

1990

中青年优秀论文集

北京有色冶金设计研究总院

编 者 的 话

出版《1990年中青年优秀论文集》的目的在于活跃我院的学术气氛，提高技术水平，促进学术交流活动的广泛开展。

编辑期间，有些作者因长期出差，论文未能收集上来，只能发表摘要或论文题目，请作者原谅。

在编辑过程中，受篇幅和经费所限，有些文章和插图作了删减，由于我们水平有限，错误和不足之处请予指正。

参加《文集》编辑加工的同志有：任英兰、黄毅华、唐建、此外得到了马慧玲、杨淑香、张丽荣、李春香等同志的帮助和指导。土建室徐建伟同志为《文集》设计封面，在此一并致谢。

院技术委员会

1991年9月

序

1990年在中青年职工中征集论文、开展评奖、交流活动，得到了全院同志的大力支持，尤其是中青年同志，几乎人人动手结合自己的工作认真撰写了论文或工作总结。这些文章都能密切联系实际，有较强实用价值。院技术委员会在评选优秀论文时，一些老专家认为有些论文的水平相当高，可以和国际学术会议的文章媲美，感到后生可畏，后生可爱！

优秀论文是在各室评分的基础上，由院技术委员会的专家推荐，集体讨论后确定的。评选工作是认真、严肃、公正的，从总体上讲是准确的。由于论文数量较大，每个评委没能评阅所有的文章，难免有些好文章没有入选，相信这部分论文的作者能够理解。

这次我院出版《中青年优秀论文集》，目的在于让我院更多的同志了解这些文章，丰富自己的知识并能结合工作予以应用，充分发挥这些文章的作用；出版这个《文集》也是为了表彰我们的中青年作者，展示他们在工作和学术领域取得的丰硕成果；这个《文集》我们准备与各兄弟院所进行交流，藉以提高我们的水平，让今后的事办得更好。

今年院里特意设立了青年科技人员技术进步奖励基金，准备对有特殊贡献的青年同志给予重奖。这充分体现了党委和院领导对青年一代的殷切期望。

乘此《文集》出版之际，希望我院中青年朋友在工作中虚心学习，深入实践、刻苦钻研、勇于探索、开拓创新，充分发挥自己的聪明才智，为祖国的社会主义建设建功立业。作一代无愧于中华民族、无愧于共产主义事业的可靠接班人。

院技术委员会 蒋继穆

1991年9月

目 录

1. 邹平铜矿突水的局部渗透系数和涌水特点.....	采矿室	徐京苑 (1)
2. 不连续性岩体三维有限元分析.....	采矿室	乔春生 (6)
3. 低爆速新型炸药切割爆破.....	采矿室	陶和彪 (12)
4. 选矿工艺设计优化程序包.....	选矿室	邓朝安 (19)
5. 三山岛金矿炼金室设计与实践.....	冶炼一室	李桂兰 (24)
6. 稀土皂技术在稀土全分离工艺中的应用.....	冶炼二室	袁新平 (27)
7. 空间加减及其混合变换.....	土建三室	徐建伟 (31)
8. 模糊数学方法在岩体力学中的应用.....	采矿室	顾秀华 (37)
9. 铜矿峪矿区原岩应力场模型的建立.....	采矿室	田治友 (42)
10. 金川全尾砂膏体泵送充填采矿试验研究.....	采矿室	张双运 (48)
11. 矿堆放矿口位置的优化设计.....	采矿室	肖尚武 (52)
12. 碳质粘土对“卡林”型金矿石浸出影响的研究.....	选矿室	高爱国 (62)
13. 计算机在火法冶金计算中的应用.....	冶炼一室	林晓芳 (66)
14. 废钒催化剂回收五氧化二钒试验研究.....	冶炼一室	张兆祥 (70)
		李 铮
15. 硫酸直接浸出高硅氧化锌矿的试验研究.....	冶炼一室	李 铮 (74)
16. 一次铜镍合金氯化液净化试验.....	冶炼一室	张广立 (79)
17. 铝电解槽阴极热、电分布设计计算数学模型.....	冶炼二室	孙 儒 (83)
18. 数学模型与有色冶金工程设计.....	冶炼二室	孙 儒 (88)
19. 稀土焙烧窑燃烧室的设计与使用.....	设备室	刘玉和 (92)
20. 螺旋楼梯的设计的与使用.....	土建一室	刘维亚 (96)
21. 变频调速的应用及其节能效果.....	电力室	史更生 (102)
22. 变风量空调系统的探讨.....	热风室	罗 英 (107)
23. 白银炉膜式辐射冷却室.....	热风室	徐建炎 (111)
24. 改善中和渣的脱水性能的新方法—碱渣回流试验.....	环保室	孔 荃 (115)
25. 平行岭谷山区大气湍流特征初探.....	环保室	宗子就 (119)
26. 大气环境预评价程序库的研制.....	环保室	宗子就 (125)
27. dBASE III 活报表编程方法	计划处	宗绍兴 (128)
28. 对工程设计中大型球磨机选择计算的几种看法.....	选矿室	杨松荣 (134)
29. 二次镍精矿制取氧化镍的实践.....	冶炼一室	江传瑜 (138)
30. 电除尘器轻型化途径.....	冶炼一室	周永亮 (141)
31. 转化器各段转化率的优化设计.....	制酸室	成 岩 (145)
32. 水平带式过滤机的研制.....	设备室	于 钊 (149)
33. 小粒度散状物料大倾角输送的几种方案探讨.....	设备室	王 波 (152)
		徐 列

