复杂环境下软岩变形破坏机理与控制技术研究

黄 旭
(首钢总公司资源办公室)

摘 要 在分析了复杂环境下软岩巷道的强烈持续塑性流变破坏特征和支护异常困难的基础上,对复杂环境软岩变形破坏的应力转移过程和力学机制进行了研究。通过古汉山矿软岩巷道工程实践,控制了巷道强烈变形,保持了巷道的稳定。为类似复杂工程环境软岩分析计算,明确了软岩巷道支护控制对象;提出了塑性区发育控制原则;提出了提高巷道浅部围岩的力学性质和残余强度的支护方法。并为类似条件下的巷道控制提供了成功经验。

关键词 塑性区 碎涨应力 膨胀应力 残余强度 围压

Mechanism and Control Technology of Soft Rock Deformation Failure in Complex Environment

Huang Xu
(*Shougang Corporation Resources Office*)

Abstract Based on the analysis of the characteristics of strong continuous plastic flow failure and extreme difficult support of soft rock tunnel in complex environment, the stress transfer process and mechanism of deformation failure of soft rocks in complex environment were studied. In the practice of Guhanshan soft rock tunneling engineering, the strong tunnel deformation was controlled, and the tunnel was kept stable. Analysis and calculation was made for soft rocks in similar complex engineering environment, and the control target of soft rock tunnel support defined; the principles for controlling plastic zone development was proposed; and the mechanical properties of shallow wall rock of tunnel and the support method for residual strength were given. Successful experience is provided fro the tunnel control with similar engineering conditions.

Keywords Plastic zone, Crushing stress, Expanding stress, Residual strength, Confining pressure

随着矿井向深部延深,尤其当巷道布置在构造应力等高水平应力、围岩软弱、含有泥化膨胀成分、水害严重等复杂工程环境时,巷道支护异常困难。通常采用"锚网喷+现浇钢筋混凝土碹"或"锚网喷+普通U型钢可缩支架"等联合支护[1-5],仍不能有效控制围岩变形,多次维修后巷道仍发生持续变形破坏,难以控制,破坏特征明显表现为顶板的剧烈下沉、破坏、冒落、底臌和两帮内敛,锚杆锚索与围岩联动伴随着部分锚杆锚索托盘变形和杆体拉断,具有明显的持续塑性流变破坏特征[6-9]。

1 工程环境条件与破坏特征

古汉山矿西大巷距地表垂深为550 m,设计断面为直墙半圆拱形,宽为4.5 m,高为3.9 m,用锚网喷+工钢+喷支护。围岩为低强度、强膨胀、易崩解的泥岩和砂质泥岩互层组成,其自然含水状态下单轴抗压强度为14.4~19.3 MPa,平均为16.85 MPa。围岩节理裂隙发育,岩石破碎,经物化分析富含膨胀性矿物成分。围岩含水率高,平均渗水量为10 m^3/min。据原位地应力测试,其最大水平主应力为21.4 MPa,最小水平主应力为15 MPa。

破坏、变形的基本特征是:巷道顶部严重下沉、局部冒落;底臌现象十分严重,底板保持平面状整体臌起;两侧的墙体内收、偏斜,中下部变形明显大于上部等。对变形破坏的巷道进行观察,巷道每帮的收敛量累计为180~680 mm,个别地方达1 500 mm,顶板绝对下沉量为150~567 mm,局部冒落高度达2.8 m,绝对底臌量为500~1 100 mm。

