

云南省科技创新强省计划项目 (2010AD006) 资助
国家自然科学基金项目 (50978251) 资助

岩土空洞周围的 压力拱及其特性

Pressure Arch in Vicinity of
Geotechnical Opening and Its Characteristics

■ 宋宏伟 杜晓丽 等 著



煤炭工业出版社

云南省科技创新强省计划项目 (2010AD006) 资助
国家自然科学基金项目 (50978251) 资助

岩土空洞周围的压力拱及其特性

宋宏伟 杜晓丽 等著

煤炭工业出版社

· 北 京 ·

图书在版编目 (CIP) 数据

岩土空洞周围的压力拱及其特性/宋宏伟等著. -- 北京:
煤炭工业出版社, 2012

ISBN 978 - 7 - 5020 - 4112 - 0

I. ①岩… II. ①宋… III. ①岩石压力—研究 IV. ①TU456

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 213006 号

煤炭工业出版社 出版
(北京市朝阳区芍药居 35 号 100029)
网址: [www. cciph. com. cn](http://www.cciph.com.cn)
煤炭工业出版社印刷厂 印刷
新华书店北京发行所 发行

*

开本 700mm × 1000mm¹/₁₆ 印张 12¹/₂
字数 213 千字 印数 1—1 000
2012 年 11 月第 1 版 2012 年 11 月第 1 次印刷
社内编号 6935 定价 28.00 元

版权所有 违者必究

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,本社负责调换

内 容 提 要

本书介绍了岩土中的一种与岩土空洞稳定性有关的特殊自然现象——压力拱的概念和研究现状,着重介绍了作者对压力拱及其特性的最新研究成果:大跨度地下岩石工程压力拱研究、节理围岩成拱特性研究、双隧道围岩压力拱研究与应用、煤矿常见断面锚喷巷道压力拱特性及稳定性研究、采场围岩压力拱演化研究与应用、城市深基坑压力拱成拱特性研究。

本书可供从事岩土工程、土木工程、采矿工程的高校师生阅读及从事地下岩体稳定理论的科研和工程人员参考,也可以作为高校研究生“隧道稳定学”的教学参考书。

前 言

在人类对生存空间的开发利用中，一直有一种观点，认为“上天难，入地更难”。“入地更难”主要涉及以下两个方面：一是如何利用有效的手段在地下破碎岩土介质，开挖出地下空间。目前如何有效地开挖地下空间仍是学术界研究的重点。二是如何利用有效的手段维护保持所开挖出的空间，使其在使用年限内正常使用。岩土地下工程的稳定性是地下空间开发利用中一个很重要的方面，本书涉及第二个方面的问题。

一般来说，工程结构的稳定性主要与工程结构的承载能力及工程结构上作用的外部载荷有关。目前研究证明，对于在岩土中的地下工程结构，岩土既是产生外载和传递外载的介质，又是主要承担外载的结构。岩土作为承载结构的一部分，与地下工程人工支护结构共同承担外载。目前岩土介质的物理力学特性仍是一个研究热点，并且，目前要明确划分哪部分岩土属于外载、哪部分岩土属于承载结构还有难度，这就导致了在地下建设空间结构比在地面建设空间结构更难。本书论述的压力拱是对地下工程承载结构的一个探索。

按照力学原理，要保持地下工程结构达到稳定，就要使工程结构有足够的力学强度等特性，以有效地抵御地下结构上的岩土地压等外载。由此可知，“入地更难”遇到的关键问题是，目前人类还不能够像在地面建设工程结构那样，对结构（包括岩土）材料的物理力学特性和地下结构所受的外载荷有深刻的认知和了解。首先，岩土是一种相当复杂的天然材料，目前要对岩土的力学特性进行正确的描述或认识仍是一个世界性的难题。现在还只能采用标准试块来描述岩土的物理和力学特性。在不同工程地点现场获取同类岩土试块，在实验室加工时，试块尺寸稍有偏差，加载条件稍有变化，

