

〔德意志民主共和国〕

C. 奥森道尔夫 著

隧 道 建 筑

上海科学技术出版社

710
34
19
1

隧·道·建·筑

〔德意志民主共和国〕 O. 奥森道尔夫著

韓布葛 韦国英 译

上海科学技术出版社

內 容 提 要

本书主要论述有关山岭隧道、水底隧道及地下铁道工程的各种建筑方法,对不同岩层情况下的开挖、砌筑技术以及解决施工困难的必要措施,均结合实例作有详细说明;并对旧隧道的修复经验和改建原则亦有扼要介绍。

本书可供从事隧道工程设计、施工人员及大专隧道系师生参考之用。

隧 道 建 筑

TUNNELBAU

原 著 者 (德意志民主共和国) C. Aussendorf

原出版者 VEB Verlag Technik Berlin 1955

译 者 韩 布 葛 韦 国 英

*

上海科学技术出版社出版

(上海瑞金二路450号)

上海市书刊出版业营业许可証出 093 号

新华书店上海发行所发行 各地新华书店经售

商务印书馆上海厂印刷

*

开本 850×1168 1/25 印张 10 13/25 字数 305,000

1961年12月第1版 1961年12月第1次印刷

印数 1-3,000

统一书号: 15119·1634

定 价: (十二) 1.50 元

原 序

隧道建筑工程的大規模建設时期开始于十九世紀，当时由于扩建铁路网而促成隧道的兴建，至第一次世界大战开始时告一結束。在1900年以前，即已有过一个建筑水底隧道的时期，继而又进入到地下鉄道的建筑时期。第二次世界大战时，隧道建筑事业則又告停頓，因为当时除了具有战略原因外不会考虑到开辟新的交通綫。直至战事平息，隧道建筑又被人們重視起来。随着开辟新綫和原有鉄路、公路的改綫，需要建筑一批新的隧道。此外，原有隧道由于部分損毀和在尺寸方面已不能适应近代交通的要求，也迫切需要大量的修复和改建。这样，使隧道建筑人員到处遇着了新的問題，感到困难的是有經驗的老工程师已不易多得，富有經驗的隧道工程監工人員、工长和工人亦很缺乏。至于訓練青年一代的隧道建筑者，又没有实际施工可資练习，故即使这种訓練没有因为战争緣故而中断，亦只能局限于作理論性的傳授。实际上，隧道建筑工程在高等学校中又往往不被重視，以致現在从事隧道建筑的人員大多缺乏建筑隧道的实际經驗。因此供給隧道建筑人員关于解决各种隧道問題的迅速而有效的指导是一項迫切的任务。在这方面可提供的专业著作虽为数甚多，但它們适宜于供深入研究之用，对于隧道建筑的基本原則和适当的建筑方法却不能提供迅速而又实用的綱要。隧道方面的巨册教科书都是1920~1925年以前的写作，内容倒也洋洋大观，不过已是过时的产物，仅在隧道建筑史方面具有价值，而不再适用于現在的时代了。另一方面，在那些教科书中，大部分都沒有談到最近数十年来发展的新方法，而这些都是散見于各种难以寻找的技术杂志中的。同时，虽也有着不少有关隧道建筑各个部分的好书，如隧道靜力学、隧道地质学、水底隧道、隧道的特殊建筑法等；但是总觉缺少一本簡明的教科书，其中能包括隧道建筑的概要和对所有問題的簡捷指示。作者在所领导的隧洞和隧道建筑工程的具体工作中深深地感觉到这一缺点的严重性。这些工程中的管理人員、工长和专业工人一般都有着一些建筑隧道的实际經驗，但是这些經驗多少是片面的，而且局限于他們从前在实际工作中所接触到的一些方法。我們采用的隧道建筑方法，不仅是不同的隧道应当按照所遇到的各种岩石类别而有所不同，而且在同一隧道建筑中也会因不同情况而需要很快地予以变换的。不能預先見到的事情随时都会发生，这就需要作紧急处理，要求改变建筑方法和采用一些特殊的措施；重要的决定如不能及时地作出，很可能招致意外并使費用和時間受到严重的損失。因此，有

必要使所有从事于隧道建筑工程的人员都具有关于各种不同建筑方法、试验可行的辅助措施、安全设备等等的宽广知识。作者写这本书的企图就是为了这些正当的需要。同时，这本书对于大学学生和渴求求知的专业人员也提供了全部隧道建筑范围内的简明资料。除了那些目前仍在采用的、又是作为发展新方法基础的古典建筑方法之外，作者还叙述了一些新的建筑方法，并对竖井作了讨论，后者是与隧道建筑有关而可能出现的。此外，作者认为有必要对于那些修复损毁隧道中的最新经验和原则也加以讨论。在这本书中，作者有目的地避免了那些过于详细的理论探讨，对于理论和建筑方法尚存在分歧的意见，作者仅讨论那些已被公认为正确的方法。此外，作者还认为不仅必须用许多实例来研究，而且也须探讨一下错误的建筑，从而防止这些错误的重复发生。对于隧道建筑的重要辅助学科，如测量学、地质学、静力学、爆破技术、建筑机具的构造等，作者仅就隧道建筑人员所需的知识加以叙述；至于特殊细节部分，那就应该就商于测量、机械和采矿工程师们了。就隧道建筑工程的知识来讲，这本书完全足够应用；对于个别问题和特殊的建筑方法则可阅读专业参考资料。