34. 圆截面偏心受压柱配筋计算探讨.....	土建一室	魏利金 (159)
35. 试谈钢框架中钢梁连接点的钢度问题.....	土建一室	王茂东 (164)
36. 德兴三期计算机控制系统与X荧光分析仪 数据通讯程序设计方案.....	电力室	廖乐光 (167)
37. C12-50/10 型汽轮机本体配置配管设计的优化探讨.....	热风室	张泽元 (170)
38. 低压喷吹脉冲扁布袋除尘机组的试验研究.....	热风室	黄翼京 (173)
39. 单纯降低财务基准参数是否能体现扶植作用.....	技经室	谢志勤 (178)
40. 论金川贵金属车间改造方案的效益.....	技经室	顾祖荣 (182)
41. 总图运输设计方法论初探.....	总图室	梁炜敏 (186)
42. 工业建筑总平面设计中的环境意识.....	总图室	梁炜敏 (189)
43. 也谈工厂总平面设计中的“联合厂房”.....	总图室	张政海 (192)
44. 附加值分配与进口替代型非标准设备的定价.....	定额站	曹 雄 (195)
45. 用高斯模式预测大气污染浓度.....	环保室	刘 超 (200)
46. 浅谈微机绘图程序的开发.....	电算室	李丽雅 (204)
47. 概率法计算尺寸链原理在蜗杆传动设计中的应用.....	加工室	林敬熹 (210)
48. 北京音乐厅改进工程(摘要).....	土建一室	唐 欣 (212)
49. 地震波法溶洞探测技术初探.....	采矿室	何信光 (213)
50. 科技档案在设计工作中的经济效益和社会效益(摘要).....	资料室	姚 杰 (211)
51. 动力输送链的试验研究(题目).....	检 测	王应生

邹平铜矿突水的局部渗透系数和涌水特点

采矿室 徐京苑

一、引言

邹平铜矿(采、选规模为200t/d)是一个水文地质条件相对复杂的小型矿山。勘探报告提供的最大涌水量为 $7000\text{m}^3/\text{d}$ ($292\text{m}^3/\text{h}$)。在基建过程中发生了初始流量达 $566\text{m}^3/\text{h}$ (约 $13600\text{m}^3/\text{d}$)的突然涌水,造成淹井。因淹井事故影响工期超过一个月,直接和间接经济损失可达几十万元。淹井事故的发生固然与建设施工过程中处理不当及防水方案尚不够完善有关,然而矿体及近矿围岩(局部强含水层)的水文地质参数与实际情况差别较大,影响了人们对可能产生的突水的认识也是一个重要因素。目前我们尚不能完全掌握矿坑突然涌水的规律,其原因之一就是无法准确评价造成突然涌水的局部强含水层的水文地质参数。本文提出一个估算局部强含水层的渗透系数的方法,并应用于邹平铜矿的具体情况。计算结果说明了该矿突水初期矿坑涌水量很大的原因。

邹平铜矿是一个构造充水的小型矿山。以构造水为主要充水源的矿山发生突然涌水是不少见的。矿坑突水量的大小不仅与具体的水文地质条件有关,与施工过程中的具体处理也有关系。中、小矿山开拓空间小,对突水的承受能力低,尤应注意防止突然涌水。邹平铜出现的突水情况可为其它类似的矿山借鉴。

二、矿区水文地质条件

矿区位于黄河冲积平原与山前斜地交界处,地面标高24m左右。矿体位于地面以下150—200m之间,上覆110—120m厚的第四系松散沉积地层。矿体赋存于一个隐爆角砾岩筒之中。矿体本身及附近围岩破碎,部分矿体呈砾状、粉状,含水性较强。

第四系内有两个含水层,上部含水层和底部含水层。上部含水层厚10—15m,埋深10—15m,岩性为砂砾石,含水性较强。该层是当地农民生活和灌溉水源。底部含水层厚20—50m,岩性为砂砾石、碎石及粘质砂土,补给条件不好、含水性较差。两含水层之间为30—40m厚(局部较薄)的粘土及砂质粘土隔水层。如果该层不被破坏,上部含水层对矿坑水无影响。在沉积层之下,矿区位于一个南北向区域含水构造带之中。该带向南沿山前展布,接受河流和冲沟渗漏补给,是矿区地下水的主要补给源。矿体和隐爆角砾岩筒含水层属于该构造含水带的一部分,与第四系下部含水层构成统一的含水层。

勘探过程中进行过多个孔段的抽水试验,基岩(包括矿体)及第四系下层的渗透系数为 $0.0008—0.1786\text{m}/\text{d}$ 。其中矿体含水层为 $0.14\text{m}/\text{d}$ 。从渗透系数值来看矿体含水层的渗透性并不很强。利用这一渗透系数值(在坑内排水的条件下)计算的最大和正常涌水量分别为 $4400\text{m}^3/\text{d}$ ($183\text{m}^3/\text{h}$)和 $1700\text{m}^3/\text{d}$ ($71\text{m}^3/\text{h}$)。由于矿体很破碎(部分矿石呈粉状、烟灰状),勘探报告所提供的渗透系数值并不很大(矿体 $k=0.14\text{m}/\text{d}$)。在这种情况下矿山防治水方案的重点放在了矿床的疏干和残余头的处理上。尽管估计到了突水的可能性,但对突