获取的物理力学特性就会产生很大变化。实验室按照规范取得的岩土物理力学性质数据一般都有很大的离散性,而且标准试块取得的力学特性与工程尺度的岩土力学特性还存在差别。其次,地下岩土工程结构的外载或地压又是另一个世界性的难题,仍然有待深入认识。目前已经有许多基于经验和假设的地压理论,如浅部地下岩土工程多用散体地压理论(如太沙基理论和普氏理论),而在地下深部多用弹性和塑性等理论;但是用这些理论获取的地下工程外载误差还很大。这两个世界性的难题存在的直接证据是,目前在地下工程的建设中普遍存在两个主要问题,即在稳定性较好的岩土中建设地下工程结构,设计上偏于保守,从而造成建设人力和物力的浪费;而在稳定性差的岩土中建设地下工程结构,设计上往往会出现问题,带来结构的大变形,甚至破坏,从而造成很大的人力和物力的损失。

长期以来国内外学者和工程技术人员对岩土地下工程的稳定性问题进行了不懈的探索,提出了许多保持岩土地下稳定性的理论和方法,推动了地下空间开发和利用的快速发展。本课题组就是这些研究大军中的一员。从1978年起,本课题组对岩土地下工程的围岩状态产生了极大兴趣,对其进行了长期而持续的研究,最终发现地下工程周围普遍存在一个破碎带,即围岩松动圈或围岩破碎带。经过长期研究,本课题组在1988年美国第7届地层控制国际学术会议上,正式提出了“围岩松动圈(破裂圈)支护理论”。该理论的核心是认为地下工程结构的外载是岩土介质破裂过程中的碎胀变形(力)。根据围岩松动圈支护理论,本课题组进行了大量的成功的现场试验。这些成功实践归功于本课题组对岩土地下工程结构的支护对象和外载大小的科学的合理的认识和估计。可以说,围岩松动圈支护理论的提出是本课题组对岩土地下工程的外载方面世界性难题的一个较为成功的挑战,对岩土地下工程结构外载来源问题作出了较好的肯定的回答,提出了适用于(深部)地下工程的支护理论和技术。

本课题组在对岩土地下工程锚杆支护参数的深入研究中发现,

对于大松动圈软岩地下工程,拱形断面形状是支护取得成功的关键因素之一。借助于现代计算机数值分析技术分析软岩地下工程的围岩应力和变形,以及查阅其他学者的研究成果可以发现,在地下工程周围的岩土中集中应力普遍会形成一个集中应力包裹圈,国外 Engesser (1882)、Fayol (1885)、W. Hack 和 G. Gillitzer (1928) 等学者最早开始研究,称之为压力拱 (The Pressure Arch)。大松动圈软岩巷道的拱形断面有利于形成集中应力包裹圈,即压力拱,它的存在对保持软岩地下工程结构稳定性起到了关键作用,从而促成了大松动圈软岩地下工程稳定性维护的成功,由此引起了本课题组对地下工程周围的压力拱的兴趣。在深入研究松动圈支护理论的进程中,从 1999 年起,本课题组开始关注地下工程的成拱特性,在宋宏伟教授的带领,对岩土地下工程的压力拱进行了较为全面深入的研究,研究涉及地下工程、基坑工程、采矿工程和国防工程等,目前取得了一些成果。应该说,对压力拱及其特性的研究基本上揭示了(深部)地下工程结构体系承载的本质,进一步丰富了地下工程支护理论的内容。

本书较系统地总结了本课题组 10 年来对岩土压力拱的研究成果。这些研究都是由宋宏伟教授点题和指导,与课题组团队共同研究取得的。参加本书研究工作的课题组主要人员有研究生杜晓丽、梁晓丹、王闯、Khairil Anwar、陶婷婷、唐德康、陈杰,他们在学位论文等研究中,工作卓有成效,前后传承,不断有新发现,使压力拱及其特性的研究不断深化。