在各种建筑工程中，隧道是最隐蔽的一种。这种工程施工时的困难和危险，以及多种多样的建筑方法和正确的设计思想都很少为人所了解。因此，本书所述和所附大量插图可以很好地用以引起非专业的读者对于隧道建筑艺术的兴趣，同时对于隧道建筑者的艰苦和忘我劳动所作出的成就亦予以适当的评价。

C. 奥森道尔夫

1955年3月，德累斯登市

目 录

原序

1. 緒論	1
2. 隧道建筑的发展历史	4
3. 隧道建筑的施工	12
3-1 开挖	12
3-1-1 手工工具	12
3-1-2 炸药和雷管	13
3-1-3 钻机	18
3-1-4 特殊设备和辅助工具	24
3-1-4-1 照明	24
3-1-4-2 通风	25
3-1-4-3 废土的清除	27
3-1-4-4 运输	29
3-2 掘进、全面开挖和支撑	31
3-2-1 导洞掘进	31
3-2-2 导洞支撑	33
3-2-3 全面开挖	43
3-2-4 隧道支撑	44
3-2-5 竖井支撑	52
3-2-6 工程进度与材料消耗	55
3-3 隧道建筑的勘察和设计	59
3-4 隧道建筑方法	73
3-4-1 德国建筑法 (核心支持法)	76
3-4-2 比国建筑法 (支承顶拱法)	79
3-4-3 奥国建筑法 (全面开挖法)	83
3-4-4 意国建筑法 (填筑圪工法)	90
3-4-5 环拱架建筑法	100
3-4-6 英国建筑法	103
3-4-7 盾构建筑法	109
3-5 隧道衬砌	113

3-6 水底隧道	129
3-6-1 采矿法开挖	130
3-6-2 盾构建筑法	134
3-6-3 采用沉箱的建筑方法	145
3-6-4 预制节段的沉放法	145
3-6-5 明筑方法	152
3-6-6 采用水下掩盖工作坑的建筑方法	155
3-6-7 海峡底下的隧道建筑方法	156
3-7 实例和隧道的坍塌	162
3-8 地下铁道	187
3-9 静力计算	218
3-10 其他工程	228
3-10-1 测量与中线测定	228
3-10-2 冰冻法	231
3-10-3 化学凝固法	239
3-10-4 旧隧道的加固和改建	242
3-10-5 特殊情况的建筑	253
3-10-5-1 有压引水隧洞	253
3-10-5-2 在不稳定岩层中引水隧道的最小尺寸	254
3-10-5-3 哈令哥氏的机械化盾构	255
3-10-5-4 在明坑中修理和拆除隧道的方法	257
結尾語	262

1. 緒 論

隧道是用作地下通道的一种建筑物,例如公路隧道、铁路隧道、汽车路隧道、通航运河隧道或给排水用的引水隧道等。小断面的隧道也可借用矿山工程的术语叫做隧洞。但是其中的基本差别却在于采矿用的隧洞一般都不是独立的建筑物,而是或多或少地属于辅助性质的地下通道,用以使蕴藏着的金属、矿物、岩石或其他贵重物品的地下矿场与外界接通。小断面的隧道则与采矿用的隧洞相反,它们是独立的建筑物;同时对于它们的位置、建筑方法和持久性的要求都比采矿用的一般隧洞要高些。在隧道工程的各种建筑方法中,它们也可作为临时性的建筑物之用,即用断面约为4~8平方米的所谓导洞首先沿着隧道的设计方向向前推进,然后随着这些导洞作全面开挖。在历史上,隧道的建造最初是根据早期的采矿经验来进行的,第一批铁路隧道是在百年前由采矿人员所筑成。由于隧道有时须建筑在不稳定或破碎的地层中,以及有时定线是在河底或地下水中,因而使掘进与砌筑衬砌常会遇到不断增加的困难,但隧道工程的建筑技术已逐渐为作为隧道建筑者训练出来的土木工程师们所掌握,并由他们将各种建筑方法不断的加以发展和改进。

