

国家自然科学基金项目 (51304068, 51374198, 51134001)

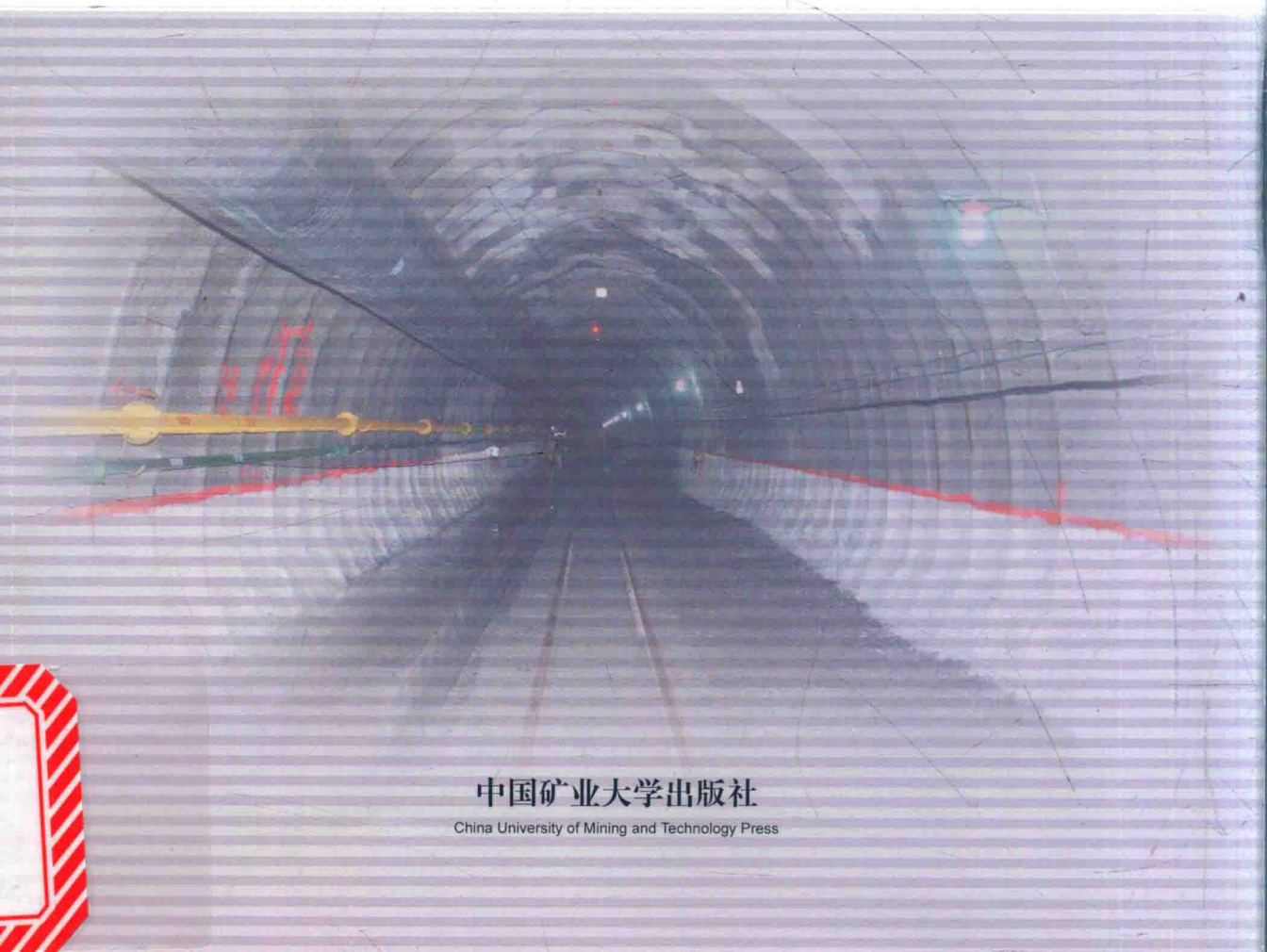
国家重点基础研究计划 (973) 项目 (2013CB036003)

中国矿业大学深部岩土力学与地下工程国家重点实验室开放基金项目(SKLGDUK1207)

# 深井巷道围岩

## 强度衰减规律研究

牛双建 著



中国矿业大学出版社

China University of Mining and Technology Press

国家自然科学基金项目(51304068,51374198,51134001)

国家重点基础研究计划(973)项目(2013CB036003)

中国矿业大学深部岩土力学与地下工程国家重点实验室开放基金项目(SKLGDUK1207)

# 深井巷道围岩强度衰减规律研究

牛双建 著

中国矿业大学出版社

## 内 容 提 要

本书以千米深井深部典型破坏巷道为工程背景,综合采用真三轴物理模拟、室内 MTS 岩样试验、理论分析和数值模拟等方法,系统深入地对深井巷道围岩强度衰减规律这一关键科学问题进行了研究。研究内容具有先进性、实用性,相关研究成果对工程实践具有重要的指导意义。

本书可供从事矿业工程及相关专业的研究人员和工程技术人员参考使用。

### 图书在版编目(CIP)数据

深井巷道围岩强度衰减规律研究/牛双建著.

