

# 软岩巷道锚注结构承载特性的时变规律与初步应用

王襄禹<sup>1,3</sup>, 柏建彪<sup>2,3</sup>, 陈勇<sup>2</sup>, 马述起<sup>1</sup>

(1. 中国矿业大学矿业工程学院深部煤炭资源开采教育部重点实验室, 江苏 徐州 221116; 2. 中国矿业大学煤炭资源与安全开采国家重点实验室, 江苏 徐州 221116; 3. 徐州矿务集团有限公司江苏省企业院士工作站, 江苏 徐州 221000)

**摘要:** 针对软岩巷道锚注结构承载特性的时变特征, 尝试将锚注结构的承载力视为时变值, 并将巷道周边弹性区、塑性区以及锚注区简化为厚壁圆筒的受力分析问题, 通过引入弹黏塑性本构模型, 得到了锚注结构承载力的计算公式, 理论分析表明: 流变停止所需的锚注结构承载力以及流变量随  $P_0$  (原岩应力) 与  $\sigma_s$  (拉伸屈服极限) 比值的增大而升高, 流变特性更为显著、支护难度增加; 锚注支护强度及范围的减小, 导致流变停止所需的承载力以及流变量升高, 是造成锚注结构失效、流变加剧的主要原因, 而流变停止所需的承载力又与锚注参数密切相关, 合理确定锚注参数保证流变停止时锚注结构的稳定至关重要。理论计算结果较好的反映了锚注结构承载力随流变变形增加而逐渐增大的时变规律, 且与现场实测结果较为吻合, 对软岩巷道锚注支护设计可起到一定的指导作用。

**关键词:** 软岩巷道; 锚注支护; 承载力; 时变规律; 厚壁圆筒

中图分类号: TU45

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2013)03-0469-07

**作者简介:** 王襄禹(1979-), 男, 河南省平顶山人, 博士, 副教授, 主要从事煤矿巷道围岩控制理论与支护技术的研究工作。E-mail: wangxiangyu79@126.com。

## Time-dependent laws and initial application of bearing features of bolt-grouting structure in soft rock roadway

WANG Xiang-yu<sup>1,3</sup>, BAI Jian-biao<sup>2,3</sup>, CHEN Yong<sup>2</sup>, MA Shu-qi<sup>1</sup>

(1. School of Mines, Key Laboratory of Deep Coal Resource Mining, Ministry of Education of China; China University of Mining & Technology, Xuzhou 221116, China; 2. State Key Laboratory of Coal Resources and Mine Safety, China University of Mining & Technology, Xuzhou 221116, China; 3. Enterprise Academician Workstation of Jiangsu Province, Xuzhou Mining Group Co., Ltd., Xuzhou 221000, China)

**Abstract:** Regarding the time-dependent behaviors of the bolting and grouting structure in soft rock roadway, the bearing capacity of bolt-grouting structure is treated as time-dependent value, and the elastic zone, plastic zone and bolt-grouting zone around the roadway are simplified as the stress analysis problem of a thick walled cylinder. Based on an elastic-viscoplastic constitutive model, the formulas for the bearing capacity of bolt-grouting structure are attained. The results show that the needed bearing capacity of bolt-grouting structure to stop rheology and rheological convergence/deformation increases with the increase of the ratio of  $P_0$  (original rock stress) to  $\sigma_s$  (Tensile yield limit), and the more apparent the rheological features the more the support difficulty. The main reason for support failure and serious rheology is that the needed bearing capacity to stop rheology and rheological deformation increases because of the decrease of support strength and range. The value of the bearing capacity has close relationship with the bolt-grouting parameters, and it is very important that the appropriate bolt-grouting parameters can guarantee the stability of the bolt-grouting structure when rheology ends. The theoretical results reflect well the time-dependent laws of bearing capacity of bolt-grouting structure increasing with the increase of the rheological deformation, and they agree with the field observations, thus playing a great role in the design of bolt-grouting support structure in soft rock roadway.

**Key words:** soft rock roadway; bolt-grouting support; bearing capacity; time-dependent law; thick walled cylinder

## 0 引言

锚注支护作为一种主动支护方式, 它以加固围岩和改善围岩的受力状态为手段, 充分发挥围岩的自承

基金项目: 国家自然科学基金项目(51204166, 51174195); 江苏高校优势学科建设工程资助项目(SZBF2011-6-B35)  
收稿日期: 2012-05-29