人们对于伟大的诗人、著名的音乐家、画家、雕刻家以及设计纪念性建筑物的建筑师们总是永久地在纪念着和景仰着的。然而对于建筑那些雄伟的桥梁、海港、发电站、堤坝、运河等建筑物的工程师们,后世的人却很少怀念着他们。至于埋藏在地下而不为人们所见到的那些最艰难的隧道建筑物的天才设计者和勇敢的建筑者就更没有人会想到他们了。有哪一个柏林地下铁道的旅客在乘车通过斯勃雷(Spreew)河下面的水底隧道时会觉察到有着什么奇迹。乘坐特别快车在半小时中通过辛普伦(Simplon)隧道的旅客们也不会问到从前建筑这个伟大工程的是哪些人。他们对于这个20公里长的奇特建筑物究竟遇到过些什么困难以及多大的牺牲更是一无所知了。然而在50年前,全世界的人们对这个历时六年有半才告完成的伟大工程的进度,都曾感到莫大的兴趣并曾寄予无比的希望。

辛普伦隧道是从意大利地中海铁道的终点站,即道模道什拉(Domo d'Ossola)车站,延伸到瑞士的不雷格(Brig)车站为止的,共有19730米长。在所有阿尔卑斯山(Alps)的隧道中它是最深的一条,它的最高点较圣哥大隧道(St. Gotthard)还要深450米,而较仙尼斯山(Cenis)隧道更要深600米。它是建筑在山岭的底部,因而长度很大。

这个隧道的建筑工程历时六年半就完成了，很明显地标志出当时隧道建筑技术已有很大的进步。在此之前，15 公里长并且工程还不算困难的圣哥大隧道，却需要 8 年的时间，至 1880 年才凿通，而 12 公里长的仙尼斯隧道直至 1871 年才筑成，历时 13 年之久。

辛普倫隧道的建筑工程是在 1898 年 8 月 13 日开工的，而在 1905 年 2 月 24 日打通了从两端掘进的导洞之间的最后一段岩层墙壁。在建筑过程中，导洞的原来方向也曾有过几次变动，但两端导洞的中轴相差有限：横向仅差 20 厘米，竖向也不过相差 2.8 米^①，这可说是当时测量技术上的一项杰出成就。

辛普倫隧道建筑工程所遭遇的困难几乎是不可想象的，山岭的岩层在掘进中不断地产生着新的障碍。有时内部热度上升到不能忍受的程度；有些地方的岩层是松软或破碎的，其岩层压力大有压毁隧道顶拱的趋势；大量的冷的或热的泉水不断地喷出，辛勤筑成的导洞时有下沉和被毁的危险。

原来的计划是要在 1903 年 11 月完工的，而按第一期的进度大家以为还可以提早凿通。但是在北端开挖到六公里处，岩层温度却升高到惊人而未能预料的程度。到 7 公里的地方，温度预计将达 $36\sim 37^{\circ}\text{C}$ ，而实际的气温则为 $45\sim 46^{\circ}\text{C}$ 。再前进 500 米，温度已高到 53°C ，且有继续增加的趋势。在这个时候，虽导入冷空气也无济于事了；为了要使钻眼工作能够继续进行，不得不利用喷洒设备把冰冷的水蒙蒙细雨般的喷到工作地点，以使岩层冷却。

除北段导洞中遇到高温影响外，南段工程也因岩石的挤压和大量水流的冲入导洞而使所有工作几乎完全处于停顿状态。这种岩层压力是巨大的，曾压毁了最大的木支撑并压弯了相当强大的钢梁。只有在建造了巨大的混凝土块和采用了最强的钢梁之后，这种压力才被持久地抵抗住了。淹没隧道的冷、热泉水亦曾尽力使其汇集起来而予以排去。建筑完成之后，仍有约每秒 1000 升的水自岩层裂缝中流入拱部，这就需要另用另一道平行隧洞把水排除出去。

从事于这个隧道工程的工人最多时曾达 4000 人。从山岭内部运到外面来的岩石远远超出了百万立方米。炸药的用量约 1350 吨，雷管约 4 百万只，引火綫长约 5300 公里。钻眼总数将近 4 百万个。

在其他隧道工程中也曾遇到类似的、甚至还要大些的困难。从事于隧道建筑的工程师们和工人们所作的奋斗和所遇到的惊险甚至超过采矿中的情况。在采矿工程中，尚有可能避开山岭中特别危险的地段；但在建筑隧道时，一般是无法对原

^① 译者注：按照荷埃欧(W. Hoyer)教授所著的 *Unterbau* (Berlin, 1923 年)一书第 121 页的记载，辛普倫隧道的长度是 19756 米，两端导洞的中轴横向差为 202 毫米，竖向差为 87 毫米，则与本书记载的数值有所出入。

来的設計中綫加以更改的。在隧道工程的全部历史的发展过程中，由于工程师們不断地努力改进技术措施而获得了日益进步的建築方法。他們了解了錯誤、失敗和意外事件发生的原因，从而吸取教訓在施工中加以防范，并在建築方法上作出了很大的改善以及很多的安全措施。現代有經驗的隧道建築者可以安全地进行那些在 50 年前会遇到很大危險或甚至不可能完成的工程。

