

国家自然科学基金面上项目 (51474209)

国家自然科学基金青年基金项目 (51204166, 51304200)

中国博士后特别资助基金项目 (2014T70560)

中国博士后科学基金面上项目 (2013M540477)

深部巷道

有控卸压与围岩稳定控制研究

王襄禹 柏建彪 王 猛 李 冲 著

Shenbu Hangdao Youkong Xieya Yu Weiyao Wending Kongzhi Yanjiu



中国矿业大学出版社

国家自然科学基金面上项目(51474209)

国家自然科学基金青年基金项目(51204166,51304200)

中国博士后特别资助基金项目(2014T70560)

中国博士后科学基金面上项目(2013M540477)

深部巷道有控卸压与围岩 稳定控制研究

王襄禹 柏建彪 王 猛 李 冲 著

中国矿业大学出版社

内 容 提 要

本书阐述了深部巷道有控卸压机理以及卸压后巷道的稳定控制技术。主要内容包括深部巷道围岩峰后强度衰减模型、松动放矸与钻孔卸压机理、合理松动放矸与钻孔卸压参数的确定方法、卸压后巷道长期稳定控制理论与技术、典型地质条件下“有控卸压+支护”的工程实例等。

本书可供从事采矿工程专业的科研、工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

深部巷道有控卸压与围岩稳定控制研究/王襄禹等
著. —徐州:中国矿业大学出版社,2015.9

ISBN 978 - 7 - 5646 - 2862 - 8

I. ①深… II. ①王… III. ①巷道—卸压—研究
②巷道—围岩稳定性—研究 IV. ①TD322

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 233411 号

书 名 深部巷道有控卸压与围岩稳定控制研究
著 者 王襄禹 柏建彪 王 猛 李 冲
责任编辑 杨 廷 郭 玉
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 徐州中矿大印发科技有限公司
开 本 850×1168 1/32 印张 8.125 字数 209 千字
版次印次 2015年9月第1版 2015年9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

煤矿进入深部开采阶段以后,巷道围岩表现出显著的非线性软岩力学特征,碎胀、扩容等长期大变形破坏现象严重,常规支护难以控制,巷道卸压作为一种新的支护途径,被越来越多的工程实践所采用。但由于卸压是对开挖卸荷后煤岩体的再次扰动与破坏,卸压巷道的稳定性特别是进入深部开采以后与巷道支护的相互影响极为敏感和强烈,卸压与围岩强度损伤的关系以及如何控制合理卸压程度成为制约卸压技术在深部巷道推广应用的关键原因。本书结合焦煤集团古汉山矿和徐矿集团张双楼矿的生产地质条件,围绕深部巷道“有控卸压—支护”的围岩控制技术,采用理论分析、数值计算、实验室实验、现场实测等研究方法,探讨了深部巷道有控卸压机理,并对卸压后巷道的稳定机理、影响因素及控制技术进行了系统分析,主要研究成果有:① 基于巷道开挖后应力真实的加卸载路径,建立了深部围岩峰后强度衰减模型;② 分析了松动放矸卸压后巷道围岩应力转移与围岩强度损伤的演化规律,确定了松动放矸卸压的合理程度;③ 研究了卸压钻孔方位、卸压时机及钻孔参数(长度、直径及间排距)对深部巷道围岩稳定性的影响规律,为确定钻孔卸压的合理程度提供了理论依据,并初步提出了各因素的确定方法;④ 建立了卸压后深部巷道长期稳定控制的弹粘塑性力学模型,利用该模型分别对二次砌碛和二次锚杆、注浆加固支护进行了弹粘塑性分析,确定了深部巷道长期稳定的控制技术及其参数。

本书共7章,第1章介绍了本书的研究背景、意义和国内外研究现状;第2章介绍了深部巷道围岩峰后强度衰减模型;第3章介绍了两种有控卸压技术及其对围岩稳定性影响的理论分析结果;第4章对合理卸压参数的确定进行了模拟分析;第5章介绍了卸压后巷道长期稳定控制的理论与技术;第6章介绍了“有控卸压—支护”的工程实例;第7章对本书所做的工作进行了总结。