徐州:中国矿业大学出版社,2015.5

ISBN 978 - 7 - 5646 - 2678 - 5

I. ①深… II. ①牛… III. ①深井—巷道围岩—强度衰减—衰减规律—研究 IV. ①TD263

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 078934 号

书 名 深井巷道围岩强度衰减规律研究

著 者 牛双建

责任编辑 杨 洋

出版发行 中国矿业大学出版社有限责任公司

(江苏省徐州市解放南路 邮编 221008)

营销热线 (0516)83885307 83884995

出版服务 (0516)83885767 83884920

网 址 <http://www.cumtp.com> E-mail: cumtpvip@cumtp.com

印 刷 中矿大印发科技有限公司

开 本 787×1092 1/16 印张 9 字数 250 千字

版次印次 2015 年 5 月第 1 版 2015 年 5 月第 1 次印刷

定 价 30.00 元

(图书出现印装质量问题,本社负责调换)

## 前 言

我国煤炭储量埋深在 1 000 m 以下的有  $2.95 \times 10^{12}$  t, 占煤炭资源总量的 53%。据相关部门统计,截至 2013 年 7 月,煤矿开采深度达 1 000 m 以上的矿井有 47 处,预计未来将有更多矿井进入深部开采。由于深井巷道处于“三高一扰动”的环境中,极大地加大了巷道维护的难度,造成深井巷道大面积破坏失稳。深井巷道围岩稳定控制问题已成为制约深井开采的瓶颈,甚至决定了资源开发的可行性及其可持续发展。深部巷道处于高应力环境中,巷道开挖后围岩经历弹塑性变形→破裂→再破裂的过程,在此动态破裂过程中,势必伴随围岩力学参数的不断劣化,即强度衰减。显然,深入研究深井巷道开挖过程中围岩力学性能参数劣化及衰减规律,对正确评价其峰后力学特征、峰后围岩承载结构形成及其与支护结构相互作用的机理及在此基础上提出适合深井巷道围岩稳定控制技术,解决一直严重制约深井开采中巷道围岩稳定控制这一瓶颈,无疑具有重要的理论和实际应用价值。

本书主要包括四大部分共 7 章内容:第一部分主要内容为以深井典型破坏巷道为工程背景,采用大尺度真三轴模拟试验系统,按照先加载后开挖的方式,室内再现了深井巷道围岩开挖卸荷效应的全过程;揭示了深井巷道围岩在无支护条件下的破坏模式;获得了不同深度处围岩单元真实的加卸载路径及开挖前后应力状态,重点分析探讨了松动圈内围岩主应力差演化规律及机理;建立了松动圈内围岩主应力差峰值后跌落幅度与其损伤程度的对应关系。第二部分内容为基于物理模拟获得的松动圈内围岩的应力路径,采用 MTS 试验机进行了岩样的加卸载试验,获得了与松动圈内各位置围岩损伤程度相一致的初始损伤岩样;采用多级围压多次峰值屈服的试验方法对其在不同围压下的强度及变形参数进行了测定,研究得出了损伤岩样强度衰减及其围压对其强度衰减幅度的影响规律;结合损伤岩样与松动圈内围岩对应关系,初步建立了深井巷道围

岩峰后强度参数衰减的模型。第三部分内容为通过对试验建立的深井巷道围岩峰后强度参数衰减模型中塑性参数的替换推导,将该模型植入了FLAC<sup>3D</sup>数值模拟分析软件;结合实际工程,更深入地研究了深井巷道围岩破裂过程中围岩应力场及位移场的演化规律,并与物理模拟和工程现场测试结果进行了对比分析,验证了所建立模型的合理性。最后,鉴于巷道围岩强度衰减伴随裂隙不断扩展及贯通的事实,现场选取具有不同破裂面分布的破裂岩样,对其进行了零围压条件下的再破坏试验,研究了围岩破坏过程中强度衰减及能耗特征参数与破碎程度的关系。

本书研究成果的取得,离不开作者博士生导师——中国矿业大学力学与建筑工程学院靖洪文院长的悉心指导和大力支持,作者在此表示由衷的敬意和衷心的感谢!

本书的出版得到了国家自然科学基金(51304068,51374198,51134001)、国家重点基础研究计划(973)项目(2013CB036003)、中国矿业大学深部岩土力学与地下工程国家重点实验室开放基金(SKJGDUEK1207)的资助。同时,也得到了河南理工大学能源科学与工程学院领导和相关老师的大力支持和帮助,作者在此一并表示衷心的感谢!

由于作者水平所限,书中不妥之处在所难免,恳请读者批评指正。

作者  
2015年1月

## 目 录

1	绪论	1
1.1	问题的提出	1
1.2	国内外研究现状	2
1.3	本书主要研究内容与方法	10
2	物理模拟相似材料的研制及试验方案设计	12
2.1	模型材料的研制	12
2.2	物理模拟试验方案设计	22
2.3	本章小结	31
3	深井巷道围岩主应力差演化规律物理模拟	32
3.1	试验目的及方案	32
3.2	模型初始应力场的施加	33
3.3	巷道围岩破坏形态及范围分析	34
3.4	主应力及主应力差演化规律分析	36
3.5	巷道围岩表面位移分析	46
3.6	本章小结	47
4	深井巷道围岩强度衰减规律试验研究	48
4.1	室内岩样加卸载路径设计	48
4.2	试验设备及岩样介绍	50
4.3	基于围岩主应力差演化规律的岩样强度衰减规律试验研究	51
4.4	巷道围岩峰后强度参数衰减模型的建立	73
4.5	本章小结	76
5	基于破裂面分形维数为损伤因子的围岩强度衰减规律研究	77
5.1	试验仪器及岩样情况	78

5.2	破裂岩样分形特征及分维数计算 .....	80
5.3	破裂岩样再破坏试验研究 .....	84
5.4	破裂岩样峰值强度与其破裂面分维数关系 .....	89
5.5	破裂岩样再破坏能耗特征试验研究 .....	90
5.6	破裂岩体再破坏声发射特征试验研究 .....	98
5.7	本章小结 .....	101
<b>6</b>	<b>深井巷道围岩峰后强度参数衰减模型的验证 .....</b>	<b>102</b>
6.1	数值模拟软件选择 .....	102
6.2	数值模型的建立 .....	102
6.3	围岩峰后强度参数衰减模型的植入 .....	105
6.4	深井巷道围岩数值模拟分析 .....	108
6.5	本章小结 .....	120
<b>7</b>	<b>结论与展望 .....</b>	<b>121</b>
7.1	主要研究成果 .....	121
7.2	进一步的研究工作 .....	123
	<b>参考文献 .....</b>	<b>124</b>
	<b>变量注释表 .....</b>	<b>133</b>