由于交通事业的不断发展，新建交通綫的规划和現有交通綫的改善必然同时并进。隧道建築在主要居住区的重要交通綫上不仅要滿足設計要求，而且更具有地下布置的意义。随着新居住区的发展，势将大規模地规划公路、鉄路和水道。由于在許多場合中建築隧道能够大大地縮短了綫路和形成有利的坡度，从而获得較經濟的效果，因此对于大型的隧道建築不再有所畏惧了。此外，隧道交通不受到气候的影响，河流和海峡底下的隧道更可省掉建築昂貴的桥梁或船只运输的费用；而且隧道不占用地面上的地位，因而毫不干扰任何用地。从經濟观点来看，交通綫的辟筑和經營應該尽可能地節約。为了要达到这个目的，建築隧道是一个很突出的好办法；因此它的重要性在未来的数十年中还会不断地增大。

2. 隧道建筑的发展历史

人类最初进入到地面下面去，并不是为了发展交通，而只是为了居住的需要，借以避免遭受天气变化的影响。他们往往利用天然的洞穴，有时还须用他们的原始工具加以扩充。当古代时，人们常在不甚坚硬但尚稳固的岩石中挖掘通道和洞穴，用以建筑庙宇和墓室。在埃及，当中王国时代的初期（约在纪元前 2000 年）采用石墓曾成为一时风尚；这种石墓一般包括一间庙堂（即祈禱室）、一间或几间小室，和贮藏尸体的竖井，可是这也只有著名的人物才能享用。石墓的建造系用早期铜器时代所用的建筑工具，故必然是非常笨拙而费时的。第一次用作通道性质的地下建筑物可能是在纪元前 1000 年左右以色列（Israel）国王大卫（David）和所罗门（Solomon）时代所建筑的。它们可以称作隧道，其用途是为了供给耶路撒冷（Jerusalem）城的用水。它们包括几个孔道，部分具有圬工的衬砌；其中的一个长达 537 米。400 年后，巴比伦（Babylon）和阿西利阿（Assyren）等处的人为了完成幼发拉底（Euphrat）河和底格里斯（Tigris）河之间这一区域的灌溉和排水，也建筑了类似的隧道。在巴比伦国王尼布甲尼撒（Nebukadnezar，纪元前 605~562 年）的统治下，从他的皇宫通到太阳神庙所建的一条交通通道可能就是第一条用于交通的隧道，这条隧道曾在幼发拉底河的河床下面通过。当然这种建筑只有在坚硬岩石中和没有任何水流侵入的条件下才有可能（那时已有铁制工具可供采用）。类似的隧道也在古希腊境内建筑了起来。幼派令脑斯（Eupalinos）人为专供萨摩斯（Samos）岛给水之用而曾筑成了长 1000 米的隧道。在罗马时代开始时即已完成了许多隧道，如把阿弗脑（Averno）湖的水供给克买（Cumae）城用的给水隧道就是一个例子。这个隧道现在已经干涸，但是人们尚可走到里面去。又如从佛新乃（Fucina）湖开始的地下排水沟道也有 5 公里长。惠思葩西安（Vespasian）人约于公元 75 年在阿皮令（Appenin）山中筑了人行隧道。在罗马、里昂（Lyon）和尼米斯（Nimes）的大规模给水线中也筑有一些隧道。有一条特别饶有兴趣的隧道建筑，那就是那不勒斯（Naples）地方的“婆西里勃洞”（“Grotto of Posilipp”），它是在纪元开始时筑成的，直到现在还是在运用着。这条公路隧道长约 1 公里，它从一个伸入海中很远的山脊下面经过；建筑形式是在凝灰岩中凿成垂直边墙而不用衬砌。宽度近乎 7 米，而中部的高度也是 7 米，这个高度从中部起向两端入口处逐渐增加到 25 米，目的是要使白天的光线能够尽量透入。建筑在旁侧的一些斜井是用于通风的。同样，

这个真正的隧道也只能是建筑在对于环境和气候有坚强抵抗性的凝灰岩岩层中。这种岩层使第一世紀时代的那不勒斯人和羅馬人能够建造起分支极广的墓穴和坟場。这些坟場是由許多通道、长廊和墓室所組成，全部都是从稳定而不风化的凝灰岩中挖凿出来的。墓室系用作一家丛葬和求神拜佛的場所。羅馬四周都有这种坟丛；如果将所有坟丛內的錯綜复杂的通道和长廊連接起来，总长度可能会达 1000 公里。

