

地下工程 安全评价

刘铁民 钟茂华 王金安 著
朱国维 林鹏 何理

地下工程安全评价

刘铁民 钟茂华 王金安 著
朱国维 林鹏 何理

科学出版社
北京

内 容 简 介

本书率先在国内较系统地提出了地下工程安全评价的方法,分析了地下工程危险、有害因素,介绍了与地下工程有关的工程地质安全评价方法、火灾安全评价方法以及隧道(巷道)稳定性安全评价理论,较详细地阐述了地铁隧道和矿山巷道稳定性、矿山地表移动及沉降、水体下采矿等地下工程中若干关键技术领域的的安全评价方法。

本书可作为安全工程领域科研人员、技术人员和高等院校师生教研用书。

图书在版编目(CIP)数据

地下工程安全评价/刘铁民等著. —北京:科学出版社, 2005
ISBN 7-03-015189-5

I. 地… II. 刘… III. 地下工程-安全-评价 IV. TU94

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 035360 号

责任编辑:胡晓春 朱海燕 卜 新/责任校对:包志虹

责任印制:钱玉芬/封面设计:王 浩

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>

中国科学院印刷厂 印刷

科学出版社编务公司排版制作

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2005 年 3 月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2005 年 3 月第 一 次印刷 印张:15 3/4 插页:2

印数:1~2 500 字数:400 000

定价:48.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈科印〉)

前 言

随着中国经济建设的需要,越来越多的地下工程将不断出现,如何确保这些地下工程的安全,预防重特大事故发生,确保地下工程中人员和财产的安全,是伴随着地下工程的出现而产生的一个新的重大课题。地下工程由于本身的特殊性及其重要性,其安全性及可靠性已受到社会公众和各级政府的高度关注,其中可能导致事故的自然原因、技术原因、管理原因都是安全工作中必须认真解决的难题。

对可能产生重特大事故的地下工程进行危险源辨识,评价其可能的风险,进而根据风险的危害程度,对这些危险源采取有效的控制是安全评价研究的主要内容。本书作者基于这一观点,结合安全评价在地下工程中的应用及理论基础,对近年来在地下工程安全评价中出现的一些新理论和新方法进行介绍。

全书分为9章。第1章由刘铁民研究员和钟茂华博士撰写,主要介绍安全评价和地下工程在国内外的发展现状,安全评价的法律依据,目前主要的安全评价方法。第2章由刘铁民研究员、钟茂华博士和何理工程师撰写,主要介绍地铁工程在建设、施工、运营过程中可能存在的主要危险、有害因素。第3章由刘铁民研究员、钟茂华博士和何理工程师撰写,主要介绍矿井在开采过程中可能存在的主要危险、有害因素。第4章由林鹏讲师和钟茂华博士撰写,主要介绍地铁车站及地铁隧道在施工、日常运营时的安全评价方法,提出了应力和位移的变化评价程序。第5章由朱国维博士和何理工程师撰写,主要介绍物探技术在地下工程安全评价中应用的理论和方法。第6章由钟茂华博士和刘铁民研究员撰写,主要介绍地下工程火灾安全评价的理论及方法。第7章由王金安教授和钟茂华博士撰写,主要介绍采场地压和隧道稳定性安全评价的理论和方法。第8章由王金安教授和钟茂华博士撰写,主要介绍受采矿活动影响的地表沉降的安全评价计算理论和方法。第9章由王金安教授和何理工程师撰写,主要介绍水体下采矿安全评价的理论和方法。本书由刘铁民研究员组织,刘铁民研究员和钟茂华博士统稿。

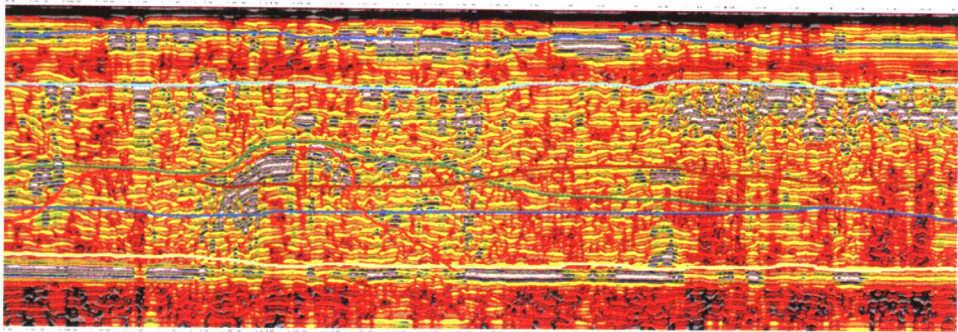
本书是一本系统介绍地下工程安全评价理论和方法的专著。在本书的撰写过程中,引用了中国安全生产科学研究院有关项目的研究成果、大量国内外同行的研究成果和参考文献,在此深表感谢。同时,本书也是多项研究成果

