:李 雪 / 责任校对:桂伟利

责任印制:徐晓晨 / 封面设计:耕者设计工作室

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京科印技术咨询服务公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2015 年 9 月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2015 年 9 月第一次印刷 印张:20 1/2

字数:467 000

定价:72.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

# 前言

21 世纪是人类开发利用地下空间的世纪。现代城市从古代、近代发展至今,历经了 18 世纪中期欧洲工业革命和第二次世界大战后工业化的催化,城市发展进程显著加快。城市人口剧增,规模日益扩大,出现了大城市群及城市带;城市功能复杂,综合性强,功能分区性越来越明显。城市环境空间组织也随之发生变化,出现了城市多中心化、郊区化及地下化趋势,产生了组合的巨型城市,纽约、伦敦、巴黎、东京、香港、北京等国际大都市在近现代迅速崛起。

随着城市化进程的加快,人口向大城市集聚,由此带来巨大的交通压力、能源消耗和严重的环境污染,城市化过程对生存空间和市政基础设施提出了更高要求,环境恶化、生态破坏等事件加剧了城市面临的人口、资源与环境危机。城市人口、支撑系统、环境问题及社会问题突出。据报道,全球人口在二战后的 70 年中增长了 3 倍多,2014 年全球人口超过 70 亿,年递增速率达 1.8% 以上。城市人口的剧增,直接导致城市用地紧张。人口密度大,管线密度高,城市道路面积小,“拉链”工程与“蜘蛛网”工程密布,是城市化的普遍问题,在发展中国家尤为突出。市政管线及电力通信等城市生命线工程在面对气象、地质及人为灾害等十分脆弱,故障频现,给城市经济发展和居民生活造成重大的负面影响。

满足城市发展需要,开发利用城市立体空间,是世界各国的普遍趋势。地下交通、地下商场、地下街、地下仓储与物流、地下综合管廊及人防工程等是地下空间开发的主要形式。地下空间的深度和广度在不断增大。目前,全世界已有 100 余座城市开通了地铁,中国已有 30 余座城市开通或正在修建地铁。地下交通的迅速发展,不仅缓解了城市交通压力,同时也使各国的地下街、地下商业等有机会发展成熟,形成多功能的城市地下综合体,并孵化地下城的建设。

在非城市地下空间的开发利用方面,涉及生活及生产物质、资源与能源的储存及输送、工业生产场地、试验、交通隧道、水利水电及防护工程等地下空间,矿物资源的开发利用以及核废的地质处置、清洁水、燃料物质及热能、电能等的储存,所涉及的深度远超城市地下空间。

在城市及非城市地下空间的发展过程中,人们逐渐认识到地下交通、地下综合管廊、地下综合体、地下物质储存与物流、海绵城市的建设是解决城市所面临的交通拥堵、水资源短缺与生态环境恶化等问题的重要途径;在深地环境中,由于地质环境的复杂性以及地下空间工程要求的多样化,地下空间与地质环境的协同性、适应性发展已成为解决深地空间结构、功能与环境问题的重要途径。地下空间开发利用已经历了半个多世纪的快速发展,取得了丰富的理论与实践成果。本书就是在充分吸收已有理论与工程实践成果的基础上,以城市地下空间为主要内容,结合非城市地下空间的开发,以协同论思想为主线,分析和论述地下空间规划设计的基本理论与方法。

本书具有以下特点:①全面性。本书内容涵盖城市及非城市地下空间规划设计的主

要内容,数据翔实,内容丰富。②系统性。从时空演化、总体到专业,以地下空间功能为主轴,将地下空间的发展过程、地下空间的基本形态、结构与功能特点、规划设计内容与方法、各专业地下空间的规划设计以及地下空间灾害防护等内容融合一体,自成系统。③先进性。在本书编写过程中,查阅和引证了大量的文献资料,充分吸收了国内外地下空间规划设计的最新理论、方法与实践成果,反映了国际地下空间规划设计的最新水平。④突出案例。结合案例进行分析,为教学、自学及研究提供了素材。⑤丰富的习题和思考题。为了检验教学效果和知识掌握程度,在每章后附有一定数量的习题和思考题,供教师和学生参考。

作为一本通用教材,很难对地下空间各工程领域的规划设计问题进行全面、详尽和深入的介绍。因此,在使用本教材的同时,不同行业、不同领域的大专院校或科研院所可以根据自身特点和需要增加必要的补充材料或专业内容。并且,可以根据自身需要,对本教材内容进行选择性地讲授。

在本书的编写过程中,清华大学王思敬院士对本书初稿进行了评审并审校第1章,北京科技大学蔡美峰院士对本书初稿进行了评审并审校第2章及第10章,新加坡国防科技局、国际地下空间联合研究中心(ACUUS)副主席周迎新教授审校第3章、第8章及第9章,中南大学胡毅夫教授审校第4章及第5章,北京交通大学王梦恕院士审校第6章、第7章,中国矿业大学何满潮院士审校第11章及第12章,解放军理工大学钱七虎院士审校了全书。此外,同济大学朱合华教授对全书的结构及编写提出了许多宝贵意见。本教材的编写与出版得到了北京科技大学教材建设经费的资助,在此一并致谢!

