

文章编号:1673-2049(2010)01-0078-06

基于统一强度理论的有压巷道 覆盖岩层厚度计算

李天华,魏雪英,赵均海,孔 巍

(长安大学 建筑工程学院,陕西 西安 710061)

摘要:基于统一强度理论对有压巷道围岩应力进行了弹塑性分析,通过控制塑性区半径,推导出有压巷道覆盖岩层最小厚度的计算公式,当考虑不同中间主应力的影响时,用该公式可计算出一系列的覆盖岩层厚度;在实际工程中可以根据岩石性质试验确定中间主应力参数,得出合理的覆盖岩层最小厚度,从而合理地设计巷道。分析结果表明:该公式考虑了拉压强度差效应和中间主应力的影响,可以退化为其他围岩条件或其他强度理论条件下的覆盖岩层厚度的计算公式,具有较强的实用价值。

关键词:巷道围岩;覆盖岩层厚度;弹塑性分析;统一强度理论;中间主应力

中图分类号:TU452 **文献标志码:**A

Overlying Rock Thickness Calculation of Roadway with Pressure Based on Unified Strength Theory

LI Tian-hua, WEI Xue-ying, ZHAO Jun-hai, KONG Wei

(School of Civil Engineering, Chang'an University, Xi'an 710061, Shaanxi, China)

Abstract: The elasto-plastic analysis for the stress of surrounding rock of roadway with pressure was carried out based on unified strength theory. By controlling the radius of plastic zone, the formula of the minimum overlying rock thickness was deduced. The effect of the intermediate principal stress on the material strength and the effect of strength difference in tension and compression were considered in the obtained formula. A series of overlying rock thicknesses could be obtained by defining the coefficient of intermediate principal stress. In practical engineering, the proper coefficient of intermediate principal stress could be obtained according to the experiment results of rock, and the minimum overlying rock thickness could be reasonably determined, furthermore, the roadway could be designed reasonably. The analytical results show that the formula considers the strength difference in tension and compression and intermediate principal stress, and the formula can be degenerated into the formula under other surrounding rock conditions or other strength theories. It has a good practicality.

Key words: surrounding rock of roadway; overlying rock thickness; elasto-plastic analysis; unified strength theory; intermediate principal stress

收稿日期:2009-10-11

基金项目:教育部高等学校博士学科点专项科研基金项目(20040710001);陕西省自然科学基金研究计划项目(SJ08E2 04)

作者简介:李天华(1985-),女,河北迁安人,工学博士研究生,E-mail:lizi2801@tom.com。

0 引言

地下水平圆形巷道常因其内部储存和输送水、气而受到一定的内压力作用,对巷道顶部产生上托力,该上托力不仅使巷道围岩产生塑性变形,形成塑性圈,严重时会使上部覆盖的岩层托起或掀翻,而且覆盖层最小厚度^[1]是确定巷道长度、影响工程造价和施工时上部岩层稳定性和安全性的主要因素^[2-4],因此在有压巷道的设计中必须考虑 2 个问题:①当巷道内压力一定时,巷道不被掀起的覆盖岩层最小厚度的确定;②当巷道上部覆盖岩层的厚度一定,覆盖岩层不被掀起时,巷道内压力最大值的确定。

以往的研究中,岩土类材料的屈服准则大多采用 Mohr-Coulomb 强度准则或 Drucker-Prager 准则。Mohr-Coulomb 强度准则没有考虑中间主应力对屈服的影响,而中间主应力对岩土类材料的屈服有明显的影响^[5-8],实际的工程大多处于三向应力状态,且在地下隧道、巷道等岩土工程中中间主应力的影响是非常显著的。Drucker-Prager 准则则认为 3 个主应力的影响是相同的,这也与实际不符。而俞茂宏等^[9]提出的统一强度理论能够合理地考虑拉压强度差、中间主应力效应等,从而被用于很多领域,特别在岩土工程^[10]中,已取得了很好的效果。

研究^[11-19]表明:巷道围岩上部覆盖层的最小厚度往往是通过控制围岩的塑性半径来控制的。在 Jeager 的研究中将深埋巷道简化为不受外界作用的厚壁圆筒,忽略了深埋巷道所处的应力环境。