本课题组对压力拱的研究仍在进行中,本书论述的研究成果将在今后不断完善,衷心地欢迎读者提出宝贵意见。

作 者

2012 年初春完稿于徐州

目 次

1 绪论	1
1.1 围岩载荷理论研究进展	2
1.1.1 自然平衡拱理论	2
1.1.2 太沙基理论	2
1.1.3 弹性介质学说	3
1.1.4 塑性介质学说	4
1.1.5 松动裂隙学说	4
1.1.6 弹塑性介质学说	5
1.1.7 岩体波速分类学说	6
1.1.8 破碎区图示学说	6
1.1.9 不连续区学说	6
1.1.10 松动圈巷道支护理论	7
1.1.11 围岩载荷理论的评述	9
1.2 压力拱及其特性的研究进展	10
1.2.1 压力拱承载结构理论的提出	10
1.2.2 压力拱的概念与特征	10
1.2.3 压力拱的判断依据	13
1.2.4 围岩成拱特性研究进展	14
2 大跨度地下岩石工程压力拱研究	18
2.1 问题的提出	18
2.2 数值分析模型	19
2.2.1 模型尺寸及其参数	19
2.2.2 边界条件及载荷模式	20
2.2.3 模拟试验安排	20
2.2.4 数值模拟的具体步骤	21
2.3 均质模型模拟结果及分析	21

2.3.1	压力拱的确定	21
2.3.2	模拟结果分析	26
2.3.3	压力拱厚度的回归方程	28
2.4	有节理模型模拟结果及分析	29
2.4.1	单组节理的分析	29
2.4.2	两组节理的分析	30
2.4.3	三组节理的分析	35
2.4.4	节理组数对压力拱形状影响的比较	39
2.5	本章小结	39
3	节理围岩成拱特性研究	41
3.1	问题的提出	41
3.2	数值分析模型和参数	42
3.3	硬岩和软岩节理围岩中压力拱的比较	43
3.3.1	硬岩中围岩压力拱分析	44
3.3.2	软岩中围岩压力拱分析	45
3.4	单组节理对压力拱的影响	49
3.4.1	节理间距对压力拱的影响	49
3.4.2	节理倾角对压力拱的影响	49
3.5	两组节理对压力拱的影响	51
3.5.1	节理间距对压力拱的影响	51
3.5.2	节理倾角对压力拱的影响	51
3.5.3	节理参数对压力拱的影响	51
3.6	侧压系数对压力拱的影响	54
3.6.1	单组节理下侧压系数对压力拱的影响	54
3.6.2	两组节理下侧压系数对压力拱的影响	57
3.7	跨度对压力拱的影响	60
3.7.1	单组节理围岩中跨度对压力拱的影响	60
3.7.2	两组节理围岩中跨度对压力拱的影响	61
3.8	断面形状对压力拱的影响	62
3.8.1	单组节理围岩中断面形状对压力拱的影响	62
3.8.2	两组节理围岩中断面形状对压力拱的影响	65
3.9	压力拱和围岩的变形关系的研究	67
3.9.1	单组节理围岩中压力拱对围岩变形的影响	67