地下空间规划设计是一个全新的学科方向,有关理论、技术及方法还不是很成熟,书中如有错误和不妥之处,敬请读者批评、指正!

谭卓英

2015年7月于北京

# 目 录

## 前言

|                        |    |
|------------------------|----|
| 第 1 章 绪论               | 1  |
| 1.1 地下空间的开发历史          | 1  |
| 1.1.1 地下住居建筑           | 1  |
| 1.1.2 地下墓葬与宗教          | 3  |
| 1.1.3 地下储藏             | 3  |
| 1.1.4 地下工业生产           | 4  |
| 1.1.5 安全防御             | 5  |
| 1.1.6 市政管线             | 5  |
| 1.1.7 商业               | 6  |
| 1.1.8 文教娱乐科研与医疗卫生      | 7  |
| 1.1.9 交通运输设施           | 9  |
| 1.2 地下空间的开发技术          | 11 |
| 1.2.1 岩土工程勘察技术         | 11 |
| 1.2.2 地下空间施工技术         | 14 |
| 1.2.3 混凝土衬砌技术          | 23 |
| 1.3 地下空间规划设计的主要方法      | 23 |
| 1.3.1 地下空间规划设计的主要内容    | 23 |
| 1.3.2 地下空间规划设计要解决的主要问题 | 24 |
| 1.3.3 地下空间规划设计的主要方法    | 24 |
| 1.4 地下空间的开发趋势          | 26 |
| 1.4.1 多样化与综合化          | 26 |
| 1.4.2 分层化与深层化          | 27 |
| 1.4.3 城市交通地下化          | 27 |
| 1.4.4 市政管线综合管廊化        | 27 |
| 1.4.5 掘进技术数字化          | 28 |
| 1.4.6 隧道掘进 TBM 技术      | 28 |
| 1.4.7 3S 技术            | 28 |
| 1.4.8 勘察、设计和施工信息一体化    | 28 |
| 习题与思考题                 | 28 |
| 参考文献                   | 29 |
| 第 2 章 地下空间的基本形态与功能     | 30 |
| 2.1 地下空间的基本概念          | 30 |

|                             |           |
|-----------------------------|-----------|
| 2.1.1 地下空间的基本形态 .....       | 30        |
| 2.1.2 地下空间结构的基本类型 .....     | 37        |
| 2.2 地下空间的基本功能 .....         | 40        |
| 习题与思考题 .....                | 41        |
| 参考文献 .....                  | 41        |
| <b>第3章 地下空间总体规划 .....</b>   | <b>42</b> |
| 3.1 地下空间规划的工作内容与特点 .....    | 42        |
| 3.1.1 地下空间规划的工作内容 .....     | 42        |
| 3.1.2 地下空间总体规划的特点 .....     | 43        |
| 3.2 地下空间规划基本原则 .....        | 44        |
| 3.2.1 开发与保护相结合原则 .....      | 44        |
| 3.2.2 地上与地下相协同原则 .....      | 44        |
| 3.2.3 远期与近期一致性原则 .....      | 45        |
| 3.2.4 平时与战时相结合的原则 .....     | 45        |
| 3.2.5 结构与功能相协同的原则 .....     | 45        |
| 3.3 地下空间规划的结构协同论 .....      | 46        |
| 3.3.1 协同论的主要思想 .....        | 46        |
| 3.3.2 协同论的主要内容 .....        | 47        |
| 3.3.3 地下空间规划的结构协同论 .....    | 47        |
| 3.4 地上与地下空间协同发展 .....       | 48        |
| 3.4.1 地上与地下协同发展的意义 .....    | 48        |
| 3.4.2 地上与地下空间协同发展的目标 .....  | 49        |
| 3.4.3 地上与地下空间协同发展的评价 .....  | 51        |
| 3.4.4 地上与地下空间协同发展的预测 .....  | 53        |
| 3.5 城市地下空间总体布局与形态 .....     | 59        |
| 3.5.1 城市地下空间功能、结构与形态 .....  | 59        |
| 3.5.2 城市地下空间功能的确定 .....     | 60        |
| 3.5.3 城市地下空间发展阶段与功能类型 ..... | 62        |
| 3.5.4 城市地下空间布局的基本原则 .....   | 64        |
| 3.5.5 城市地下空间总体布局 .....      | 65        |
| 3.5.6 地下空间形态规划 .....        | 73        |
| 3.6 地下空间规划的编制 .....         | 75        |
| 3.6.1 地下空间总体规划设计的基本方法 ..... | 75        |
| 3.6.2 地下空间总体规划的编制 .....     | 76        |
| 3.6.3 地下空间详细规划的编制 .....     | 76        |
| 3.6.4 规划的成果文件 .....         | 76        |
| 习题与思考题 .....                | 77        |
| 参考文献 .....                  | 77        |