在本书的编写过程中,参考了许多国内外文献资料,工程应用得到了焦煤集团与徐矿集团工程技术人员的大力支持。本书的出版得到了国家自然科学基金面上项目(51474209)、国家自然科学基金青年基金项目(51204166)的资助,在此一并致谢。此外,在本书编写过程中,吴博文、张宏伟、陈永雷、李国栋在文字录入和图表绘制方面做了大量工作,在此表示感谢。

由于作者水平有限,书中难免存在错误和不妥之处,恳请读者批评指正。

作 者

2015年7月

目 录

| | |
|---------------------------|-----|
| 1 绪 论 | 1 |
| 1.1 深部巷道研究的意义 | 1 |
| 1.2 深部巷道的研究现状及评述 | 3 |
| 1.3 存在的问题 | 16 |
| 1.4 主要研究内容 | 18 |
| 2 巷道围岩强度衰减模型的研究 | 21 |
| 2.1 室内岩样加卸载路径 | 21 |
| 2.2 岩石峰后强度衰减规律的室内试验 | 23 |
| 2.3 巷道围岩强度衰减模型的建立 | 41 |
| 2.4 巷道围岩强度衰减模型合理性评价 | 45 |
| 2.5 本章小结 | 53 |
| 3 深部巷道有控卸压技术理论研究 | 54 |
| 3.1 有控卸压方式的提出 | 54 |
| 3.2 松动放矸卸压技术理论分析 | 56 |
| 3.3 钻孔卸压技术理论分析 | 87 |
| 3.4 本章小结 | 102 |

| | |
|--------------------------------------|-----|
| 4 有控卸压技术参数的研究 | 105 |
| 4.1 松动放矸卸压技术参数的确定 | 106 |
| 4.2 钻孔卸压技术参数的确定 | 127 |
| 4.3 本章小结 | 165 |
| 5 卸压后巷道长期稳定的控制理论及技术 | 168 |
| 5.1 长期稳定控制的目标 | 168 |
| 5.2 无二次支护巷道围岩的弹黏塑性分析 | 170 |
| 5.3 二次砌碛支护控制围岩蠕变的弹黏塑性分析 | 180 |
| 5.4 二次锚杆、注浆加固支护控制蠕变的 弹黏塑性分析 | 189 |
| 5.5 本章小结 | 200 |
| 6 有控卸压技术工程实践 | 202 |
| 6.1 松动放矸技术工程实践 | 202 |
| 6.2 钻孔卸压技术工程实践 | 220 |
| 6.3 本章小结 | 233 |
| 7 主要结论 | 234 |
| 参考文献 | 237 |

1 绪 论

1.1 深部巷道研究的意义

随着对能源需求量的增加和矿井开采深度的不断加大,浅部资源日益减少,国内外矿山都相继进入深部资源开采状态。据有关资料介绍:我国预测煤炭总储量的 70% 以上埋藏在深度 600 m 以下,随着开采规模的扩大和机械化水平的提高,又加快了矿井向深部开采的速度,我国生产矿井 1980 年的平均深度为 288 m,而 1995 年的平均深度为 428 m,相当于每年以 10~12 m 的速度向深部发展^[1-2],而东部矿井正以每 10 年 100~250 m 的速度发展,预计在未来 20 年很多煤矿将进入 1 000~1 500 m 的深度。因此,煤矿深部开采是大多数采煤国家目前和将来要面临的问题。