能力来减小围岩的变形,是解决软岩巷道支护困难的一种有效途径<sup>[1-3]</sup>。随着锚注支护技术的推广应用,国内外学者对锚注支护机理及其工程实践进行了大量而卓有成效的研究。文献[4]依据弹塑性理论分析了巷道周边位移、塑性区半径与锚注区半径、锚杆初锚力之间的关系,并利用非线性突变理论提出了锚注圈失稳的力学判据;文献[5]从弹塑性理论出发研究了锚注支护的工作机理,根据所提出的内表比理论,认为控制软弱围岩巷道变形的途径是控制围岩的浅部位移,加固巷道的浅部围岩,并论证了锚注支护是维护软岩巷道稳定的有效方法。由于软岩巷道的流变特性显著,近几年锚注支护机理的研究广泛采用了流变力学理论<sup>[6-10]</sup>,文献[11]将锚注软岩巷道分为锚注加固区和未注围岩区,分别采用不同的黏弹性模型,得到了巷道围岩锚注加固区和未注围岩区的应力、位移关系式,结合现场观测的围岩累计移近量曲线,确定了锚注加固区围岩蠕变方程式;文献[12]将锚注区细化为弹性区和塑性区,引入岩石蠕变的鲍尔丁-汤姆逊模型,得到了软岩巷道锚注支护结构应力及位移的蠕变规律;文献[13, 14]将锚杆简化为作用于围岩的一种体积力,并将注浆作用看作对围岩力学性能的改变,推导出了原岩应力和锚注支护反力均为恒载下巷道围岩的流变变形。这些研究成果都为软岩巷道锚注支护的研究奠定了基础。

由于围岩的弹塑性变形在巷道开挖瞬间即发生并完成,锚注支护结构控制的对象主要是峰后煤岩体的流变变形,导致锚注结构的承载力具有随流变变形增加而升高的时变特征,但目前的成果大都将锚注结构看作为对围岩力学参数的改变或者是一种恒载支护,未能反映出锚注结构承载力的时变规律,而该时变规律对锚注结构的自身稳定以及控制流变效果的影响又极为显著。因此,揭示锚注结构承载特性的时变规律对研究锚注支护控制软岩巷道流变的作用机理具有十分重要的理论意义。本文尝试将锚注结构的承载力视为时变值,并将巷道周边弹性区、塑性区以及锚注区简化为厚壁圆筒的受力分析问题,通过引入弹黏塑性本构模型,对锚注结构的承载特性以及巷道流变变形进行了理论分析,并得到初步应用。

## 1 锚注支护结构弹黏塑性分析

### 1.1 弹黏塑性分析的力学模型

基本假定:

(1) 巷道为深埋圆形巷道,处于静水应力状态,视为平面应变状态。

(2) 锚注区和锚注区以外围岩被视为连续、均质、

各向同性。

(3) 锚注支护结构安装之前围岩弹塑性变形已完成,塑性区已形成,流变阶段塑性区视为弹黏塑性区,且假设锚注半径小于塑性区半径。

(4) 流变阶段巷道周围分为原岩弹性区、弹黏塑性区以及锚注加固区,各区域简化为厚壁圆筒的受力分析问题。

(5) 围岩开始流变时,锚注支护结构安装完成并对围岩产生承载力,受非锚注区持续流变的挤压作用,锚注结构的承载力不断增加,围岩流变变形  $\mu = 0$  即  $t = 0$  时锚注支护结构的承载力为 0。

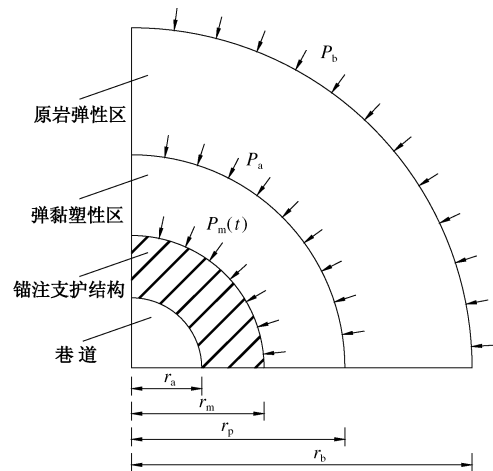


图1 锚注结构弹黏塑性分析模型

Fig. 1 Elastic-viscoplastic model of bolt-grouting structure

图中,  $P_b$ ,  $P_a$ ,  $P_m(t)$  分别为原岩应力、弹黏塑性区对弹性区的径向约束力、锚注结构承载力(MPa);  $r_a$ ,  $r_m$ ,  $r_p$ ,  $r_b$  分别为巷道开挖半径、锚注半径、弹黏塑性区半径、巷道开挖影响半径(m)。

### 1.2 原岩弹性区分析

原岩弹性区视为内半径  $r_p$ 、外半径  $r_b$  的厚壁圆筒受力问题,该厚壁圆筒内、外边界分别受力为  $P_a$ ,  $P_b$ 。参照弹性力学应力及位移的通解,弹性区内应力及位移的解应为(弹性区内各解有上标“'”):

$$\begin{aligned}\sigma_r' &= -\frac{r_p^2(r_b^2 - r^2)}{r^2(r_b^2 - r_p^2)}P_a + \frac{r_b^2(r_p^2 - r^2)}{r^2(r_b^2 - r_p^2)}P_b, \\ \sigma_\theta' &= \frac{r_p^2(r_b^2 + r^2)}{r^2(r_b^2 - r_p^2)}P_a - \frac{r_b^2(r_p^2 + r^2)}{r^2(r_b^2 - r_p^2)}P_b, \\ U' &= \frac{1-\nu^2}{Er} \left[ \left( \frac{r_b^2 + r^2}{r_b^2 - r_p^2} + \frac{\nu}{1-\nu} \frac{r_b^2 - r^2}{r_b^2 - r_p^2} \right) P_a r_a^2 - \right. \\ &\quad \left. \left( \frac{r_p^2 + r^2}{r_b^2 - r_p^2} + \frac{\nu}{1-\nu} \frac{r_p^2 - r^2}{r_b^2 - r_p^2} \right) P_b r_b^2 \right],\end{aligned}\quad (1)$$