|                          |     |
|--------------------------|-----|
| <b>第4章 城市中心区及地下综合体</b>   | 78  |
| 4.1 中心区及地下综合体的特点         | 78  |
| 4.1.1 中心区及其相关概念          | 78  |
| 4.1.2 城市地下综合体            | 81  |
| 4.1.3 中心区的特征             | 84  |
| 4.1.4 中心区地下综合体开发利用的动因    | 91  |
| 4.2 中心区地下空间规划方法          | 94  |
| 4.2.1 规划的基本步骤            | 94  |
| 4.2.2 中心区地下空间规划的基本原则     | 94  |
| 4.2.3 中心区现状与地面规划评析       | 96  |
| 4.2.4 中心区地下空间开发预测        | 100 |
| 4.3 中心区地下空间规划与设计         | 105 |
| 4.3.1 中心区地下空间功能规划        | 105 |
| 4.3.2 中心区地下空间的形态规划       | 106 |
| 4.4 中心区地下空间规划设计案例        | 110 |
| 4.4.1 北京商务中心区(CBD)       | 110 |
| 4.4.2 中关村西区              | 112 |
| 4.4.3 金融街地区              | 114 |
| 4.4.4 商业中心区              | 116 |
| 4.4.5 文化体育中心区            | 119 |
| 4.4.6 交通枢纽地区             | 122 |
| 习题与思考题                   | 124 |
| 参考文献                     | 125 |
| <b>第5章 城市地下街及步行系统</b>    | 126 |
| 5.1 城市地下街的作用             | 126 |
| 5.1.1 城市地下街的基本类型         | 126 |
| 5.1.2 地下街的主要组成           | 129 |
| 5.1.3 城市地下街的作用与特点        | 132 |
| 5.2 城市地下街规划的基本原理         | 133 |
| 5.2.1 地下街规划的基本原则         | 133 |
| 5.2.2 影响地下街规划的主要因素       | 134 |
| 5.3 地下步行系统规划布局           | 135 |
| 5.3.1 地下步行系统规划布局要点       | 135 |
| 5.3.2 地下步行系统布局模式         | 136 |
| 习题与思考题                   | 140 |
| 参考文献                     | 141 |
| <b>第6章 城市地铁路网及地下公路交通</b> | 142 |
| 6.1 城市地铁交通的基本形态          | 142 |

|                             |            |
|-----------------------------|------------|
| 6.1.1 城市地铁路网的基本概念 .....     | 142        |
| 6.1.2 城市地铁路网的基本形态 .....     | 142        |
| 6.2 城市地铁路网规划原则与方法 .....     | 149        |
| 6.2.1 地铁路网规划的一般要求 .....     | 149        |
| 6.2.2 地铁路网规划的基本原则 .....     | 149        |
| 6.2.3 地铁路网规划的基本方法 .....     | 150        |
| 6.2.4 地铁选线 .....            | 156        |
| 6.3 地铁车站规划 .....            | 159        |
| 6.3.1 地铁车站规划的一般要求 .....     | 159        |
| 6.3.2 地铁车站的类型 .....         | 159        |
| 6.3.3 地铁车站的客流量 .....        | 167        |
| 6.3.4 地铁车站位置 .....          | 169        |
| 6.4 城市地下公路交通规划 .....        | 171        |
| 6.4.1 地下公路交通规划的类型 .....     | 171        |
| 6.4.2 城市地下公路交通规划的基本步骤 ..... | 172        |
| 6.5 北京城区地铁规划设计案例分析 .....    | 172        |
| 6.5.1 轨道交通规划路网 .....        | 172        |
| 6.5.2 车站规划 .....            | 173        |
| 6.5.3 交通枢纽地下空间开发利用 .....    | 173        |
| 习题与思考题 .....                | 174        |
| 参考文献 .....                  | 174        |
| <b>第7章 地下停车场</b> .....      | <b>175</b> |
| 7.1 概述 .....                | 175        |
| 7.2 地下停车场的分类与特点 .....       | 178        |
| 7.2.1 地下停车场的基本类型 .....      | 178        |
| 7.2.2 地下停车场的基本特点 .....      | 185        |
| 7.3 地下停车场规划设计方法 .....       | 185        |
| 7.3.1 地下停车场的规划步骤 .....      | 185        |
| 7.3.2 地下停车场规划要点 .....       | 185        |
| 7.3.3 地下停车场的选址原则 .....      | 186        |
| 7.3.4 地下停车场的布局原则 .....      | 187        |
| 7.3.5 地下停车场的平面形态 .....      | 188        |
| 7.3.6 地下停车场的整体布局形态 .....    | 189        |
| 7.3.7 地下停车场衔接设计 .....       | 192        |
| 7.4 地下停车场交通组织 .....         | 194        |
| 7.4.1 停车场交通要素之间的关系 .....    | 194        |
| 7.4.2 停车场内部交通流线设计 .....     | 197        |
| 7.5 地下停车场智能交通系统 .....       | 200        |