煤矿进入深部开采阶段以后,煤岩体赋存结构与应力环境逐渐趋于复杂,深部煤岩体长期在高地应力、高地温、高渗透压以及强时间效应作用下,其组织结构、基本行为特征和工程响应与浅部相比均发生了根本性变化,巷道掘出后围岩易表现出显著的非线性软岩力学特征,碎胀、扩容等大变形破坏现象严重,支护和维护效果极差^[3-12],往往经历多次修复和加固之后,仍无法满足矿井生产所需的断面要求,甚至一些巷道因难于维护而被遗弃(如开滦赵各庄矿-980 m 水平和新汶孙村矿-1 100 m 水平煤巷^[13-14])。据顿涅茨矿区资料介绍,为解决埋深增加带来的影响,15 年内尽管

支护强度增加一倍,费用增加 1.4 倍,但矿井巷道复修量仍超过 40% 以上^[2]。我国统计的深部巷道翻修率甚至高达 200%,由深部开采引起的片帮、冒顶等安全事故约占矿山建设、生产事故总数的 40%,死亡人数比例占据矿山百万吨死亡率的 50% 以上^[15]。因此,深部巷道围岩的稳定控制已成为决定深部矿井经济效益和安全生产的关键问题之一。

总结各种深部高应力巷道变形破坏特征,主要包括以下 3 个方面^[16]:一是岩体的结构和所处的环境,其表现为软弱、破碎、松散、高地应力等;二是岩体的物理和力学性能,其表现为低强度、流变、风化、膨胀等;三是围岩的工程特征,其表现为巷道压力显现强烈,围岩变形具有四周来压和显著的时间效应,初期来压快,变形量大,稳定后围岩仍以一定速度长时间持续大变形,围岩的稳定难以控制。

为解决深部巷道围岩稳定性维护这一技术难题,国内外学者展开了大量研究,逐渐形成了“先柔后刚、先让后抗、柔让适度、稳定支护”,即一次卸压、二次加强支护的联合支护理念^[17-22],该支护理念的重点是“柔让适度”,强调适度让压才能更有效地进行二次加强支护。为此,国内外开展了诸如开槽、钻孔、松动爆破等巷内卸压以及开卸压巷、开采保护层等巷外卸压技术的研究工作,取得了良好的卸压效果。由于卸压尤其巷内卸压是对开挖卸荷后煤岩体的再次扰动与破坏,外界因素对卸压巷道特别是进入深部开采以后卸压巷道稳定的影响极为敏感。以往深部巷道卸压机理的研究主要集中在如何“卸”的方面,卸压与围岩强度损伤的关系以及其对围岩稳定的影响规律还很少有报道,导致目前深部巷道的卸压设计多是参考一些经验,冒顶、片帮事故时有发生^[23-25],成为制约卸压技术在深部巷道推广应用的关键原因。

因此,对于深部高应力巷道,探索正确的巷道变形机理和稳定控制理论,选择合理的卸压及支护方法,以及针对具体的围岩应力

状态和地质条件确定合理的支护参数成为一个亟需解决的技术问题。本书在前人研究的基础上,结合焦作煤业集团古汉山矿和徐州矿业集团张双楼矿的生产地质条件及巷道支护工程实践,开展深部巷道有控卸压与围岩稳定控制技术的系统研究。本书在揭示巷道围岩强度衰减规律的基础上,针对性地提出 2 种卸压方式,即松动放矸卸压技术与钻孔卸压技术,采用理论计算的方法分析了两种卸压技术对巷道围岩稳定性的弱化效果,结合数值模拟结果,提出了卸压技术关键参数的确定方法,并通过对比卸压后巷道蠕变控制的理论分析,开发了深部卸压后巷道长期稳定的控制理论及技术。研究成果不仅可丰富深部巷道围岩控制理论,同时为实现矿井安全高效生产提供技术保障,具有重要的理论意义及实用价值。

