文章编号:1000-1964(2007)03-0298-05

富水条件下软岩巷道变形特征与过程控制研究

许兴亮,张 农
(中国矿业大学 能源与安全工程学院,江苏 徐州 221116)

摘要:富水条件下泥质软岩巷道破坏及稳定性机制比一般软岩巷道更复杂,不仅需要采用多种复合支护控制围岩非线性大变形,还必须进一步控制其泥化进程.针对此情况,提出了动态过程控制的支护原理,采用预拉力锚杆、锚索、桁架和围岩滞后注浆堵水加固相结合的全过程控制围岩技术.结果表明,在成功阻断泥化诱因"水"之后,高强预应力锚杆组合支护体系可有效控制巷道变形,避免泥化导致随后的锚固失效.此技术在淮北桃园煤矿裂隙水患严重的三软煤巷支护中取得成功.

关键词:富水条件;泥质软岩;变形特征;过程控制
中图分类号:TD 353 **文献标识码**:A

Study of Control Process Deformation Behavior and of Soft Rock Drift Under Rich Water Condition

XU Xing-liang, ZHANG Nong
(School of Mining and Safety Engineering, China University of Mining & Technology, Xuzhou, Jiangsu 221116, China)

Abstract: The deformation and stability mechanisms of pelitic soft rock drift under rich water condition are more complicated than those of the general ones. Studies show that simply adopting multi-compound supporting is far from enough to control strong non-lineal deformation, meanwhile measures must be taken to harness the weakening course caused by fracture water. The results show that after water is successfully blocked, the roadway deformation is controlled using the highly-prestressed anchor combined bolting system and the supporting invalidation is avoided. This supporting system is successfully applied in the "three soft" coal roadways (soft roof, wall, and floor) of Taoyuan coal mine, Huaibei.

Key words: rich water condition; pelitic soft rock; deformation character; process-control supporting

具有泥化倾向的煤系沉积软岩巷道遇水后突出表现为非线性大变形、显著流变和受扰动影响的工程特点,由于其受力状态的复杂性与遇水条件的多变性决定了软岩巷道复杂的变形机制,单一支护方式难以有效控制围岩变形.目前对富水条件下泥化软岩变形机理与过程缺乏清晰的认识,往往在掘进迎头盲目采用多种组合支护手段,很少考虑开挖后围岩压力与支护的动态响应及矿压变化过程中的控制措施,地质因素的动态影响也常常被忽略,因而很多软岩巷道支护稳定性很差[1-2].

沉积岩中或多或少地含有水分[3],水的存在使得岩石的物理力学性质有很大的改变,研究表明[3-5]水对沉积岩力学性质及变形特征的影响程度明显高于岩浆岩和变质岩.很多情况下水对泥化软岩的变形破坏具有控制作用,无水影响的软岩地层中,采用强化手段可以维护住的巷道,在遇水侵入

收稿日期:2006-10-30
基金项目:国家自然科学基金项目(50674085)
作者简介:许兴亮(1976-),男,山东省宁阳县人,博士研究生,从事巷道矿山压力及其控制方面的研究.
E-mail:xusmf@163.com **Tel**:13913476100
万方数据

时，会对围岩变形破坏起“催化作用”，使得巷道极难维护. 所以研究岩石的渗透性很重要，岩体的裂隙发育和贯通情况决定了渗透率大小，而裂隙的发育又与受载状况有关，彭苏萍[3]与丁卫华认为[6]岩石的渗透率伴随着变形破坏发生了巨大变化，渗透率随着载荷的增加经历了一个先降低再增大的动态发展过程.

根据淮北矿区多条软岩巷道支护实践中观测总结的一手资料，深入分析该类巷道围岩不同阶段的变形力学机制，找出引起变形破坏的主导原因，采用全过程动态控制技术“对症下药”，取得了良好的支护效果.