的结晶，如国家自然科学基金项目(编号：70473018, 50106017)、国家重点基础研究专项经费资助项目(编号：2001CB409606)、国家“十五”科技攻关项目(编号：2004BA803B05)和中国安全生产科学研究院完成的多项重大工程安全分析项目等。在此，感谢科学技术部、国家自然科学基金委员会、国家安全生产监督管理局等部门在研究经费上给予的大力资助。本书在撰写过程中得到清华大学周维垣教授、东北大学陈宝智教授、中国科学技术大学陆守香教授、北京科技大学蒋仲安教授的指教，同时也得到中国安全生产科学研究院张兴凯教授、耿凤高级工程师、刘功智高级工程师、王宇航工程师和其他研究人员的帮助，在此深表谢意！

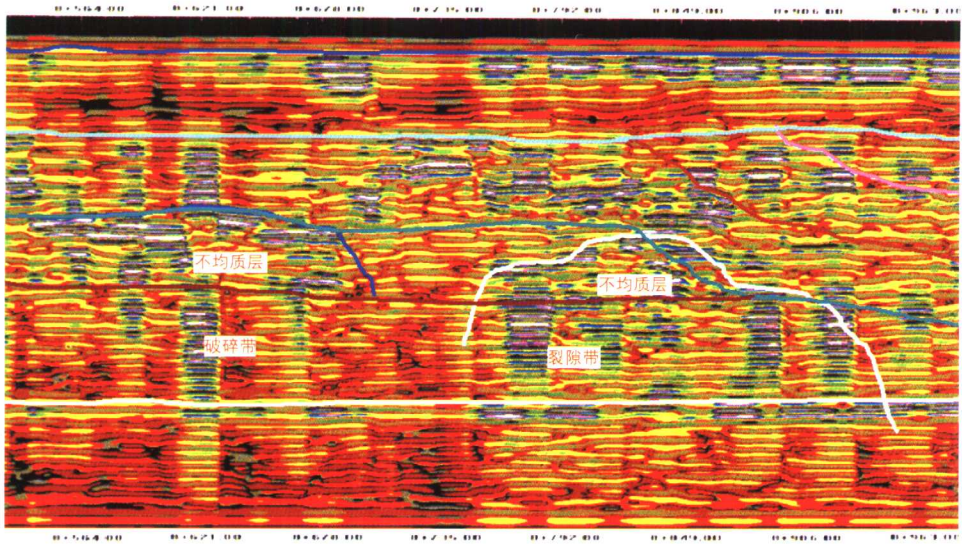
虽然作者在本书的撰写过程中尽了最大的努力，但由于水平有限，错误和不足之处在所难免，敬请读者赐教。