12 世紀以来，德国、匈牙利、挪威和英国等国家为了搜求貴重金屬（如金、銀、白金）以及銅、錫、鉛、鉄、水銀等进行着大規模的采矿工作。1262 年，哈茨（Harz）山的矿工曾被征召到英格兰西南部一个州的銅矿区工作。在 14 和 15 世紀中，德国人曾在瑞典指导有关开采銅、銀、鉄矿的技术。德国的矿工也曾到匈牙利、法国、西班牙、苏格兰，甚至后来更到南美洲去工作。在 15 世紀中，德国的采矿事业更兴盛起来了，特别是为了开采貴重金屬。同样地，在奥国、匈牙利、波希米亚、薩克森（Sachsen）以及哈茨山等地方也是如此。在坚固的岩层中开挖巷道曾耗費了意想不到的人力、物力和財力；它們是由艰辛的手工操作应用手錘、凿子开挖而成，开挖的进度有时甚至一年只有 6~10 米。在这样艰难的工作条件下，亦終于在陶欧茵（Tauern）山的片麻岩和石英岩中挖掘了 100 公里长的金矿隧道。佛来堡（Freiberg）銀矿的矿井和巷道并没有砌筑衬砌，而至今仍然完好；值得注意的是一条建筑在岩层中长达 25 公里的排水用巷道，它从佛来堡矿場排水到易北（Elbe）河谷而在弥森（Meissen）城的附近流出。所有这些巷道的断面都不大，都是用手工在坚岩中挖凿而成，有的加做了拱形的块石圬工衬砌，有的則并无衬砌。在中世紀中，从軍用城堡通到周圍的許多避难用和交通用的隧道也是和上面所述的差不多。中世紀不少設防城市中的許多地下聯絡通道网至今仍可找到；虽然大部分已破損，但一部分尚可走进去。这些通道也曾筑在不稳固的地层中；它們由于断面小，故用木料作衬砌，但寿命不长；在含水的地层中則沒有发现这种建筑。但是在中世紀的时候，由于对隧道的需要不大，故沒有大量的建筑，只有在 30 年战争（17 世紀）終止后欧洲人民回复到和平建設的时期，建筑隧道的技术又复日新月异了，特别是在炸药逐渐广泛地用于采矿工作之后。从前所利用的工具不过是些 1~2 公斤的重錘以及装有鋼尖（用于掘松岩石）的 15~20 厘米长的鉄凿。有时則在将要开挖的岩壁面前燃燒木材使岩壁燒热，然后澆以冷水，使岩石变脆而易于开凿。这些原始的方法后来都为爆炸方法所代替。这样，隧道的建筑技术又有了进一步的发展。

在那个时候，法国人掌握了建筑隧道的技术，他們領導着这种事业几乎达 150 年之久。这种情况并不是偶然的，主要是在于法国当 18 世紀和 19 世紀初期經濟高度发展和政府权力集中的緣故。那时，欧洲中部和南部正在不断地分裂成一些

小国(特别是德国),因而大大削弱了发展交通的力量,而在法国的广大土地上却得以从事和平建设而使科学和技术得到进一步的发展。公路网和水道网的标准大大地提高了。这也是第一条大隧道——马尔派斯(Malpas)隧道——能够顺利完成的原因。马尔派斯隧道是普洛瓦斯(Provençal)运河的一部分,于1678~1681年由利奎特(Riquet)氏所建造,它是筑在凝灰岩中的,当时并没有砌筑衬砌;过了7年,才加筑衬砌的。这条隧道长157米、宽6.9米、高8.4米,因而断面积大于50平方米。它也是用与采石和采矿一样的普通开挖方法开挖的,所不同者仅在于它曾第一次开挖了一个大尺寸的断面,而且没有使用支撑或特殊的建筑方法。可能当时所采用的在岩壁上进行全面开挖的方法用在稳定的凝灰岩中是没有危险的。但是,即使在法国,当时这样的工程也是不常见的;又隔了几乎一个世纪之后,两条相似的隧道筑成了:1770年的沿盖佛斯(Givors)运河的盖欧(Gier)河底隧道和1787年的沿中央运河的陶尔赛(Torey)隧道。此外,还有一条隧道也值得一提,那就是18世纪初期(1707年)建筑的“欧娄洞”(Urner Hole),它是横穿圣哥大山的一条交通栈隧道,它的建筑也是纯粹的岩石开挖工作。所有这些隧道在技术上都没有特殊的困难;施工方面只包括挖凿和搬运岩石,但在当时的工具条件下,没有坚持的精神也是不容易成功的。

法国人于1803年曾计划在突朗科(Tronquoi)建筑一条8米宽的隧道把圣昆丁(St. Quentin)运河连接起来。那时,在压力强大的砂岩中建筑这样大小的隧道还是第一次,因此毫无建筑经验。唯一的办法就是利用采矿方面的经验,在松散土壤中建筑一些小型隧道用于交通和运输矿石,这类隧道仅约1.5米宽和1.8米高,