1　富水条件下泥化软岩变形特征分析

煤系地层一般为层状赋存的沉积岩，在未开挖状态下，一般存在良好的隔水层（如泥岩等），不是所有的岩层都受水的影响. 围岩裂隙伴随受载变形动态发育，提供了供水通道，当外部围岩存在充足的补给水源时. 由于水-岩相互作用使得这类特殊软岩的力学性质有了很大的变异，实验室的一些成果与现场实测有了很大的差别. 为此在受动压影响相似条件下对软岩巷道进行了现场实验，对巷道围岩表面位移进行了监测，以期从宏观上把握其变形基本规律，其两帮表面收敛曲线见图 1.

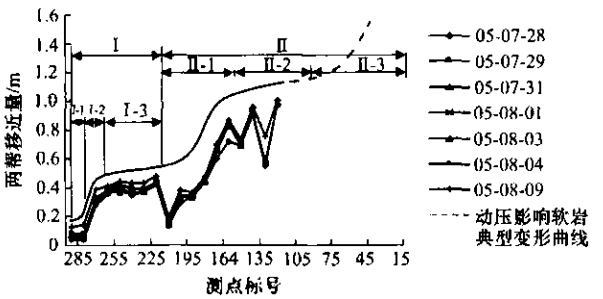

图 1　巷道两帮收敛曲线

Fig. 1　Convergence curves of roadway

根据实际观测，富水条件下软岩变形过程具有明显的阶段性特征：

1）第 1 阶段泥化前的变形阶段　在巷道围岩变形初期，原生裂隙经历逐渐压密过程，此时宏观导水性不升反降，巷道围岩初期变形受裂隙水影响不大，其变形规律与一般巷道初期变形基本类似即：a. 调整变形阶段：见图 1（Ⅰ-1），弹性变形在掘巷的同时立即释放，部分塑性变形伴随着浅层围岩调整，其变形量较小；b. 调整变形阶段后期表现为加速变形如图 1（Ⅰ-2），此时浅层围岩发生局部破裂，这种破裂从周边开始逐渐向深部扩展，直至达到另一新的平衡状态为止，并伴随着外围结构剧烈调整变形，变形量较大；c. 稳定变形阶段如图 1（Ⅰ-3），一般巷道服务期间都处于这一变形阶段，但受裂隙水影响的巷道此变形阶段较短，很快进入变形的第 2 阶段——流变阶段.

2）第 2 阶段泥化流变变形阶段　当巷道变形积累达到一定程度后，围岩裂隙发育经历了由小到大过程，最终形成畅通的水力通道，造成顶板砂岩裂隙水的侵入. 浸水实验条件下软岩岩体的蠕变过程可分为阻尼蠕变阶段、等速蠕变阶段和加速蠕变阶段[7-9]. 根据现场观测泥化软岩的流变变形同样也包括 3 个阶段，但由于受动态富水条件的影响，其变形特征与静态浸水条件下的变形既有相似点又有鲜明的特点. 由于围岩裂隙经过了掘巷影响阶段的变形积累，此时阻尼流变阶段表现剧烈，部分与第 1 阶段的稳定变形重合，变形量较大，岩体的宏观变形表现为以较大的速度向开挖空间移动，如图 1（Ⅱ-1）所示. 等速流变阶段较短，由于经历的先期变形影响与围岩岩性劣化，此时岩体内的脆性损伤几乎没有，主要是泥化后的等速流变变形，很快进入加速流变阶段；岩体开始流变后，随着时间的推移巷道围岩快速泥化与强度急剧降低，大部分围岩在后期必然会进入加速流变阶段，围岩变形失控，最终导致围岩的破坏失稳.

这种具有明显流变特性的软弱围岩，由于应力场与渗流场的耦合作用，围岩内部新裂纹的产生和扩展，不但致使围岩强度低于长期强度，而且提供了良好的水力通道，诱使泥化围岩力学性质逐渐劣化，进入加速流变阶段. 如果围岩变形不致于达到泥化流变阶段，随着时间的推移和一些强化措施的实施，变形速率会逐渐衰减最后稳定，则可避免围岩的破坏或失稳. 因此，在富水条件下软弱围岩的控制关键在于阻止外围水对岩体力学性质的劣化，防止进入流变阶段.

2　围岩动态过程控制

巷道的开挖与支护实际上是围岩的释放调整与受控约束的矛盾统一过程，开挖与支护方式、支护时机的不同组合，导致围岩的变形和破坏也不相同，因此有效的支护形式必须靠合理的控制理念与施工工艺来实现.