式中,  $\sigma_r'$ ,  $\sigma_\theta'$ ,  $U'$  为弹性区径向、切向应力与径向位移。

### 1.3 弹黏塑性区分析

流变阶段的弹黏塑性区由弹塑性变形阶段的塑性区演化而来, 其也可视为内半径  $r_m$ 、外半径  $r_p$  的厚壁圆筒受力问题, 流变初始应力场的计算参照式 (1), 只是内边界受力即锚注结构的承载力  $p_m$  随时间  $t$  变化 (黏弹性区内各解有上标 “ $\bullet$ ”)

$$\left. \begin{aligned} \sigma_r'' &= -\frac{r_m^2(r_p^2 - r^2)}{r^2(r_p^2 - r_m^2)} p_m(t) + \frac{r_p^2(r_m^2 - r^2)}{r^2(r_p^2 - r_m^2)} p_a, \\ \sigma_\theta'' &= \frac{r_m^2(r_p^2 + r^2)}{r^2(r_p^2 - r_m^2)} p_m(t) - \frac{r_p^2(r_m^2 + r^2)}{r^2(r_p^2 - r_m^2)} p_a. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

弹黏塑性本构方程为<sup>[15]</sup>

$$\left. \begin{aligned} \dot{\varepsilon}_{i,j} &= \frac{1}{2G} \dot{S}_{ij} + \frac{1}{2\eta} \left(1 - \frac{k}{\sqrt{J_2}}\right) S_{ij} \quad (\sqrt{J_2} > k), \\ \dot{\varepsilon}_{i,j} &= \frac{1}{2G} \dot{S}_{ij} \quad (\sqrt{J_2} < k). \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式(3)表达的是瞬时偏应力与瞬时应变速率的关系, 这种瞬时的比列因子是时间的函数, 可将黏性效应与塑性变形结合考虑, 不但对弹塑性小变形是适用的, 对黏塑性大变形也使用。式中,  $k$  为剪切屈服模量,  $\eta$  为黏性系数,  $\dot{\varepsilon}_{ij}$  为应变偏量增量,  $\dot{S}_{ij}$  为应力偏量增量,  $S_{ij}$  为应力偏量,  $\sqrt{J_2}$  为应力偏量第二不变量, 假定弹黏塑性区为不可压缩材料<sup>[16]</sup>, 由于  $\varepsilon_z'' = 0$ ,  $d\varepsilon_z'' = 0$ , 可得

$$\sigma_z'' = \frac{1}{2}(\sigma_\theta'' + \sigma_r'') \quad , \quad (4)$$

代入  $\sqrt{J_2}$  表达式求出

$$\sqrt{J_2} = \frac{1}{2}(\sigma_z'' - \sigma_r'') \quad . \quad (5)$$

锚注结构具有适应围岩大变形的特征, 结构破坏之前可视为内半径  $r_a$ 、外半径  $r_m$ 、承受外压力  $p_m(t)$  的弹性厚壁圆筒, 分别将锚注结构的材料属性  $\nu$ ,  $E$ ,  $G$  注以下标  $s$ 。代入式 (1) 的第三式, 可得该厚壁圆筒的外边界 ( $r=r_m$ ) 在  $p_m(t)$  作用下产生的流变变形  $U_m$ :

$$U_m = -\frac{1}{2G_s} \frac{p_m(t)}{(r_m^2 - r_a^2)} [r_a^2 r_m + (1 - 2\nu_s) r_m^3] \quad , \quad (6)$$

式中,  $E_s = 2G_s \cdot (1 + \nu_s)$ 。

依据锚注结构的受力条件列出  $U_m$  的另一补充方程:

$$U_m = \frac{p_m(t)}{K_s} \rightarrow \varepsilon_r = \frac{p_m(t)}{K_s r_m} \quad , \quad (7)$$

其中,  $k_s$  为锚注结构的刚度 (MPa/mm), 联立式 (6)、(7) 可求得

$$\frac{1}{k_s} = -\frac{1}{2G_s} \frac{r_m}{(r_m^2 - r_a^2)} [r_a^2 \cdot r_m + (1 - 2\nu_s) r_m^3] \quad . \quad (8)$$