|                              |     |
|------------------------------|-----|
| 7.5.1 智能交通系统的基本类型 .....      | 200 |
| 7.5.2 地下停车场 IC 卡智能交通系统 ..... | 201 |
| 7.5.3 地下停车场 ETC 智能交通系统 ..... | 204 |
| 7.5.4 地下停车场区位引导系统 .....      | 206 |
| 习题与思考题 .....                 | 207 |
| 参考文献 .....                   | 208 |
| <b>第 8 章 地下综合管廊</b> .....    | 209 |
| 8.1 概述 .....                 | 209 |
| 8.2 综合管廊的组成和分类 .....         | 211 |
| 8.2.1 综合管廊的组成 .....          | 211 |
| 8.2.2 地下综合管廊的分类及作用 .....     | 213 |
| 8.3 地下综合管廊的规划方法 .....        | 215 |
| 8.3.1 总体规划原则 .....           | 215 |
| 8.3.2 综合管廊网路系统的规划布局 .....    | 216 |
| 8.3.3 规划设计基本原则 .....         | 217 |
| 8.3.4 综合管廊特殊部位 .....         | 221 |
| 8.3.5 综合管廊与其他地下设施交叉 .....    | 223 |
| 8.4 中关村西区地下综合管廊规划设计 .....    | 223 |
| 8.4.1 背景条件 .....             | 223 |
| 8.4.2 综合管廊建设方案 .....         | 225 |
| 习题与思考题 .....                 | 226 |
| 参考文献 .....                   | 227 |
| <b>第 9 章 防空地下空间</b> .....    | 228 |
| 9.1 防空的作用、目的和意义 .....        | 228 |
| 9.2 民防工程建设的基本要求 .....        | 229 |
| 9.2.1 民防工程建设的基本原则 .....      | 229 |
| 9.2.2 民防工程建设的目标和要求 .....     | 230 |
| 9.3 民防工程的分类与等级 .....         | 232 |
| 9.3.1 民防工程的分类 .....          | 232 |
| 9.3.2 民防工程的分级 .....          | 234 |
| 9.4 民防工程规划 .....             | 235 |
| 9.4.1 民防工程规划的总体原则 .....      | 235 |
| 9.4.2 民防工程规划的依据 .....        | 235 |
| 9.4.3 民防工程规划的主要内容 .....      | 235 |
| 9.5 民防工程规划设计方法 .....         | 238 |
| 9.5.1 民防工程规划的编制方法 .....      | 238 |
| 9.5.2 民防工程规划的调研 .....        | 239 |
| 9.5.3 民防工程规划的调整和审批 .....     | 240 |

|                           |            |
|---------------------------|------------|
| 习题与思考题                    | 240        |
| 参考文献                      | 241        |
| <b>第 10 章 地下物质仓储与物流空间</b> | <b>242</b> |
| 10.1 地下仓储空间的类型            | 242        |
| 10.1.1 地下仓储的发展            | 242        |
| 10.1.2 地下仓储空间的基本类型        | 243        |
| 10.2 地下仓储空间的地质条件          | 243        |
| 10.3 地下仓储的综合效益            | 245        |
| 10.4 物资型仓储空间              | 246        |
| 10.4.1 地下粮库               | 246        |
| 10.4.2 地下冷库               | 251        |
| 10.5 地下物流系统               | 254        |
| 10.5.1 地下物流系统的定义          | 254        |
| 10.5.2 地下物流系统的基本类型        | 256        |
| 10.5.3 地下物流系统的功能          | 257        |
| 10.5.4 地下物流系统规划           | 258        |
| 10.5.5 北京地下物流系统规划设计分析     | 260        |
| 习题与思考题                    | 266        |
| 参考文献                      | 266        |
| <b>第 11 章 资源及能源地下空间</b>   | <b>268</b> |
| 11.1 深部地下空间的基本特点          | 268        |
| 11.1.1 深部地下空间的定义          | 268        |
| 11.1.2 深部地下空间的主要特点        | 269        |
| 11.1.3 深部地下空间的主要类型        | 270        |
| 11.2 地下民用液体燃料库            | 271        |
| 11.2.1 液体燃料的物理特性和储存要求     | 271        |
| 11.2.2 液体燃料岩洞水封储存的基本条件    | 272        |
| 11.2.3 岩洞水封油库的总体布置        | 274        |
| 11.2.4 地下储油库的布置           | 275        |
| 11.3 地下能源储存库              | 276        |
| 11.3.1 热能地下储存             | 276        |
| 11.3.2 机械能地下储存            | 278        |
| 11.3.3 电能地下储存             | 278        |
| 11.4 地下清洁水储库              | 279        |
| 11.4.1 地下清洁水储库的作用         | 279        |
| 11.4.2 地下水库的基本类型          | 280        |
| 11.4.3 地下水储存库的建库条件        | 281        |
| 11.4.4 地下水储存库的动态设计方法      | 281        |