动态过程控制方法如图 2，即根据软岩变形阶段特点，针对性的采用动态支护对策：在软岩巷道变形的第 1 阶段即开巷初期充分发挥围岩自身的承载能力，利用裂隙水对围岩劣化间隙，采用高强预应力支护体系，充分利用预应力支护结构的柔性

万方数据

特点,在保证有效支护阻力的条件下,支护结构与岩体产生少量位移释放掉部分能量,实现对外层结构的适应性让压;在第 2 阶段泥化流变开始前,根据该类岩体变形规律及现场的动态观测,及时注化学浆液封堵取代排水,有效避免水的侵入对软岩力学性质的弱化;最后关键部位加强支护,防止产生新的水力通道与薄弱环节突破. 采用全过程性控制,从而达到成功控制泥化软弱围岩的目的.

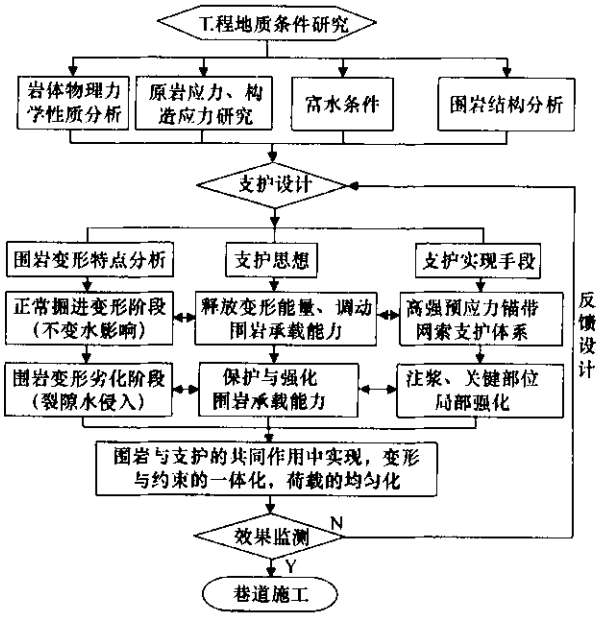

图 2 动态过程性控制流程

Fig. 2 Flow chart of dynamic control process

2.1 调动围岩自身承载能力,高阻"让"压

巷道围岩变形与支护结构的相互作用关系表明,随着径向位移的增大支护压力经历了一个逐渐减小再变大的过程[8]. 合理的支护刚度使得支护结构与围岩产生位移时,围岩压力逐渐减小,释放掉部分能量,实现让压过程中的高阻约束,保持围岩受控变形.

让压过程中围岩结构稳定性与完整性控制如下:

1) 顶板 通过加强初期支护强度,在顶板中形成预应力承载结构,这种结构对垂直应力在两帮的传递具有均化效应,如图 3 所示,使帮部垂向应力集中程度减缓,提高顶板承载结构的刚度,消除或大大减缓顶板离层,并从根本上控制巷道围岩的最终变形量.

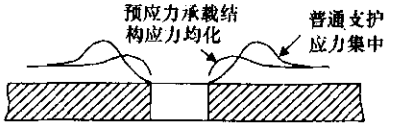

图 3 支护形式对顶板载荷传递模式的影响

Fig. 3 Load transfer pattern of the roof strata by different supporting

万方数据

从以前的支护实践分析,锚杆的预拉力仅在 20 kN 左右,顶板的预应力水平较低,而且顶板 M 型钢带纵向抗弯强度较低不能满足泥化复合顶板支护所需的支护刚度. 为此通过高预拉力桁架和短锚索梁来进一步强化顶板,加强顶板的支护强度与支护刚度,改善围岩的细观应力场,提高控制围岩变形的能力.

