

普通高等教育城市地下空间工程系列规划教材

地下工程施工

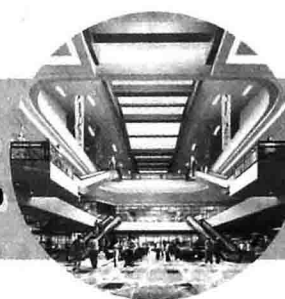
张志勇◎主编



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

普通高等教育城市地下空间工程系列规划教材

地下工程施工



主 编 张志勇

副主编 纪洪广 张德琦 蒋复量

参 编 王文武 周晓敏 李万江

吴新华 张宝红 马芝文

仲兆全 邹 波



机械工业出版社

本书系统地介绍了地下工程施工技术与管理,分为五大部分共18章和一个附录,对地下工程中的表土施工、岩石施工、特殊地层施工和施工组织与管理分别作了阐述。全书突出了表土中的顶管法、盾构法和岩石中的岩石平巷施工(含巷道断面和交岔点设计)以及特殊施工技术。具体内容包括地下工程围岩分级方法、明挖法施工、非开挖施工技术(顶管法和盾构法)、钻井法、混凝土帷幕法、水平巷道(隧道)施工、立井井筒施工、倾斜巷道施工、冻结法施工、注浆施工、反井钻进施工、软岩巷道施工、地下工程施工组织与管理、岩石平巷巷道断面与交岔点设计等。

本书既可作为高等院校城市地下空间工程以及土木工程相关专业的本科教材,还可作为矿山工程、交通工程、水利水电工程、市政工程等专业的本科教材,也可供相关的工程技术人员、管理人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

地下工程施工/张志勇主编. —北京:机械工业出版社, 2014. 12

普通高等教育城市地下空间工程系列规划教材

ISBN 978-7-111-48520-9

I. ①地… II. ①张… III. ①地下工程—工程施工—高等学校—教材

IV. ①TU94

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第265919号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

策划编辑:李帅 责任编辑:李帅 于伟蓉 冯钺

版式设计:霍永明 责任校对:张晓蓉

封面设计:鞠杨 责任印制:刘岚

北京诚信伟业印刷有限公司印刷

2015年1月第1版第1次印刷

184mm×260mm·23印张·622千字

标准书号:ISBN 978-7-111-48520-9

定价:46.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

服务咨询热线:010-88379833 机工官网:www.cmpbook.com

读者购书热线:010-88379469 机工官博:weibo.com/cmp1952

教育服务网:www.cmpedu.com

封面无防伪标均为盗版

金书网:www.golden-book.com

前 言

地下工程施工是土木工程专业必修的专业技术课程。它在培养学生独立分析和解决地下工程施工中有关施工技术和施工组织与管理问题的基本能力方面,对达到土木工程专业培养目标起着重要的作用。

本书内容包括了地下工程施工技术和地下工程施工组织与管理两大部分。其中,地下工程施工技术部分是按照地下工程施工的先后顺序,对表土和岩石两大施工技术分别进行了阐述,这也是全书编写的重要出发点和与现行其他教材不同之处,这样更加适合教师的教学和学生的学习以及地下工程施工中的实际应用;而地下工程施工组织与管理部分,涵盖了地下工程施工组织与管理的基本内容。

目前,地下工程表土的施工技术方法较多,不同行业对不同的施工技术偏重程度不同,本书根据工程施工技术的应用广度和施工工艺的难易程度不同,在内容和篇幅上作了一定的取舍,对其中的明挖施工技术,做了简要介绍;而对非开挖施工技术,包括顶管法和盾构法,是当前地下表土工程施工,特别是路桥工程中的常用施工技术,具有较大的施工难度,采用了较大的篇幅作了系统、详细的介绍;冻结法、钻井法和混凝土帷幕法,作为地下工程表土施工的特殊施工方法,可与岩石施工技术中的注浆法、反井钻进技术以及软岩巷道施工共同构成一门特殊施工(特殊凿井)课程。过去、现在和未来相当长的一段时间,我国的岩石地层地下工程施工都将以钻眼爆破法施工为主,以机械破岩为辅,而其中的岩石水平巷道施工,是地下岩石工程施工中的主要内容,相关高校中开设的井巷工程课程、平巷设计与施工课程等均以本部分为主讲内容,采用了较大篇幅作了详细的介绍,以便学生能够充分掌握并运用,同时还以附录(包括设计示例)的方式详细介绍了岩石平巷和交岔点的设计,可供有课程设计的教师选用;立井井筒施工技术和倾斜巷道施工技术,主要是在矿山开拓时期采用的技术,目前相关专业学生未来从业者较少,作为地下工程施工技术的组成部分,本书采用了较小的篇幅作了简要介绍。