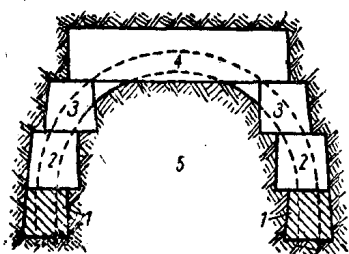


图1 突朗科隧道的开挖程序

用木料支撑以防挖松的土壤崩塌。开挖突朗科隧道时曾想出了一种方法,就是借助于先开挖几个比较小的隧洞,然后逐渐挖成所需的断面。这样,隧道全部断面得以同时开挖而昂贵的支撑也可以免掉了。衬砌也在同时一段段地砌筑起来,然后就在这种衬砌的保护下,把剩下的核心部分挖掉。首先,把隧道两边底脚地方的两个导洞1

挖好(图1),隧道衬砌的两脚就是在这些导洞中用圬工筑成的。然后,紧接着第一对导洞之上开挖第2对导洞,继续再挖第3对,并在每一导洞中向上砌筑隧道衬砌的相应部分。最后,在横洞4中用圬工筑成拱顶。于是在隧道衬砌已成部分的保护下有可能开挖核心5了;在压力强大的松软地层中的第一条隧道就是这样地完成的。这是一种大胆的设计和勇敢的建筑方法。然而建筑这个隧道的工程人员是谁,即使在最大的隧道建筑手册中也没有这种记载。

• 在第一个法兰西帝国的时代没有建筑什么隧道。那时法国的力量在拿破仑统治下完全消耗于战争。拿破仑失败之后，这个国家也只能逐步地从战争创伤中恢复过来，而隧道的建筑也只有经过几年的和平建设之后才有可能。1822年，根据突朗科的已经考验过的经验，在圣爱格兰(St. Aignan)建筑了沟通阿丹令(Ardennen)运河的隧道，但拱顶是在一个纵的(不是横的)导洞中砌筑。另外一个进步的建筑是在1824年完成的沟通波尔格尼(Bourgogne)运河的婆莱(Pouilly)隧道。它是筑在泥灰土和坚实的石灰岩中的，因而在开挖的时候导洞可以挖得稍微大些(图2)。在开挖隧道底脚的两个导洞1的同时也开挖顶部导洞2，从那里再开挖扩大部分3直到底脚导洞为止。这种建筑方法只有在不破碎或稍微破碎的岩层中才有可能。但是为了加固顶部必须安装由简单的纵梁组成的支撑。这种支撑用圆木撑住在“核心”部分上(图3)。这样，隧道的第一道支撑就建成了。必须注意的是隧道建筑中的所谓纵梁(也叫做顶梁)是一种圆形或方形的木料(例如8米长)，沿着隧道的纵向直接地支撑着隧道的顶部；它与木桥建筑中的排架是不同的。在这个隧道中，衬砌是不断地从底脚导洞起进行砌筑的。

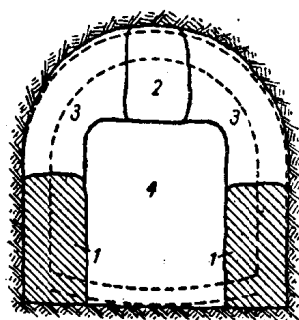


图2 婆莱隧道的开挖程序

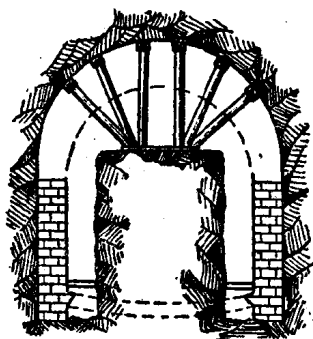


图3 婆莱隧道的支撑

这些法国的建筑隧道方法是一种直到现在还偶尔采用的所谓“核心建筑法”，这种方法是因为中央部分(即核心)一直保留到最后才开挖而得名，在保留时间中它具有支持洞壁的作用。这种建筑方法也可叫做“德国建筑法”，因为在德国有些筑在松软岩层(有压力的岩层)中的隧道是根据早期的法国建筑方法胜利完成的。这个名称当然并不适当；应该把这种“核心建筑法”称为“法国建筑法”，借以纪念法国的那些创造这种方法的工程人员们。

直到1830年为止，除在松软岩层中建筑了许多隧道之外，在坚硬岩层中也建筑了一些隧道——主要是为了防止雪崩。这些隧道是筑在通过辛普伦山、仙尼斯山、斯波利根(Splügen)山、本哈廷(Bernhardin)山、斯替尔守(Stilfser)山和圣哥大山的阿尔卑斯公路线上。在建筑技术方面并没有遭遇到特别的困难。在那个时候，英国也在坚硬岩层中建筑公路隧道。其中最著名而有特殊重要性的要算泰晤士(Thames)河下面的公路隧道，它把伦敦市的两个部分连接起来。这个计划开端于18世纪末，至1807年才开始施工。采用的方法是先开凿一座直井，再从直