大水的认识不足。

发生大突水的-180m中段突水点交叉构造张开宽度达0.1—0.2m,水流从上部像瀑布样冲下。-140m中段矿体附近多见有张裂隙充填有钻探泥浆,表明裂隙连通性极好,裂隙最大张开宽度可达0.05—0.1m。实际发生的突水和揭露的构造现象说明 $k=0.14\text{ m/d}$ 不能反映矿体的实际导水能力。矿体局部渗透性大小不仅影响到对可能发生的突水量的认识,还影响到矿山防治水重点的确定。

三、局部强含水水体渗透系数估算

可能发生突然涌水的矿山多为有局部强含水体的矿床。局部强含水水体可划分为两种类型。一是延伸较远的“开放型”,这类矿山突水后的稳定流量相对较大,地下水以动储量为主,如三山岛金矿。另一是“封闭型”的,突水后稳定流量相对较小,地下水以静储量为主。如果矿床所处含水层的含水性普遍较强,则矿山涌水表现为总量较大,并不一定出现突然涌水。恰当估计可能的突然涌水量大小的前提是正确评价局部强含水体的空间尺度和其渗透性。局部强含水体的空间尺度可由地表或钻探工程控制及按地质规律推断。对其渗透系数尚无统一的办法取得。目前,由抽水试验求含水层渗透系数的方法求得的多为抽水影响范围内的平均值。对于开放型强含水水体,这种平均值较接近强含水体的实际值,对于封闭型的则相差较远。

在承压水条件下,常用的求渗透系数的方法之一是:

$$K = \frac{0.366Q(\lg R - \lg r_w)}{MS_w}$$

式中: K : 渗透系数, m/d ;

Q : 抽水量, m^3/d ;

R : 影响半径, m ;

r_w : 井半径, m ;

M : 含水层厚度, m ;

S_w : 抽水井内水位降深, m 。

该方法的本质是,在一定流量抽水时,含水层中形成一个地下水降落漏斗,根据降落漏斗的坡度来计算渗透系数。含水层渗透系数越大,地下水降落漏斗越平缓(坡度越小)。由于有局部含水体的存在,在强含水水体边界附近降落漏斗坡度将有一个突变。这样就存在一种可能性,利用局部强含水水体中的抽水孔资料降落漏斗的缓坡段来求得局部强含水水体的渗透系数。一般来说,强含水水体内的缓坡段的坡度是未知的,问题必须分两步解决。先求出强含水水体边界上的水位降深值,再由此降深值和强含水水体抽水孔的降深值得出水位坡度进而计算其渗透系数。

求局部强含水水体边界的降深值时,将强含水水体本身视为一个大井。抽水孔的抽水量做为大井的抽水量。大井外的渗透系数为弱含水层渗透系数的平均值。用上述求渗透系数公式反算“大井”的降深值:

$$S_0 = \frac{0.366Q(\lg R - \lg r_0)}{Mk}$$

式中: S_0 : “大井”的水位降深, m ;

r_0 : “大井”半径, m ;

M: 外围含水层的厚度, m;

K: 外围含水层的平均渗透系数, m/d;

得到了局部强含水边界的水位降深 S_0 后, 将强含水边界做为定流量补给边界, 用下式求局部强含水渗透系数。

$$K = \frac{0.369 Q(\lg r_0 - \lg r_w)}{M(S_w - S_0)}$$

式中: M: 强含水厚度, m;

r_w : 钻孔半径, m;

S_w : 钻孔水位降深, m;

强含水边界附近的水位降深受其两侧的强、弱含水层的影响。上述方法是在忽略了强含水本身渗透性对它的影响的条件下应用的。因此, 这个方法只适合于强弱含水层渗透系数差别较大的情况。另外, 各含水层的空间尺度对强含水渗透系数的计算也有影响, 而这些参数有时也不是很精确的。所以这方法的准确性有时受其它参数精度的制约。不管怎样, 这一方法能使我们对含水层局部渗透性有个基本定量的估计。

四、邹平铜矿突水的局部渗透系数

邹平铜矿在勘探时全部5个见矿孔在矿体标高都发生了冲洗液全部漏失的现象。从矿体向外, 漏水段深度位于矿体标高以下100m之下, 漏失程度从全部漏失变为部分漏失。强导水地层明显地局限于矿体及附近围岩, 属于“封闭型”强含水层。从地质背景分析, 局部强含水层应与包围矿体的隐爆角砾岩筒一致。其平面尺寸为方圆100—150m左右, 厚度约60m。外围较弱含水层平均渗透系数 $\bar{K} = 0.103\text{m/d}$, 厚度包括第四系底部含水层在内为100m。位于隐爆角砾岩筒(矿体)中心的A₁孔为抽水孔。抽水流量为687.7m³/d, 最大降深为28.85m。抽水影响半径为1000—1100m。当分别取强含水层半径为75m, 厚度为60m, 抽水影响半径为1000m及1100m时, 算得的局部强含水边界上的水位降深为27.5m和28.5m。进一步算得强含水体的渗透系数为9.32m/d和21.57m/d。

在A₁孔进行抽水时, 称A₁孔60m的A₂孔观测到的最大水位降深为28.57m, 由此可知, 所计算的强含水边界(距A₁75m)上的水位降深值是可信的。将A₂孔的 $r_D = 60\text{m}$, 降深 $S_0 = 28.57\text{m}$ 代入上述渗透系数公式求得的K值为43.5m/d。一般情况下, 当与主抽水孔位于同一含水层有其它观测孔时, 用这观测孔资料算得的渗透系数应更可靠。但这种条件并不总能具备, 而只有一个抽水孔的情况更多些。