作 者

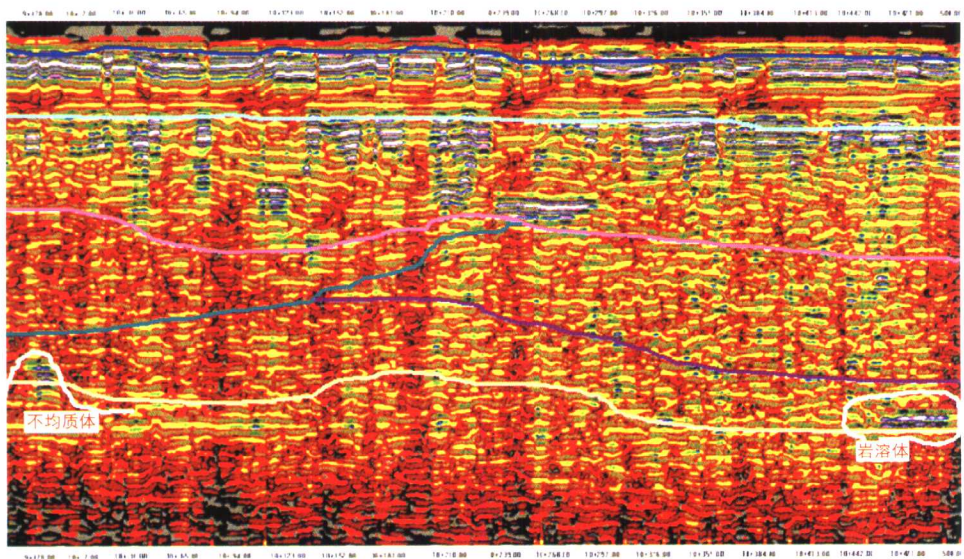
2005年2月于北京



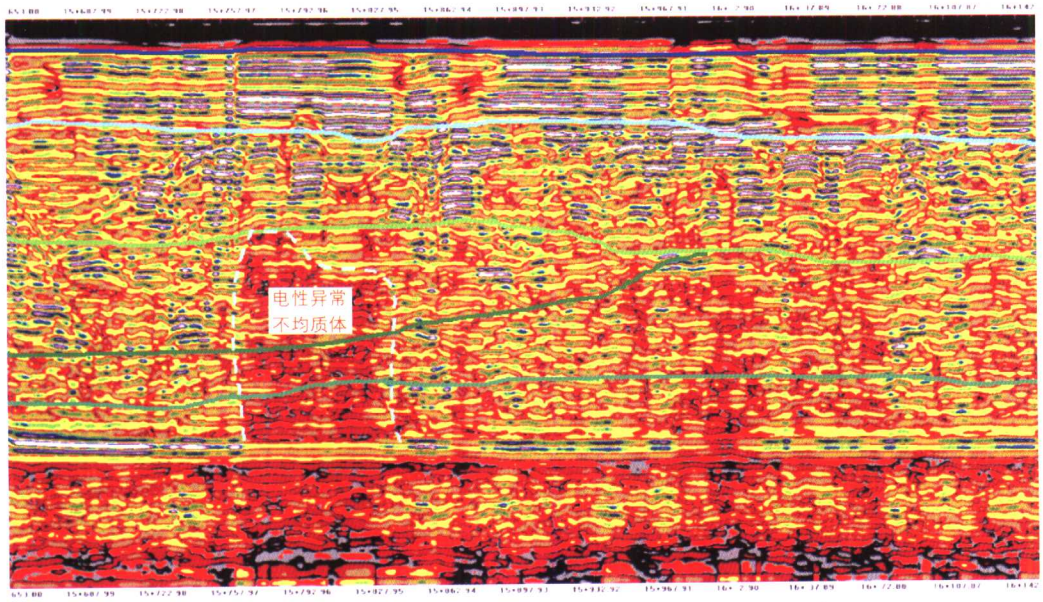
彩图1 1-1 测段地质雷达探测成果图



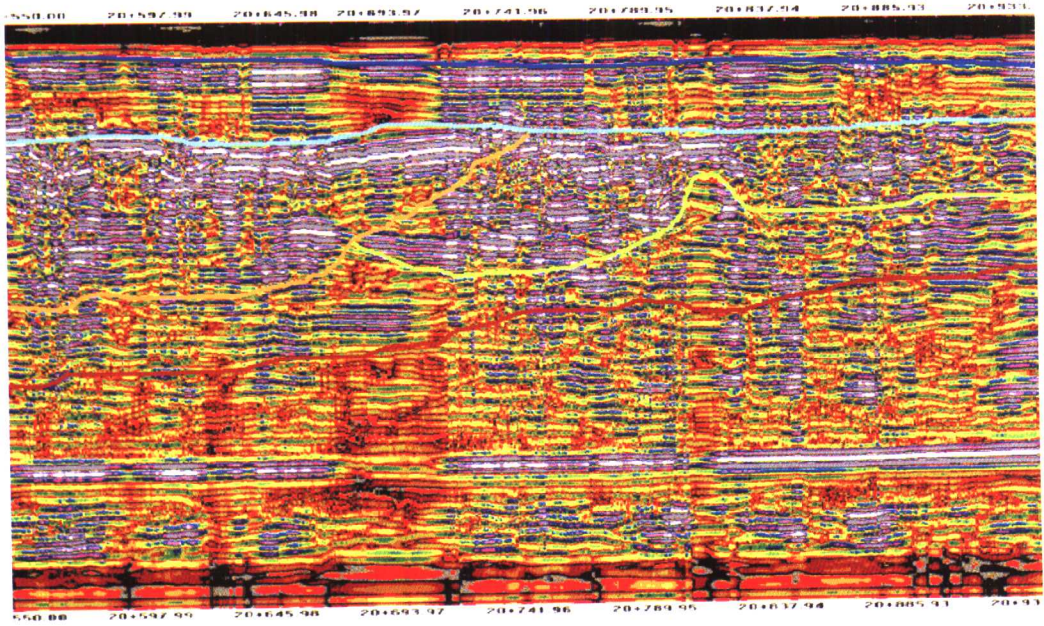
彩图2 2-2 测段地质雷达探测成果图



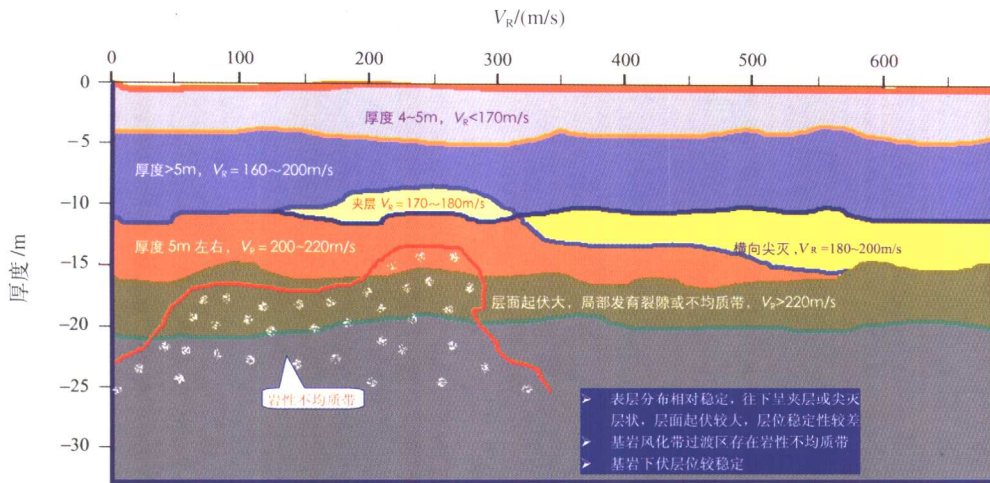
彩图3 3-3 测段地质雷达探测成果图



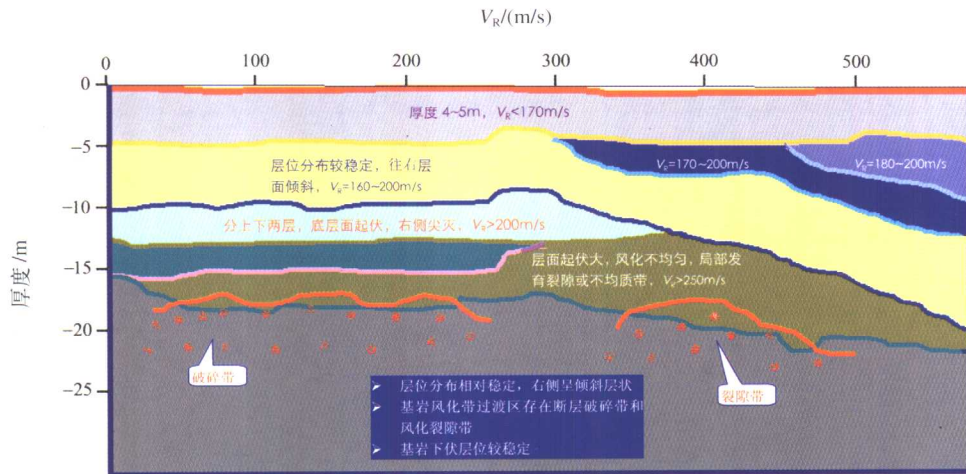
彩图 4 4-4 测段地质雷达探测成果图



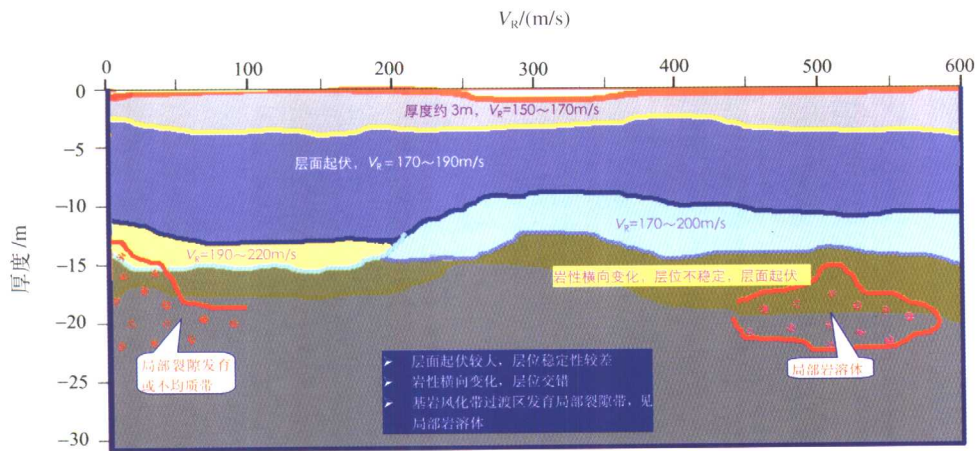
彩图 5 5-5 测段地质雷达探测成果图



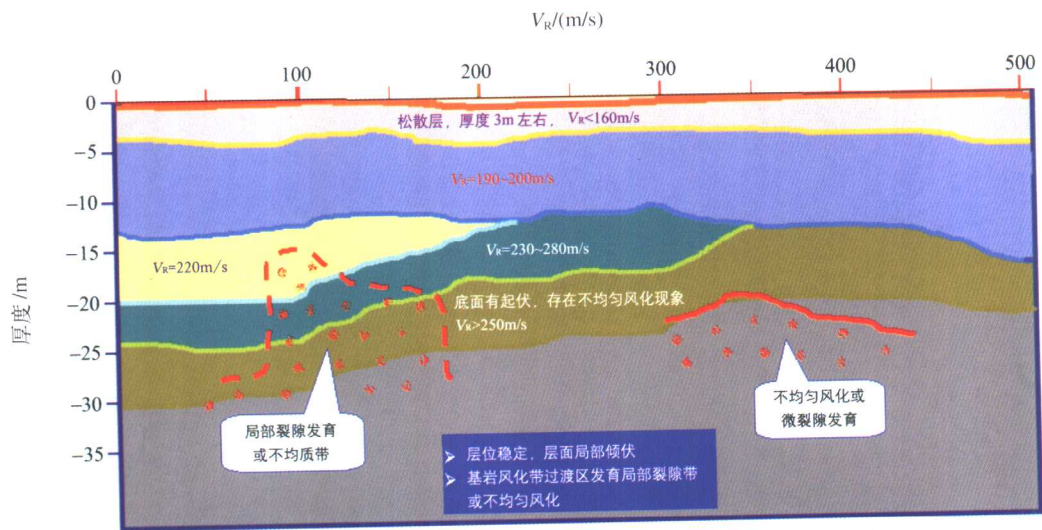
彩图6 CD线1-1测段综合物探成果剖面图



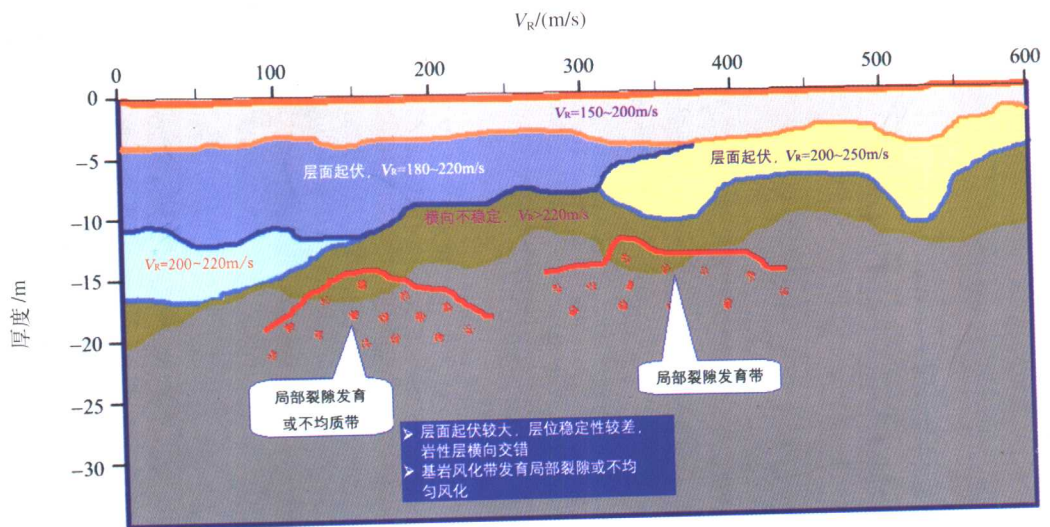
彩图7 CD线2-2测段综合物探成果剖面图



彩图8 CD线3-3测段综合物探成果剖面图



彩图 9 CD 线 4-4 测段综合物探成果剖面图



彩图 10 CD 线 5-5 测段综合物探成果剖面图