本书由山东科技大学张志勇主编。第1、2章由山东科技大学张志勇编写;第3、5、6章由辽宁石油化工大学张德琦、马芝文、仲兆全、邹波和山东科技大学张志勇共同编写;第4章第1节由辽宁石油化工大学王文武编写;第4章第2节由辽宁石油化工大学张德琦编写;第7章和附录部分由南华大学环境保护与安全工程学院蒋复量编写;第8、9章由山东科技大学李万江、张宝红共同编写;第10、11、12、13章由北京科技大学纪洪广、周晓敏和山东科技大学张志勇共同编写;第14、15、16、17、18章由山东科技大学张志勇、吴新华共同编写。

本书可作为高等院校城市地下空间工程以及土木工程其他相关专业的本科教材,还可作为矿山工程、交通工程、水利水电工程、市政工程等专业的本科教材,也可供相关的工程技术人员、管理人员参考。

天地科技股份有限公司建井研究所刘志强为本书反井钻进部分提供了大量素材,在此表示衷心感谢。

由于编者水平有限,书中欠妥之处,敬请批评指正。

编 者

目 录



前言

第1部分 绪论

第1章 地下工程概述	2
1.1 地下工程的概念	2
1.2 地下工程分类	2
习题	3
第2章 地下工程围岩分级	4
2.1 地下工程围岩的概念	4
2.2 地下工程围岩分级方法	4
习题	14

第2部分 表土地层地下 工程施工技术

第3章 明挖法施工技术	16
3.1 放坡开挖施工	16
3.2 围护结构施工	18
习题	24
第4章 非开挖施工技术	25
4.1 顶管法施工	25
4.2 盾构法施工	54
习题	84
第5章 钻井法施工技术	85
5.1 钻井法施工技术概述	85
5.2 钻井设备	87
5.3 井筒钻进	94
5.4 永久支护	103
习题	105
第6章 混凝土帷幕法施工技术	106
6.1 混凝土帷幕施工基本原理	106
6.2 槽孔施工	106
6.3 导管法灌注混凝土	110
习题	112

第3部分 岩石地层地下 工程施工技术

第7章 水平巷道(隧道)施工技术	114
7.1 岩石平巷(隧道)施工	114

7.2 掘进机施工技术	182
7.3 巷道施工作业方式与循环图表	210
习题	213

第8章 立井井筒施工	215
8.1 立井井筒施工概述	215
8.2 立井井筒表土施工	216
8.3 立井井筒基岩施工	219
8.4 凿井设备布置	229
8.5 辅助作业	234
习题	236

第9章 倾斜巷道施工技术	237
9.1 斜井表土施工	237
9.2 斜井基岩施工	239
9.3 上山施工	244
习题	246

第4部分 特殊地层施工技术

第10章 冻结法施工技术	248
10.1 冻结法施工原理	248
10.2 冻结方案	252
10.3 钻孔布置	254
10.4 冻结法施工工艺参数	255
10.5 冻结施工主要技术措施	256
10.6 冻结井筒支护	258
习题	261

第11章 注浆施工技术	263
11.1 注浆法概述	263
11.2 地下工程注浆工艺技术	264
11.3 注浆材料及选择	268
11.4 注浆参数	271
11.5 注浆设备	274
习题	276

第12章 反井钻进施工技术	277
12.1 反井钻进施工技术概述	277
12.2 反井钻机组成与布置	278
12.3 反井钻进工艺	278
12.4 反井钻进施工中应注意的问题	279
12.5 反井钻井工程实例	280
习题	283

第 13 章 软岩巷道施工	284	习题	307
13.1 软岩施工概述	284	第 16 章 施工质量、进度与成本	
13.2 软岩分类与分级	285	管理	308
13.3 软岩巷道围岩变形特征与		16.1 施工质量管理	308
变形量	286	16.2 施工进度管理	311
13.4 巷道位置和巷道断面形状的选择 ...	287	16.3 施工成本管理	314
13.5 破岩和支护方式的选择	288	习题	318
13.6 围岩的量测监控	290	第 17 章 施工安全与技术管理	319
习题	292	17.1 施工安全管理	319
第 5 部分 地下工程施工组织与管理		17.2 施工技术管理	320
第 14 章 施工准备	294	习题	322
14.1 技术准备	294	第 18 章 施工合同、信息与风险	
14.2 物资准备	295	管理	323
14.3 组织准备	297	18.1 施工合同管理	323
14.4 工程准备	298	18.2 信息管理	328
习题	299	18.3 风险管理	329
第 15 章 施工组织设计	300	习题	331
15.1 施工组织设计概述	300	附录 岩石平巷巷道断面与交岔点	
15.2 施工方案	302	设计	332
15.3 施工场地布置	304	参考文献	360

第1部分

绪 论

第1章 地下工程概述

1.1 地下工程的概念

地下工程是指深入地面以下为开发利用地下空间资源所建造的地下土木工程。它泛指修建在地面以下岩层或土层中的各种工程空间与设施，是地层中所建工程的总称。通常包括矿山井巷工程、城市地铁隧道工程、水工隧洞工程、交通山岭隧道工程、水电地下硐室工程、地下空间工程、军事国防工程、建筑基坑工程等。