计算结果表明, 隐爆角砾岩筒的渗透系数在9.32—43.5m/d之间。它与勘探报告提供的矿体平均渗透系数相比要大90—400倍。根据几个构造裂隙突水的矿山(三山岛, 焦家等)的经验, 当水头在50—100m左右, 渗透系数为0.1—1.0m/d时, 可能产生50—150m³/h(1200—3600m³/d)的突然涌水。邹平铜矿突水点水头在120m以上, 估算的渗透系数大于9m/d, 由此, 我们就不难理解为什么会发生初始流量达566m³/h的突然涌水了。

五、邹平铜矿涌水的几个特点

1、最大涌水发生早

较大的坑采煤矿、铁矿等矿山的最大涌水较多发生在采空区充分塌陷后雨水大量渗入时。不少岩溶矿床最大涌水发生在降落漏斗形成后期, 溶洞塌陷引起地表水流入。邹平铜矿

以构造充水为主,最大涌水发生在基建期,即地下水降落漏斗形成早期。这类矿山中最大涌水量的发生常常早于永久排水系统的形成,因此,尽快形成排水能力是构造充水为主的矿山保证基建进度的重要条件。

2. 突水量大

对于中、小型矿山,矿坑总涌水量相对较小,突然涌水相对于总涌水量及开拓空间显得较大。邹平铜矿这一特点最明显。按地表疏干和坑内排水两种方案计算的矿坑最大涌水量分别为 $292\text{m}^3/\text{h}$ 和 $183\text{m}^3/\text{h}$ 。 -180m 平巷突水时的初始涌水量达 $566\text{m}^3/\text{h}$ 。远远超过了预计的最大涌水量。从这点看,防止突然涌水对中、小矿山尤为重要。

3. 水量变化快

-180m 突水时,最初三小时平均涌水量达 $566\text{m}^3/\text{h}$,四小时后涌水量降至 $366\text{m}^3/\text{h}$ 左右。淹井恢复过程中,排干井巷积水后当天全矿总涌水量为 $266\text{m}^3/\text{h}$ 。三天后水量降至 $150\text{m}^3/\text{h}$,已明显小于最大涌水量,表明突水对矿坑涌水量的影响已经过去。十几天后涌水量又低至 $100\text{m}^3/\text{h}$ 左右,流量趋于稳定。

邹平铜矿为构造承压水,突水初期涌水量大主要为水压释放引起,后期流量缓慢衰减主要为地层疏干的反映。水压大小是制约突水量大小的重要因素。早期利用坑内放水孔或揭露较弱的导水构造降低水压对防止大量突水是有积极意义的。待到水压降到一定程度再揭露强导水构造,突水量会相应减小。对同一条强导水构造,先从较高的中段揭露,后在较低中段揭露,对防止突水也是有利的。但对岩溶充水矿床这种方法不一定适用,因为岩溶往往浅部更发育。

4. 导水构造

强导水构造陡倾者居多,不均一性很强。坑内突水后,距 A_1 孔 60m 的 A_2 孔水位与 A_1 孔同步变化,水位差很小,说明该孔与强含水层联系很畅通。但 A_2 孔本身抽水试验时,降深 45.3m ,出水量仅 $30\text{m}^3/\text{d}$ (求得的 $K=0.0043\text{m}/\text{d}$),出水量很少。可见 A_2 孔虽揭露了强导水构造,使得水位与 A_1 相同,但揭露很不充分。可能实际上该孔只揭穿了若干条陡立导水构造中的一条,限制了过水量。

-180m 突水点不仅处于构造张开度大的部位,而且处于两构造交叉部位,导水性非常强。构造的导水性不均主要决定于构造张开度和交叉构造的发育。突水点所处构造部位不同,可能发生的突水量可有很大差别。构造充水为主的矿山如需采用降压疏干时,用地表钻孔疏干效率往往较低,因为强导水构造较陡,地表钻孔难以充分揭露(如 A_2 孔的情况,有时钻探都难以发现,如三山岛金矿的平行勘探线的导水构造)。用坑内钻孔放水则有可能针对构造的方向及构造组合特征布置钻孔,用较少的钻进工程揭露多条导水构造或构造交叉部位,可取得事半功倍的效果。

5. 水位特点

-180m 大突水之前, -140m 在矿体附近曾出水 $40\text{m}^3/\text{h}$,距出水点水平距离分别为 10m 和 60m 的 A_2 孔和 A_1 孔水位差不到 0.5m 。 -180m 出水点距充填孔约 20m ,距 A_1 和 A_2 孔约 $50-60\text{m}$ 。淹井恢复过程中以 $300\text{m}^3/\text{h}$ 的排水量排水时,各孔水位差仍不足 1m 。距突水点远近不同地点的地下水位差很小,说明地层对地下水阻力很小。这时,突水量主要受出水点处构造张开程度或工程对构造的揭露程度控制。这意味着工程揭露处构造张开度若再大一些,出水点的水量还会更大。

六、结 论

由于矿体的渗透系数与实际差别较大，影响了对可能发生的突水的认识，也影响到防治水方案的侧重点。用本文提出的估算局部强含水体系渗透系数的方法估算了邹平铜矿矿体（隐爆角砾岩筒）的渗透系数为 $K = 9.32 - 43.5 \text{ m/d}$ 。该值为勘探报告提供的矿体含水层平均值 $K = 0.14 \text{ m/d}$ 的90—400倍。从所得的渗透系数出发，我们不难理解为什么突水初期的涌水量会大大超过计算的最大涌水量。