3.9.2 两组节理围岩中压力拱对围岩变形的影响	70
3.9.3 压力拱内边界与围岩变形的关系	72
3.10 本章小结	73
4 双隧道围岩压力拱研究与应用	75
4.1 问题的提出	75
4.2 数值分析模型	76
4.2.1 数值模型与参数	76
4.2.2 模拟试验安排	77
4.2.3 数据提取路径	78
4.3 双隧道围岩应力规律分析	79
4.3.1 埋深变化时围岩应力的变化分析	79
4.3.2 中心间距变化时围岩应力的变化分析	80
4.3.3 埋深变化时地面沉降位移的变化分析	82
4.4 双隧道合理布置位置的分析	83
4.4.1 合理埋深和中心间距的概念	83
4.4.2 双隧道合理埋深的分析	84
4.4.3 双隧道合理中心间距的分析	85
4.5 用压力拱确定地下硐室群合理间距的应用	86
4.5.1 工程概况	86
4.5.2 数值分析模型的建立	86
4.5.3 数值模拟分析方法	87
4.5.4 模拟得到的压力拱的分析	88
4.5.5 模拟结果分析	89
4.6 本章小结	92
5 煤矿常见断面锚喷巷道压力拱特性及稳定性研究	94
5.1 问题的提出	94
5.2 数值模型和参数	94
5.2.1 基本假定	94
5.2.2 数值模型与模拟方案	95
5.2.3 应力提取路径	98
5.3 常见断面下压力拱变化规律分析	98
5.3.1 矩形巷道压力拱变化规律分析	98

5.3.2	梯形巷道压力拱变化规律分析	102
5.3.3	直墙拱形巷道压力拱变化规律分析	102
5.3.4	圆形巷道压力拱变化规律分析	109
5.4	常见断面下锚杆提高围岩承载力分析	109
5.5	常见断面下锚固压缩拱与压力拱关系分析	114
5.5.1	常见断面下的锚固压缩拱	114
5.5.2	常见断面下压缩拱和压力拱的关系	119
5.6	本章小结	123
6	采场围岩压力拱演化研究与应用	125
6.1	问题的提出	125
6.2	数值模拟过程	127
6.2.1	数值分析方法的选取	127
6.2.2	基本假定	127
6.2.3	屈服准则的选取	127
6.2.4	采矿工程数值模型的建立	128
6.2.5	模拟安排	129
6.3	数值模拟结果分析	129
6.3.1	工作面走向围岩压力拱成拱系数变化规律	129
6.3.2	工作面倾向围岩压力拱成拱系数变化规律	130
6.4	采矿岩石压力拱演化规律分析	132
6.4.1	工作面走向围岩压力拱演化规律分析	133
6.4.2	工作面倾向围岩压力拱演化规律分析	134
6.5	采场压力拱空间形态变化规律	135
6.6	采矿岩石压力拱影响因素分析	135
6.6.1	数值模型的建立及求解	136
6.6.2	模型建立及数据提取路径	137
6.6.3	数值模拟结果分析	137
6.7	压力拱演化规律在冲击地压问题中的应用	147
6.7.1	问题的提出	147
6.7.2	采场数值模型模拟分析	148
6.7.3	工作面开采前后采场应力位移场分析	151
6.7.4	工作面开采过程中围岩压力拱演化规律分析	154
6.7.5	二水平轨道大巷压力拱和松动圈的模拟分析	157

6.7.6 二水平轨道大巷冲击地压危险区域划分	159
6.8 本章小结	159
7 城市深基坑压力拱成拱特性研究	161
7.1 问题的提出	161
7.2 数值分析模型	163
7.2.1 数值模型与参数	163
7.2.2 模型的数据提取路径	164
7.3 深基坑成拱特性分析	165
7.4 深基坑压力拱的相关因素分析	172
7.4.1 正交模型试验方案	173
7.4.2 影响压力拱厚度的因素分析	173
7.4.3 影响卸压区深度的因素分析	175
7.5 深基坑成拱规律的回归分析	177
7.5.1 影响压力拱厚度因素回归分析	177
7.5.2 影响卸压区深度因素回归分析	177
7.6 本章小结	178
参考文献	180