1.2 地下工程分类

随着国民经济的发展，地下工程的范围越来越广泛，其分类也越来越复杂。按领域分，有矿山、交通、水电、军事、建筑、市政等；按用途分，有交通、采掘、防御、贮存、工业、商业、农业、居住、旅游、娱乐、物流等；按空间位置分，有水平式、倾斜式和垂直式；按形状分，有洞道式和厅房式；按埋藏深度分，有深埋式和浅埋式。

尽管分类方法繁多，但从施工角度来看，最主要的分类方法是按所处位置的介质、空间位置和形状，因为它们直接决定着施工方案与方法、施工工艺与设备的选择。例如，在岩石中开凿的工程，围岩比较稳定，支护比较容易，开挖较为困难，需用爆破法或岩石掘进机法破岩；在土中开发的工程则相反，支护困难但破岩容易，可用人工或机器开挖（如挖掘机、盾构机），必要时还要采取特殊的施工法，如降水、冻结、注浆等；在水中修建隧道则需用沉管法等。

1.2.1 按空间位置分

1. 水平巷道

水平式通常称为水平巷道，是指巷道长轴线与水平面平行的巷道。实际上这类巷道并不是绝对水平的，为了运输、排水的方便，都具有一定坡度。属于这类巷道的有平硐、隧道、石门、平巷等。

- 1) 平硐：地面上有一个直接出口的水平巷道。
- 2) 隧道：地面上有两个直接出口的水平巷道。
- 3) 石门：没有直接通达地面的出口，在岩层中开凿并与岩层走向垂直或斜交的水平巷道。
- 4) 平巷：没有直接通达地面的出口，沿着岩层走向开凿的水平巷道。

2. 倾斜巷道

倾斜巷道是指巷道长轴线与水平面成一定倾角相交的巷道。属于这类巷道的有斜井、暗斜井、上（下）山等。

- 1) 斜井: 有直接通达地面出口的倾斜巷道。
- 2) 暗斜井: 没有直接通达地面出口的倾斜巷道。
- 3) 上(下)山: 指在运输大巷以上(下)的倾斜巷道。

3. 垂直巷道

垂直巷道是指巷道长轴线与水平面垂直的巷道。属于这类巷道的有立(竖)井、暗立(竖)井、溜井等。

- 1) 立(竖)井: 自地面往下开凿的垂直巷道。
- 2) 暗立(竖)井: 没有直通地面的出口且设有提升设备的垂直巷道。
- 3) 溜井: 没有直通地面的出口且不装置机械设备的垂直巷道。

需要说明的是, 在立(竖)井、斜井、平巷中施工, 尽管支护方式类似, 但所用设备及其设备的布置则有较大差别。

1.2.2 按形状分

在洞道式和厅房式分类中, 洞道式是指长度较大、径向尺寸相对较小的地下工程; 厅房式又称洞室式(也有的称硐室), 是指长度相对较短、径向尺寸较大的地下工程。两者在支护上有不同的要求, 在开挖方式的选择上有一定差异, 如厅房式工程无法使用掘进机施工。

这里需要说明的是, 对于洞道式工程, 不同的行业领域有不同的称谓。在公路及铁路工程中称为隧道, 在矿山工程中称为巷道, 在水利水电工程中称为隧洞, 而军事工程中则称为坑道或地道, 在市政工程中又称为通道或地道。隧道通常是指修筑在地下或山体内部, 两端有出入口, 供车辆、行人等直接通行的交通工程。隧道由于要通过车辆, 断面一般比较大。巷道通常是指为采掘地下矿物而修建的地下空间结构体, 包括各种用途的巷道, 一般也包括硐室。矿山巷道一般埋藏较深, 断面较小, 主要用以运输、行人和通风。隧洞是水力发电工程、城市市政方面用于引水、排水、通风等的地下工程。隧洞两端有出口, 断面一般比较小。通道、地道和坑道的长度和断面都相对较小, 有单出口或多出口, 多用于行人和储物。

1.2.3 按埋藏深度分

一般而言, 矿山井巷工程埋藏较深, 而城市地铁隧道工程、水工隧洞工程、交通山岭隧道工程、水电地下硐室工程、地下空间工程、军事国防工程、建筑基坑工程等则相对埋藏较浅。

习 题

- 1-1 什么叫地下工程?
- 1-2 地下工程按空间位置如何分类?