|                                 |            |
|---------------------------------|------------|
| 11.5 地下核废储存库·····               | 281        |
| 11.5.1 核废储存的基本方法·····           | 281        |
| 11.5.2 核废深部地质处置的选址·····         | 283        |
| 11.5.3 高放废物地质处置的设计·····         | 285        |
| 11.5.4 核废处置库建造的基本步骤·····        | 285        |
| 习题与思考题·····                     | 286        |
| 参考文献·····                       | 286        |
| <b>第12章 地下空间环境调控与灾害防护</b> ····· | <b>288</b> |
| 12.1 地下空间环境·····                | 288        |
| 12.1.1 地下空间环境的定义·····           | 288        |
| 12.1.2 地下空间环境的基本特点·····         | 288        |
| 12.2 地下空间环境调节·····              | 290        |
| 12.2.1 地下空间环境调节的作用·····         | 290        |
| 12.2.2 地下空间环境调节的主要内容·····       | 290        |
| 12.2.3 地下空间环境调节的主要方法·····       | 290        |
| 12.3 地下空间环境的监测监控·····           | 294        |
| 12.3.1 地下空间环境空气质量监测·····        | 294        |
| 12.3.2 地下空间工程环境变量监测·····        | 294        |
| 12.4 地下空间环境灾害防护·····            | 295        |
| 12.4.1 地下空间灾害类型·····            | 295        |
| 12.4.2 地下空间灾害特点·····            | 295        |
| 12.4.3 地下空间灾害的成因·····           | 296        |
| 12.4.4 灾害防护的基本方法·····           | 297        |
| 12.4.5 地下空间火灾防护·····            | 297        |
| 12.4.6 地下空间震害防护·····            | 300        |
| 12.4.7 地下空间水害防护·····            | 302        |
| 12.4.8 地下空间化学防护·····            | 304        |
| 12.4.9 地下空间爆恐防护·····            | 305        |
| 12.5 城市生命线系统防灾规划·····           | 306        |
| 12.5.1 生命线系统防灾的作用·····          | 306        |
| 12.5.2 生命线系统的灾害防护·····          | 307        |
| 12.6 地下救灾物资储备系统规划·····          | 312        |
| 12.6.1 地下救灾储备库的布局与选址·····       | 312        |
| 12.6.2 地下储备库的设防标准与防护措施·····     | 312        |
| 12.6.3 城市地下能源及物资应急储备系统规划·····   | 313        |
| 习题与思考题·····                     | 314        |
| 参考文献·····                       | 314        |

# 第 1 章 绪 论

**内容提要:**本章主要介绍地下空间的起源、主要类型、功能、特点和发展演化过程;地下空间的主要开发技术、规划设计的主要内容、方法及发展趋势。

**关键词:**地下空间起源;地下空间的演变;勘察技术;开发技术;发展趋势。

## 1.1 地下空间的开发历史

地下空间应用广泛,历史悠久。从居住、墓葬、宗教、仓储、生产、防灾、市政管线到商业、文教娱乐及交通,无不与人类的生活、生产等活动密切相关。

### 1.1.1 地下住居建筑

人类住居建筑经历了先地下后地面的过程,地下空间的最早应用可追溯到远古的穴居时代。人类之所以最先选择穴居,主要影响因素是气候、建材、地形及抵御外敌入侵。地下住居冬暖夏凉,适宜居住;直接掘于土或岩层,无须运搬砌筑,建材天成,而且相对坚固稳定;依岸靠坡,地质地形利于地下空间的挖掘建造,能满足抵御外来侵害的要求。据《易·系辞下》记载:上古穴居而野处。《礼记·礼运》谓:昔者先王未有宫室,冬则居营窟,夏则居曾巢。意思是说原始人类栖息于天然洞穴内,以遮蔽风雨、防御猛兽和敌人。世界上许多国家和地区,如中国、印度、土耳其、西班牙、法国、希腊、约旦、埃及、以色列、美国、加拿大、北非、伊朗、波兰、意大利、阿富汗、波斯等很早以前就开始利用地下空间。许多化石保存完好的地区都发现了大量的穴居遗址,其中一些最古老的岩洞至今仍有人居住<sup>[1-3]</sup>。研究表明,人类脱离天然岩洞,掘土穴居,形成相对固定的地下半地下住居点,始于距今约 6000 年的新石器时代。伴随着人类第一次劳动大分工,农业从渔牧业中分离出来,出现了农业为主的乡村和以手工业、商业为主的都市,要求居住地相对固定和集中,此时天然岩洞已不能满足需要,掘土穴居是人类对地下空间开发利用的最早形式。在中国,已发现 7000 多个新石器时代的遗址。其中,1953 年发现的西安半坡村遗址,一个室内地砬在地表以下 1.0m 左右的半地下村庄,它的上部结构或圆或方,柱子立在夯土地面上,上面覆盖着树枝和草皮。迄今为止,人类考古发现了世界上三个地区存在着较集中的地下住宅和村庄:①中国中、西北部的黄土高原地区。覆盖中国中部、西北部大部分地区的黄土土质疏松,易于挖掘,可以方便地用手挖出 2~3m 宽与 5~10m 长的房间。宋代郑刚中《西征道呈记》描述北宋末年陕西境内,有长达数里、曲折复杂的窑洞。土壤含水不多、湿度不大、冬暖夏凉、施工便利、无运输材料之劳等优越性,使得中国至今仍有数千万人生活在窑洞里,其中,以豫西的河南荥阳至渑池一带较为典型。②土耳其中部的卡帕多