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 地下工程概述	1
1.2 安全评价概述	1
1.3 安全评价的法律依据	2
1.4 我国建设项目或工程安全评价分类	2
1.5 常用的安全评价方法简介	3
第 2 章 地铁工程危险、有害因素	8
2.1 国内外地铁典型事故案例	8
2.2 地铁危险、有害因素	12
第 3 章 矿井开采过程中的危险、有害因素	22
3.1 井巷塌方冒顶危险因素	22
3.2 采空区冒落造成的空气冲击危险因素	24
3.3 矿井水害危险因素	25
3.4 有毒有害气体危害因素	25
3.5 电气危害危险因素	28
3.6 爆破伤害危险因素	30
3.7 尾矿库危险因素	30
3.8 矿山其他危险有害因素	32
第 4 章 地铁车站及隧道稳定性安全评价	35
4.1 概述	35
4.2 评价方法介绍	35
4.3 评价实例	37
4.4 评价结果分析	43
第 5 章 地下工程地质构造地球物理勘探及工程地质安全分析	53
5.1 概述	53
5.2 地球物理勘探评价原理	53
5.3 评价实例概况及范围选择	57
5.4 评价实例资料处理与解析	59
5.5 综合物探解析成果及工程地质分析	68
第 6 章 地下工程火灾安全评价方法	75
6.1 概述	75
6.2 地下工程的特殊性分析	75
6.3 火灾时人员安全疏散判据	75

6.4	火灾事故时人员疏散评价方法	81