2 变形破坏的力学机制

岩体的全应力-应变试验曲线(图1)表明,岩

黄 旭(1966—),男,首钢总公司资源办公室,博士,高级工程师,100041 北京市石景山区杨庄大街69号。

万方数据

体强度达到其极限强度 σ_c 后,岩体变形进入塑性软化阶段,岩体自身的强度随着应变的增大逐渐衰减,直至残余强度 σ_c^* 。

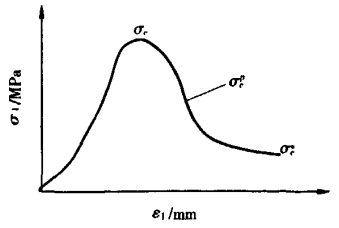

图 1　岩体的全应力－应变曲线

巷道开挖后围岩应力重新分布的结果使部分围岩应力出现应力集中。一般圆形巷道最大应力集中系数为 2～3,轴比为 2 的椭圆形巷道围岩应力集中系数可以达到 4～5,矩形巷道和轴比更大的椭圆形巷道的应力集中系数还要更大。在这样大的应力作用下,采准巷道围岩将出现拉断破坏或剪切塑性破坏[10],造成围岩内应力或强度的变化,产生围岩应力转移、集中和强度的减小,发生围岩物理状态度改变,使围岩塑性变形破坏。在复杂环境软岩工程中,由于围岩单向抗压强度远小于原始应力,即使不考虑巷道开挖造成的应力集中,在巷道开挖瞬间表面围岩三向应力解除即发生塑性应变。随后由于浅部围岩塑性软化,强度降低,支撑能力下降,围岩应力向深部转移。顶底板在围岩变形初期,由于较大水平应力作用,可以认为处于 2 向应力状态,有利于顶底板的稳定。但随着两帮塑性区加大,相当于顶底板跨度增大,加之其塑性和膨胀变形,不可避免地使顶底板出现向巷道空间的屈曲变形,水平应力又成为变形破坏的推动力,如图 2。最终在巷道围岩一定范围内形成塑性变形区。

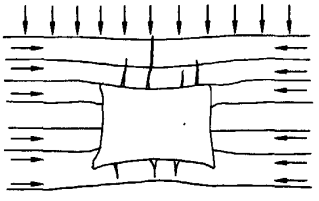

图 2　顶板变形破坏

其后,塑性区范围内的自重应力相对很小,而变形反映的是岩石强度峰值后变形,应力超过岩石强度,围岩中将产生大量新的破裂缝和膨胀,其物理过程表现为破裂岩块在围岩应力作用下的滑移、错动和裂缝扩张程度的进一步增加,相对于峰值强度前弹塑性变形,其变形量要大得多。如果围岩泥质成分高,富含伊/蒙石、高岭土等膨胀成分,且工程环境水害严重,膨胀应力将比围岩自重和碎涨应力大得多,成为支护设计需要考虑的主要应力对象。也就是说塑性区形成后,围岩的变形破坏将主要由碎涨应力和膨胀应力引起。

3　控制对象与原则

对复杂环境下的软岩,由于原岩应力水平高,必须允许围岩发生塑性软化,产生塑性区。之后将塑性区碎涨和膨胀应力作为支护设计的主要控制对象,即实现塑性软化后的应力平衡。而围岩变形量是反映围岩稳定性的主要指标,是围岩控制的最终目标。巷道变形量与塑性区半径有公式(1)所示关系[11],所以可以用塑性区半径 R 的大小判断巷道围岩的稳定性,R 越大巷道越不稳定。

$$R = \frac{57.8P_0}{\sigma_c} - 51.56. \qquad (1)$$

这样控制度对象就成为塑性区半径 R。而塑性区半径 R 的计算如公式(2):

$$\left(\frac{2P-\sigma_c}{K+1} + \frac{A}{K+1+\eta} + \frac{B}{K-1}\right)\left(\frac{a}{R}\right)^{K-1} - \frac{A}{K+1+\eta}\left(\frac{R}{a}\right)^{2+\eta} - \frac{B}{K-1} - P_i = 0, \qquad (2)$$

式中,$A = \dfrac{\sigma_c - \sigma_c^*}{1-\left(\dfrac{R}{a}\right)^{2+\eta}}$;$B = \sigma_c - A$;$P$ 为原岩应力;R 为围岩的塑性区半径,m;a 为巷道半径,m;K 为系数,$\dfrac{2P-\sigma_c}{\sigma_R} - 1$;$P_i$ 为支护强度,MPa;σ_c 为围岩单向极限抗压强度,MPa;η 为平面应变条件下岩体扩容梯度;σ_R 为弹塑性区交界处径向应力,MPa;σ_c^* 为围岩残余强度,MPa。

从式(2)可知,影响塑性区半径 R 值的因素主要有原岩应力 P、岩体单向抗压强度 σ_c、岩体扩容梯度 η、残余强度 σ_c^*、支护阻力 P_i、巷道跨度 a 等。原岩应力 P、岩体单向抗压强度 σ_c、巷道跨度 a 是通常技术方法难以改变的因素,而残余强度 σ_c^*、支护阻力 P_i 是可控制因素。

支护阻力 P_i 对塑性区半径的影响如图 3 所示。随着支护阻力提高,塑性区围岩所受围压加大,残余强度 σ_c^* 变大(见图 4),塑性区半径 R 逐渐减小。因此应尽可能提高对巷道的支护阻力 P_i,尤其提高锚杆支护的预紧力。

基于软岩变形特征,建议支护的原则为:

万方数据

(1)及时进行初次封闭支护,使松动圈受控发展,防止围岩出现泥化膨胀,并保证施工安全;