$\sigma_m'' = \frac{1}{3}(\sigma_r'' + \sigma_\theta'' + \sigma_z'')$ , 联立式 (4) 可得

$$\sigma_m'' = \frac{1}{2}(\sigma_r'' + \sigma_\theta'') \quad . \quad (9)$$

采用极坐标将式 (3) 中的前一式展开:

$$\dot{\varepsilon}_r'' - \dot{\varepsilon}_m'' = \frac{1}{2G} (\dot{\sigma}_r'' - \dot{\sigma}_m'') + \frac{1}{2\eta} \left(1 - \frac{k}{\sqrt{J_2}}\right) (\dot{\sigma}_r'' - \dot{\sigma}_m'') \quad .$$

将式 (2)、(5)、(7)、(9) 代入上式, 得到  $r=r_m$  处锚注结构承载力的微分方程:

$$\begin{aligned} \frac{P_m(t)}{r_m k_s} &= \frac{1}{2G} (-\dot{P}_m(t) - \frac{r_m^2}{r_p^2 - r_m^2} \dot{P}_m(t)) \\ &\quad - \frac{1}{2\eta} \left[ \frac{r_p^2}{r_p^2 - r_m^2} (P_m(t) - p_a) - k \right] . \end{aligned} \quad (10)$$

解此微分方程, 其中  $t=0$ ,  $P_m(t)=0$ , 求得

$$P_m(t) = p_a + \frac{r_p^2 - r_m^2}{r_p^2} k$$

锚注结构外边界边界  $r=r_m$ , 假设满足 Mises 屈服

$$\sigma_\theta'' - \sigma_r' = \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_s \quad , \quad (11)$$

式中,  $\sigma_s$  为拉伸屈服极限, 将式 (11) 代入式 (2), 得到式 (10) 的另一补充方程:

$$p_a = p_m(t) - \frac{r_p^2 - r_m^2}{\sqrt{3} r_p^2} \sigma_s \quad . \quad (12)$$

### 1.4 弹黏塑性边界的确定

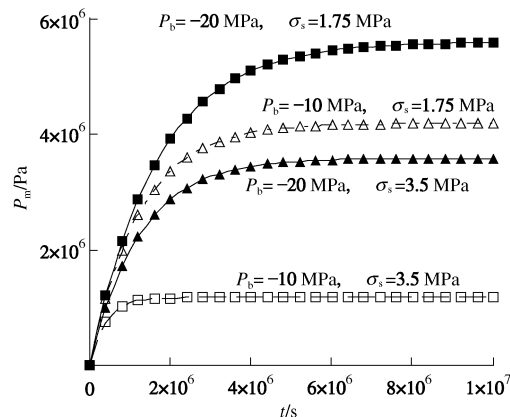
弹黏塑性区是由弹塑性变形阶段塑性区转变而来, 因此, 弹黏塑性边界的确定可简化内半径  $r_a$ 、外半径  $r_b$  的厚壁圆筒外边界受力  $P_b$ 、内边界受力为 0 的弹塑性求解问题。若塑性区半径为  $r_p$ , 则在  $r=r_p$  满足 Mises 屈服准则, 则由式 (1)、(12) 求得

$$\frac{2p_b \cdot r_b^2 \cdot r_a^2}{r_m^2 (r_a^2 - r_b^2)} = \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_s \rightarrow r_m = \sqrt{\frac{\sqrt{3} p_b \cdot r_b^2 \cdot r_a^2}{(r_a^2 - r_b^2) \sigma_s}} \quad . \quad (13)$$

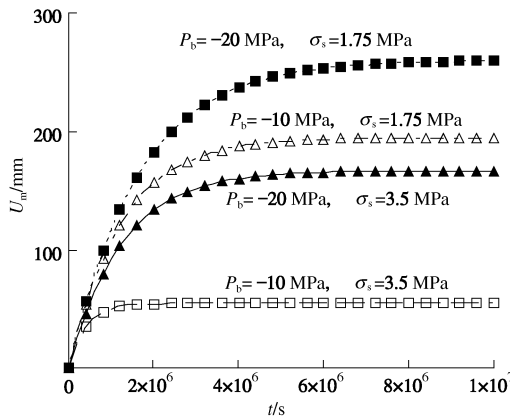
## 2 分析与探讨

联立式 (8)、(10)、(12) 及式 (13), 并假设巷道半径  $r_a = 2.0$  m、 $r_b = 30$  m (大于巷道影响半径), 取围岩黏性系数  $\eta = 90000$  GPa·s  $\approx 1.04$  GPa·d、 $G = 5$  GPa、 $k = 8$  MPa, 代入 Mathcad 计算软件得到锚注结构的承载力  $P_m(t)$ 、流变变形  $U_m$  与时间  $t$  以及

其它因素的变化规律（计算中原岩应力取相应的负值）。



(a) 锚注结构承载力的变化曲线



(b) 锚注结构流变变形曲线

图2 锚注结构承载力、流变与  $P_b$ 、 $\sigma_s$  的关系

Fig. 2 Relationship among bearing capacity of bolt-grouting structure, rheology,  $P_b$  and  $\sigma_s$