1 绪 论

地下工程具有许多不可替代的优越性能,因此城市地下空间的开发利用,已成为世界性发展趋势,并以此为衡量城市现代化的重要标志^[1]。事实上,早在 20 世纪 80 年代后期,国际隧道协会(ITA)就提出“大力开发地下空间,开始人类新的穴居时代”的倡议,得到了发达国家的广泛响应,特别是国土资源贫乏的国家的重视,如挪威、瑞士等积极开发地下空间,岛国日本提出了利用地下空间把国土扩大 10 倍的设想^[2]。1991 年在东京召开的国际会议通过的《东京宣言》提出了“21 世纪是地下空间开发利用的世纪”。有学者预测 21 世纪末将有三分之一的世界人口生活在地下。在工程实践方面,瑞典、挪威、加拿大、日本、美国、法国和芬兰等国现在对城市地下空间的利用已达到相当的规模和水平。当前中国等经济快速发展国家对地下空间的利用也如火如荼地展开。

地下结构与地面结构都是形成空间的结构物,从力学上,为了保持稳定性,要求结构有能够抵御外载的能力。但是,这两种结构在力学上有很大不同,地面结构载荷和结构体比较清楚,而地下结构在这两方面很难划分清楚。因此,地下工程稳定主要涉及两大方面的问题:一是什么是地下工程结构上作用的载荷来源的问题;二是什么是地下工程结构本质的问题。前一方面的研究开展得比较早,目前已形成许多观点和理论,而后一方面的研究,开始得到重视相对较晚。究其原因是在过去很长一段时期,人们把地面结构的概念用于地下,简单地把隧道的衬砌、巷道的支架和基坑的支挡等看成地下结构的全部,认为只要找到作用于它们之上的外载即可。但是,自从研究发现了地下工程的围岩具有自承载能力,地下工程的围岩是地下结构的一部分,甚至是主要部分后,对地下结构的研究才得到关注。目前,对地下结构本质的研究得到重视,并且以发挥围岩自承载能力为基础的锚杆支护得到了广泛应用,但是对结构承载本质的研究成果还相对较少,认识很不深刻。

地下工程岩体是赋存于一定的地质环境中非常复杂的非连续介质。它本身的组成具有多样性,并且内外动力的地质作用又使其变成被各种结构面切割出的复杂结构体系,此外岩体还受到地形地貌、地下水等诸多因素的影响。所以,人们很难用精确的数学理论和方法来进行研究。在地下结构稳定性分析

上,广泛采用了现场实测、假设简化和模型物理试验方法。近年来,计算机技术的发展才使分析方法有了进步。借助于这些手段,国内外学者在地下结构稳定性研究方面取得了丰硕成果。

1.1 围岩载荷理论研究进展

1.1.1 自然平衡拱理论

1907 年俄国普罗托季亚科诺夫 (М. М. ПротоДьяконов)^[3-7] 开始研究地下工程围岩破裂区,并提出冒落拱地压理论。普氏认为,在山岩中开挖隧道后,洞顶有一部分岩石将可能因松动而塌落,塌落之后形成拱形,然后才能稳定。普氏通过对冒落拱的分析提出了自然平衡拱学说,其核心是巷道开掘后组成围岩的各单元体在自重的作用下向巷道空间方向移动(图 1-1)。在下移过程中,原来占据曲线 A 位置的各个单元体将下移到曲线 B 上。由于曲线 B 的长度小于曲线 A,因此各单元体被迫相互挤压而出现一个拱;作用于拱顶的水平推力将引起剪切力 L ,且拱线上的各单元体均满足 $L = \sigma \tan \varphi$ 这一极限平衡条件;拱以下的各单元体由于挤压程度不够而松脱下来,需要用支架支护;拱以上的岩石重量则经此挤紧的拱圈传递到两帮。这个拱就是自然平衡拱,其形状为抛物线形。