2) 帮部 加大锚固区域宽度,提高锚固体变形过程中的强度及支护可靠性. 预应力锚杆控制围岩理论,突出强调支护结构整体抗变形能力,要求支护结构具有合理的抗变形刚度及变形过程中的可靠性. 回采巷道两帮一般为煤体,其强度低、完整性差,是巷道围岩变形的突破口,易诱发巷道的破坏. 当两帮维护失控,隐性地加大了巷道跨度,造成顶底板应力集中. 由于巷道表层煤体变形较大,易造成锚固损伤,可靠性急剧降低,锚固段必需置于一定煤壁深处. 为了提高巷道两帮的锚固区域宽度和整体强度,需要增加帮锚杆长度与锚固长度,并采用预应力桁架或斜拉锚索梁加强支护,从而确保两帮支护结构具有足够的强度和可靠性. 只有这样才能利用深部小变形约束浅部大变形,从而实现变形过程中始终具有可靠的支护结构.

2.2 关键部位强度耦合,"保护与强化"围岩

软岩等大变形岩土工程的失稳机制表明,其失稳是一个渐进过程,总是先从一个或几个部位首先发生变形破坏,而后逐渐扩展至整个岩土工程失稳[10]. 由于构造应力的方向性、岩体赋存的不均匀性、分层性和岩体遇水弱化的难易,巷道周围总会存在一些薄弱部位,这些薄弱部位在围岩发生大变形时总是应力集中、能量不协调的突破口. 因而大变形岩土工程的设计必须保证整个支护结构的整体强度耦合,实现整体受控变形,而不能仅靠盲目增加支护强度来实现. 水致泥化大变形软岩巷道的破坏主要是泥质软弱岩体遇水后物理力学性质劣化的结果.

1) 控制顶板裂隙水,"保护"围岩强度

地下水渗入岩体后诱发岩体泥化,岩体随泥化程度由固态向塑态直至液态弱化,导致岩体的力学性能急剧降低,甚至失去承载能力. 遇水软化后巷道围岩自身强度大幅劣化,抗变形能力急剧衰弱. 同时裂隙水对锚固树脂药卷、螺纹钢杆体、以及锚固体自身的物理力学性能都有很大的影响,严重时会使锚固失效. 因而在新掘巷道时,必须加强水的管理,在现场实验中尝试在巷道一侧进行大孔径疏导孔及时疏导顶板裂隙水,并在淋水段顶板悬挂塑

料油布集水，降低顶板水对底板的侵蚀. 在疏导水源的基础上进行围岩内注浆，封闭裂隙和围岩表面. 采取导、疏、堵结合的综合控水措施，削弱水患的影响，保护围岩原有强度.

2) 破碎地带采取围岩注浆加固

试验巷道开挖 7～10 d 后，在巷道围岩应力二次分布与协调变形共同作用下，顶板原生裂隙张开，次生裂隙得到充分发展，此时提供了最好注浆时机：裂隙等各种弱面的发育为注浆提供了良好的通道与空间，而且各裂隙没有完全贯通形不成水力通道，裂隙水无法进入岩体深部，避免了围岩泥化后注浆困难. 围岩及时注浆后，浆液把围岩的各种弱面充实，破碎岩体重新胶结起来，阻断裂隙水的通道，从而既避免水引起的围岩泥化，防止软岩进入流变期. 注浆加固在控制软岩流变变形中有决定作用，通过注浆提高支护结构的整体性，使岩体承受更大荷载，扩大支护结构的适应性，并可以承受动压的作用，使得巷道围岩维护形成良性循环.

3　关键部位控制技术手段

3.1　高效预应力强化技术

预应力桁架：利用巷道围岩的特殊变形规律和特点，以围岩深部相对稳定区作为锚固点，通过对围岩主动施加侧向约束，形成楔形稳定结构，控制浅部岩体的整体移动. 桁架水平拉索的拉力作用在巷道围岩内产生一对反弯矩，补偿由于围岩变形引起的的拉应力区，转变为有利的受压应力状态. 斜拉锚索梁：锚索梁支护技术则兼具了单体锚索和预应力桁架两者的优点. 克服了单体锚索在泥化围岩中护顶面积小的缺点，同时避免了桁架随围岩位移使得预应力损失而逐渐失去支护效果的缺陷.