图2 计算中锚注结构的参数选取为: 锚注范围 2 m 即  $r_m = 4.0$  m,  $\nu_s = 0.15$ ,  $E_s = 500$  MPa。

(1) 图2 计算结果表明: 锚注结构的承载力随着流变初期的剧烈变形而快速升高, 随着流变时间的进一步延长, 锚注结构承载力与流变变形的增长幅度逐渐减缓、并最终趋于一稳定值, 两者趋于稳定的时间基本一致, 具有近似的变化规律, 较好的反映了锚注结构承载力随流变变形增加而逐渐增大的时变规律。

(2) 锚注支护参数一定时, 流变停止所需的锚注结构承载力以及流变变形取决于原岩应力  $P_b$  与拉伸屈服极限  $\sigma_s$  的比值, 当  $P_b$  较小、 $\sigma_s$  较大时, 承载力与流变趋于稳定的时间较短, 流变停止所需的锚注结构承载力以及最终流变量也较小, 表现出“硬岩”的变形特性; 当  $P_b$  较大、 $\sigma_s$  较小时, 承载力、流变变形量以及流变时间都将显著增加, 表现出“软岩”的变形特性, 支护难度增加。

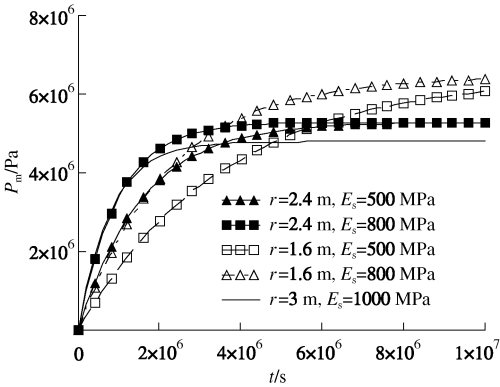
(3) 图3 计算结果表明, 地应力与围岩条件一定时, 相同锚注范围下围岩流变停止所需的锚注结构承

载力基本一致(如图3(a)), 但由于锚注支护强度(图3中  $E_s$  反映了锚注支护强度)及其承载特性的变化, 控制围岩流变的效果明显不同, 锚注支护强度越高的巷道其流变时间以及流变量越小。

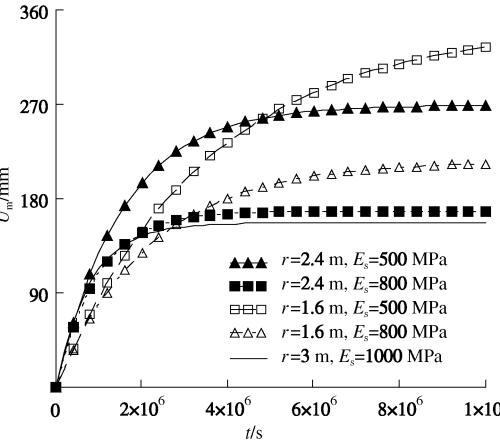
(4) 随着锚注范围以及锚注支护强度的减小, 流变停止所需的承载力以及流变变形都在逐渐增大, 如图3(b)所示, 锚注范围  $r = 1.6$  m、 $E_s = 500$  MPa 时流变时间达到  $1 \times 10^7$  s  $\approx 116$  d 还未稳定, 承载力与流变变形分别超过了 6.5 MPa 和 300 mm 但仍持续增加, 锚注结构会因强度或变形不匹配而失效, 进而丧失对围岩流变的控制。

(5) 虽然增大锚注范围与锚注支护强度可显著降低锚注结构的承载力与流变变形, 但当锚注范围与锚注支护强度增加到一定程度后再继续提高, 流变停止所需的锚注结构承载力及流变变形减小的幅度很小(如图3(b)中锚注范围  $r = 3$  m,  $E_s = 1000$  MPa), 故要合理设计锚注参数, 实现锚注结构与围岩在强度、变形上的匹配, 同时也能避免安全系数太大, 降低锚注支护成本。

图3 计算中  $P_b = -20$  MPa,  $\sigma_s = 1.75$  MPa。



(a) 锚注结构承载力的变化曲线



(b) 锚注结构流变变形曲线

图3 锚注结构承载力、流变与锚注范围  $r$ ,  $E_s$  的关系

Fig. 3 Relationship among bearing capacity of bolt-grouting structure, rheology,  $r$  and  $E_s$

### 3 工程应用分析

徐州矿区某矿西二大巷位于复杂岩层结构中, 巷道埋深超过 800 m, 围岩以富含泥质成份的泥岩、砂质泥岩和粉砂岩为主。巷道掘进初期选用锚网喷支护, 但巷道掘进后 1~2 个月内变形量就达到 300~500 mm, 且持续流变, 锚杆(索)失效情况严重, 通过缩小锚杆(索)间排距、提高杆体强度的方法也未能改变西二大巷支护困难的局面。在此条件下, 决定改变原有支护思路, 采用锚杆(索)与注浆加固的联合支护技术。