1.2 深部巷道的研究现状及评述

国外从 20 世纪 80 年代初期开始了对深部开采问题的研究工作。其中,1983 年苏联学者就提出对超过 1 600 m 深的矿井开采进行专题研究,当时的联邦德国还建立了特大型模拟试验台,专门对 1 600 m 深矿井的三维矿压问题进行了模拟试验研究;1989 年岩石力学学会曾在法国专门召开“深部岩石力学”问题国际会议,并出版了相关的专著。我国学者在 20 世纪 80 年代末也开始注意深部矿井的开拓问题,“九五”、“十五”规划期间曾作为专题提出,并于 2004 年启动了国家自然科学基金重大项目“深部岩体力学基础研究与应用”的研究^[26],取得了一系列有价值的研究成果,为深部矿井开采提供了理论指导。

1.2.1 深部巷道变形失稳机制的研究

20 世纪 50 年代以前,国内外学者主要采用弹性或弹塑性理

论研究深部开采问题。近年来,随着对深部巷道围岩力学本质研究的加深,各国学者开始意识到深部岩体的流变特性,并将流变理论引入岩体力学的研究中;70年代末期,对于岩石(体)流变特征及流变地压的研究已非常活跃;目前,考虑岩石(体)峰后应变软化及碎胀特征的弹塑性分析与流变分析仍是岩石力学方向的研究主流^[27]。学术界一般认为深部巷道主要经历2个变形阶段^[28]:第一阶段是巷道开挖后的初期变形阶段(围岩强度瞬时衰减阶段),主要以剧烈的弹塑性变形为主;第二阶段为巷道后期流变变形阶段(围岩强度长期衰减阶段),此阶段内巷道前期弹塑性变形大致结束,围岩变形表现出强烈的时间效应,随着时间的推移,围岩变形逐渐增大,此阶段则主要以流变变形为主。

弹塑性分析法又称极限平衡分析方法,是基于 Mohr-Coulomb 屈服准则开发的,主要将巷道简化为各向同性的轴对称平面应变模型,分析围岩在弹塑性“极限平衡”状态下围岩应力、应变及位移等问题。该模型最初将巷道视为理想弹塑性材料,认为围岩仅发生塑性破坏,而不产生破裂,但室内试验、数值模拟及现场原位测试均表明岩石峰后阶段具有明显的应变软化和体积膨胀特征。为更全面揭示巷道围岩变形破坏的力学本质,国内外众多学者对理想弹塑性模型进行了修正,考虑了围岩的应变软化及扩容效应,具有代表性的有:H-Wilson、E-T-Brown 等人在 Mohr-Coulomb 准则中引入了残余强度的计算^[29];于学馥、刘夕才、付国斌等人分别考虑了岩石破坏过程中的应变软化、残余变形、扩容变形等特性,对弹塑性解析解进行了修正^[30-33]。

在长期的岩体工程实践中,很多学者意识到岩体应力场、力学性质及变形破坏特征等随着时间的变化而逐渐变化,时间效应对工程岩体的动态特征及支护设计具有非常重要的意义,并开始注重于岩石(体)流变的研究。同时,随着研究的深入,许多学者通过室内试验或实际测量,采用按照岩石的弹性、塑性和黏滞性性质设

定的一些基本原件,如牛顿黏性体 N、胡克弹性体 H、圣维南体 S 等,拟合深部岩体的流变性质,成为岩体流变的组合模型,并通过调整模型的参数和组合元件的数目,使模型的输出结果与试验结果相一致,给流变问题的解答开辟了新的路径。

国内外学者通过对深部巷道围岩弹塑性及流变变形的大量研究总结,认为深部巷道产生大变形的原因主要包括以下几点^[3,34-35]:

(1) 深部高应力。深部高应力是导致巷道围岩变形破坏加剧的直接因素。开采深度增加,垂直及水平应力越来越大,如巷道埋深 1 000 m 时,仅由岩层重量引起的垂直应力就已超过 25 MPa,加上构造应力的叠加作用,巷道开挖后围岩产生的应力集中极易超过其极限强度,导致巷道掘进初期即表现出大变形现象。