已知局部强含水体系的渗透系数并不能完全确定突水量的大小。突水量不仅决定于地层的渗透性，具体工程处理往往起着决定的作用。邹平铜矿的突水具有：突水发生在基建期，排水系统正式运行之前；突水量大大超过矿坑正常涌水量；突水后矿坑涌水量很快减少；含水构造陡倾，地表钻孔不易充分揭露等特征。该矿是以构造充水为主的小型矿山涌水的典型代表。对这类矿山，尽早形成排水能力、适当利用放水降压手段及重视基建期的水文观测工作可消除或减少可能的突水对矿山建设的影响。

不连续性岩体三维有限元分析

采矿室 乔春生

一 引 言

由于电子计算机的发展,数值方法已被证明在解答复杂的岩石力学课题中是一种十分有效的手段,而有限元法在处理复杂的结构、复杂的边界条件及荷载条件时它显示了独特的效能。有限元法已经解决了大量的岩石力学课题,但是大都属于平面分析,有一定的局限性,而三维有限元分析和解决地下工程的专用有限元程序几乎没有。究其原因有三条。1) 三维问题规模大,需要计算机内存量庞大且相当费时,2) 岩石力学是一门新学科,还没有完全贯穿到地下工程的设计之中,3) 地下工程有其特殊性,开发专用程序难度大。

近年来电子计算机的迅猛发展为三维有限元分析创造了良好条件,采矿工业的发展和地下工程规模的扩大,对设计、施工的科学化程度要求也日益高涨,以经验为依据的工程类比法已无法满足地下工程发展的要求。中条山有色公司所属的铜矿峪铜矿5号矿体在我国首次采用矿块崩落法开采,为摸索经验,解决实际工程技术问题,国家科委组织了矿块崩落法技术研究的联合科技攻关。为研究地应力场对矿岩可崩性的影响,必须用数值分析方法对矿块崩落法开采进行三维模拟,为此本文提出了不连续性岩体的三维有限元分析方法及计算机程序,成功地分析了地应力场对矿岩可崩性的影响,为掌握和推广此法提供了科学依据。本文提出的分析方法及程序具有一定的通用性,可用于巷道、硐室、采场及矿山整体稳定性分析和其它地下工程。

下面先介绍不连续性岩体的三维有限元分析原理和程序,然后以对铜矿峪矿块崩落法的数值模拟为例讨论本方法的适用性。

二 分析原理及程序

1. 不连续性岩体的应力~应变关系

岩石及岩体具有复杂的力学性态和结构特征,层理、节理以及几乎遍布岩体中的裂隙

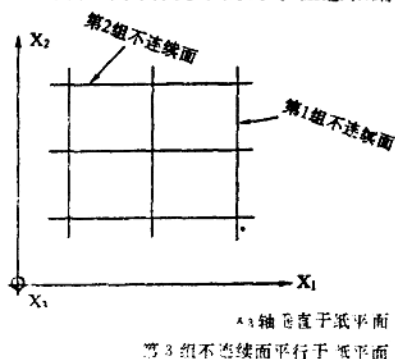


图1 三组正交不连续面及坐标系

(这些被通称为不连续面)的存在破坏了岩体的连续性。某些岩体层理发育,或者片理发育,或者在某几个方向有非常发育的节理族,它在三个互相正交的方向上的变形特性很可能互不相同。对于这类岩体,按照各向同性体理论进行分析,往往难以得到满意的结果。不连续面对岩体的应力状态和变形特性有较大的影响,它的力学特性和分布状态在相当程度上影响着岩体的稳定,尤其对硬岩影响更大。因此有必要充分考虑不连续面对岩体的影响。为简单起见,这里对岩体作以下基本假设。

1) 岩体中最多只有三组互相正交的不连续面。

2) 每组不连续面的各个不连续面互相平行, 等间隔分布。

取图 1 所示的坐标系, 各坐标轴分别指向各组不连续面的法线方向。岩体的等效弹性常数应该反映岩石材料本身和不连续面的影响, 由叠加原理, 可推出岩体的等效弹性常数为:

$$\begin{aligned} E_1 &= \frac{1}{\frac{1}{E} + \frac{1}{S_1 K_{n1}}} & E_2 &= \frac{1}{\frac{1}{E} + \frac{1}{S_2 K_{n2}}} \\ E_3 &= \frac{1}{\frac{1}{E} + \frac{1}{S_3 K_{n3}}} & G_{12} &= \frac{1}{\frac{1}{G} + \frac{1}{S_1 K_{s1}} + \frac{1}{S_2 K_{s2}}} \\ G_{23} &= \frac{1}{\frac{1}{G} + \frac{1}{S_2 K_{s2}} + \frac{1}{S_3 K_{s3}}} & G_{31} &= \frac{1}{\frac{1}{G} + \frac{1}{S_1 K_{s1}} + \frac{1}{S_3 K_{s3}}} \end{aligned} \quad (1)$$

其中: E 、 G 是岩石的弹性模量和剪切模量 (MPa)

S_1 、 S_2 、 S_3 是每组不连续面的平均间距 (m)

K_{n1} 、 K_{s1} 、 K_{n2} 、 K_{s2} 、 K_{n3} 、 K_{s3} 是每组不连续面的垂直刚度和剪切刚度 (MPa/m)

不连续面的刚度是不连续面的弹性变形常数, 可从连续面的剪切试验和压缩试验结果中求出。岩体的应力~应变关系可表示为

$$\{\sigma\} = [D] \{\epsilon\} \quad (2)$$

其中: $\{\sigma\} = [\sigma_1 \ \sigma_2 \ \sigma_3 \ \tau_{12} \ \tau_{23} \ \tau_{31}]^T$