# 1 绪 论

## 1.1 问题的提出

能源和矿产资源是制约世界各国国民经济发展的的重要因素。随着各国浅部资源的减少和枯竭,世界各国煤炭和其他矿物资源的开采深度在逐年增加,规模也越来越大。就煤矿开采方面,我国埋深在 1 000 m 以下的煤炭储量为 2.95 万亿 t,占煤炭资源总量的 53%。目前煤矿开采深度以每年 8~12 m 的速度增加,东部矿井以每 10 年 100~250 m 的速度发展,预计在未来 20 年很多煤矿开采将进入 1 000~1 500 m 的深度<sup>[1]</sup>。

由于深井巷道处于“三高一扰动”的环境中,极大地加大了巷道维护的难度,造成深井巷道大面积破坏失稳。据统计<sup>[2-3]</sup>,我国深井部分巷道翻修率高到 200%,由于深部开采引起围岩变形、位移和片帮、冒落等安全事故,占矿山建设、生产事故总数的 40%以上,由此所带来的损失,仅死亡人数就占矿山百万吨死亡率中的 50%以上,至于事故发生后的清理修复、加固等所耗费的资金和影响生产所造成的经济损失则以数亿元计。总之,深井高应力巷道的维护及其灾害防护已经成为这些矿井经济效益和生产安全的关键问题,甚至决定了资源开发的可行性及其可持续发展问题。

现场试验研究表明,地下硐室开挖后,围岩在由开挖前的三向应力状态向近似的二向应力状态调整过程中,由于产生应力集中以及卸荷作用使得巷道围岩力学环境劣化导致破坏,从而造成硐室周围存在一个力学性能参数变差的破损区(EDZ)<sup>[4-7]</sup>,该破损区内的围岩力学参数(弹性模量  $E$ 、黏聚力  $C$ 、内摩擦角  $\varphi$  等)较开挖前明显地发生了不同程度的劣化,即强度衰减。然而,现有的支护理论和设计方法一般忽略了这一重要事实,采用该理论和设计方法对深井巷道围岩稳定控制提出的技术,往往不能有效地控制深部围岩发生过大的变形,致使深井巷道普遍出现破坏现象,严重影响矿井安全生产。

显然,深入研究深井巷道开挖过程中围岩力学性能参数劣化及衰减规律,对探讨深井巷道出现的特殊破坏现象,以及对深井巷道开挖后围岩所处应力状态和破裂后力学特性的正确评价,在此基础上进一步开展深井巷道围岩承载结构形成及其与支护相互作用机理的研究,进而提出适合深井巷道围岩稳定控制的技术和对策,解决严重影响深井高应力巷道围岩稳定的安全和经济效益问题,无疑具有重要的理论和实际应用价值。



## 1.2 国内外研究现状

### 1.2.1 岩石强度衰减研究现状

巷道围岩强度衰减一般可以分为强度瞬时衰减和强度长期衰减两个阶段。瞬时衰减阶段是指巷道在开挖前后较短时间内由于开挖卸荷、应力集中和围岩所处应力环境改变等作用导致的巷道围岩强度参数劣化。长期衰减是由于围岩已在开挖期间出现不同程度的强度劣化,加之深井巷道围岩高应力的环境,随着时间的增长,强度进一步降低,即围岩强度时效性。以下从试验研究、数值模拟和现场实测等方面就巷道围岩(岩石)强度衰减规律对课题国内外研究现状进行总结回顾。

#### 1.2.1.1 试验研究现状

##### (1) 岩石瞬时强度衰减研究

von Karman 最早在普通试验机上得到了不同围压下大理岩的应力—应变曲线。之后,刚性试验机的出现,使更多的岩石力学工作者致力于该领域的研究。1966年, N. G. W. Cook<sup>[8]</sup>利用液压—热力耦合加载的刚性试验机,得到了岩石单轴压缩全程曲线。1968年, W. R. Wawersik<sup>[9]</sup>对该试验机做了改进,采用人工伺服控制的方法,得到了一系列岩石试样单轴压缩的全程曲线,根据岩样单轴压缩破坏稳定与否,将岩石分为Ⅰ类和Ⅱ类材料,这一观点至今仍存在争论<sup>[10]</sup>。

从1966年至今40多年,由于刚性伺服试验机的出现,使岩石峰后承载能力衰减规律研究取得了丰硕的成果。1981年,日本学者川本眺万根据室内压缩曲线最先提出了弹性—线性软化—残余塑性模型。该模型将岩石峰后软化段强度衰减与塑性应变简化为线性关系,而残余塑性阶段强度为定值;由于该模型参数少且基本符合岩石材料力学特性,在岩土工程中应用较广泛<sup>[11-13]</sup>。1979年, K. Y. Lo 和 C. F. Lee<sup>[14]</sup>提出了弹性—脆性跌落—残余塑性模型。该模型假定岩石峰后强度从峰值强度直接跌落到残余强度,然后保持定值。这一模型是对线性软化模型的简化,能够反映脆性比较明显的岩石材料的软化现象,因而其应用也比较广泛<sup>[15-25]</sup>。