(2) 岩石力学行为的转变。在深部高应力作用下,巷道经历短暂的弹塑性变形后,围岩随即表现出明显的时间效应。研究表明^[36-37],在高应力状态下保持应力恒定,多数岩石包括中等坚硬岩石都会表现出流变特性,变形量随时间推移不断增加,当岩体应力或应变超过一定极限后,岩石的力学行为由黏弹性向黏塑性转变,最终导致岩石加速破坏。

(3) 强烈的开采扰动。开采扰动对深部巷道围岩稳定性的影响主要体现在 2 个方面:一方面工作面或巷道开挖将导致邻近巷道围岩的应力集中,另一方面采场上覆顶板岩层断裂等动载现象将加速巷道围岩变形破坏。由于埋深的增加,巷道对各影响因素的敏感程度非常高,外界条件的改变极可能诱发巷道的灾变失稳,给巷道稳定性维护带来了极大挑战。

1.2.2 深部巷道蠕变特性的研究

1.2.2.1 蠕变特性的试验研究

深部巷道的蠕变性是该类巷道的重要力学特性之一,深部巷道

工程基本上都与围岩的蠕变性有密切关系。岩石的蠕变试验是认识岩石蠕变性质的主要途径和最重要的手段,岩石的蠕变性试验研究最早可追溯到 20 世纪 30 年代。1939 年 Griggs^[38] 发表了研究成果,提出砂岩、泥板岩和粉砂岩等岩石中,当载荷达到岩石破坏载荷的 12.5%~80%时就发生蠕变的观点。此后的几十年里,有关岩石材料蠕变性的资料和成果越来越趋于丰富和完善。

近年来,岩石的蠕变试验得到了进一步的发展,取得了一些新的成果。E. H. Lee 和陈宗基教授等通过岩石蠕变试验来研究岩体的流变特征,试验研究表明,在较低的恒定荷载作用下,多数岩石表现为黏弹性固体特性,变形随着时间而不断增长,但变形速率逐渐减小并最终趋于稳定;而当应力较高或应力超过某极限时,则由黏弹性向黏塑性转化,变形量和变形速率随时间而不断增大,最终加速蠕变而破坏。由黏弹性向黏塑性转化的过程中存在明显的转折点,此转折点随着时间的增加而逐步降低,并趋于某极限值,即长期强度,陈宗基称之为第三屈服强度。由于蠕变的发展,长期强度、弹性模量和泊松比均随时间的增加而大为降低。

文献[39]通过对不同岩石的蠕变试验总结认为,在复杂应力状态下,岩石和岩体亦会产生蠕变现象,其蠕变性状受各个方向应力大小及其加载路径的影响。在轴压和围压均恒定时,轴向蠕变应变显著地随时间而增长;在围压恒定而轴压增加时,曲线特征与单轴压缩相似,在每一段增量荷载下的轴向、侧向和体积变形均具有显著的时间效应;在轴压恒定、围压增加时,体积变形的时间效应不明显且轴向和侧向蠕变值也不大;岩石和岩体的蠕变特性与应力差($\sigma_1 - \sigma_3$)密切相关。当应力差较小时,变形由衰减蠕变阶段进入稳定变形阶段;当应力差较大时,变形由衰减蠕变进入加速蠕变而破坏。若三轴压缩的应力差与单轴压缩的轴向应力值相等,则二者稳定蠕变应变率相等。

文献[40,41]采用伺服刚性机对粉砂岩、大理岩、红砂岩和泥

岩 4 种不同岩性的岩石进行了单轴压缩条件下的蠕变和松弛试验,指出在一定的常应力作用下,岩石材料一般都出现蠕变速率减小、稳定、增大 3 个阶段,但各阶段出现与否及其延续的时间,则与所观测的岩石性质和所施加的应力水平有关。岩石的松弛曲线具有连续型和阶梯型两种典型的变化规律,前者与一般的连续介质比较接近,而后者则具有非连续性和突变性的特征。岩石蠕变试验观测得到的长期强度明显小于岩石的瞬时强度,而且岩石破裂后都具有残余强度,这对处于高应力环境下、服务年限较长的深部巷道工程具有十分重要的意义。