西亚(Cappadocia)火山凝灰岩地区。在近4000年内,那里出现了四十多个地下村庄,这里地处土耳其中部的高原地区,气候极为恶劣,夏季炎热,冬季寒冷,全年干燥,火山灰凝岩圆锥形的地势完全不能耕作,但能承受悬崖地下居所的建筑物,在岩石里开凿了居住建筑,学校、教堂和城镇,这些建筑在10~11世纪拜占庭时期达到了它们的鼎盛时期。其中,德林库尤地下城镇深达地下18~20层,深度为70~90m,长达数千米,1200多个房间,建于火山岩中,具有完整的地下通风、供水和街道系统。此外,地下空间还包括了畜栏、粮囤、酒窖等各种设施,地下通道设置了大圆板封隔系统,当敌人入侵时,这些城镇可以作为临时避难所。③位于撒哈拉沙漠地区北部边界的突尼斯南部。那里的玛特玛塔高原约有二十几个地下村庄,这些村落深建于地下,一般房屋设计都有一个深井,房屋布置在深井周围的不同高度上,用作居住与储藏,进出要通过楼梯或地道,地道壁挖有动物窝穴。地下房屋主要为地坑式和崖洞式,这些居住群按居民的亲属关系组合,房间为矩形,交角成弧形,天棚为曲面,房间尺寸常为 $2\text{m} \times 2.5\text{m}$ 。偶尔在中间留有柱子支撑天棚,与天井相连的房间有稍低的门槛。

另外,加纳东北沃尔特河上游塞里泊(Seripa)半地下城式村落,每幢有一个天井,天井周围是房间,构成一个坚固的外围墙,以抵御外敌。中国新疆吐鲁番地区因气候干燥炎热,夏季高温时间长,冬天又寒冷。因此,地下、半地下室的居住形式在汉唐时期盛行。高昌故城遗址中就有下穴上居或半地下室的做法。其他如意大利阿普利亚省石灰岩地区、澳大利亚沙漠气候区。

现代地下建筑在居住方面的应用只在少数国家得到发展,其中,最引人注目的是美国和澳大利亚。在澳大利亚,一些内陆矿业城市将大量的居住建筑置于地下以躲避炎热的气候。在美国,印第安人很早就把半地下建筑作为居住场所,西南区印第安人用一种称之为“开越司(kivas)”的圆形地下洞室作为男人们举行宗教仪式的场所或作为住宅。科罗拉多州西南梅萨·沃尔德地区还有印第安人的峭壁住宅村。美国地下居住建筑统一设计得到发展的例子,可以在弗兰克·劳埃德·赖特20世纪30~40年代的一些作品中得到体现,如明尼苏达州罗切斯特·凯斯住宅等<sup>[4]</sup>。60年代的冷战促进了地下建筑的发展,60年代中后期建筑环境意识和自然美学观点得到重视。随着70年代能源危机的出现,公众对环境和能源非常关注,也注意到地下建筑在这方面的优越性,地下居住建筑得到飞速发展。进入80年代,公众对节约能源的兴趣降低,所以,建造地下建筑的兴趣也随之降低,再加上80年代的地下居住建筑大多没有经过良好的设计,而且出现防水问题。进入90年代,对环境的关注及可持续发展理论的提出,覆土或半覆土的地下建筑又重新引起建筑师的重视。

最近30年来,大量的地下居住建筑大都以个体住宅为主,很少出现群居建筑。地下居住建筑设计中,因居室的功能要求,一般多以半下沉式或通过中庭、下沉庭园或一面敞开(台地或坡地)和周围开小天井的形式来满足采光、通风要求。

美国明尼苏达大学的书店与注册办公大楼,由于缺乏空间和保护附近有价值的历史建筑的需要,采用建筑与环境完美结合的地下建筑。书店与注册办公大楼有着不同的需要和特点,45°玻璃墙可引入视线和阳光,为使冬季阳光可透入,同时减少夏季阳光照射,在固定百页上种植花草,以减少阳光峰值强度,建筑在实用上和视觉上都很舒适,令人感兴

趣的还有屋顶用作花园。Monsanto 公司总部在地下建造自助餐厅,这样一方面可以方便地服务所有的办公建筑,满足功能要求,另一方面还可以在地面上保留一块大的中心绿地。

政府办公建筑在城市里常常位于市区中心位置,也常常成为这个城市或地区的标志性建筑,尤其是那些具有保护价值的老建筑,对于现存的具有历史意义的政府办公建筑的加建,常常将大量空间安排在地下,以达到减少对环境的影响和提高城市防御功能的目的。莫斯科克里姆林宫就是这样的例子,它延伸到地下许多层。美国加利福尼亚州的政府办公楼也位于地下,在城市中心区保留了两个街区大的开放空间,在设计上巧妙地利用照射在塔楼和下沉庭园上的太阳能来供给地下部分能量的需要,成为节约能源技术的范例。在美国堪萨斯有许多办公楼建造在改造过的石灰石矿中。