井中开挖导洞；但不久这个工程，由于那时的设备还不足以克服侵入的水流就被迫停顿了。1823年，这个工程在法国工程师I. 勃吕奈尔(Brunel)氏的指导下又告开工；在18个年头里虽然遭遇到不断的且为当时尚不能了解的困难，勃吕奈尔氏终于克服了它们而胜利地完成了这个艰巨的任务。在建筑过程中，工程进度曾中止过十一次，但勃吕奈尔氏每次都能克服困难而重新开工。最后，他采用一种铁制的“盾”形工具沿着隧道断面的全部周边打入岩层中而终于获得了成功。在这个盾形工具的保护下可以完成岩层的开挖和砌筑隧道的永久衬砌。这样，勃吕奈尔氏成了这种建筑新法，即“盾构建筑法”的发明者。这个方法后来更用在松散岩层中、有流水侵入的地层中以及在水底建筑隧道，它成为一项非常重要的技术措施了。

隧道建筑工程的另一新纪元随着铁道建筑的发展而开始。G. 史蒂文生(Stephenson, 1781~1848年)氏在1814年制造了第一部实用的机车(即火车头)，而在1821年之后并筑成英国第一条公用的铁路线。在1826~1830年中他在利物浦(Liverpool)城的坚硬岩层中建筑了最早的两条铁路隧道借以打通利物浦-曼彻斯特(Manchester)铁路。自从历史上著名的“莱因亥尔(Rainhill)竞赛”中机车“火箭号”获得了胜利(1829年)以来，仅仅几年之后全世界的巨大铁路网的建筑开始了。这样一来，隧道建筑也随着大大地向前发展了。

德国的最初两条铁路隧道的建筑开始于1837年：一条是德累斯登-莱比锡(Dresden-Leipzig)铁路的俄比劳(Oberau)隧道，长约500米，100年之后，由于它的断面太窄并且已经不能修复，故废弃不用而代以深路堑了。另一条隧道则是科隆-亚琛(Köln-Aachen)铁路线上的科尼希村(Königsdorf)隧道。俄比劳隧道的建筑工程历时2年才完成；它是由佛来堡的采矿工人筑成的。隧道顶部的复盖层只12米厚。假使用现代的土工设备来开挖，则明堑还比隧道的费用节省得多。那时的开挖与运输完全依靠着既昂贵而又耗费时间的手工和牲畜的力量。为了要节省时间，隧道的建筑不是从两端开始而是从两个竖井开始的。那里的岩层还算稳定，采用开矿用的简单支撑方法就可以了。这个隧道供双轨之用，轨道中线之间的距离是3.11米，但德累斯登-莱比锡铁路最初仅筑成单轨。57~113厘米厚的拱顶衬砌和隧道门是用砂岩料石块筑成的，经过了95年的运用，它们还很完好。只有在圯工的内面，由于水和机车烟灰的侵蚀作用，致砂岩和灰浆受到了一定的损害。所用灰浆的成分是7分石灰、2分石粉和1分碎砖。顶拱上加筑了一个指头厚的防水保护层。然而这样的保护层并不足以永久防止水的渗入。从这条铁路和隧道的旅行记载上知道，当时的旅行是很有兴趣的。火车站的房屋非常简单，火车的车厢亦和现代的完全不同。只有头等车有车厢和窗子；二等车仅有车顶而两边有帘子；三等车则和现在的煤车相似，是完全敞开的。三等车的乘客经常受到风吹

雨打、烈日熏蒸以及灰砂侵扰的痛苦,而不时更遭到机車上火花的襲击以致身体和衣服都会受到損害。因此,当时在車站上就有人販卖面具和保护用的眼鏡,而每个旅客往往亦随帶一套粗麻紗的外衣以資保护。

奥国的第一条铁路隧道是1839年开始建筑的維也納-脫利斯脫(Wien-Triest)铁路綫中的格姆婆尔斯(Gumpoldskirchen)隧道。

在后来的数十年中,隧道工程师們由于对一系列严重問題的深入研究,终于迅速地发展了适应各种不同岩层情况的建筑技术来加速开挖工作。迄今为止,在交通路綫中,公路的坡度和曲度都很容易适应于山岭的地势,而铁路路綫由于要求具有相当小的坡度和比較大的曲率半徑,因此在崇山峻岭中只有用长隧道来克服,故在阿尔卑斯山中隧道的长度有达 20 公里的。这样一来,在建筑这些巨大建筑物时,除开挖和砌筑等問題之外又发生了排水、运输和通风等新問題。这些建筑之所以成为可能还是因为采用了炸药来代替火药以及机械化钻眼来代替手工钻眼的緣故。最近几十年以来,建筑技术的发展更是突飞猛进,运用新式工具和采用新的方法已能在松散岩层中、流砂中以及在水底建筑隧道了。下表中所列举的主要是上一世紀(19 世紀)所建筑的一些重要隧道。当然,表中所包括的只是目前还存在的隧道中的一部分。