$\{\epsilon\} = [\epsilon_1 \ \epsilon_2 \ \epsilon_3 \ \gamma_{12} \ \gamma_{23} \ \gamma_{31}]^T$

$$[D] = \begin{bmatrix} \frac{1}{e} E_1 E (E^2 - E_2 E_3 \mu^2) & & & & & \\ \frac{1}{e} E_1 E_2 E \mu (E + E_3 \mu) & \frac{1}{e} E_2 E (E^2 - E_3 E_1 \mu^2) & & & & \\ \frac{1}{e} E_1 E_3 E \mu (E + E_2 \mu) & \frac{1}{e} E_2 E_3 E \mu (E + E_1 \mu) & \frac{1}{e} E_3 E (E^2 - E_1 E_2 \mu^2) & & & \\ 0 & 0 & 0 & G_{12} & & \\ 0 & 0 & 0 & 0 & G_{23} & \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & G_{31} \end{bmatrix} \quad \begin{matrix} \text{对称} \\ \\ \\ \\ \\ \end{matrix} \quad (3)$$

$$e = E^3 - E E_2 E_3 \mu^2 - E E_1 E_2 \mu^2 - E E_1 E_3 \mu^2 - 2 E_1 E_2 E_3 \mu^3$$

μ 是岩石的泊桑比。不连续性岩体的弹性矩阵 $[D]$ 比较复杂, 确定此矩阵时除了岩石的弹性常数外, 还需要每组不连续面的间距、剪切刚度和垂直刚度。这个矩阵除了能用于正交各向异性岩体 (三组不连续面), 还能用于横观各向同性岩体 (两组或一组不连续面) 和各向同性岩体 (无不连续面)。应力分析中, 通常整体坐标系的坐标轴与岩体的弹性主轴方向并不一致, 必须对其进行坐标变换。变换后的应力~应变关系将成为

$$\{\sigma\} \dots = [D] \dots \{\epsilon\} \dots \quad (4)$$

其中

$$[D] \dots = [T]^T [D]_{1,2,3} [T] \quad (5)$$

$[T]$ 是坐标变换系数矩阵, 脚标 $\dots$ 和 $1, 2, 3$ 分别指整体坐标系和弹性主方向组成的坐标系。

2. 不连续面破坏准则

不连续面的常见破坏形式有受拉时发生的拉裂破坏和受剪力作用时出现的剪切滑移破坏,其破坏准则是

$$\text{拉裂破坏 } \sigma_n - R_t \geq 0 \quad (6)$$

$$\text{剪切滑移破坏 } \tau_n' \geq |\tau_n| \quad (7)$$

$$\tau_n = C - \sigma_n \tan \varphi \quad \sigma_n < 0 \quad (8)$$

其中 τ_n' 、 σ_n 是不连续面上的剪应力和正应力, R_t 、 C 、 φ 是不连续面的抗拉强度、粘结力和摩擦角。

3. 有限元程序简介

计算机内存占用量大, 计算费时和空间几何关系复杂是分析空间问题时遇到的两大难题。为克服此困难, 达里把三维有限元程序分成前处理程序、有限元计算程序和后处理程序三部分, 三个程序之间用数据文件作为接口进行数据传递, 各自独立使用, 灵活性强, 快速方便。

前处理程序主要完成网格划分、总刚度矩阵存储地址表的制作等工作。网格划分采用手工输入加自动形成方式, 可以显著的确少数据准备工作量和出错率。

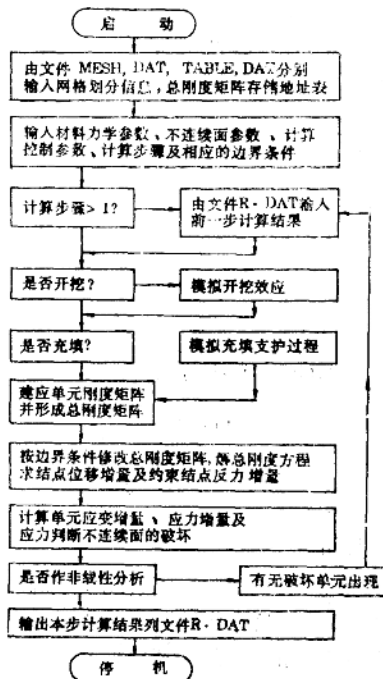


图 2 有限元计算程序框图

图 2 是有限元计算程序粗略框图。程序中考虑到三维分析的特点, 按照加载顺序或开挖步骤等分步计算, 每步计算完成后将中间结果存入文件, 以备下一步计算和整理结果时使用, 缩短了程序运行时间, 既保证了能在规定时间内完成计算, 又防止了因停电、机房关机等原因造成不必要的损失或返工。另外, 采用一维变带宽紧缩存储方式存储总刚度矩阵, 只存储与周围结点号有关的上三角阵内的非零元素, 比等带宽和变带宽存储方式节约内存 40~60%, 配合共轭斜量法解总刚度方程组, 计算速度显著提高, 使三维有限元计算成为可能。

程序中全部采用八结点六面体空间等参单元, 用高斯积分法计算单元刚度矩阵, 可以考虑均匀分布、三角分布或梯形分布的面力荷载。结合地下工程的特点, 用应力释放法模拟开挖、模拟施工步骤和充填支护等工程, 了解各个施工阶段岩体应力状态和稳定程度, 从而指导施工决定合理的施工顺序。