除了以上两个应用比较广泛的模型外,基于室内岩样全应力—应变曲线的特点,许多学者就岩石峰后承载能力的衰减特性提出了许多新的模型。如周维垣等<sup>[26]</sup>通过引用非关联流动规则和由 K. H. Roscoe 等<sup>[27]</sup>提出的临界状态模型建立了岩石的弹—塑性模型。廖红建等<sup>[28-29]</sup>基于应变空间建立了适合硅藻质软岩的软化模型。王贵荣等<sup>[30]</sup>基于红砂岩三轴试验建立了二线弹性—线性软化—残余塑性四线性模型,给出了红砂岩4个阶段的本构方程,并确定了相关参数。解廷堃等<sup>[31]</sup>在前人研究的基础上,提出了三线性弹性—线性软

化—残余理想塑性五线性模型。

以上提出的各种模型,均是对室内岩样试验得到的全应力—应变曲线特性进行一定的简化获得的,其主要区别在于除了弹性—脆性跌落—残余塑性模型将强度直接跌落到残余强度外,其他模型均将强度衰减简化为塑性应变的线性函数,尤明庆<sup>[32]</sup>给出了类似于这种函数关系的表达式,只是将应变变量用总的塑性变形量代替。

$$\frac{d\sigma_s}{du_p} = -Y = \text{常数} \quad (1-1)$$

式中, $Y$ 为岩石的弱化模量,表征岩石的强度随塑性变形量增大的弱化程度,它与岩样的长度无关; $\sigma_s$ 为岩样峰后强度; $u_p$ 为岩样总的塑性变形量。

对于岩石强度的衰减,除了可以直接采用承载能力的不断丧失即应力值的衰减表示外,也可从岩石力学性能参数即强度准则参数的衰减着手进行研究,并且在进行深井巷道支护理论与相关问题研究时,后者具有更实际和重要的意义。J. F. Shao<sup>[33]</sup>采用广义黏聚力和广义内摩擦角表示岩石峰后强度的衰减(应变软化),在应变软化段为:

$$\begin{cases} C = C_0 \{ \gamma_c + (1 - \gamma_c) \exp[b_c (\gamma^p)^2] \} \\ \tan \varphi = \tan \varphi_0 \{ \gamma_\varphi + (1 - \gamma_\varphi) \exp[-b_\varphi (\gamma^p)^2] \} \end{cases} \quad (1-2)$$

残余强度段,广义黏聚力和广义内摩擦角为定值:

$$\begin{cases} C = C_0 \gamma_c \\ \tan \varphi = \gamma_\varphi \tan \varphi_0 \end{cases} \quad (1-3)$$

式中, $r^p = \sqrt{\frac{2}{3} \epsilon_{ij}^p \epsilon_{ij}^p}$  ( $i \leq j, i, j = 1, 3$ ),  $\epsilon_{ij}^p$ 为主应变塑性分量; $r_c, b_c$ 为广义黏聚力软化参数,分别反映 $C$ 的软化程度和软化速度; $\gamma_\varphi, b_\varphi$ 为广义内摩擦角软化参数,分别反映岩石 $\varphi$ 的软化程度和软化速度。

杨超等<sup>[34]</sup>根据三轴压缩试验应力—应变曲线,运用Hoek提出的由主应力圆包络线确定黏聚力和内摩擦角等效值和曲线拟合的方法,研究了围压对软岩宏观物性参数(广义内摩擦角和广义黏聚力)峰后衰减影响规律。张帆等<sup>[35]</sup>根据三峡花岗岩三轴压缩试验全应力—应变全过程曲线,基于弹塑性理论,通过试验数据拟合屈服面,研究了花岗岩强度参数与峰后应变软化参量的关系,得出花岗岩应变软化过程中黏聚力 $C$ 随应变软化参量的增大而快速减小,而内摩擦角 $\varphi$ 几乎保持不变的结论。

基于煤矿深井巷道围岩普遍处于破裂状态的事实,也有学者对损伤岩样峰后承载力降低规律进行了研究。杨米加和贺永年<sup>[36]</sup>通过对岩样采用预先制裂的方法,得出了岩石破坏后强度随围压的增加逐渐由不稳定向稳定过渡的特性,并给出了岩石的二次峰值强度与初次破坏状态的统计关系式。苏承东等<sup>[37]</sup>利用伺服试验机对大理岩在不同围压下轴向压缩屈服之后完全卸载,再对损伤岩样进行单轴压缩试验,研究岩样不同围压下三轴压缩的塑

性变形量与单轴损伤岩样峰后承载能力的关系, 研究结果表明损伤岩样单轴压缩峰后屈服弱化阶段承载能力的降低与塑性变形的增加近似成线性关系。张后全等<sup>[38]</sup>将单轴压缩和三轴压缩试验得到的泥质细砂岩破裂后形成的不规则岩块浇注在混凝土制成的“剪切壳”中, 运用 XJ-1 型便携式剪切仪进行了自行设计的压剪试验, 测得了破裂岩块的自身材料强度。通过对比先前压缩试验得到的极限莫尔包络线, 研究了破坏前完整岩样与破坏后损伤岩块间的强度变化。

基于巷道围岩一般是由于开挖卸荷导致的破坏, 也有学者对卸荷应力路径下岩石强度衰减进行了研究, 具有代表性的是哈秋龄等<sup>[39-43]</sup>对岩体卸荷力学性能开展了一系列全面的、系统的研究工作。

## (2) 岩石长期强度衰减研究

前述成果均属于岩石强度瞬时衰减, 对于岩石强度长期衰减可归于岩石流变研究的范畴。岩石流变力学特性作为岩石重要的力学特性之一, 与岩石工程长期稳定性紧密相关。许多工程实践和研究都表明了岩体失稳破坏与时间有着密切的关系<sup>[44-52]</sup>, 尤其是深部地下工程和软岩工程往往均是经历由于开挖岩体变形→岩体破碎→岩体强度降低→岩体进一步变形这样的恶性循环导致工程的最终失稳与破坏, 因此, 研究深部地下工程的稳定性时, 不仅要考虑岩体强度的瞬时衰减, 还应高度重视岩体强度随时间长期的降低, 即岩体强度的时效性。