6.5	火灾事故的控制措施	84
6.6	火灾安全评价常用方法	84
6.7	实例分析	87
第7章	矿山采场地压与巷道稳定性安全分析	90
7.1	概述	90
7.2	巷道稳定性评价准则	90
7.3	巷道稳定性评价方法	91
7.4	评价实例	91
7.5	静力作用下巷道稳定性评价	94
7.6	动力作用下巷道稳定性评价	114
第8章	矿山地表移动及沉降安全性分析	179
8.1	概述	179
8.2	地表移动界限确定的评价原则	179
8.3	评价方法的可靠性分析	180
8.4	地表移动及塌陷安全评价实例	184
第9章	水体下采矿安全评价	200
9.1	概述	200
9.2	水体下采矿安全评价理论基础	201
9.3	安全评价实例	209
9.4	对挖法评价结果与分析	213
9.5	背挖法评价结果与分析	236
9.6	综合分析	242
	主要参考文献	244

第 1 章 绪 论

1.1 地下工程概述

随着我国经济的迅速发展,已出现各种类型的地下工程,如矿山、地铁、隧道等工程,这些工程对于国民经济和社会的发展起到了重要作用。地下工程的类型是多样的,按其用途可分为:矿井工程、地下交通工程、地下人防工程、地下储存工程、地下商业工程、地下国防工程等。地下工程既有有利的一面,同时也有不利的一面,如地下工程中的环境是完全的人工环境,地下水、洪水、漏水等容易进入。特别是地下工程一旦发生重特大事故时,人员安全疏散与地面不一样。