第2章 地下工程围岩分级

由于地下工程施工的作业对象主要是岩石或土，所以岩（土）体的各种物理力学性质及其赋存条件，直接影响地下工程开挖的难易程度和巷道开挖后围岩的稳定性。为正确进行工程的设计和布局，合理选择地下工程的开挖方法和支护方式，保证地下工程施工及运营安全，须对围岩岩石（土）强度及稳定性进行分析。

2.1 地下工程围岩的概念

岩石和土可总称为岩土。岩石是经过地质作用形成的由一种或多种矿物组成的天然集合体，其性质很大程度上取决于它的矿物成分。按其成因，岩石分为岩浆岩、沉积岩和变质岩三大类。不同类型的岩石，其物理力学性质是不一样的。地下工程施工方法、施工设备选择中经常需要考虑的物理性质有岩石的密度、硬度、耐磨性、孔隙比、碎胀性、水胀性、水解性、软化性等；需要考虑的力学性质有岩石的抗压、抗拉、抗剪强度以及弹性、塑性、流变性等。

地下工程中更大范围内的岩石组成了岩体。岩体由一种或多种岩石组成，因此，岩体也可以看作是由岩块组成的地质体。岩体的性质除决定于岩块性质外，还受其结构的影响。在地壳岩石形成过程中，地质构造作用以及其他漫长的大自然作用破坏了岩体的完整性和连续性，产生了许多裂隙、节理、断层以及溶洞等。人们常常把节理、裂隙、断层以及沉积岩和由沉积岩变质而成的变质岩在生成过程中形成的层理和层面统称为结构面，把由结构面切割出的完整块体称为岩块，因此，岩体又可以认为是由岩块和结构面组成的复杂地质体。

矿山地下工程中遇到的大多是沉积岩。沉积岩是由沉积物经过压实、胶结等作用而形成的岩石，通常把这些固结性岩石称为基岩，把覆盖在基岩之上的松散性沉积物称为基岩风化带和表土。表土通常又称为第四纪冲积层，如黄土、黏土、砂土以及地下流沙层等。在基岩和表土之间，成岩作用不够充分的那部分岩层通常称之为基岩风化带。

风化后的岩石或土体受到水、风、冰川等的动力作用，经冲刷、搬运后沉积在一起，会形成新的土体；再经长期的高压、脱水、固结后，又会形成岩石。因此，岩石和土的区别只是颗粒胶结的强弱。土的胶结力比较弱，所以土的成分对土体的物理力学性质影响很大。

2.2 地下工程围岩分级方法

2.2.1 岩石的工程分级

我国铁路、公路、水利、建筑、矿山等部门的相应设计规范，通常是根据岩石坚硬程度来划分岩石强度等级的。虽然各部门在其相应设计规范中划分的类别和指标有所不同，但其基本原理

是一致的。岩石的工程分级主要考虑了以下几点：强调岩体的地质特征的完整性和稳定性，避免单一的岩石强度指标分级的方法；分级指标应采用定性和定量指标相结合的方式；明确工程目的和内容并提出相应的措施；分级应简明，便于使用；应考虑吸收其他岩石工程分级的优点，并尽量和我国其他工程分级一致。

1. 公路隧道工程中的岩石工程分类

《公路隧道设计规范》(JTG D70—2004) 根据岩石坚硬程度划分的岩石强度等级，其中，岩石坚硬程度的定性划分见表 2-1。

表 2-1 岩石坚硬程度的定性划分

名 称		定 性 鉴 定	代表性岩石
硬质岩	坚硬岩	锤击声清脆，有回弹，震手，难击碎，浸水后大多无吸水反应	未风化~微风化的花岗岩、正长岩、闪长岩、辉绿岩、玄武岩、安山岩、片麻岩、石英片岩、硅质板岩、石英岩、硅质胶结的砾岩、石英砂岩、硅质石灰岩等
	较坚硬岩	锤击声较清脆，有轻微回弹，稍震手，较难击碎，浸水后有轻微吸水反应	1. 弱风化的坚硬岩 2. 未风化~微风化的熔结凝灰岩、大理岩、板岩、白云岩、石灰岩、钙质胶结的砂页岩等
软质岩	较软岩	锤击声不清脆，无回弹，较易击碎，浸水后指甲可刻出印痕	1. 强风化的坚硬岩 2. 弱风化的较坚硬岩 3. 未风化~微风化的凝灰岩、千枚岩、砂质泥岩、泥灰岩、泥质砂岩、粉砂岩、页岩等
	软岩	锤击声哑，无回弹，有凹痕，易击碎，浸水后手可掰开	1. 强风化的坚硬岩 2. 弱风化~强风化的较坚硬岩 3. 弱风化的较软岩 4. 未风化的泥岩等
	极软岩	锤击声哑，无回弹，有较深凹痕，手可捏碎，浸水后可捏成团	1. 全风化的各种岩石 2. 各种半成岩

岩石坚硬程度定量指标用岩石单轴饱和抗压强度 R_c 表达。一般采用实测值，若无实测值时，可采用实测的岩石点荷载强度指数 $I_{S(50)}$ 的换算值，即按下式计算

$$R_c = 22.82 I_{S(50)}^{0.75}$$

(2-1)