巷道设计为  $r=2.25$  m 的圆形断面, 采用  $\phi 22$  mm、 $L 2400$  mm 左旋螺纹钢高强锚杆, 锚杆间排距:  $750\text{ mm}\times 750\text{ mm}$ ; 锚索排距  $1500\text{ mm}$ , 每排 3 根  $\phi 18.9$  mm、 $L 8300$  mm 锚索; 巷道表面铺设  $\phi 6.5$  mm 的钢筋网; 锚杆支护后巷道表面喷射混凝土  $60\sim 70\text{ mm}$ , 再进行围岩注浆加固, 采用中国矿业大学研制的 ZKD 高水速凝材料进行双液注浆, 该注浆材料具有流动渗透性好、早期强度高、尤其与泥质围岩黏结强度高、固结体强塑性变形等优点, 浆液水灰比为  $1.5:1$ , 注浆压力为  $2.0\sim 2.5\text{ MPa}$ , 注入的浆液应尽量保证裂隙充填满, 注浆孔排距为  $1.5\text{ m}$ , 每排 6 个孔, 孔深为  $2.5\text{ m}$ ; 试验巷道取  $P_b=20\text{ MPa}$ ,  $r_a=2.25\text{ m}$ ,  $r_b=30\text{ m}$ ,  $\sigma_s=3.5\text{ MPa}$ ,  $\eta=150000\text{ GPa}\cdot\text{s}\approx 1.73\text{ GPa}\cdot\text{d}$ ,  $G=9\text{ GPa}$ 、 $k=7.5\text{ MPa}$ , 锚注区相关参数为:  $r_m=4.65\text{ m}$  (有效锚注范围  $2.4\text{ m}$ ),  $\nu_s=0.25$ ,  $E_s=1.05\text{ GPa}$ 。锚杆支护后及时布置巷道表面位移测点, 巷道表面位移监测是在巷道两帮设置监测点, 测点用  $300\text{ mm}$  短锚杆制成, 用快硬水泥药卷或水泥固定, 端部用红漆做标记, 采用测枪或卷尺测量, 测点布置完成后即开始监测。理论与现场实测结果如图 4、5。

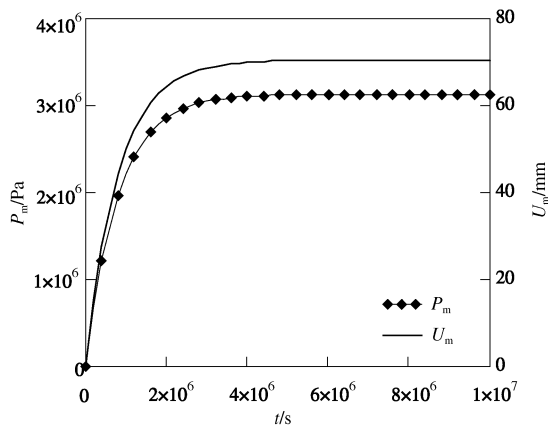


图 4 锚注结构承载力  $P_m$  与流变变形  $U_m$  的理论分析结果

Fig. 4 Theoretical results of bearing capacity of bolt-grouting structure  $P_m$  and rheological deformation  $U_m$

理论分析结果表明, 锚注结构承载力最大为  $3.2\text{ MPa}$  左右, 巷道一侧最大流变变形  $72\text{ mm}$  左右, 理论上巷道两侧相对位移量为  $144\text{ mm}$ , 且在  $4\times 10^6\text{ s}\approx 46\text{ d}$  后基本稳定; 现场实测巷道表面位移在  $40\text{ d}$  左右趋于稳定, 两帮相对位移稳定在  $165\text{ mm}$  左右, 流变稳定时间与最大流变量的理论计算结果与实测结果比较相近, 验证了理论计算结果的合理性, 且理论模型中的力学参数也易于选取与测定, 方便对锚注支护软岩巷道的位移场进行预测、预报, 对巷道支护设计和施工等起到一定的科学指导作用。

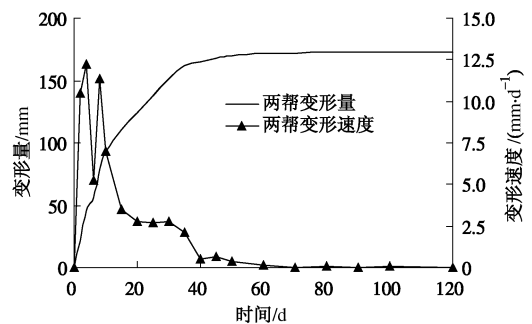


图 5 巷道两帮累计移近量与移近速度曲线

Fig. 5 Convergence and convergence-velocity curves of roadway rib-sides



图 6 锚注支护巷道维护状况

Fig. 6 Maintenance condition of bolt-grouting roadway

### 4 结 论

(1) 本文尝试将锚注结构的承载力视为时变值, 并将巷道周边弹性区、塑性区以及锚注区简化为厚壁圆筒的受力分析问题, 通过引入弹黏塑性本构模型, 得到了锚注结构承载力的计算公式。