通常,地下工程的重特大事故及危害有如下特点(关宝树等,2001):

(1) 人的心理恐慌程度大,行动混乱程度高。地下工程安全出入口少,通道狭窄,疏散距离长,人员多,故易造成人员挤踩事故。

(2) 若火灾爆炸或毒物泄漏,有毒物积聚不易散去,对人员的安全疏散及事故的应急救援工程带来很大的障碍。

(3) 人员疏散难度大,人员从地下工程到地面开阔空间的疏散和避难都要有一个垂直向上的过程,比下行要耗体力,同时,可能由于烟气的积聚,降低可视距离,从而影响疏散速度。

(4) 事故扑救困难。由于地下工程的限制及可能的浓烟、高温、缺氧、视线不清、有毒、通信中断等原因,救援人员很难了解现场,大型救援设备难以进入事故现场,因此,救援工作相当困难。

1.2 安全评价概述

安全评价是对系统危险程度的客观评价,它通过对系统中存在的危险源及其控制措施的评价,客观地描述系统在规划、设计、建设、生产等各个阶段的危险程度,从而指导人们先行采取有效的安全措施来消除危险或降低系统的危险性。安全评价始于保险业,在国内又称危险评价、安全性评价、风险评估或风险评价。安全评价目的是查找、分析和预测工程、系统存在的危险、有害因素及危险、危害程度,提出合理可行的安全对策措施,指导危险源监控和事故预防,以达到最低事故率、最少损失和最优的安全投资效益(陈宝智,1995)。

面对众多的危险,人们努力抗争而追求安全,按一般的理解,安全是没有伤害、损害或危险,不遭受伤害或损害的威胁,或免除了伤害、损害的威胁。然而世界上没有绝对的安全,劳伦斯(W. W. Lowrance)定义安全为没有超过允许限度的危险。按此定义,安全也是一种危险,只不过其危险性很小,人们可以接受它。日本的北川彻三曾论述说,给安全下定义是非常困难的,这是因为安全是一个相对的、主观的概念。C. O. Smith 认

为安全是一种心理状态。对于同一事物是安全还是危险，不同的人或同一人在不同的心理状态下是不同的。即，不同的人，在不同的心理状态下，其可接受危险水平是不同的。

人类为了保证生产、生活活动顺利地进行和自身不受伤害，必须努力控制危险源以消除和减少危险。然而，危险的存在是绝对的，人们不懈地努力消除和减少危险，而为此付出的代价却越来越昂贵。于是，人们需要进行安全评价，判断所承受的危险是否是可接受的危险，是否值得花费高昂的代价去消除或减少它们。

1.3 安全评价的法律依据

在我国，安全评价的法律依据是《中华人民共和国安全生产法》(以下简称《安全生产法》)第 25 条：“矿山建设项目和用于生产、储存危险物品的建设项目，应当分别按照国家有关规定进行安全条件论证和安全评价。”同时，《安全生产法》第 79 条规定：“承担安全评价、认证、检测、检验工作的机构，出具虚假证明，构成犯罪的，依照刑法有关规定追究刑事责任；尚不够刑事处罚的，没收违法所得，违法所得在五千元以上的，并处违法所得二倍以上五倍以下的罚款，没有违法所得或者违法所得不足五千元的，单处或者并处五千元以上二万元以下的罚款，对其直接负责的主管人员和其他直接责任人员处五千元以上五万元以下的罚款；给他人造成损害的，与生产经营单位承担连带赔偿责任。对有前款违法行为的机构，撤销其相应资格。”

在《危险化学品安全管理条例》中也对安全评价有明确的规定。例如，第九条规定：“设立剧毒化学品生产、储存企业和其他危险化学品生产、储存企业，应当分别向省、自治区、直辖市人民政府经济贸易管理部门和设区的市级人民政府负责危险化学品安全监督管理综合工作的部门提出申请，并提交下列文件：可行性研究报告；原料、中间产品、最终产品或者储存的危险化学品的燃点、自燃点、闪点、爆炸极限、毒性等理化性能指标；包装、储存、运输的技术要求；安全评价报告；事故应急救援措施；符合本条例第八条规定条件的证明文件。”同时，《危险化学品安全管理条例》第十七条规定：“生产、储存、使用剧毒化学品的单位，应当对本单位的生产、储存装置每年进行一次安全评价；生产、储存、使用其他危险化学品的单位，应当对本单位的生产、储存装置每两年进行一次安全评价。安全评价报告应当对生产、储存装置存在的安全问题提出整改方案。安全评价中发现生产、储存装置存在现实危险的，应当立即停止使用，予以更换或者修复，并采取相应的安全措施。安全评价报告应当报所在地设区的市级人民政府负责危险化学品安全监督管理综合工作的部门备案。”