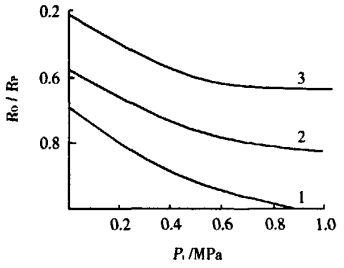

图3　支护阻力与塑性区半径 R 的关系

$1-P_i=2.5$ MPa;$2-P_i=5.0$ MPa;$3-P_i=10$ MPa

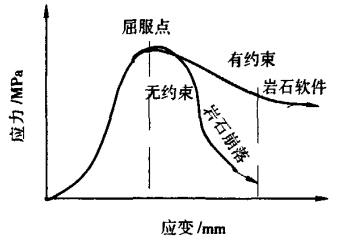

图4　锚固体岩层应力应变关系

(2)软岩的塑性流变很大,但无论是初次支护的新开巷道,还是实施了多次支护的翻修巷道,其巷道支护体破坏是一个过程,应力集中偏移深部后,一方面应力集中程度降低,另一方面深部岩石处于三轴受力状态,破坏可能性大大减小。对于高应力软岩巷道支护来讲,既要允许出现稳定塑性区,又要严格限制非稳定塑性区的扩展。因此在塑性圈发展到一定程度时,必须进行二次支护;

(3)软岩的碎涨变形应力很大,依靠支护体达到应力平衡是不经济的,有时是不可能的,二次支护应提高塑性区围岩自身残余强度,其支护技术以锚杆支护或注浆支护为最佳;

(4)锚杆长度或注浆范围不必深入塑性区,在浅部提供足够的支护阻力,提高浅部围岩残余强度,达到应力平衡即可。

4　工程实例

4.1　优化方案

分析确定巷道塑性区已发展充分,变形为塑性区围岩碎涨和膨胀应力所致,维修刷巷后应控制塑性区新的发展,必须提供足够的支护力;而该巷围岩自身含水量大,膨胀力大,锚网喷支护将不经济,而且锚杆长度减小将失去可靠着力基础,所以提高围岩残余强度的有效措施为注浆加固。

原方案采用2.2 m注浆锚杆,两底角采用3.0 m注浆锚杆,排间距为1.0 m×1.0 m,注浆压力为2~3 MPa。如前,加固浅部围岩,提高浅部围岩自撑能力,对应力释放过的修复巷道,锚注仍然符合变形力学机制。而且可以降低注浆锚杆成本和施工成本、提高经济效益和施工效率。为此,进行了浅部围岩注浆试验。因此将注浆锚杆长度改为0.6 m(底角及其它参数不变)。

4.2　观测结果分析

古汉山运输大巷注浆前后在不同的深度,观测到的声波速率如表1所示,声波速率图如图5所示。

表1　运输大巷注浆后声波速率比较

深　度 /m	声波速率/(m/s)		注浆后声速增长率/%
	注浆段	非注浆段	
400	4 200	3 200	31.25
513	4 600	3 300	39.39
766	4 800	3 660	31.15
900	4 900	3 940	24.37
1 150	4 800	3 840	25.00
1 300	4 200	4 050	3.70
1 500	3 950	4 140	-4.59
1 700	4 100	4 260	-3.76

分析声波速度图5,在1.3 m范围内修改方案(即浅部注浆)效果明显好于初步方案,之外效果相差并不明显。另外,岩芯测取率提高30%。从浆脉分析,浅部注浆浆脉渗透范围大,但深部明显浆脉较稀少。注浆后,浅部注浆的变形量大,稳定期长,但巷道最终都趋于稳定,且总变形量不超过预定值,巷道表面喷层完整。

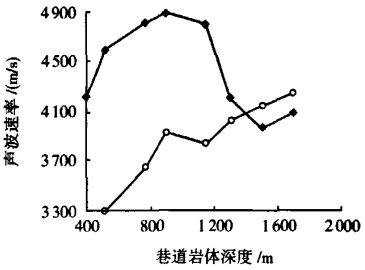

图5　古汉山矿运输大巷声波速率

◆-注浆段;○-非注浆段

从图6巷道变形来看,浅部注浆加固前,巷道表面位移量较大,两帮位移达到600 mm左右,而且围岩变形稳定的时间也较长。浅部注浆加固后巷道表面位移大为降低,两帮位移仅为280 mm左右,并且在30 d后围岩的变形就基本稳定不变。说明采用浅部注浆加固围岩后,不但强化围岩自身强度,还能提高弱面的强度和粘性系数,有效控制了软岩的持续流变。

(下转第95页)