表 2-2 R_c 与岩石坚硬程度定性划分的关系

R_c /MPa	>60	60~30	30~15	15~5	<5
坚硬程度	坚硬岩	较坚硬岩	较软岩	软岩	极软岩

注：指标用岩石单轴饱和抗压强度 R_c 表达。

2. 建筑地基基础工程中的岩石工程分级

《建筑地基基础设计规范》(GB 50007—2011) 中规定，岩石的坚硬程度应根据岩块的饱和单轴抗压强度 f_{rk} 按表 2-3 划分为坚硬岩、较硬岩、较软岩、软岩和极软岩。当缺乏饱和单轴抗压强度资料或不能进行该项试验时，可在现场通过观察定性划分。

表 2-3 岩石坚硬程度的划分

坚硬程度类别	坚 硬 岩	较 硬 岩	较 软 岩	软 岩	极 软 岩
饱和单轴抗压强度标准值 f_{rk} /MPa	>60	$60 \geq f_{rk} > 30$	$30 \geq f_{rk} > 15$	$15 \geq f_{rk} > 5$	≤ 5

对比表 2-2 和表 2-3 可以发现，公路隧道工程和建筑地基基础工程对岩石工程的分级指标完全相同。

3. 矿山工程中的岩石工程分级

苏联 M. M. 普罗托奇雅克诺夫于 1926 年提出用“坚固性”这一概念作为岩石工程分级的依据。坚固性不同于硬度，也不同于强度，它表示岩石在各种采矿作业（锹、镐、钻机、爆破等）以及地压等外力作用下受破坏的相对难易程度。普氏认为，岩石的坚固性在各方面的表现是趋于一致的，难破碎的岩石用各种方法都难于破碎，容易的都容易。因此，可通过大量的试验数据和统计数据得出一个综合性的指标，即“坚固性系数”，以此来表示岩石破坏的相对难易程度。通常称 f 为普氏岩石坚固性系数。根据 f 值的大小，可将岩石分为 10 级共 15 种，见表 2-4。

表 2-4 普氏岩石坚固性系数分级表

级 别	坚固性程度	岩 石 类 型	坚固性系数 f
I	最坚固的岩石	最坚固、最致密和有韧性的石英岩和玄武岩，以及其他最坚固的岩石	20
II	很坚固的岩石	很坚固的花岗岩类岩石，石英斑岩，很坚固的花岗岩，硅质片岩，坚固程度较 I 级岩石稍差的石英岩，最坚固的砂岩及石灰岩	15
III	坚固的岩石	致密的花岗岩及花岗岩类岩石，很坚固的砂岩及石灰岩，石英质矿脉，坚固的砾岩，很坚固的铁矿石	10
III a	坚固的岩石	坚固的石灰岩，不坚固的花岗岩，坚固的砂岩，坚固的大理岩和白云岩，黄铁矿	8
IV	相当坚固的岩石	一般的砂岩，铁矿石	6
IV a	相当坚固的岩石	砂质页岩，混质砂岩	5
V	坚固性中等的岩石	坚固的页岩，不坚固的砂岩及石灰岩，软的砾岩	4
V a	坚固性中等的岩石	各种不坚固的页岩，致密的泥灰岩	3
VI	相当软的岩石	软的页岩，很软的石灰岩，白垩，岩盐，石膏，冻土，无烟煤，普通泥灰岩，破碎的砂岩，胶结的卵石及粗砂砾，多石块的土	2
VI a	相当软的岩石	碎石土，破碎的页岩，结块的卵石及碎石，坚硬烟煤，硬化的黏土	1.5
VII	软岩	致密的黏土，软的烟煤，坚固的表土层	1.0
VII a	软岩	微砂质黏土，黄土，细砾石	0.8

(续)

级 别	坚固性程度	岩 石 类 型	坚固性系数 <i>f</i>
VIII	土质岩石	腐殖土，泥煤，微砂质黏土，湿砂	0.6
IX	松散岩石	砂，细砾，松土，采下的煤	0.5
X	流沙状岩石	流沙，沼泽土壤，饱和水的黄土及饱和水的土壤	0.3

普氏岩石分级法简明，便于使用，因此多年来在我国及其他很多国家广泛地应用。岩石坚固性的各方面表现趋于一致的观点在绝大多数岩石中是适用的，但对少数岩石不适用，例如，在黏土中钻眼容易而爆破困难。

2.2.2 围岩分级

工程实践和理论研究表明，围岩稳定性主要取决于岩体的结构和岩体强度，而不只是岩石试件的强度。

围岩分级指标主要考虑了岩体的结构特征与完整性。岩体结构的完整状态是影响围岩稳定性的主要因素。当风化作用使岩体结构发生变化造成岩石松散、破碎、软硬不一时，应结合因风化作用造成的各种状况综合评价围岩的结构完整状态和地质构造影响程度。当遇有地下水时，一般采用降级处理。