另外，在其他一些法律、条例中也有安全评价的相关规定。

1.4 我国建设项目或工程安全评价分类

根据工程、系统生命周期和评价的目的，安全评价分为安全预评价、安全验收评价、安全现状综合评价、专项安全评价。

安全评价是以实现工程、系统安全为目的，应用安全系统工程原理和方法，对工程、系统中存在的危险、有害因素进行辨识与分析，判断工程、系统发生事故和职业危害的

可能性及其严重程度，从而为制定防范措施和管理决策提供科学依据。

安全预评价是根据建设项目可行性研究报告的内容，分析和预测该建设项目可能存在的危险、有害因素的种类和程度，提出合理可行的安全对策措施及建议。

安全预评价程序一般包括：准备阶段；危险、有害因素识别与分析；确定安全预评价单元；选择安全预评价方法；定性、定量评价；安全对策措施及建议；安全预评价结论；编制安全预评价报告。

安全验收评价是在建设项目竣工、试运行正常后，通过对建设项目的设施、设备、装置实际运行状况及管理状况的安全评价，查找该建设项目投产后存在的危险、有害因素，确定其程度并提出合理可行的安全对策措施及建议。

安全验收评价程序一般包括：前期准备；编制安全验收评价计划；安全验收评价现场检查；编制安全验收评价报告；安全验收评价报告评审。

安全现状综合评价是针对某一个生产经营单位总体或局部的生产经营活动的安全现状进行安全评价，查找其存在的危险、有害因素并确定其程度，提出合理可行的安全对策措施及建议。

安全现状评价工作程序一般包括：前期准备；危险、有害因素和事故隐患的识别；定性、定量评价；安全管理现状评价；确定安全对策措施及建议；确定评价结论；安全现状评价报告完成。

专项安全评价是针对某一项活动或场所，以及一个特定的行业、产品、生产方式、生产工艺或生产装置等存在的危险、有害因素进行的安全评价，查找其存在的危险、有害因素，确定其程度并提出合理可行的安全对策措施及建议。

1.5 常用的安全评价方法简介

目前人们已开发研究了数十种安全评价方法，适用于不同的安全分析过程。这些方法可以按实行分析过程的相对时间分类，也可按分析的对象、内容分类。从分析的数理方法出发，可分为定性分析和定量分析；从分析的逻辑方法出发，可分为归纳方法和演绎方法。

简单地讲，归纳的方法是从原因推论结果的方法，演绎的方法是从结果推论原因的方法，这两种方法在系统安全分析中都有应用。从危险源辨识的角度，演绎的方法是从事故或系统故障出发查找与该事故或系统故障有关的危险源，与归纳的方法相比较，可以把注意力放在有限的范围内，提高工作效率；归纳的方法是从故障或失误出发探讨可能导致事故或系统故障，再来确定危险源，与演绎的方法相比较，可以无遗漏地考察、辨识系统中的所有危险源。实际工作中往往把两类方法结合起来，来充分发挥各自的优点。

1.5.1 简介

一般来讲，广泛应用的安全评价方法主要有如下几种(陈宝智，1995)：

(1) 检查表法(checklist)；

- (2) 预先危害分析(preliminary hazard analysis, PHA);
- (3) 故障类型和影响分析(failure model and effects analysis, FMEA);
- (4) 危险性与可操作性研究;
- (5) 事件树分析(event tree analysis);
- (6) 故障树分析(fault tree analysis);
- (7) 因果分析(cause-consequence analysis);
- (8) What...if ... 分析;
- (9) 管理疏忽和危险树分析(MORT)。

目前, 出现了一些新的安全评价方法(钟茂华, 1998; 范维澄等, 2004), 如 Petri Net、Bond Graph (键合图)、非线性科学方法、数值计算方法等。这些方法分别应用于不同的阶段。在选择系统安全分析方法时应根据实际情况, 并考虑如下问题。

1.5.1.1 分析的目的

选择的安全评价方法应该能够满足对分析的要求。虽然安全评价的最终目的是辨识危险源, 但是在具体工作中可能要实现一些具体目的, 例如, 应用系统安全分析方法可能是为了下述目的中的一个或某几个:

- (1) 查明系统中所有的危险源, 列出危险源的清单;
- (2) 弄清危险源可能导致的事故, 列出潜在的事故情况的清单;
- (3) 确定降低危险性的措施或需要深入研究的部位, 列出相应的清单;
- (4) 危险源排序;
- (5) 为定量的危险性评价提供数据。

一些系统安全分析方法只能用于查明危险源, 而几乎所有的方法都可以用于列出潜在的事故地点清单或确定降低危险性的措施, 只有少数的方法可以提供定量的数据。

1.5.1.2 可获得的资料

分析者可能获得的资料的多少、详细程度、新旧, 都会影响选择系统安全分析方法。一般来说, 被分析的系统所处的阶段对获得的资料有很大的影响。例如, 分析处于方案设计阶段的系统时, 就很难为危险性和可操作性研究或故障类型和影响分析找到足够详细的资料。随着时间的推移, 系统可获得的资料越来越多, 越来越详细。为了更好地分析, 应该收集最新的、高质量的资料。