笔者采用统一强度理论,克服以往理论不考虑岩土类材料拉压强度不等的特性及中间主应力影响的缺点,考虑深埋巷道的内压力和外界初始应力,以弹塑性理论推导出了有压巷道塑性区的应力、半径及上部覆盖岩层最小厚度的计算公式,并以一实例说明其应用。

1 统一强度理论

统一强度理论^[20-22]是俞茂宏在 20 世纪 90 年代提出的一种全新的强度理论体系。该理论考虑了中间主应力的影响,适合于拉压强度不等的岩土类材料,用主应力形式表达的统一强度理论为

$$\left. \begin{aligned} F &= \sigma_1 - \frac{\alpha}{1+b} (b\sigma_2 + \sigma_3) = f_t & \sigma_2 \leq \frac{\sigma_1 + \alpha\sigma_3}{1+\alpha} \\ F' &= \frac{1}{1+b} (\sigma_1 + b\sigma_2) - \alpha\sigma_3 = f_c & \sigma_2 \geq \frac{\sigma_1 + \alpha\sigma_3}{1+\alpha} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中: F 、 F' 为主应力强度理论函数; σ_1 、 σ_2 、 σ_3 分别为

单元体的最大主应力、中间主应力和最小主应力; f_t 为材料的拉伸强度; α 为材料的拉压强度比, $\alpha = f_t/f_c$; f_c 为材料的压缩强度,对于岩土类材料, α 一般小于 0.5; b 为统一强度理论引进的影响系数,反映中间主应力对材料屈服的影响程度,实际上也可作为选用不同屈服准则的参数,故被称为屈服准则系数, $0 \leq b \leq 1$ 。

在岩土工程中,常用粘聚力 c 和内摩擦角 φ 作为材料的基本参数,统一强度理论可以表示为

$$\left. \begin{aligned} \sigma_1 - \frac{b\sigma_2 + \sigma_3}{1+b} + (\sigma_1 + \frac{b\sigma_2 + \sigma_3}{1+b}) \sin \varphi &= 2c \cos \varphi \\ \sigma_2 &\leq \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} + \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \sin \varphi \\ \frac{\sigma_1 + b\sigma_2}{1+b} - \sigma_3 + (\frac{\sigma_1 + b\sigma_2}{1+b} + \sigma_3) \sin \varphi &= 2c \cos \varphi \\ \sigma_2 &\geq \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} + \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \sin \varphi \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

2 基本假设和计算模型

2.1 基本假设

岩石是一种结构十分复杂多变的材料,为了能够较理想地应用岩土类材料的统一强度理论,现给出如下假设^[23]:①巷道围岩为均质的、各向同性的连续介质;②巷道围岩为坚硬无裂缝岩体;③只考虑由自重产生的初始应力场和内压力的联合作用;④巷道截面为圆形,位于一定深度;⑤不考虑围岩的时间效应和围岩自重对屈服的影响,并将问题简化为轴对称的平面应变问题,用极坐标应力求解。

2.2 计算模型

有压巷道覆盖岩层和巷道围岩应力分别如图 1、2 所示,其中, H 为巷道的埋深,即巷道中心到地面的距离; h 为上部覆盖岩层的厚度,即巷道顶到地面的距离; P_1 为巷道内压力,沿径向均匀分布; r_0 为圆形巷道半径; r_p 为塑性区半径。巷道围岩由内向外可分为塑性区 I、弹性区 II 和原岩应力区。

取塑性区单元,其应力为沿巷道半径的径向应力 σ_r 和垂直半径的切向应力 σ_θ ; 设 λ 为侧压系数,表示初始垂直应力 P_v 和初始水平应力 P_h 的比值,当 $\lambda = 1$ 时, $P_h = P_v = \gamma H$,巷道周边围岩各点应力均相同, γ 为巷道围岩的重度。