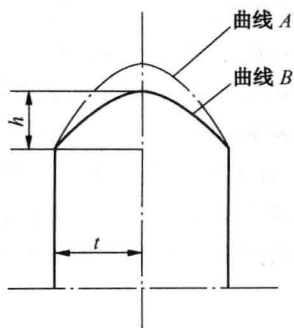


图 1-1 普氏自然平衡拱

普氏根据工程实践的经验,认为岩体内总是有许多大大小小的裂隙、层理、节理等软弱结构面。这些纵横交错的软弱结构面将岩体割裂成各种大小的块体,破坏了岩石的整体性,造成松动。被软弱结构面割裂而成的岩块与整个地层相比,其几何尺寸较小,因此可以把硐室周围的岩石看做是没有凝聚力的大块散粒体。但是,实际上岩石是有凝聚力的。因此,用增大内摩擦因数的方法来补偿这一因素。这个增大了的内摩擦因数称为岩石的坚固系数,用 f 表示。

普氏引入结构力学中压力曲线理论来分析巷道围岩的破坏与稳定,为岩石力学这门学科奠定了基础,但对形成平衡拱的物理实质并没有分析清楚。他假设沿拱线上遍布切力,这在实际中难于形成,后来人们又为普氏自然平衡拱增加了一定的限定条件。但该理论不能解释一些变形严重的巷道在支架阻力远大于冒落体岩石重量的情况下仍无法维护的问题。

1.1.2 太沙基理论

1946 年,太沙基 (K. Terzaghi)^[8-11] 研究了松动冒落拱,把隧道围岩视为

散粒体,提出了楔形体地压理论。他认为坑道开挖后,其上方围岩将形成冒落拱,并认为在巷道两侧将产生楔形体的作用(图1-2),支架承担的载荷只是顶板松动岩体中一部分高度(H_q)的重量。

$$H_q = \alpha (2d + h) \quad (1-1)$$

式中 α ——荷载系数,根据岩体条件和地下水的影响确定;

d ——巷道跨度的一半;

h ——巷道高度。

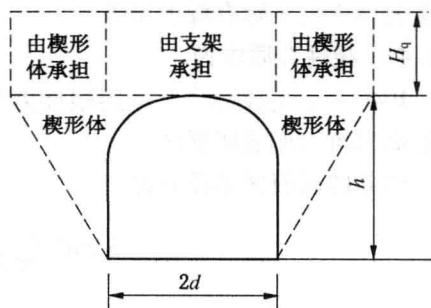


图1-2 太沙基楔形拱体学说

太沙基根据理论分析和实践经验,提出了将地下工程上覆地层自重作为支护外载的地压理论,并且给出了估算坑道地层压力的经验公式,该公式简单,容易理解,使用方便,解决了许多浅埋工程的实际问题。但是,该理论对地层压力的估算带有极大的主观性,也不能解释一些变形严重的巷道在支架阻力远大于冒落体岩石重量的情况下仍无法维护的问题。

1.1.3 弹性介质学说

1930年起金尼克^[12]把弹性理论应用到矿山巷道中,他认为在垂直剖面上的矿山岩层可类似于无限弹性半平面,圆形断面的巷道只是其中的圆形切口。通过对集中应力的研究,表明弹性介质中切口周围应力状态的变化特征与弹性常数、切口形状、边界条件等许多因素有关。一般情况下,主应力轨迹流从切口两边通过。因此,均质弹性岩石中的巷道上部将形成一定范围的卸载区,其中圆形巷道周边的径向位移量 ΔV 为

$$\Delta V = \frac{d}{E} [\sigma_2 + \sigma_1 - (\sigma_2 - \sigma_1) \cos 2\theta] \quad (1-2)$$

$$\sigma_2 = \frac{\mu}{1-\mu} \sigma_1 \quad (1-3)$$

式中 d ——巷道半径;

E ——岩石弹性模量;

σ_1 ——垂直应力;

σ_2 ——水平应力;

θ ——极坐标角;