### 1.1.2 地下墓葬与宗教

墓葬与宗教是地下空间开发与应用的另一原动力。土葬很早以前就流行于世界各地,从英国的古冢、埃及金字塔到中国帝王陵墓,尤以中国的帝王陵墓为代表,最初地下主要有安置棺柩的墓室,用木椁室,随着建筑技术的发展,随后出现了砖石结构墓室。发展到后来,成为规模宏大、结构严密的地下宫殿,如秦始皇骊山陵、唐乾陵、宇陵、明孝陵及清东陵等。

古埃及、古希腊、古罗马与中国的文明大量地凸显了地下宗教遗址和地下陵墓文明。地下未经装饰的空间寂静、黑暗与神秘,给人一个与世隔绝的心理暗示、思索与灵魂净化的机会。在罗马,挖掘了大量纵横交错的地下陵墓。公元9世纪,土耳其除建造地下居住建筑外还建造了许多礼拜堂。佛教在印度和东西亚的兴起,使大量的挖掘和凿石而建的寺庙出现,那些洞室有大量有关佛教的雕刻和绘画。典型遗址如印度的百合结岩庙宇,中国四大名窟的洛阳龙门石窟、山西太原天龙山石窟、敦煌莫高窟及大同云冈石窟。此外,如近代澳大利亚的库伯佩迪(Coober Pedy)教堂、芬兰赫尔辛基 Temppeliavkio 教堂均修建于地下。在波兰和哥伦比亚等地还有一些由地下矿洞改造而成的地下教堂,以及前述美国亚利桑那印第安人的地下开越司等。

### 1.1.3 地下储藏

地下空间在储藏方面发挥着巨大的作用。仓储有着与人类地下住居建筑同样悠久的历史。地下环境温、湿度适宜,避光,有利于粮食、水果、蔬菜及酒等保存。研究表明,谷物储存在地下可获得一个相对封闭的环境,随着谷物的呼吸作用,洞室内氧气和二氧化碳含量会发生变化,从而抑制菌类及昆虫的生长,维持一种自然平衡状态。我国洛阳发现的隋唐时期的谷物坑,共有287个谷物储存框,散布在深7~11.8m、直径8~18m的范围内,部分谷物保存完好。北非的一些国家如摩洛哥、苏丹等还普遍使用传统的地下储存建筑,一个圆柱形的罐状,大约深2m,里面装满了谷物,然后密封起来。西红柿、香蕉和其他不同种类的水果也宜于储存在地下。酒窖是地下空间的传统用途,地下储存陈年酒的习惯在现在也还一样。地下空间还可广泛用作如火腿、大米、奶酪、冰淇淋等各种物资的储存。

地下空间另一个用途是石油和天然气的储存。许多大型的油气储存设施建造于地

下,主要是因为地下设施可减少冷藏费,建造成本相对低,安全性高,对环境的潜在威胁较低,且能避免地面压力罐对视觉美观的影响,特别是在城区。20世纪70年代中期,美国曾在地下储存了 $150 \times 10^6$ 桶石油和将近 $1.56 \times 10^8 \text{ m}^3$ 的天然气。地下储油系统通常意义上是一种埋地的储油罐,但斯堪的纳维亚人却发展水下岩洞储存石油,这样的成本更低。此外,天然气和油气可以在常温高压下储存或在高压下液化储藏。地下压力储存可以利用在合适深度的岩洞或多孔岩层中的天然洞穴,天然水压或岩石限制力就足够天然气或油气在这种温度下储存所需的压力。

除此以外,由于地下空间独特的环境条件及隐秘性,它还是国家机密和珍稀财产的储存地。例如:美国摩门教的记录曾保存在盐湖城附近的一个地下空间里;另外,许多大公司的高等档案储存在密苏里州堪萨斯城附近开采的石灰矿洞及马萨诸塞州波士顿附近一些废弃的矿井里。第二次世界大战中,英国的国家财产曾从伦敦疏散到西部一系列大型矿井里,挪威的国家档案馆就位于一座岩洞的防震建筑里。

#### 1.1.4 地下工业生产

地下空间也是人类生产的重要场所。工业设施建筑于地下,主要原因有二:①对战争(空袭、核战)防护的要求;②利用地下空间的环境特性。地下空间具有很好的隐蔽性和保护性,为一些安全级别高的重要产品制造提供了条件。20世纪初空袭使得摧毁一座城市的工业设施变得十分容易。第二次世界大战期间许多工业设施都被转移到地下以避空袭。在不列颠空袭中,英国伦敦一系列地下设施都改为秘密工厂。1942年5月德国发布了一条分散整个德国飞机制造业的命令;1944年2月,德国为了分散飞机制造业,计划在地下建设 $900 \times 10^4 \text{ m}^2$ 的厂房,地下设施壳体结构跨度达到200m。地下工厂由于隐蔽性好,炸弹不可能危及这些地下设施,使得地下飞机制造业得到很好的保护。第二次世界大战中,日本也建造了超过 $2.8 \times 10^4 \text{ m}^2$ 的地下工业建筑作为飞机生产厂房,同一时期美国在堪萨斯城第一次把矿井作为工业仓库。第二次世界大战结束后,瑞典持续建造了许多新的地下工厂,并且考虑了持续工作所需的条件。