东北大学李向东、郑雨天教授等利用自行研制的重力杠杆式岩石蠕变试验机,并配有三轴压力室,对泥岩进行了三轴压缩条件下的蠕变试验。试验结果表明,在各种应力状态下,泥岩的三轴蠕变曲线都是非线性的(如图 1-1 所示),且与时间有关,可以表示为: $\epsilon_t = f(\sigma_i, t)$; 在复杂应力状态下,泥岩具有很强的蠕变特性,其蠕变变形量为瞬时变形量的 300% 以上;在对泥岩进行各向等压的蠕变试验过程中,发现泥岩的体积变形基本上无蠕变现象,且十分微小 ($\epsilon_v \approx 0$)。

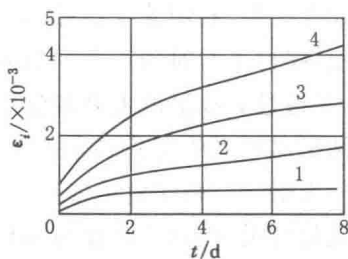


图 1-1 泥岩三轴蠕变曲线

- 1— $\sigma_i = 3.6$ MPa; 2— $\sigma_i = 3.0$ MPa; 3— $\sigma_i = 2.4$ MPa;
4— $\sigma_i = 1.5$ MPa

文献[42]通过分析岩石蠕变曲线找出了蠕变速度与作用载荷之间的关系,并利用 $u-\sigma$ 曲线确定反映流变过程 4 个特征起始点(流变起始点、等速流变起始点、加速流变起始点、流变破坏点)的应力值和应力区间。金丰年^[43]利用伺服控制刚性试验机,采用应力反馈控制方法(stress-feedback loading method)获得了各种岩石单轴拉伸试验的全应力-应变曲线,通过对岩石单轴拉伸、单轴压缩及其荷载速度效应和蠕变试验的研究,首次提出了岩石受拉和受压力学特征具有相似性的理论观点。文献[44]根据岩石压缩过程中变形、弱化本构关系以及变形与承载力的关系,采用岩石最弱断面并联微元体模型,对非均匀软岩的衰减蠕变和非衰减蠕变机理进行了分析,认为非均匀性内部各点承载能力不同使得变形后岩石内部各点屈服弱化不同步,又由于岩石晶体内部空位或杂质的扩散,二者共同作用导致岩石蠕变。非稳定加速蠕变过程主要是岩石最弱断面局部塑性变形、其他断面卸载回弹的过程。

文献[45]中介绍了多个岩石蠕变试验,并以试验为基础,研究了黏滞系数随加载应力和加载持续时间的变化规律。文献[46]等使用 Instron-1346 型电液伺服刚性试验机,采用陈氏加载法,做了软岩的单轴和三轴蠕变试验,利用非牛顿体黏性元件构成五元件的改进西原正夫模型,探讨了与时间有关的软岩一维和三维的本构方程和蠕变方程,并通过非线形的麦夸脱法求得的软岩流变力学参数形成的理论结果与软岩的实验结果进行对比分析,验证了理论结果的正确性。文献[47]则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。文献[48]则根据软岩的单轴压缩蠕变试验,讨论了软岩强度和弹性模量的时间效应问题,认为软岩的强度和弹模均为时间的函数,它们的变化规律具有相似性,都随时间的延长而降低,最后分析了岩石损伤的时间效应,提出了长期弹模和长期损伤变量的