除弹性分析, 还可作简单非线性分析, 处理不连续面破坏后的应力再分配。即若单元内某组不连续面出现拉裂破坏或剪切滑移破坏, 则降低该组不连续面的

垂直刚度或剪切刚度。处理完所有单元之后, 如图 2 所示, 返回去从头重新计算, 直到所有单元不再出现破坏为止重复以上过程。

后处理程序用于整理计算结果, 具有人机对话, 作任意剖面, 自动绘图等功能。可以作三维空间任意剖面上的单元分割图、开挖区域图、破坏范围图、主应力分布图和主应力等值线图。全部图形可根据需要任意缩放。

三、应 用

图3是模拟铜矿峪矿块崩落法时使用的计算模型,共2184个结点,1716个单元,此模型已基本上占用了我院PE-3230机的最大内存,运行一遍约需三小时(弹性计算)。按照铜矿峪矿采用的岩体分类法确定了各单元代表的岩体类别及力学参数,其中第2类、第3类、第4类岩体分别含有两组、两组、三组节理。按照图4所示的拉底顺序,分别分析了原岩应力场和铜矿峪地应力场对岩矿崩落特性的影响。

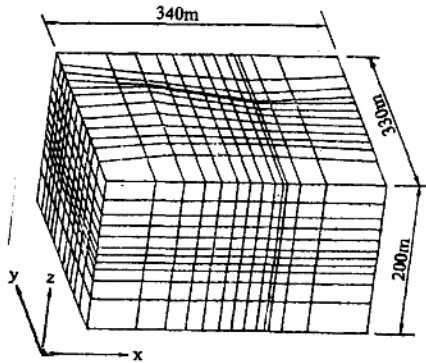


图3 单元分割图

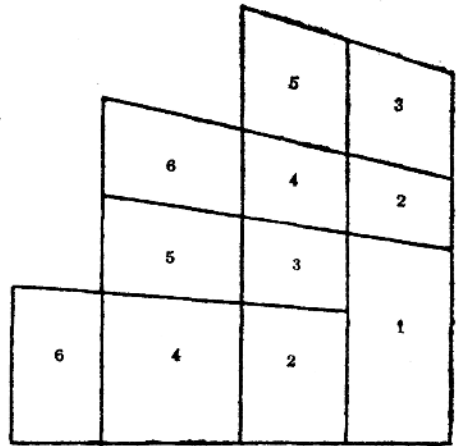


图4 拉底顺序图

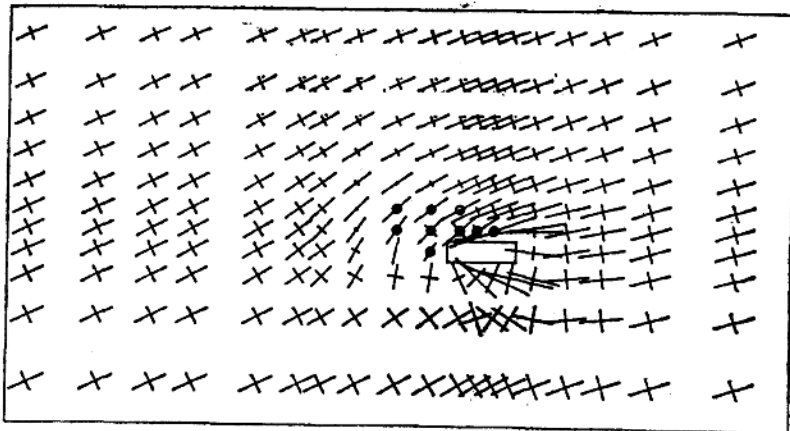


图5 单一拉底时垂直剖面上主应力分布(拉底面积:3770m²)

图5是在铜矿峪原岩应力作用下拉底约3700m²后垂直剖面上的主应力分布,图中出现圆圈处表示该点主应力是拉应力。拉底破坏了岩体原始的平衡状态,围岩中出现大范围应力集中区,拉底区附近应力变化十分明显,上方出现了拉应力区和应力增压区、应力增大区,并随着拉底面积的增加迅速发展,逐渐增大。图6是拉底约11700m²后的主应力分布,顶板上方的拉应力已远远超过不连续面的抗拉强度,使顶板上方出现大范围的拉裂破坏区,同时,由于拉底区右上方应力增大,也出现了剪切破坏区。

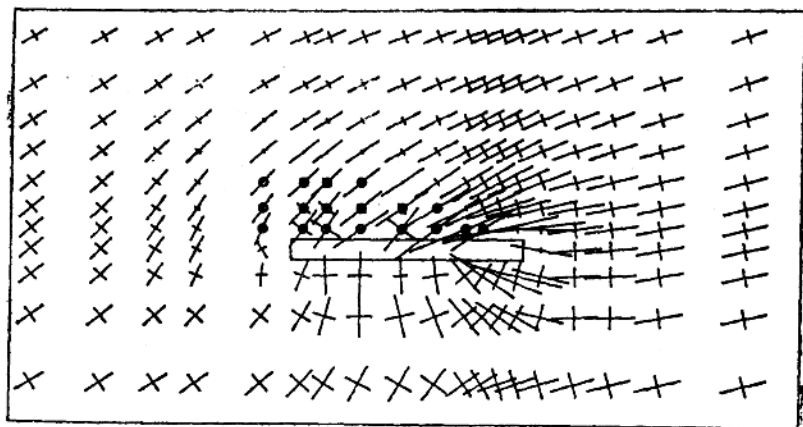


图 6 单一拉底时垂直剖面上主应力分布(拉底面积: 11740m^2)

若在矿体东北侧端部配合割帮, 在相同的原岩应力场作用下, 拉底区上方的拉应力区和应力增大区将显著增大。图 7 是割帮 20 m 高, 拉底约 11700m^2 后的主应力分布, 与图 6 相比不难发现, 割帮的效果十分明显。