建筑时期	隧 道 名 称	所 在 地	长 度
1854~1876	呼薩克隧道	美 国	7600 米
1856~1860	史朗德雷奇隧道	英 国	5000 米
1857~1871	仙尼斯山隧道	意大利-法国	12820 米
1869~1873	苏突罗隧道	美 国	6000 米
1872~1881	圣哥大山隧道	瑞 士	15000 米
1873~1886	塞汶河下隧道	英 国	7300 米
1874~1877	考奇姆隧道	德 国	4200 米
1879~1884	馬雷脑婆里隧道	意大利(西西里)	6480 米
1880~1884	勃朗德里突隧道	德 国	3040 米
1880~1884	阿尔堡隧道	奥 国	10250 米
1882~1889	朗科隧道	意 大 利	8290 米
1883~1894	包喀罗隧道	意 大 利	7970 米
1884~1890	圣克萊尔河下隧道(盾构开挖)	美 国	1830 米
1885~1887	馬利恩哈尔隧道	德 国	1040 米
1886~1890	倫敦-南部倫敦隧道(盾构开挖,两道)	英 国	每道 5100 米
1889~1900	科里-第-探达隧道(双軌)	意 大 利	8100 米
1889~1894	陶琴挪隧道	意 大 利	6450 米
1892~1896	格拉斯哥区地下鉄道隧道	英 国	10500 米
1892~1897	泰晤士河下的黑墙隧道(用压縮空气的盾构开挖)	英 国	1360 米
1895~1899	在突雷勃妥的斯勃雷河隧道(用压縮空气的盾构开挖)	德 国	450 米

(續)

建筑时期	隧 道 名 称	所 在 地	长 度
1896~1912	少妇山隧道	瑞 士	7200 米
1896~1903	格雷弗好尔斯隧道	挪 威	5310 米
1897~1900	中部倫敦地下鉄道隧道(深 18~28 米)	英 国	9300 米
1893~1900	巴黎地下鉄道隧道	法 国	14000 米
1898~1906	辛普倫隧道 I }	瑞士-意大利	19800 米
1912~1922	辛普倫隧道 II }	瑞士-意大利	19800 米
1899~1903	阿尔布拉隧道(单軌)	瑞 士	5860 米
1900~1905	伏呼埃耐尔隧道	奥 国	6340 米
1901~1906	卡拉万肯隧道(双軌)	奥 国	7980 米
1901~1909	陶欧茵山隧道(双軌)	奥 国	8550 米
1902~1905	盖蒂科隧道(单軌,其中有 350 米是用壓縮空气沉箱开挖的)	意 大 利	3310 米
1902~1909	紐約市地下鉄道隧道(其中 1830 米在赫德森河下)	美 国	19920 米
1904~1909	雷肯隧道	瑞 士	8600 米
1906~1913	雷奇堡隧道(双軌)	瑞 士	14530 米
1908~1914	斯魯突因隧道(双軌)	德 国	3570 米
1907~1910	在汉堡易北河下的隧道(两道均用壓縮空气的盾构开挖)	德 国	每道 430 米
1908~1909	地得律河下的隧道(两道,有 810 米在水底,分 10 节沉筑)	美 国	2530 米
1910~1914	金山隧道	法国-瑞士	6100 米
1911~1922	罗弗运河隧道(22 米宽、14 米高)	法 国	7120 米
1912~1916	格雷琴堡隧道	瑞 士	8370 米
1912~1915	豪恩斯坦隧道(双軌)	瑞 士	8150 米
1917~1924	上达肯隧道(用于紐約市給水)	美 国	29000 米
1918~1922	丹那隧道	日 本	8000 米
1919~1927	紐約市赫德森河下的荷兰隧道(双道,其中 4150 米是用盾构开挖的)	美 国	5160 米
1921~1930	亚平宁隧道(双軌)	意 大 利	18510 米
1925~1934	麦賽隧道(用采矿法)	英 国	4620 米
1926~1929	喀斯喀特隧道(单軌)	美 国	12520 米
1926~1928	俄克兰-阿拉美达隧道(在旧金山灣下面,分节沉放)	美 国	1080 米
1928~1930	地得律-加拿大水底隧道(其中 670 米长一段分 9 节沉放,引道部分用盾构开挖)	美国-加拿大	1370 米
1928	斯勃雷河下面的柏林-弗里特里哈根隧道(沉箱)	德 国	105 米
1929~1930	錯喀斯毕茲隧道(单軌)	德 国	4500 米
1931~1933	些耳德河下用于汽車交通的隧道	比 国	1770 米
1931~1933	些耳德河下用于行人交通的隧道(壓縮空气的盾构开挖)	比 国	570 米
1935~1938	鹿特丹的瑪斯河下的隧道(在水下 585 米,分 9 节沉放)	荷 兰	1070 米