1. 公路隧道工程中的围岩分级

《公路隧道设计规范》(JTG D70—2004)将围岩分为六级，并给出了各类围岩的主要工程地质特征、结构特征和完整性等指标。隧道围岩分级的综合评判方法宜采用两步分级，并按以下顺序进行：首先应根据岩石的坚硬程度和岩体完整程度两个基本因素的定性特征和定量的岩体基本质量指标*BQ*，综合进行初步分级；然后再对围岩进行详细定级，此时应在岩体基本质量分级基础上，考虑修正因素的影响，修正岩体基本质量指标值，最后按修正后的岩体基本质量指标 [*BQ*]，结合岩体的定性特征综合评判，确定围岩的详细分级。岩体完整程度的定性划分见表 2-5。

表 2-5 岩体完整程度的定性划分

名 称	结构面发育程度		主要结构面的结合程度	主要结构面类型	相应结构类型
	组 数	平均间距/m			
完整	1~2	>1.0	好或一般	节理、裂隙、层面	整体状或巨厚层状结构
较完整	1~2	>1.0	差	节理、裂隙、层面	块状或厚层状结构
	2~3	1.0~0.4	好或一般		块状结构
较破碎	2~3	1.0~0.4	差	节理、裂隙、层面、小断层	裂隙块状或中厚层状结构
	>3	0.4~0.2	好		镶嵌碎裂结构
			一般		中、薄层状结构
破碎	>3	0.4~0.2	差	各种类型结构面	裂隙块状结构
		<0.2	一般或差		碎裂状结构
极破碎	无序		很差		散体状结构

注：平均间距指主要结构面（1~2组）间距的平均值。

岩体完整程度的定量指标用岩体完整性系数 K_v 表达。 K_v 可用岩体弹性纵波速度 v_{pm} 和同一岩体取样测定的岩石弹性纵波速度 v_{pr} 按下式计算

$$K_v = \left(\frac{v_{pm}}{v_{pr}} \right)^2$$

(2-2)

若无条件进行应力波实测时, 也可用岩体体积节理数 J_v 按表 2-6 确定对应的 K_v 值。

表 2-6 J_v 与 K_v 对照表

$J_v/(条/m^3)$	<3	3~10	10~20	20~35	>35
K_v	>0.75	0.75~0.55	0.55~0.35	0.35~0.15	<0.15

K_v 与定性划分的岩体完整程度的对应关系可按表 2-7 确定。

表 2-7 K_v 与定性划分的岩体完整程度的对应关系

K_v	>0.75	0.75~0.55	0.55~0.35	0.35~0.15	<0.15
完整程度	完整	较完整	较破碎	破碎	极破碎

围岩基本质量指标 BQ 应根据分级因素的定量指标 R_c 值和 K_v 值, 按下式计算

$$BQ = 90 + 3R_c + 250K_v$$

(2-3)

使用式 (2-3) 时, 应遵守下列限制条件: ①当 $R_c > 90K_v + 30$ 时, 应以 $R_c = 90K_v + 30$ 和 K_v 代入计算 BQ 值; ②当 $K_v > 0.04R_c + 0.4$ 时, 应以 $K_v = 0.04R_c + 0.4$ 和 R_c 代入计算 BQ 值。

围岩详细定级时, 如遇下列情况之一, 应对岩体基本质量指标 BQ 进行修正: ①有地下水; ②围岩稳定性受软弱结构面影响, 且由一组起控制作用; ③存在高初始应力。

围岩基本质量指标修正值 $[BQ]$ 可按下式计算

$$[BQ] = BQ - 100(K_1 + K_2 + K_3)$$

(2-4)

式中 $[BQ]$ ——围岩基本质量指标修正值;

BQ ——围岩基本质量指标;

K_1 ——地下水影响修正系数;

K_2 ——主要软弱结构面产状影响修正系数;

K_3 ——初始应力状态影响修正系数。

K_1 、 K_2 、 K_3 值可分别按表 2-8、表 2-9、表 2-10 确定。无表中所列表情况时, 修正系数取零。 $[BQ]$ 出现负值时, 应按特殊问题处理。

表 2-8 地下水影响修正系数 K_1

BQ	>450	450~351	350~251	≤250
地下水出水状态				
潮湿或点滴状出水	0	0.1	0.2~0.3	0.4~0.6
淋雨状或涌流状出水, 水压≤0.1MPa 或单位出水量≤10L/(min·m)	0.1	0.2~0.3	0.4~0.6	0.7~0.9
淋雨状或涌流状出水, 水压>0.1MPa 或单位出水量>10L/(min·m)	0.2	0.4~0.6	0.7~0.9	1.0

表 2-9 主要软弱结构面产状影响修正系数 K_2

结构面产状及其与洞轴线的组合关系	结构面走向与洞轴线夹角 $<30^\circ$ ，结构面倾角 $30^\circ \sim 75^\circ$	结构面走向与洞轴线夹角 $>60^\circ$ ，结构面倾角 $>75^\circ$	其他组合
K_2	0.4 ~ 0.6	0 ~ 0.2	0.2 ~ 0.4