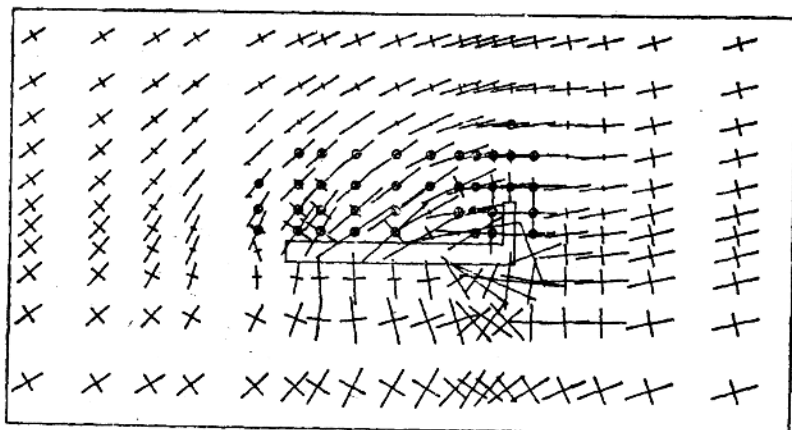


图 7 拉底结合割帮时垂直剖面上主应力分布(割帮 20m 高, 拉底面积: 11740m^2)

拉底区上方破坏区内矿量随拉底面积的扩大呈直线增加趋势, 拉底面积越大, 破坏矿量越多, 但若采用拉底结合东北部割帮方案进行诱导崩落, 破坏矿量将增加约 50%。这主要是由于割帮削弱了水平地应力对矿体的夹持作用。

四、结 语

本文提出了不连续性岩体的三维有限元分析方法及专用计算机程序, 并通过实例介绍了其适用性, 归纳起来有以下特点。

1. 把不连续性岩体的应力与应变关系引入三维有限元分析中, 既可考虑各向同性均质岩体, 又可处理复杂的不连续性岩体, 充分反映节理、层理等不连续面对岩体力学性质的影响。

2. 计算程序占用计算机内存容量少, 运行速度快, 使得在现有小型计算机上能进行三维有限元分析, 并能按照施工顺序、正确地模拟开挖、充填支护等, 安全可靠, 使用方便, 功能齐全。

3. 能作简单非线性分析, 处理不连续面的破坏和破坏后应力再分配, 正确地评价地下工程稳定性。

在分析地应力场对矿岩可崩性影响过程中得到了中条山有色公司和我院电算室的大力协助, 在此一并致谢。

参 考 文 献

- (1) Duncan J.M., Goodman R.E., Finite element analyses of slopes in jointed rock, Contract Report S-68-3, 1968.
- (2) 《地下工程围岩稳定分析》于学等, 煤炭工业出版社, 1983.
- (3) 《弹性力学问题的有限单元法》(修订版), 水利出版社, 1982.
- (4) 《弹性力学及其有限元法》张允展, 曹富新, 中国铁道出版社, 1983.
- (5) 《有限元法续讲》李大潜等, 科学出版社, 1979.

低爆速新型炸药切割爆破

采矿室 陶和彪

前 言

长期以来,人们多用传统的劈裂法开采装饰性石材,近年来,随着爆破技术的发展,特别是新型炸药的出现,已有越来越多的矿山,用控制爆破的方法开采石材,与人工开采相比,控制爆破法的开采效率要高几十倍,同时还可以提高荒料率。但到目前为止,我国石材矿山用爆破方法开采石材的还较少(不到10%),极大地限制了石材工业的发展。这主要有两个原因,其一是控制爆破开采石材的理论还不够完善,其二是控制爆破开采石材的技术不稳定,一些经验公式在不同的矿山使用容易出现偏差,因此阻碍了它的推广应用,加之一般控制爆破都使用普通炸药,容易在孔壁产生微裂缝,破坏石材。我们采用低爆速新型炸药在石材开采中取得了较好的效果。

一、新型低爆速炸药

后勤工程学院姚克音工程师成功地研制成一种小直径低爆速管状炸药,简称XD装药。这种装药能在 $\phi 8\text{mm}$ 的纸管中以 $1500\sim 1600\text{m/s}$ 的速度稳定爆轰,同时具有普通工业炸药成本低廉、制做简单,使用安全等特点。其主要性能与瑞典古立特炸药的比较见表1。

表 1

炸药种类 (mm)	爆 速 (m/s)	密 度 (kg/m^3)	线装炸药密度 (kg/m)	爆炸气体体积 (l/kg)
$\phi 17$ 古立特	4000	1300	0.245	404
$\phi 11$ 古立特	4000	1300	0.110	404
$\phi 12\text{XD}$	2000	950	0.107	900
$\phi 10\text{XD}$	1700	950	0.075	900
$\phi 8\text{XD}$	1500	950	0.050	900

XD装药的主要成份是硝酸铵,它仍保持了硝酸类炸药的主要性能,化学安定性好,敏感度较低。

其冲击感度:25kg重锤,落高10cm,爆炸40%

2kg重锤,落高10cm,爆炸8%

热感度:爆发点 260°C

火焰感度:标准药柱不能点燃。

1. XD装药爆轰时不对孔壁产生破坏作用

切割爆破对孔壁的破坏作用是孔内炸药爆炸所产生的动压对孔壁的破坏。当它所产生的动压低于一定限度时,切割爆破只能使岩石沿预定方向开裂,对其它方向并不产生裂缝。