3.2　新型岩层注浆化学材料

浆液采用由树脂和催化剂双组分合成的新型高分子——聚亚胺胶脂材料聚亚胶脂化学浆液马丽散，其具有低初始黏度、高黏合力，很好的机械性能与渗透性，并可以通过加入一定量的加速剂控制反应速度. 液体双组分化学浆液注入地层后，其初期低黏度混合物保持液体状态几秒钟，具有水泥浆等微粒状注浆材料不可比拟的渗透性，在注浆压力作用下(甚至在无压情况下)可渗透至极其细小的裂缝，然后发生反应膨胀和黏结，形成似胶体状物，他具有较高的黏合力、力学强度和很好柔韧性，能承受随后的地层运动，可与水反应并封闭水流，从而有效地加固和密封围岩松动破碎区域，在后期围岩变形过程中保持有效的加固性能. 主要技术指标见表 1.

表 1　马丽散主要技术参数

Table 1　Chief technical parameters of Marithan

物理化学性质	树脂	催化剂
25 ℃时的密度/(g·cm^{-3})	1.04	1.23
25 ℃时的黏度/(MPa·s)	200	210
混合比例(体积比)	1	1
初始黏度/(MPa·s)	450	250
开始反应时间/min	1:15	0:45
发泡结束时间/min	2:10	2:15
最终压力/MPa	>15	>15
黏合力/MPa	>5	>5
膨胀比	2	2

4　工程实践

桃园矿 7244 机巷顶底板为厚层泥岩与煤线互层，富含泥质成分，顶板砂岩裂隙水发育，地应力较大. 该巷道内段先期掘进，表现为四周全面来压，变形量大、变形持续时间长，巷道施工后 85 d，平均两帮累计变形达 1 420 mm，平均变形为 16.75 mm/d，顶底板累计变形达 770 mm，平均变形为 5.06 mm/d. 严重地段巷道断面宽度由 3.8 m 很快收缩到不足 1 m，后经过多次翻修(平均卧底改棚修复 4～5 次)仍不能满足生产安全需要，支护非常困难.

4.1　岩层组分与水文条件

1) 岩层组分：在该巷道现场取典型岩样 2 块，衍射实验分析测试结果如图 4.

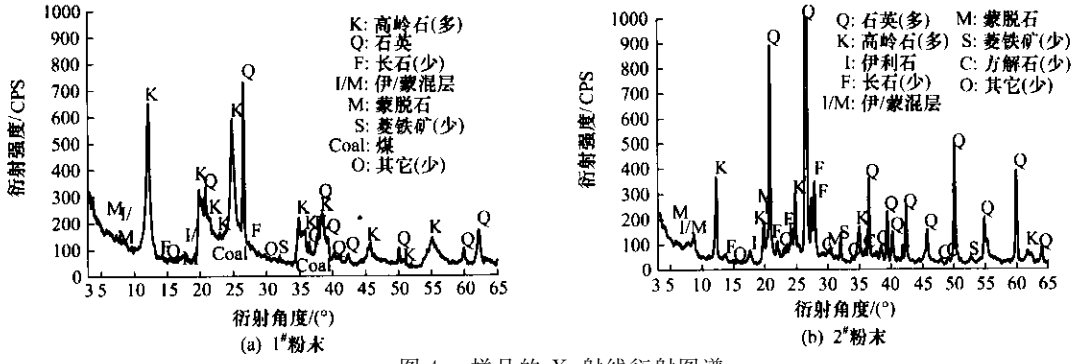

图 4　样品的 X-射线衍射图谱

Fig. 4　X-ray diffraction pattern of specimens

万方数据

巷道围岩组分中黏土类矿物的含量很大,高岭石、蒙脱石、伊/蒙混层总体接近 80%,黏土矿物的大量存在,大大影响了顶板岩层的物理力学性质.

2)水文条件:老顶砂岩裂隙水发育,正常涌水量 15 m^3/h,最大涌水量为 20 m^3/h.顶板隔水层为粉砂岩、中砂岩、泥岩,总厚度为 7.8 m.

4.2 工程效果

7244 外段机巷于 2005 年 3 月开始试验施工,至 2005 年 6 月完工,施工长度约 400 m.从监测结果看,该巷道总体维护状况良好,巷道开掘 3 个月后帮顶收敛变形趋于稳定,两帮变形平均累计 210 mm,最高 490 mm,通过离层仪监测,顶板平均下沉量 15 mm,底鼓量较大,局部累计达 380 mm.但相比前期巷道,顶板下沉量与两帮收敛量得到了明显的控制,虽然底鼓量较大,在采取了卧底等措施后,基本满足煤矿生产安全需要.