3 塑性区半径计算公式的推导

3.1 塑性区应力

将 $\sigma_2 = \frac{m}{2} (\sigma_1 + \sigma_3)$ ^[24]代入式(2),整理得

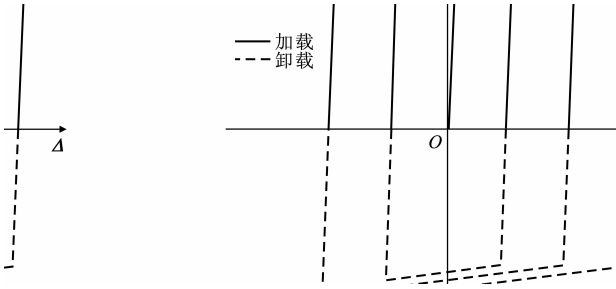


图 1 巷道覆盖岩层

图 2 巷道围岩应力

Fig. 1 Overlying
Rock of RoadwayFig. 2 Stress of Roadway
Surrounding Rock

$$\left. \begin{aligned} \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} &= -\frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} \sin \varphi_t + c_t \cos \varphi_t \\ \sin \varphi_t &= \frac{b(1-m) + (2+b+bm) \sin \varphi}{2+b+b \sin \varphi} \\ c_t &= \frac{2(1+b)c \cos \varphi}{(2+b+b \sin \varphi) \cos \varphi} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中: φ_t 为材料统一内摩擦角; c_t 为材料统一内粘聚力; m 为中间主应力参数, 可以通过理论和试验来确定, 在弹性区可以取 $m=2\mu$, μ 为泊松比, 在塑性区可取 $m=1$ 。

由于运行期巷道内压力较大时巷道围岩应力会超出弹性范围, 产生弹性变形, 形成以 r_p 为半径的塑性区, 塑性区以外的仍为弹性区。巷道内压力较大时, 径向应力(压应力)数值较大, 以拉应力为正, 有 $\sigma_\theta > \sigma_z > \sigma_r$, σ_z 为轴向应力。结合平面应变条件得出 $\sigma_1 = \sigma_\theta$, $\sigma_3 = \sigma_r$, $\sigma_2 = \sigma_z = \frac{\sigma_r + \sigma_\theta}{2}$ 满足 $\sigma_2 = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} \leq \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_3) + \frac{\sin \varphi}{2}(\sigma_1 - \sigma_3)$ 的条件, 因此塑性区的应力符合统一强度理论式(2)。将相应的 σ_1 、 σ_2 、 σ_3 代入式(3)得

$$\frac{\sigma_\theta - \sigma_r}{2} = -\frac{\sigma_\theta + \sigma_r}{2} \sin \varphi_t + c_t \cos \varphi_t \quad (4)$$

即

$$\sigma_\theta = \frac{1 - \sin \varphi_t}{1 + \sin \varphi_t} \sigma_r + \frac{2c_t \cos \varphi_t}{1 + \sin \varphi_t} \quad (5)$$

将式(5)代入平衡方程^[25]

$$\frac{d\sigma_r}{dr} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} = 0 \quad (6)$$

解得

$$\sigma_r = Dr^{\frac{-2 \sin \varphi_t}{1 + \sin \varphi_t}} + c_t \cot \varphi_t \quad (7)$$

式中: D 为系数; r 为半径。

将边界条件 $r=r_0$, $\sigma_r = -P_1$ 代入式(7)得

$$D = -(P_1 + c_t \cot \varphi_t) r_0^{\frac{-2 \sin \varphi_t}{1 + \sin \varphi_t}}$$

由此得塑性区径向应力 σ_r^p 为

$$\sigma_r^p = c_t \cot \varphi_t - (P_1 + c_t \cot \varphi_t) \left(\frac{r}{r_0} \right)^{\frac{-2 \sin \varphi_t}{1 + \sin \varphi_t}} \quad (8)$$

将式(8)代入式(5)得塑性区切向应力 σ_θ^p 为

$$\sigma_\theta^p = \frac{1 - \sin \varphi_t}{1 + \sin \varphi_t} [c_t \cot \varphi_t - (P_1 + c_t \cot \varphi_t) \left(\frac{r}{r_0} \right)^{\frac{-2 \sin \varphi_t}{1 + \sin \varphi_t}}] + \frac{2c_t \cot \varphi_t}{1 - \sin \varphi_t} \quad (9)$$