表 2-10 初始应力状态影响修正系数 K_3

BQ 初始应力状态	>550	550 ~ 451	450 ~ 351	350 ~ 251	≤ 250
极高应力区	1.0	1.0	1.0 ~ 1.5	1.0 ~ 1.5	1.0
高应力区	0.5	0.5	0.5	0.5 ~ 1.0	0.5 ~ 1.0

在地下工程设计和施工中，最关心的是围岩的稳定性和围岩的压力特征。各级围岩的自稳能力，宜根据围岩变形量测和理论计算分析来评定，也可按表 2-11 做出大致的评判。

表 2-11 地下工程岩体自稳能力

围岩级别	自 稳 能 力
I	跨度 $\leq 20\text{m}$ ，可长期稳定，偶有掉块，无塌方
II	跨度 10 ~ 20m，可基本稳定，局部可发生掉块或小塌方 跨度 $< 10\text{m}$ ，可长期稳定，偶有掉块
III	跨度 10 ~ 20m，可稳定数日至 1 月，可发生小 ~ 中塌方 跨度 5 ~ 10m，可稳定数月，可发生局部块体位移及小 ~ 中塌方 跨度 $< 5\text{m}$ ，可基本稳定
IV	跨度 $> 5\text{m}$ ，一般无自稳能力，数日至数月内可发生松动变形、小塌方，进而发展为中 ~ 大塌方。埋深小时，以拱部松动破坏为主，埋深大时，有明显塑性流动变形和挤压破坏 跨度 $\leq 5\text{m}$ ，可稳定数日至 1 月
V	无自稳能力

注：1. 小塌方：塌方高度 $< 3\text{m}$ ，或塌方体积 $< 30\text{m}^3$ 。
2. 中塌方：塌方高度 3 ~ 6m，或塌方体积 30 ~ 100m³。
3. 大塌方：塌方高度 $> 6\text{m}$ ，或塌方体积 $> 100\text{m}^3$ 。

可根据调查、勘探、试验等资料、岩石隧道的围岩定性特征、围岩基本质量指标 BQ 或修正的围岩质量指标 $[BQ]$ 值、土体隧道中的土体类型、密实状态等定性特征，按表 2-12 确定围岩级别。

表 2-12 公路隧道围岩分级

围岩级别	围岩或土体主要定性特征	围岩基本质量指标 BQ 或修正的围岩基本质量指标 $[BQ]$
I	坚硬岩，岩体完整，巨整体状或巨厚层状结构	> 550
II	坚硬岩，岩体较完整，块状或厚层状结构 较坚硬岩，岩体完整，块状整体结构	550 ~ 451
III	坚硬岩，岩体较破碎，巨块（石）碎（石）状镶嵌结构 较坚硬岩或较软硬质岩层，岩体较完整，块状体或中厚层结构	450 ~ 351

(续)

围岩级别	围岩或土体主要定性特征	围岩基本质量指标 BQ 或修正的围岩基本质量指标 $[BQ]$
IV	坚硬岩，岩体破碎，碎裂结构 较坚硬岩，岩体较破碎至破碎，镶嵌碎裂结构 较软岩或软硬质岩互层，且以软岩为主，岩体较完整至较破碎，中薄层状结构	350 ~ 251
	土体： 1. 压密或成岩作用的黏性土及砂性土 2. 黄土 (Q_1 、 Q_2) 3. 一般钙质或铁质胶结的碎石土、卵石土、大块石土	
V	较软岩，岩体破碎 软岩，岩体较破碎至破碎 极破碎各类岩体，碎、裂状，松散结构	≤250
	一般第四系的半干硬至硬塑的黏性土及稍密至潮湿的碎石土、卵石土、圆砾、角砾土及黄土 (Q_3 、 Q_4) 非黏性土呈松散结构，黏性土及黄土呈松软结构	
VI	软塑状黏性土及潮湿、饱和粉细砂层、软土等	

注：本表不适用于特殊条件的围岩分级，如膨胀性围岩、多年冻土等。

当根据岩体基本质量定性划分与 $[BQ]$ 值确定的级别不一致时，应重新审查定性特征和定量指标计算参数的可靠性，并对它们重新观察、测试。

2. 建筑地基基础工程中的围岩分级

《建筑地基基础设计规范》(GB 50007—2011) 按照围岩的完整程度，将其划分为完整、较完整、较破碎、破碎和极破碎共五级，见表 2-13。规范规定，当缺乏试验数据时可按现场条件定性确定。

表 2-13 岩体完整程度划分

完整程度等级	完 整	较 完 整	较 破 碎	破 碎	极 破 碎
完整性指数	>0.75	0.75 ~ 0.55	0.55 ~ 0.35	0.35 ~ 0.15	<0.15