对岩体强度时效性与长期强度的研究一般是基于室内岩样的流变试验进行的。陈宗基<sup>[53]</sup>结合蠕变试验, 给出了长期强度的概念, 认为存在一临界强度, 当压力小于临界强度时, 变形为稳定蠕变; 当压力大于临界强度时, 为加速蠕变。陈宗基教授称此临界值为岩石的长期强度。金丰年<sup>[54]</sup>探讨了岩石压缩破坏强度、弹性模量随应变速度的变化情况, 得到了强度与到达破坏为止荷载作用时间的回归关系式, 表明荷载速度越大, 破坏时间越短, 强度越高。孙钧等<sup>[55]</sup>结合三峡工程永久船闸高边坡岩体的工程实际, 试验分析了饱水花岗岩在劈裂拉伸条件下的“荷载—位移—时间”蠕变关系及其抗拉强度与破坏的历时性和时效性, 建立了与加载间隔时间或加载速率间的经验关系。周楚良等<sup>[56-57]</sup>根据室内岩样长期流变试验结果, 提出岩石强度随时间呈负指数函数衰减变化:

$$\sigma_{tM} = \sigma_{0M} \exp[-At/(t+B)] \quad (1-4)$$

式中,  $\sigma_{tM}$  为经历  $t$  时的长期强度;  $\sigma_{0M}$  为即时强度;  $A, B$  为待定参数。

许宏发<sup>[58]</sup>利用指数函数:

$$E = A \exp(B/t) \quad (1-5)$$

对试验所得第三屈服强度进行了回归分析, 取得了较好的效果; 并通过 Poyting-Thomson 蠕变模型导出了强度的时间函数关系式:

$$\sigma_c(t) = \frac{S_c}{E_0 [P + Q \exp(-Rt)]} \quad (1-6)$$

式中,  $A, B, P, Q, R$  为回归参数;  $\sigma_c(t)$  为  $t$  时刻第三屈服强度;  $E_0$  为瞬时弹性模量;  $S_c$  为瞬时抗压强度。

左红伟(2000)<sup>[59]</sup>根据试验结果并参考 MAXWELL 松弛模型, 提出岩石滑动位移弱化时抗剪强度随时间的变化公式:

$$\tau = \sigma_n [\tan(\varphi_r + \Psi_r) + \alpha \sigma_n \exp(-\beta \sigma_n t)] \quad (1-7)$$

式中,  $\alpha \sigma_n \exp(-\beta \sigma_n t)$  表征峰值后剪应力随时间变化;  $\tan(\varphi_r + \Psi_r)$  表征了岩石的抗剪残余强度;  $\sigma_n$  为正应力;  $\varphi_r$  为残余摩擦角;  $\Psi_r$  为残余剪胀角。

廖红建等<sup>[60]</sup>探讨了软岩中存在的不连续面对应力—应变关系、残余强度特性和蠕变应变速率的影响。高小平等<sup>[61-62]</sup>通过对盐岩单轴、三轴的强度与蠕变试验结果的分析, 研究了应力状态对盐岩的强度及其时间相关性特征的影响。崔希海等<sup>[63]</sup>应用自制蠕变仪, 对红砂岩的蠕变特性进行单轴压缩蠕变试验研究, 根据试验结果对岩石长期强度的确定进行了分析。试验结果表明, 考虑岩石蠕变的“岩石长期强度”应根据岩石进入横向稳定蠕变的阈值应力来确定, 这样确定的“岩石长期强度”值要比根据岩石进入轴向稳定蠕变的阈值应力确定的“岩石长期强度”值小 19%~35%。庞正江等<sup>[64]</sup>通过室内岩块瞬时剪切试验得到的  $\sigma-\tau$  强度曲线和流变剪切试验得到的  $\sigma-\tau_\infty$  强度曲线研究了岩石剪切强度的衰减规律, 研究表明黏聚力  $C$  对时间的敏感性要强于内摩擦角  $\varphi$ 。曹运江等<sup>[65]</sup>采用同样的试验方法对某边坡岩体结构面强度衰减研究得出了类似的结论。另外, 杨圣奇等<sup>[66]</sup>也得到了同样的结论。

### 1.2.1.2 数值模拟研究现状

近 30 年来, 岩石力学数值模拟方法得到了迅速的发展, 出现了有限差分、有限元、边界元、离散元、块体元、无限元、流形元及其混合应用等各种数值模拟技术, 使复杂岩石力学与工程问题的设计发生了很大的变化, 由于其具有明显的可重复性和低成本, 在岩石力学研究领域发挥着越来越重要的作用<sup>[67]</sup>。

在研究岩石峰后承载能力衰减特性与巷道并行破坏机理等相关领域问题时, 美国 ITASCA 咨询集团于 1986 年研制推出的 FLAC 程序, 由于提供了应变软化、Mohr-Coulomb 和 Drucker-Prager 等多种模型以及该软件内置的功能强大的 fish 语言具有较好的二次开发性, 使该软件具有广泛的应用。

江权等<sup>[68]</sup>将围岩力学性能参数岩体弹性模量  $E$ 、黏聚力  $C$ 、内摩擦角  $\varphi$  假设为等效塑性应变的函数, 建立了考虑高地应力硬岩地层中开挖扰动下围岩劣化的硬岩本构模型。并利用 FLAC<sup>3D</sup> 的二次开发, 实现了 RDM(力学性质变差的破损区)模型的数值模拟计算。任奋华等<sup>[69]</sup>利用 FLAC<sup>3D</sup> 程序中的考虑材料弹脆性破坏特点的 Hoek-Brown 强度准则对在软