5 结 论

1)富水条件下软岩泥化变形破坏过程具有明显的阶段性特征:a.泥化前的变形阶段,其变形破坏规律与一般巷道变形破坏类似.b.泥化流变阶段,该阶段特点为阻尼流变阶段表现剧烈,变形量较大,等速流变阶段较短,很快进入加速流变阶段.

2)泥化的软岩巷道控制的关键在于治水,在成功阻断了泥化诱因之后,再配合高强预应力支护体系能够有效控制此类软岩巷道.依据软岩变形过程各阶段特点针对性的采用动态支护对策:a.在软岩巷道变形的第一阶段以充分发挥围岩自身的承载能力为主,采用预应力支护体系,高阻让压;b.在变形第二阶段开始前,以保护和强化围岩承载能力为目的,及时注化学浆液封堵与取代排水,避免水的侵入对软岩力学性质的弱化;c.最后关键部位加强支护防止产生新的水力通道与薄弱环节突破.

参考文献:

[1] 范秋雁. 试论软岩支护的理论基础[J]. 地下空间, 1999, 19(4): 328-340.
FAN Qiu-yan. On the theory of supporting of soft rock[J]. Underground Space, 1999, 19(4): 328-340.

[2] 李学华,杨宏敏, 刘汉喜, 等. 动压软岩巷道锚注加固机理与应用研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2006, 23(2):159-163.
LI Xue-hua, YANG Hong-min, LIU Han-xi, et al. Research on bolt-grouting reinforcement technology in dynamic pressure and soft rock roadway[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2006, 23(2): 159-163.

[3] 彭苏萍, 孟召平. 矿井工程地质理论与实践[M]. 北京:地质出版社, 2002.

[4] 彭 涛, 何满潮, 马伟民. 煤矿软岩的黏土矿物成分及特征[J]. 水文地质工程地质, 1995(2): 40-48.
PENG Tao, HE Man-chao, MA Wei-min. Clay mineral's composition and characteristic of soft rock[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 1995(2): 40-48.

[5] 周翠英, 彭泽英, 尚 伟, 等. 论岩土工程中水:岩相互作用研究的焦点问题-特殊软岩的力学变异性[J]. 岩土力学, 2002, 23 (1): 124-128.
ZHOU Cui-ying, PENG Ze-ying, SHANG Wei, et al. On the key problem of the water-rock interaction in geoengineering: mechanical variability of special weak rocks and some development trends[J]. Rock and Soil Mechanics2002, 23(1): 124-128.

[6] 丁卫华, 仵彦卿, 曹广祝, 等. 三轴条件下软岩变形破坏过程的 CT 图像分析[J]. 煤田地质与勘探, 2003, 31(3): 32-35.
DING Wei-hua, WU Yan-qing, CAO Guang-zhu, et al. The CT image analysis on the soft rock deformation and damage process under triaxial condition[J]. Coal Geology & Exploration, 2003, 31(3): 32-35.

[7] 郭 志. 软岩流变过程与强度研究[J]. 工程地质学报, 1996, 4(1): 75-79.
GUO Zhi. Study of incompetent rock rheological process and strength[J]. Journal of Engineering Geology, 1996, 4(1): 75-79.

[8] 王祥秋, 杨林德, 高文华. 软弱围岩蠕变损伤机理及合理支护时间的反演分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(5): 793-796.
WANG Xiang-qiu, YANG Lin-de, GAO Wen-hua. Creep damage mechanism and back analysis of optimum support time for soften rockmass[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(5): 793-796.

[9] 沈明荣. 岩体力学[M]. 上海:同济大学出版社, 1999.

[10] 何满潮. 中国煤矿软岩工程地质力学研究进展[J]. 煤, 2000, 9(1): 6-1.
HE Man-chao. The research development of soft rock engineering geological mechanics China Coal Mine[J]. Coal, 2000, 9(1): 6-11.

万方数据

(责任编辑 王继红)