注：完整性指数为岩体纵波波速与岩块纵波波速之比的平方。选定岩体、岩块测定波速时应有代表性。

3. 煤矿工程中的围岩分级

煤炭部门根据锚喷支护设计和施工需要，考虑煤矿岩性的特点、构造情况和断面尺寸，将围岩划分为五类，见表 2-14。

表 2-14 煤矿工程中的围岩分级

围岩分类		岩 层 描 述	巷道开掘后围岩的稳定状态 (3 ~ 5m 跨度)	岩 种 举 例
类 别	名 称			
I	稳定岩层	1. 完整坚硬岩层， $R_b > 60\text{MPa}$ ，不易风化 2. 层状岩层层间胶结好，无软弱夹层	围岩稳定，长期不支护无碎块掉落现象	完整的玄武岩，石英质砂岩，奥陶纪灰岩，茅口灰岩，大冶厚层灰岩
II	稳定性较好岩层	1. 完整的比较坚硬岩层， $R_b = 40 \sim 60\text{MPa}$ 2. 层状岩层，胶结较好 3. 坚硬块状岩层，裂隙面闭合，无泥质充填物， $R_b > 60\text{MPa}$	围岩基本稳定，较长时间不支护会出现小块掉落	胶结好的砂岩，砾岩，大冶薄层灰岩

(续)

围岩分类		岩层描述	巷道开掘后围岩的稳定状态 (3~5m 跨度)	岩种举例
类别	名称			
Ⅲ	中等稳定岩层	1. 完整的中硬岩层, $R_b=20\sim40\text{MPa}$ 2. 层状岩层, 以坚硬岩层为主, 夹有少数软岩层 3. 比较坚硬的块状岩层, $R_b=40\sim60\text{MPa}$	围岩能维持一个月以上稳定, 会产生局部岩体掉落	砂岩, 砂质页岩, 粉砂岩, 石灰岩, 硬质凝灰岩
Ⅳ	稳定性较差岩层	1. 较软的完整岩层, $R_b<20\text{MPa}$ 2. 中硬的层状岩层 3. 中硬的块状岩层, $R_b=20\sim40\text{MPa}$	围岩的稳定时间仅有几天	页岩, 泥岩, 胶结不好的砂岩, 硬煤
Ⅴ	不稳定岩层	1. 易风化、潮解、剥落的松软岩层 2. 各种类破碎岩层	围岩很容易产生冒顶片帮	碳质页岩, 花斑泥岩, 软质凝灰岩, 煤, 破碎的各类岩石

注: 1. 岩层描述将岩层分为完整的、层状的、块状的、破碎的四种。

- (1) 完整岩层: 层理和节理裂隙的间距大于 1.5m。
- (2) 层状岩层: 层与层间距小于 1.5m。
- (3) 块状岩层: 节理裂隙间距小于 1.5m、大于 0.3m。
- (4) 破碎岩层: 节理裂隙间距小于 0.3m。
- 2. 当地下水影响围岩的稳定性时, 应考虑适当降级。
- 3. R_b 为岩石的饱和抗压强度。

4. 锚喷支护工程中的围岩分级

《锚杆喷射混凝土支护技术规范》(GB 50086—2001) 规定: 围岩级别的划分, 应根据岩石坚硬性、岩体完整性、结构面特征、地下水和地应力状况等因素, 按表 2-15 综合确定。

表 2-15 锚喷支护工程中的围岩分级

围岩级别	主要工程地质特征							毛洞稳定情况
	岩体结构	构造影响程度, 结构面发育情况和组合状态	岩石强度指标		岩体声波指标		岩体强度应力比	
			单轴饱和抗压强度 /MPa	点荷载强度 /MPa	岩体纵波速度 /(km/s)	岩体完整性指标		
I	整体状及层间结合良好的厚层状结构	构造影响轻微, 偶有小断层。结构面不发育, 仅有 2 ~ 3 组, 平均间距大于 0.8m, 以原生和构造节理为主, 多数闭合, 无泥质充填, 不贯通。层间结合良好。一般不出现不稳定块体	>60	>2.5	>5	>0.75	—	毛洞跨度 5 ~ 10m 时, 长期稳定, 无碎块掉落
II	同 I 级围岩结构	同 I 级围岩特征	30 ~ 60	1.25 ~ 2.5	3.7 ~ 5.2	>0.75	—	毛洞跨度 5 ~ 10m 时, 围岩能较长时间 (数月 至数年) 维持稳定, 仅出现局部小块掉落
	块状结构和层间结合较好的中厚层或厚层状结构	构造影响较重, 有少量断层。结构面较发育, 一般为 3 组, 平均间距为 0.4 ~ 0.8m, 以原生和构造节理为主, 多数闭合, 偶有泥质充填, 贯通性较差, 有少量软弱结构面。层间结合较好, 偶有层间错动和层面张开现象	>60	>2.5	3.7 ~ 5.2	>0.5	—	