弱岩层中开挖的巷道进行了三维数值模拟,定量评价了破碎岩体巷道非对称破坏与变形特征。李树清等<sup>[70]</sup>采用岩石峰后应变软化本构模型对深井巷道与浅部巷道围岩承载结构的差别进行数值模拟,探讨了支护阻力对深井巷道围岩承载结构的影响。

何满潮等(2002)<sup>[71-72]</sup>利用弹塑性理论和岩石峰后应变软化本构模型对软岩巷道支护的载荷进行了理论和数值模拟研究。杨超等<sup>[73]</sup>利用弹塑性理论和岩石峰后应变软化本构模型对不同支护阻力下软岩巷道岩性和围岩应力进行了数值分析。赵瑜等<sup>[74]</sup>建立了莫尔-库仑剪破坏与拉破坏复合的应变软化模型,并采用 FLAC<sub>3D</sub>对深埋隧道模拟计算,分析了高应力环境下隧道周边塑性区分布、应力场、位移场等的分布特点。陈坤福<sup>[75]</sup>利用 FLAC<sup>3D</sup>中应变软化模型对深井巷道围岩破裂过程中的应力演化规律进行了研究。张忠宇<sup>[76]</sup>根据深部软岩强度参数的衰减与时间分别成线性函数、二次函数、指数函数,推导出了围岩特性依时函数和巷道收敛曲面,在此理论分析的基础上通过数值计算分析提出了控制巷道围岩变形的支护形式和支护方法。

鉴于岩体损伤与破坏是一个从微观到宏观时空演化的过程,唐春安等<sup>[77-86]</sup>基于弹性损伤和有限元理论开发了 RFPA 数值模拟软件。由于该软件考虑了岩石材料的非均匀性和缺陷分布的随机性以及材料破坏后其力学性能的弱化,故可以较好地模拟岩石材料的破坏过程,因此也具有较广泛的应用。倪红梅等<sup>[87]</sup>应用岩石破裂过程分析系统 RFPA<sup>2D</sup>研究了岩石的强度与体积的关系。研究表明:随着体积的增大,岩石强度呈衰减趋势,但在体积增大到某个值后时,岩石强度便基本趋于稳定,且岩石强度的体积效应根源于材料的非均质性。

另外,吕兆兴等<sup>[88]</sup>应用冯增朝开发的岩石试验及工程分析系统 RTEA<sup>2D</sup>研究了非均质参数  $m$  与岩石峰后弱化模量  $Y$  的关系,表明  $m$  与  $Y$  间服从关系式: $Y = -A \exp(-m/B) + C$ (式中系数是与岩石的物理力学参数有关的量)。

### 1.2.1.3 现场实测研究现状

国际上对深部地下工程问题进行了许多地下原位试验,如加拿大的 URL 地下原位试验,欧洲各国联合进行的 DECOVALEX 项目<sup>[89]</sup>,瑞典 Aspö 硬岩试验室(HRL)的原位试验<sup>[90]</sup>及美国 Yucca 山原位试验<sup>[91]</sup>等。韩国原子能研究机构(KAERI)在 2006 年就地下工程开挖损伤区问题进行了原位试验(KURT),试验硐室位于埋深达 500 m 的岩浆岩中,主要针对深埋隧洞开挖围岩的变形和强度参数进行现场测试研究<sup>[92]</sup>,具体对岩石的波速和弹性模量等参数进行了测试,现场测试得到的岩体弹性模量结果如图 1-1 所示。

从图 1-1 可以看出,开挖损伤区域(EDZ)内岩体弹性模量明显比未产生损伤区域内岩体的弹性模量小很多,损伤越大,其弹性模量越小。上述研究结果表明,对于深部地下工程,原岩由于工程实施的扰动,确实会造成工程岩体强度力学参数的降低。对其强度衰减规律的研究,无疑对地下工程破坏及稳定控制机理的研究意义重大。为了可以对地下硐室开挖后围岩强度衰减规律进行现场测试分析,首先面临的问题就是怎样现场获取工程岩体

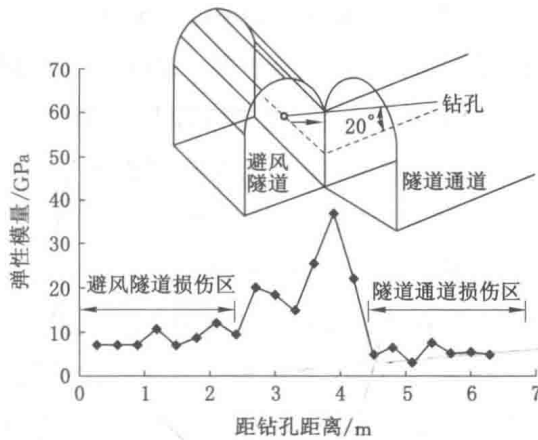


图 1-1 深埋隧洞围岩弹性模量测试结果<sup>[93]</sup>

的强度参数。一般有现场静荷载试验和原位动态测试两种方法。前者试验结果直观可靠，但设备复杂笨重，并具破坏性，不可能进行大范围测试。后者比较简便，可以进行较大规模的测试，能反映岩体力学性质。由于原位动态测试往往在一定范围内的自然状态下岩体上进行，所以成果数据更能反映岩体介质的真实情况，更具实际应用价值<sup>[93]</sup>。