除了防护、防灾作用外,发展地下工业建筑还有其他潜在的优势,具有很好的环境调节性。这些特性包括稳定的热环境,较之地表的低振动,密闭的通风系数和低渗透水平,更容易创造清洁的环境。岩洞建筑的高承载力,重要工厂的保密性,高科技的发展,需要更多特殊的工作环境与生产相适应。尽管满足这些要求的环境在地面上也可以做到,但要比普通的地面工业设施昂贵得多。对于同样的要求,如果地点合适,地下建筑只需增加很少费用,一般只要负担最初的费用。特别是利用已有地下空间时更是如此。

从美学上看,将工业建筑全部或部分建造于地下,降低地面部分的高度,可降低人们的心里恐慌,减轻心理压力。

地下工业生产的另一个重要方面是矿产资源的开发利用。据有关考古发现,人类采矿活动至今有4000年的历史。最早的采矿遗址是南非斯威士兰的一个赤铁矿矿洞,原始人开采赤铁矿用作图腾颜料,匈牙利也发现了原始人开采燧石用于制作武器和工具的矿场,埃及在西奈半岛发现了绿松石的古矿场。位于中国湖北大冶的铜绿山古铜矿遗址是迄今为止世界上开采时间跨度最长的地下矿山,铜绿山古代采矿活动始于距今3000多年

前的殷小乙时期,到南宋末期,发现采矿井、巷 360 多条,矿区面积达  $2\text{km}^2$ ,采掘深度超过  $50\text{m}$ <sup>[5]</sup>。中国在唐代发明了黑火药,距今有 1000 多年历史。黑火药的发明使得大规模采矿成为可能,大大地推动了采矿业的发展。

### 1.1.5 安全防御

地下空间用作军事用途,安全防御在很早以前就和地下空间的利用紧密联系在一起。许多防御系统都包括地道。其中,最复杂、最坚固的当属法国的马其诺防线。此外,在中国,许多地区也广泛利用地道来抗击敌人。

原子核时代对防御及最初进攻的报复性打击能力提出了新的要求,躲避爆炸和防止放射性坠尘的底所在世界各地都有所发展。美国从 20 世纪 50 年代起就开始强调可以躲避射线伤害的城防设施建设。许多家庭都在后院修建了能屏蔽放射性物质的避难所。最典型的美国科罗拉多州斯普林北美防空(air defence)指挥部,于 1965 年修建,建造于夏延山脉花岗岩中,拥有 11 座建筑,总面积为  $1.86 \times 10^4 \text{ m}^2$ 。

在瑞士等欧洲国家,人们对地下军事设施和城防设施一直保持着稳定的兴趣,如斯德哥尔摩的地下通讯中心、挪威的地下国家档案馆、斯堪的纳维亚地下储油岩洞和其他公众避难设施。它们不仅被用作城防用途,同时也很好地满足了社区的需要。中国从 20 世纪 60 年代起也发展了这样的人防设施。

许多特殊的地下军事设施还包括地下导弹发射基地、地下潜水艇基地、弹药库和其他军工设施。地下军事设施的用途还包括一些地下核武器试验。

### 1.1.6 市政管线

随着人类住居地的集中,市政管线在城市雏形时期就开始出现了。大约公元前 2500 年,古巴比伦在印度河谷建造了输水隧道;公元前 4000 年,以色列耶路撒冷和麦吉多也出现了供水隧道;罗马帝国时代,罗马建设了井水供应系统和污水排放系统;中世纪,法国巴黎建立了一套处理污水系统。地下空间也同样运用在水利灌溉上,波斯、伊朗在地层深处建造了非常好的运水系统。

19 世纪开始,市政公用设施在世界各地迅速发展,给排水系统之后是电力、电话系统、区域供暖系统及大规模运输系统等,直到现在,被称作共同沟(utility tunnel)或综合管廊的市政设施隧道已经出现,它将市政管网系统集中布置在同一沟道内,大大提高了公用设施的适应性、便利性和高度集中的效益性。

将给排水系统、电力、电话、供冷、供暖、供气及运输系统等置于地下空间,不仅可以防止天气的影响,降低冰冻和延缓老化,保证排水坡度和巨大管径等要求,而且可以美化环境,扩大地面有效空间,提高废水处理前的储存能力。

水利设施建于地下,除了减少对视觉美观上的影响外,还有使用上的优点,稳定的温度条件,安全有保障,对自然环境的影响也可降到最低程度。因此,世界上许多国家在新建水电设施时均倾向于修建在地下。挪威是世界上地下水力发电站的倡导者,全国 60% 以上的水力电站建于地下。

污水排放系统埋在地下,可以减少土地占用,解决气味和视觉污染问题,加快恶劣