1.5.1.3 对象的特点

被分析对象的复杂程度和规模, 工艺类型, 工艺过程中的操作类型, 第一类危险源的类型, 以及事故和第二类危险源等影响选择系统安全分析方法。

随着对象复杂度和规模的增加, 有些方法需要的工作量和时间相应地增加, 这种情况下应该先用较简捷的方法进行筛选, 然后确定分析的详细程度, 再选择恰当的分析方法。

有些系统安全分析方法更适合于某些类型工艺过程或对象, 例如, 危险性和可操作性研究适用于分析化工类工艺过程; 故障类型和影响分析适用于分析机械、电气系统。

因此，应该根据被分析对象的类型选择适用的分析方法。

1.5.1.4 对象的危险性

当对象的危险性较高时，分析者、管理者都倾向于采用系统的、严格的、预测的方法，如危险性和可操作性研究、故障类型的影响分析、事件树分析、故障树分析等方法。反之，倾向于采用经验的、不太详细的分析方法，如检查表法等。

关于对象危险性的认识，取决于系统无事故运行时间和严重事故发生次数，以及系统变化情况。

1.5.1.5 其他

影响选择系统安全分析方法的其他因素包括分析者的知识和经验，完成期限，经费支持，分析者和管理者的喜好等。

1.5.2 预先危害分析

预先危害分析(PHA)是一种系统安全分析方法，它主要用于新系统设计、已有系统改造之前的方案设计、选址阶段，人们还没有掌握其详细资料的时刻，用来分析、辨识可能出现或已经存在的危险源，并尽可能在付诸实施之前找出预防、改正、补救措施，消除或控制危险源(陈宝智，1995)。

预先危害分析的优点在于允许人们在系统开发的早期识别、控制危险因素，可以用最小的代价消除或减少系统中的危险源，它为制定整个系统寿命期间的安全操作规程提出依据。

进行危害预先分析时，首先利用安全检查表、经验和技术判断的方法查明危险源存在部位，然后识别使危险源演变为事故的触发因素和必要条件，研究可能的后果及应该采取的措施。预先危害分析包括准备、审查和结果汇总三个阶段的工作。

1.5.3 故障类型和影响分析

故障类型和影响分析(FMEA)是对系统的各组成部分、元素进行的分析。系统的组成部分或元素在运行过程中会发生故障，并往往可能发生不同类型的故障。不同类型的故障对系统的影响是不同的。这种分析方法首先找出系统中各组成部分及元素可能发生的故障及其类型，查明各种类型故障对邻近部分或元素的影响以及最终对系统的影响，然后提出避免或减少这些影响的措施。

故障类型和影响分析是一种归纳的系统安全分析方法。最初的故障类型和影响分析只能做定性分析，后来在分析中包括了故障发生难易程度的评价或发生的概率。更进一步地，把它与危险度分析(critical analysis)结合起来，构成故障类型和影响、危险度分析(FMECA)。这样，如果确定了每个元素故障发生概率，就可以确定设备、系统或装置的故障发生概率，从而定量地描述故障的影响。

故障类型和影响分析一般程序包括如下四个方面：

- (1) 定义对象系统;
- (2) 分析系统元素的故障类型和产生的原因;
- (3) 研究故障类型的影响;
- (4) 结论和建议。

1.5.4 危险性 with 可操作性研究

危险性 with 可操作性研究是英国帝国化学工业公司(ICI)于 1974 年开始开发的,用于热力—水力系统安全分析的方法,它应用系统的审查方法来审查新设计或已有的工厂的生产工艺和工程意图,以评价因装置、设备的个别部分的误操作或机械故障引起的潜在危险,并评价其对整个工厂的影响。可以认为,危险性 with 可操作性研究是故障类型和影响分析的改版,它特别适合于化学工业那样的系统的安全分析。

危险性 with 可操作性研究需要由一组人而不是一人实行,这一点有别于其他系统安全分析方法。通常,分析小组成员应该包括相关领域的专家,采用头脑风暴法(brainstorming)来进行创造性的工作。

危险性 with 可操作性研究的分析程序包括以下几个方面:

- (1) 准备工作。①确定分析的目的、对象和范围;②成立研究小组;③获得必要的资料;④制定研究计划。
- (2) 开展审查。

1.5.5 事件树分析

事件树分析是一种事故发展的时间顺序由初始事件开始推论可能的后果,从而进行危险源辨识的方法。一起伤亡事故的发生是许多原因事件相继发生的结果,其中一些事件的发生是以另一些事件首先发生为条件的。事件树以一初始事件为起点,按每一事件可能的后续事件只能取完全对立的两种状态(成功或失败,正常或故障,安全或危险等)之一的原则,逐步向结果方面发展,直到达到系统故障或事故为止。

事故树分析起源于决策树(decision tree)分析,是一种归纳的系统安全分析方法,可以用于定性分析,也可用于定量分析。

这种系统安全分析方法最初用于核电站的安全分析,并且直至今日仍是核电站应用的主要系统安全分析方法之一。由于事件树方法特别适用于表达事件之间的时间顺序,在其他领域也有广泛的应用。

1.5.6 故障树分析

故障树分析是从特定的故障事件(或事故)开始,利用故障树考察可能引起该事件发生的各种原因事件及其相互关系的系统安全分析方法。它本来是一种复杂系统可靠性分析方法,由于可靠性与安全性有密切的因果关系,所以故障树分析方法在安全工程领域得到广泛的应用。