概念。

工程实践和试验均已证明,巷道围岩的变形破坏是一个渐进的过程,岩体的宏观破坏是介质中裂纹的起裂、扩展和连接的结果,岩体的弹性参数和蠕变参数并非定值,而是时间的函数。总的来说,目前研究岩石蠕变特性的试验主要是利用流变仪进行单轴和三轴压缩蠕变试验,绘制蠕变曲线,并选取合适的蠕变模型,通过作图和曲线拟合等方法来求取蠕变参数。就目前发展状况来看,对岩体蠕变特性研究得比较深入,但真正把它用于煤矿深部巷道支护设计的情况还不多见。

1.2.2.2 蠕变特性的理论研究

早期因为岩体蠕变的应力、应变和时间之间的关系很复杂,不便于用一般的函数关系来表示,于是就根据不同试验条件及不同岩石种类求得的蠕变曲线进行反分析,得到一定的蠕变函数关系,称为岩体蠕变的经验模型。经验模型多数描述的是初始蠕变和等速蠕变,较少反映加速蠕变。目前,关于材料介质蠕变的经验模型主要有 3 种类型:幂函数型,多用来反映初始蠕变阶段的性质;对数型,常用来反映加速蠕变阶段的性质;指数型,多用来描述等速蠕变阶段性质。

随着蠕变理论研究的深入,逐步通过室内试验或实际测量结果,采用按照岩石的弹性、塑性和黏滞性性质设定的一些基本元件(牛顿黏性体 N、胡克弹性体 H、圣维南体 S)来拟合软岩的蠕变性质,称为软岩蠕变的组合模型,并通过调整模型的参数和组合元件的数目,使模型的应力-应变曲线与试验结果相一致。组合模型早期主要有黏弹性模型,如 Maxwell 模型、广义 Kelvin 模型(Kelvin-Burgess 模型)等。为反映围岩的更为复杂的时间效应特征,采用了更为复杂的岩体流变模型,包括 Burgess 模型、Poynting-Thomson 模型、西原模型、通用线性黏弹性模型以及黏(弹)塑性模型。组合模型的本构方程是一种微分形式的本构关系,通过本

构方程的求解就可得到蠕变方程、应力松弛方程等,其特点是概念直观、简单,物理意义明确,又能较全面地反映流变介质的各种流变学特性,如蠕变、应力松弛、弹性后效和滞后效应等。当考虑[H]元件的非线性应力-应变关系或者[N]元件的非牛顿体的特性时,组合模型就可以描述岩石的非线性蠕变特性,因此,组合模型得到了广泛的应用。

近几年,随着组合模型的广泛应用,各类岩石的组合模型出现了许多研究成果。如西原^[49]于1993年提出弹性-黏塑性模型,如图1-2所示,用以描述岩石变形与时间有关的形态。模型包括一个弹簧,以及并联在一起的摩擦滑动器和黏性阻尼器,用以表示蠕变变形、蠕变破坏、岩石强度对应变速率的依赖性等与时间有关的岩石形态,其本构关系如下:

弹性:

$$\epsilon = \epsilon^e = \frac{\sigma}{E} \quad (\sigma < \sigma_y)$$

弹性-黏塑性:

$$\epsilon = \epsilon^e + \epsilon^{vp} = \frac{\sigma}{E} + \lambda \left| \frac{\sigma - \sigma_y}{\sigma_0} \right|^n \quad \sigma \geq \sigma_y = H(\epsilon^{vp})$$

式中, ϵ^e , ϵ^{vp} 分别表示弹性和黏塑性应变; σ_y 为屈服强度; σ_0 为使括号中应力项为无量纲的参数,认为可任意选取; λ 为纳梅常数。

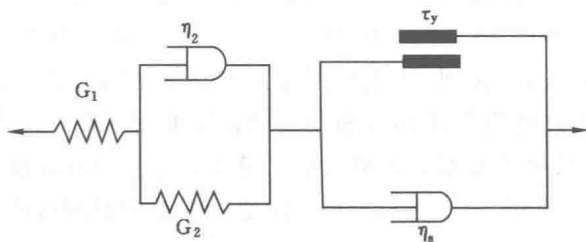


图 1-2 改进的西原正夫模型