我国岩石力学工作者采用后一种方法对工程岩体开挖后的损伤岩体力学参数衰减问题进行了许多有意义的研究，如周火明等<sup>[6]</sup>采用岩体声波测试和现场岩体变形试验等手段，研究了三峡船闸边坡卸荷扰动区范围以及岩体力学性质弱化程度和岩体力学参数取值。研究表明，强、弱卸荷区岩体性状弱化程度分别为 60% 和 30% 左右。周黎明等<sup>[7]</sup>利用钻孔声波法对马来西亚巴昆水电站发电硐室开挖松动区围岩声波波速进行了测试，基于测试得到的数据，根据岩体声波波速与其动弹性模量的关系式，研究了硐室开挖前后岩体动弹性模量的衰减。

### 1.2.2 岩石强度准则研究现状

岩石强度准则是对岩石处在一般应力状态下破坏与否的判据。从 17 世纪至今许多的岩石力学研究者从事该方面的研究，并建立了自己的强度理论。早期的岩石强度理论是引用金属和土体的强度理论，如屈斯卡 (Tresca) 屈服准则、米塞斯 (Mises) 准则。随着岩石力学研究的发展，人们逐渐认识到岩石的物理力学性质与金属材料有很大的差别，采用金属破坏准则去分析判断岩石类材料破坏时，理论分析与岩石实际破坏不相符的矛盾越来越严重，于是很多岩石力学工作者开展了适合于岩石类材料强度准则的研究工作。

1773 年，库仑 (Coulomb) 根据一系列的岩石单轴压缩试验，提出了沿用至今的 Coulomb 剪切理论。该准则认为材料压缩时剪应力达到黏聚力和破坏面上摩擦力之和时材料破裂，该准则比较适合于松散的摩擦材料。1883 年莫尔 (Mohr) 在一系列不等  $\sigma_1$  和  $\sigma_3$

的试验基础上修订了 Coulomb 准则,得到了 Mohr-Coulomb 准则。该准则认为材料某平面上的剪应力  $\tau$  达到某一特定值时,材料就开始屈服。Mohr-Coulomb 准则反映了抗压强度大于抗拉强度和屈服极限随平均应力增加而提高等岩土材料的力学特性,并且具有简单实用、 $C$ 、 $\varphi$  值易于测定等优点,因而在岩土及岩石力学和塑性理论中得到广泛应用。但是,该准则没有考虑中间主应力  $\sigma_2$  对屈服和破坏的影响,也没有反映静水压力可以引起岩土屈服的特性,而且屈服面有棱角,给数值计算带来了困难。

1920年,格里菲斯(Griffith)在微裂纹控制破坏和渐进式破坏的概念基础上提出提出了 Griffith 强度准则<sup>[94]</sup>。该准则认为:实际的固体材料在结构构造上既不是绝对均匀的,也不是绝对连续的,其内部包含有大量的微裂纹和微孔洞。这种固体在外力作用下,即使作用的平均应力不大,但由于微裂纹或微孔洞边缘上的应力集中,很可能在边缘局部产生很大的拉应力。当这种拉应力达到或超过其抗拉强度时,微裂纹便开始扩展,当许多这样的微裂纹扩展、迁就、联合时,最后使固体材料沿某一个或若干个平面或曲面形成宏观破裂。格里菲斯理论适用于脆性岩石的拉破坏情况。该准则的提出,极大地推动了断裂力学的发展,为岩体强度理论的研究提供了理论基础。

1952年德鲁克(Drucker)与普拉格(Prager)考虑了平均主应力对屈服与破坏的影响,将 Mises 准则推广为广义的 Mises 准则,即 Drucker-Prager 准则。由于该准则考虑了中间主应力  $\sigma_2$  对破坏的影响并具有完善的数学表达式,因而得到了广泛的应用,但它的实质是三剪强度理论<sup>[95]</sup>,不能反映强度的各向异性,与岩体性质和试验结果不符。

1961年,我国学者俞茂宏<sup>[96]</sup>通过对中间主剪应力的研究,提出了考虑中间主应力  $\sigma_2$  对材料强度影响的双剪学说,并推导了适用于拉压强度相等材料的双剪应力屈服准则。1983年俞茂宏又提出了可适用于拉压强度不等材料的强度准则,即广义的双剪应力屈服准则。

20世纪六七十年代,世界各国提出了各种适用于工程岩体强度破坏的经验准则,在众多的经验准则中,Hoek 和 Brown<sup>[97-102]</sup>提出的 Hoek-Brown 经验强度准则被工程界普遍所接受。该准则的特点之一是实现了以一定数学方式对岩体应力分量进行规则化,并使之与岩体类材料属性相联系。该屈服准则,其子午线是曲线,经过多次修正,其 3 个参数取值的方法越来越完善<sup>[98]</sup>,变得更为实用。但是,Hoek-Brown 屈服准则最大的缺点是没有考虑中间主应力  $\sigma_2$  的影响,因而不能很好地符合真三轴试验结果。

1991年,俞茂宏<sup>[103]</sup>提出了统一强度准则。该准则能合理地考虑材料的拉压强度差效应、中间主应力效应等,且具有明显的物理意义和分段线性的数学表达式,已用于许多领域并取得了很好的效果。统一强度准则不是一个单一的屈服准则,而是一系列有规律变化的线性屈服准则的集合。随着该准则中屈服准则系数  $b$ (反映了中间主应力对材料屈服的影响)的变化,从统一强度理论可得 Mohr-Coulomb 准则( $b=0$ )、广义双剪准则( $b=1$ )和一系

列新的屈服准则( $b$ 取其他值);如果进一步取内摩擦角为零,从统一强度准则中可得 Tresca 准则( $b=0$ )、线性 Mises 准则( $b=0.5$ )、双剪准则( $b=1$ )及一系列适用于拉压强度相等材料的新屈服准则( $b$ 取其他值)。