μ ——泊松比。

式(1-2)适用于均质各向同性的连续体弹性材料,用于分析完整性好

的硬砂岩、石灰岩巷道围岩应力。但是,该理论以弹性连续假设为基础,在非连续岩体中与实际有较大误差。

1.1.4 塑性介质学说

1940年,芬纳尔^[7,10]应用塑性力学理论论证了一定条件下塑性岩石中的巷道周围可以形成屈服区。

竖井的屈服区半径 b 为

$$b = d^{K-2} \sqrt{\frac{2\gamma h}{K(K-1)q}} \quad (1-4)$$

$$K = \frac{2}{1 - \sin\varphi}$$

式中 d ——井筒半径;

K ——屈服系数;

φ ——岩石内摩擦角;

γ ——岩石重力密度;

h ——井筒断面位置的深度;

q ——支架应力。

水平巷道、硐室的屈服区近似于椭圆形,长轴在垂直方向上。如果支架的最大应力符合下述条件:

$$q_{\max} = \frac{dr}{K-3} - \frac{K^2 - 5K + 7}{(K-1)(K-3)} - rh \left[\frac{2d}{(K-2)h} \right]^{K-2} \quad (1-5)$$

则屈服区将是圆形,其半径为

$$r = \frac{(K-2)h}{2} \quad (1-6)$$

芬纳尔理论没有证明弹性介质中巷道周围的屈服区是如何形成的,对塑性介质屈服区的分析也是以假设为基础的。芬纳尔假设的理想介质的性质不变、结构一致,在屈服极限范围内符合胡克定律。这在实际中很难做到,只适用于均质的软岩巷道应力变形分析。

1.1.5 松动裂隙学说

1950年,拉巴斯^[9,13]在芬纳尔学说基础上进一步提出水平硐室周围由表及里将形成岩石松动裂隙区、应力升高区、天然假塑性区,认为松动裂隙区为一头大一头小的卵形椭圆,其半径与岩石强度性能、开挖深度和时间无关,仅取决于硐室的碎胀变形,计算式为

$$b = \sqrt{\frac{\pi d^2 (K-1) + \Delta S}{\pi (K-1)}} \quad (1-7)$$

式中 b ——松裂区半径;
 d ——巷道半径;
 K ——岩石碎胀系数;
 ΔS ——巷道周边极限变形量。

作用于支架上的矿压为

$$p = (1 - \sin\varphi) \gamma H \frac{d}{b} \times \frac{2\sin\varphi}{1 - \sin\varphi} \quad (1-8)$$

式中 p ——作用于支架上的矿压;
 φ ——岩石内摩擦角;
 γ ——岩石重力密度;
 H ——巷道埋深。

在裂隙区内, 岩石被裂隙切割成各种形状和尺寸的块体, 属于分离块体介质, 有自己的位移变形规律, 可形成三铰拱和多铰拱等。因此, 这样的区域应视为散体介质, 而式(1-7)是按连续介质条件推导出的公式, 这除个别情况(砂土)外, 是与实际不符的。

1.1.6 弹塑性介质学说

1950年, 鲁宾涅特^[9,14]以芬纳尔和拉巴斯的基本原理为基础, 认为巷道周围的岩石被裂隙切割, 局部发生破坏, 不能抵抗线性拉力, 这个区域(即拉巴斯所称的松动裂隙区)被鲁氏称为非弹性变形区。

鲁氏应用弹塑性理论进行分析计算表明非弹性变形区的轮廓不是卵形, 而是中间稍细的哑铃形; 它也不像芬纳尔、拉巴斯提出的那样是沿垂直轴拉长的, 而是沿水平轴拉长的。圆形断面巷道周边岩石位移量与非弹性变形区半径的关系式如下:

$$U_0 = \frac{R\alpha}{4G} (P + K \cot q) r^{d+2} \quad (1-9)$$

$$\alpha = \frac{2\sin q}{1 - \sin q}$$

式中 U_0 ——巷道周边岩石位移量;
 R ——巷道半径;
 G ——剪切模量;
 q ——岩石内摩擦角;
 P ——支架反力;
 K ——岩石黏聚力;
 r ——非弹性变形区半径;