万方数据

采,但矿体仍在向毛堂街下延伸,已远远超过当初探矿控制的范围,其矿床规模也大大超过了岩体内部赋存的矿床。这些从不同侧面证明了隐爆气液的远程成矿作用的重要意义。

5　找矿方向

(1)矿种问题。对隐爆角砾岩型矿床的研究由来已久,除金伯利岩外,以往研究较多的为金矿,如我国东北的团结沟金矿、夹皮沟金矿,河南境内的蒲塘金矿、毛堂金矿均为典型的隐爆角砾岩型金矿床,相关的文献资料较多,但很少见到有人涉及其他矿种。近年来在河南桐柏的老湾金矿、破山 - 银硐坡贵金属成矿带上的河坎银多金属矿床、南召的贯沟金多金属矿床、内乡板厂铜多金属矿床中均发现有爆破角砾岩(体)产出,因此从认识角度来讲,与隐爆角砾相关的矿种已从以往较单纯的金矿逐渐向多金属矿种发展。如本研究所述的老田岩体一带,从近程 - 远程成矿作用的同一性出发,就矿种方面完全可以将 Au,Cu,Mo,Pb,Zn,Ag 作为一个系列性问来研究。即在隐爆角砾岩分布区,不仅可以寻找金矿,而且同样具有寻找铜、钼、铅、锌、银等多金属矿产的潜力。

(2)远程找矿问题。在成矿部位方面,以往认为只有在隐爆角砾岩筒内或近筒的环状及放射状构造内才是成矿的最有利部位,因此找矿重点多局限在隐爆角砾岩筒附近,而按照远程成矿作用原理,除上述的近筒部位外,在较远离爆破中心的成矿期断裂、特别是对喷发流体起主要疏导作用的成矿期断裂同样是成矿的最有利部位。

参 考 文 献

[1] 曾庆光,杨宝星. 河南省淅川县毛堂矿区Ⅲ号岩体金矿详查报告[R]. 郑州:河南省地矿局第四地质调查队,1987.

[2] 焦守敬,马庚杰. 河南省西峡、淅川县蒲塘、毛堂隐爆角砾岩型金矿成矿机理及成矿预测报告[R]. 郑州:河南省地矿局第四地质调查队,1990.

(收稿日期　2009-01-27)

(上接第 34 页)

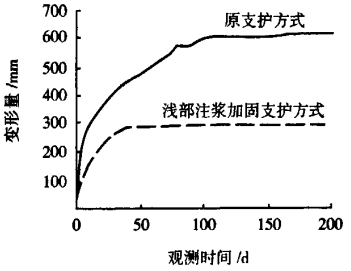

图 6　古汉山矿运输大巷两邦位移曲线

5　结　论

(1)高应力软岩必须允许其塑性区发育,释放应力;

(2)支护是一个过程,即需分次支护;

(3)由于软岩变形量大,难以稳定,在塑性区发育到一定程度,必须加强支护限制松动圈的进一步发展,减小参与变形的围岩范围;

(4)在塑性区发育到一定程度,采取措施提高浅部围岩力学性质和残余强度对于软岩变形控制极为重要;

(5)采用巷道围岩浅部注浆加固后,巷道围岩变形稳定时间和变形量都大为降低,围岩的承载能力得到提高,有效控制了软岩巷道的强烈变形、保持了巷道稳定;

(6)塑性区范围内某一位置的应力值和支护设计时对围岩施加的围压值的计算尚需进一步研究。

参 考 文 献

[1] 董　涛,谢友友. 让压与锚注法在软岩巷道中的研究与应用[J]. 采矿与安全工程学报,2008,25(1):41-45.

[2] 张　农. 巷道滞后注浆围岩控制理论与实践[M]. 徐州:中国矿业大学出版社, 2004.

[3] 张凤旺,崔道品,杨晓东. 锚注法在软岩大巷施工中应用[J]. 矿山压力与顶板管理,2005,22(2):76-78..

[4] 李永友,李树清. 深部软岩巷道锚注联合支护围岩承载机理分析[J]. 湖南科技大学学报:自然科学版,2008,23(1):10-14.

[5] 王其胜,姚　华. 深埋软岩巷道增强混凝土应用[J]. 采矿与安全工程学报,2008,25(2):184-187.

[6] 段庆伟,何满潮,张世国. 复杂条件下围岩变形特征数值模拟研究[J]. 煤炭科学技术,2002,30(6):55-58.

[7] 王其胜,李夕兵,李地元. 深井软岩巷道围岩变形特征及支护参数的确定[J]. 煤炭学报,2008,33(4):364-367.

[8] 柏建彪,王襄禹,姚　喆. 高应力软岩巷道耦合支护研究[J]. 中国矿业大学学报,2007,36(4):421-425.

[9] 何满朝. 中国煤矿软岩巷道[M]. 北京:科学出版社,2004.

[10] 马念杰,侯朝炯. 采准巷道矿压理论及应用[M]. 北京:煤炭工业出版社,1995.

[11] 董方庭. 巷道围岩松动圈支护理论及应用技术[M]. 北京:地质出版社,2001.

(收稿日期　2009-01-19)

万方数据