### 1.2.3 巷道围岩变形机理研究现状

目前,关于圆形硐室围岩的弹塑性分析被广泛引用的是 Fenner 等提出的理想弹塑性模型。该模型假设岩体服从莫尔—库仑屈服条件,将巷道围岩视为理想弹塑性材料,只发生塑性破坏而没有发生破裂,且假定体积应变为零,但室内岩样试验、数值模拟和现场原位测试均表明岩石峰后具有明显的应变软化(强度衰减)和体积膨胀的特性,因此,结果与实际严重不符。为此,国内外许多学者随后就巷道变形破坏机理提出了一些考虑围岩应变软化、扩容等效应的计算方法。

蒋明镜等提出了基于应力跌落模型和考虑剪胀效应的柱状圆孔扩张问题的解析解。方德平等<sup>[11-12]</sup>考虑岩石脆—塑性过渡特性,应用线性应变软化模型,推导了不同围压作用下出现的软—弹、残—软—弹、残—塑—弹三种情况下的围岩位移和应力公式。王兵等<sup>[13]</sup>采用三直线弹—塑性模型,考虑岩石应变软化特性,推导出该模型在一般情况下三维应力—应变关系的基本方程。付国彬<sup>[106]</sup>考虑岩石破裂后承载力降低(应变软化)和体积膨胀的重要特性,导出了巷道围岩破裂区、塑性区半径和周边位移的解析解。范文等<sup>[107]</sup>基于统一强度理论,考虑某些材料屈服后强度衰减和体积膨胀的特点,用弹性—塑性软化—塑性残余三线性应力—应变模型推导出了硐室围岩塑性残余区及塑性软化区半径、硐周边位移、围岩内任一点应力的解析解,并给出了硐室围岩所处应力状态的判别式。S. K. Sharan<sup>[108]</sup>计算了 Hoek-Brown 岩体中应力跌落模型的近似解。蔡晓鸿等<sup>[109]</sup>给出了考虑围岩松动圈的塑性区分布解析解。另外,其他的研究者还有潘岳和王志强<sup>[110]</sup>、潘晓明和尤春安等<sup>[111]</sup>、孙金山和卢文波<sup>[112]</sup>。

上述成果均是基于弹塑性理论对圆形硐室围岩变形破坏机理进行的分析,没有考虑时间效应,而对于深埋地下硐室来说围岩变形破坏具有很强的时间效应,即流变性。据此,为了与深井巷道破坏实际情况更符合,许多学者通过考虑岩石的流变效应对圆形硐室围岩变形破坏机理进行黏—弹—塑性分析。

周楚良<sup>[57]</sup>根据岩石长期强度随时间呈指数函数衰减,岩石的全应力—应变曲线所包络的应变能守恒原理,推导建立了新的流变数学力学模型,并与试验、现场实测成果有较好的拟合性。陈进和袁文伯<sup>[113]</sup>以岩石的变形与破坏特性为依据,推导出了综合考虑岩体蠕变、软化和膨胀特性的围岩性态解答。金丰年<sup>[114]</sup>应用非线性黏—弹性模型,对围岩特征曲线随时间的变化进行了有限元计算分析,并对初始模量、强度围压比的影响以及岩石破坏后特征、强度载荷速度效应与围岩特征曲线之间的相互关联进行了讨论。



#### 1.2.4 需要进一步研究的问题

纵观国内外文献,尽管国内外岩石力学工作者对这一课题已取得了丰硕的研究成果,就目前研究现状来说,主要存在以下两个方面的问题:

① 由于缺乏建立巷道围岩破裂演化过程与室内岩样试验两者之间的对应关系,该课题前期研究成果主要集中于室内特定简单加载应力路径下的岩样峰后承载能力降低规律的研究,没有将室内岩样强度衰减规律与巷道围岩强度衰减规律两者结合起来,研究仅仅停留在室内岩样阶段,对巷道围岩强度衰减规律研究较少,对于深井巷道围岩则更少。

② 现有的岩石本构模型中很少考虑岩石峰后强度参数是一个逐步劣化衰减的事实,即使考虑一般多为人为假设其符合某种衰减规律,缺乏试验支持。如理想弹塑性模型认为峰后强度参数不衰减,至峰值后保持为常数;脆塑性模型虽认识到强度衰减这一事实,但却忽略了衰减是一个逐步发展的过程,而是将其峰值点后整个应变软化段内强度直接全部简化为残余强度;应变软化模型虽认识到逐步衰减这一事实,但多是人为假定其衰减规律符合某种函数关系,缺乏足够的试验研究结果的支撑。

### 1.3 本书主要研究内容与方法

#### 1.3.1 研究内容

对深井巷道围岩破裂演化及其强度衰减规律的研究一直是岩石力学课题研究的难点,本书结合前人研究成果,在以下几个方面开展了探索性的研究:

① 由于深井巷道围岩多处在高地应力环境中,深部地下工程围岩峰后多出现明显的延性变形特征,基于此点考虑,研制适合于模拟深井巷道围岩的相似模拟材料,并将其运用于深井巷道三维物理模型试验中。

② 针对目前缺乏建立巷道围岩破裂演化过程与室内岩样试验两者之间的对应关系的事实,采用大尺度真三轴模拟试验台对深井巷道围岩开挖卸荷过程进行物理模拟,对深井巷道在无支护条件下不同深度处围岩三维应力及其主应力差的演化规律进行研究,基于相关研究成果建立巷道围岩破裂演化过程与室内岩样试验两者之间的对应关系,用于指导室内岩样试验研究。

③ 在物理模拟获得的研究成果的基础上,选取深井巷道内不同深度的围岩作为分离体——岩样试件,采用先进的 MTS 815.2 型电液伺服岩石力学试验系统按照获得的围岩应力路径进行室内岩样的加卸载试验,获得可以代表巷道松动圈内不同位置处已损伤的围岩单元的初始损伤岩样,在此基础上,采用多级围压多次峰值屈服的试验方法对初始损伤岩