(2) 理论计算结果表明: 锚注结构的承载力随着流变初期的剧烈变形而快速升高, 随着流变时间的延长, 锚注结构承载力与流变变形的增长幅度逐渐减缓, 两者趋于稳定的时间基本一致, 具有近似的变化规律, 较好的反映了锚注结构承载力随流变变形增加而逐渐增大的时变规律; 锚注支护参数一定时, 流变停止所

需的锚注结构承载力以及流变变形取决于原岩应力  $P_0$  与拉伸屈服极限  $\sigma_s$  的比值, 两者比值越大, 流变停止所需的锚注结构承载力、最终流变量以及流变时间都将显著增加, 表现出“软岩”的变形特性, 支护难度增加。

(3) 地应力与围岩条件一定时, 相同锚注范围下围岩流变停止所需的锚注结构承载力是个定值, 但流变量及流变时间将随锚注支护强度的增加而逐渐降低; 锚注支护强度及范围的减小, 导致流变停止所需的承载力以及流变量升高, 是造成锚注结构失效的重要原因, 但当锚注强度及范围增加到一定程度后再继续提高, 流变变形降低的幅度很小, 因此, 确定技术和经济上合理的锚注支护参数至关重要; 理论计算与现场实测结果具有较好的一致性, 能够对软岩巷道锚注支护设计起到一定的指导作用。

#### 参考文献:

- [1] 柏建彪, 王襄禹, 贾明魁, 等. 深部软岩巷道支护原理及应用[J]. 岩土工程学报, 2008, **30**(5): 632 - 635. (BAI Jian-biao, WANG Xiang-yu, JIA Ming-kui, et al. Theory and application of supporting in deep soft roadways[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, **30**(5): 632 - 635. (in Chinese))
- [2] 韩立军, 贺永年. 破裂岩体注浆加锚特性模拟数值试验研究[J]. 中国矿业大学学报, 2005, **34**(4): 418 - 422. (HAN Li-jun, HE Yong-nian. Numerical experimental study on mechanical characteristics of cracked rock mass reinforced by bolting and grouting[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2005, **34**(4): 418 - 422. (in Chinese))
- [3] 张百红, 韩立军, 王延宁, 等. 深井软岩巷道锚注支护结构承载特性[J]. 采矿与安全工程学报, 2007, **24**(2): 160 - 164. (ZHANG Bai-hong, HAN Li-jun, WANG Yan-ning, et al. Carrying capacity of deep mine soft rock roadway supported by bolting and groutin[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2007, **24**(2): 160 - 164. (in Chinese))
- [4] 刘福胜. 基于非线性分析的锚注支护机理研究[D]. 济南: 山东科技大学, 2006. (LIU Fu-sheng. Study about mechanism of bolting-grouting support based on nonlinear analysis[D]. Jinan: Shandong University of Science and Technology, 2006. (in Chinese))
- [5] 杨新安, 黄宏伟. 围岩变形内表比及一种新的巷道围岩分类法[J]. 岩土工程学报, 1998, **20**(3): 23 - 26. (YANG Xin-an, HUANG Hong-wei. Ratio of internal to external deformation of surrounding rocks and a new kind of classification for tunnel surrounding rocks[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1998, **20**(3): 23 - 26. (in Chinese))
- [6] 宋 丽, 廖红建, 韩 剑. 软岩三维弹黏塑性本构模型[J]. 岩土工程学报, 2009, **31**(1): 83 - 88. (SONG Li, LIAO Hong-jian, HAN Jian. Three-dimensional nonlinear elastic viscoplastic constitutive model of soft rock[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, **31**(1): 83 - 88. (in Chinese))
- [7] 王连国, 李明远, 王学智. 深部高应力极软岩巷道锚注支护技术研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, **24**(16): 2889 - 2893. (WANG Lian-guo, LI Ming-yuan, WANG Xue-zhi. Study on mechanisms and technology for bolting and grotting in special soft rock roadways under high stress[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, **24**(16): 2889 - 2893. (in Chinese))
- [8] 范秋雁, 阳克青, 王渭明. 泥质软岩蠕变机制研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, **29**(8): 1555 - 1561. (FAN Qiu-yan, YANG Ke-qing, WANG Wei-ming. Study of creep mechanism of argillaceous soft rocks[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, **29**(8): 1555 - 1561. (in Chinese))
- [9] 刘泉生, 卢兴利. 煤矿深部巷道破裂围岩非线性大变形及支护对策研究[J]. 岩土力学, 2010, **31**(10): 3273 - 3279. (LI Quan-sheng, LU Xing-li. Research on nonlinear large deformation and support measures for broken surrounding rocks of deep coal mine roadway[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, **31**(10): 3273 - 3279. (in Chinese))
- [10] 陆银龙, 王连国, 张 蓓, 等. 软岩巷道锚注支护时机优化研究[J]. 岩土力学, 2012, **33**(5): 1395 - 1401. (LU Yin-long, WANG Lian-guo, ZHANG Bei, et al. Optimization of bolt-grouting time for soft rock roadway[J]. Rock and soil Mechanics, 2012, **33**(5): 1395 - 1401. (in Chinese))
- [11] 毕心祝, 吕凡任, 谢广祥. 锚注软岩巷道流变研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, **22**(2): 297 - 303. (BI Xin-zhu, LÜ Fan-ren, XIE Guang-xiang. Rheological study on bolt-grouting supported roadways in soft rock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, **22**(2): 297 - 303. (in Chinese))
- [12] 王连国, 张 建, 李海亮. 软岩巷道锚注支护结构蠕变分析[J]. 中国矿业大学学报, 2009, **38**(5): 607 - 612. (WANG Lian-guo, ZHANG Jian, LI Hai-liang. A creep analysis of a bolt-grouting support structure within a soft rock roadway[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2009,

38(5): 607 - 612. (in Chinese))

- [13] 刘全林, 杨敏. 软弱围岩巷道锚注支护机理及其变形分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(8): 1158 - 1161. (LIU Quan-lin, YANG Min. Analysis on deformation of surrounding rock masses of runnel using bolt-grouting support and its mechanism[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(8): 1158 - 1161. (in Chinese))
- [14] 侯公羽, 李晶晶, 裘彬, 等. 恒载作用下轴对称圆巷围岩的流变变形方程求解[J]. 岩土力学, 2011, 32(2): 341 - 346. (HOU Gong-yu, LI Jing-jing, QIU Bin, et al. Solving equation of rheological deformation in axisymmetric round well under dead load[J]. Rock and soil Mechanics, 2011,

32(2): 341 - 346. (in Chinese))

- [15] 贾乃文. 黏塑性力学及工程应用[M]. 北京: 地震出版社, 2000. (JIA Nai-wen. Viscoplasticity mechanics and engineering applications[M]. Beijing: Earthquake Press, 2000. (in Chinese))
- [16] 侯公羽, 牛晓松. 基于 Levy-Mises 本构关系及 D-P 屈服准则的轴对称圆巷理想弹塑性解[J]. 岩土力学, 2009, 30(6): 1555 - 1562. (HOU Gong-yu, NIU Xiao-song. Perfect elastoplastic solution of axisymmetric circular openings in rock mass based on Levy-Mises constitutive relation and D-P yield criterion[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(6): 1555 - 1562. (in Chinese))

### 2013 年第六届国际环境振动学术研讨会 2013 年 11 月 8~10 日, 中国 上海

第六届国际环境振动学术研讨会将于 2013 年 11 月 8~10 日在同济大学举办。本届会议致力于环境振动的预测、控制和减振技术措施研究, 旨在为环境振动的研究、发展和应用提供一个良好的国际学术交流平台。作为一个系列召开的国际学术会议, 前五届分别由浙江大学(杭州, 2003)、日本冈山大学(冈山, 2005)、台湾大学(台北, 2007)、北京交通大学(北京, 2009)、西南交通大学(成都, 2011)主办。会议将特邀国内外著名专家作最新研究成果和工程应用的报告。

**会议主题:** 地基中波的传播; 土 - 结构动力相互作用; 土动力学和土 - 结构动力相互作用的数值模拟; 环境振动的预测和模拟; 环境振动的现场试验和监测; 铁路轨道和车辆的动力学模拟; 振动引起的沉降; 地基、地下结构和高架桥等的振动分析; 车辆等引起的结构振动的监测、评价和控制; 减小移动车辆等引起的环境振动影响的措施; 铁路、地铁、地面道路和人行天桥的结构安全性及适用性评价。

**征文要求:** 提交 300 字的英文摘要, 包括题目、作者姓名、单位、联系方式、论文的主要内容和结论。为便于审稿, 要求全文和摘要以电子邮件方式提交。所有录用论文均安排会议发言。摘要截止日期: 2013 年 2 月 10 日, 摘要录用日期: 2013 年 3 月 10 日, 论文提交日期: 2013 年 5 月 30 日, 全文录用日期: 2013 年 6 月 30 日, 会议日期: 2013 年 11 月 8~10 日。

论文摘要发至 E-mail: [isev2013@gmail.com](mailto:isev2013@gmail.com)。此次会议的论文集将公开发售, 所有录用论文将送 ISTP 检索。有关本次会议的详细信息请查看网站 <http://geotec.tongji.edu.cn/isev2013> 的论文征集通知。

#### ISEV2013 组委会

会议主席: 高广运教授, 联合主席: Tutumluer E. 教授, 陈云敏教授, 秘书长: 冯世进教授, 同济大学土木工程学院地下建筑与工程系, 上海四平路 1239 号, 邮编 200092, 电话: 021-65988575, 传真: 021-65985210。

(会议组委会 供稿)