3.2 塑性区半径

巷道围岩出现塑性区和弹性区的分界面, 这个分界面是半径为 r_p 的圆。弹性区的径向应力 σ_r^e 和切向应力 σ_θ^e 可由Lame公式得到, 即

$$\left. \begin{aligned} \sigma_r^e &= A + \frac{B}{r^2} \\ \sigma_\theta^e &= A - \frac{B}{r^2} \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

式中: A 、 B 为待定系数, 可由边界条件求得。

当巷道内压力 P_1 不太大时, 巷道围岩均处于弹性状态。当 $r \rightarrow +\infty$ 时, $\sigma_\theta^e = -\gamma H$, 得 $A = -\gamma H$; 当 $r=r_0$ 时, $\sigma_r^e = -P_1$, 得 $B = (-P_1 + \gamma H)r_0^2$ 。

将 A 、 B 代入式(10), 得巷道围岩的弹性区应力分量分别为

$$\sigma_r^e = -\gamma H + (\gamma H - P_1) \left(\frac{r_0}{r} \right)^2 \quad (11)$$

$$\sigma_\theta^e = -\gamma H - (\gamma H - P_1) \left(\frac{r_0}{r} \right)^2 \quad (12)$$

当巷道内压力 P_1 较大时, 巷道围岩会出现塑性变形, 形成一定范围的塑性区。对于塑性区以外为弹性区, 当 $r \rightarrow +\infty$ 时, $\sigma_\theta^e = -\gamma H$, 得 $A = -\gamma H$; 当 $r=r_p$ 时, $\sigma_r^e = \sigma_r^p$, 由式(8)、(10)得 $B = [\gamma H + c_t \cot \varphi_t - (P_1 + c_t \cot \varphi_t) \left(\frac{r_p}{r_0} \right)^{\frac{-2 \sin \varphi_t}{1 + \sin \varphi_t}}] r_p^2$ 。

将 A 、 B 代入式(10), 得到巷道围岩的弹性区应力分量分别为

$$\sigma_r^e = -\gamma H + [\gamma H + c_t \cot \varphi_t - (P_1 + c_t \cot \varphi_t) \left(\frac{r_p}{r_0} \right)^{\frac{-2 \sin \varphi_t}{1 + \sin \varphi_t}}] \left(\frac{r_p}{r} \right)^2 \quad (13)$$

$$\sigma_\theta^e = -\gamma H - [\gamma H + c_t \cot \varphi_t - (P_1 + c_t \cot \varphi_t) \left(\frac{r_p}{r_0} \right)^{\frac{-2 \sin \varphi_t}{1 + \sin \varphi_t}}] \left(\frac{r_p}{r} \right)^2 \quad (14)$$

联立式(9)和式(14), 在 $r=r_p$ 处利用切向应力相等的连续条件, 得塑性区半径为

$$r_p = r_0 \left[\frac{(\gamma H + c_t \cot \varphi_t)(1 + \sin \varphi_t)}{P_1 + c_t \cot \varphi_t} \right]^{\frac{1 + \sin \varphi_t}{-2 \sin \varphi_t}} \quad (15)$$

当 $b=0$ 时, 塑性区半径可退化为 Mohr-Coulomb 强度准则下的塑性区半径; 当 $b=1$ 时, 得到广义双剪强度准则下的塑性区半径。由此可以看出,

运行期塑性区半径与巷道半径、巷道内压力、原岩应力、巷道埋深、岩土类材料本身的性质及中间主应力有关。

3.3 边界应力

在求解弹性区、塑性区边界 $r=r_p$ 上的径向应力时,边界上的径向应力符合统一强度理论式(3)。令 $\sigma_1=\sigma_\theta(r_p),\sigma_3=\sigma_r(r_p)$,将其代入式(3),得

$$\frac{\sigma_\theta(r_p)-\sigma_r(r_p)}{2}=-\frac{\sigma_\theta(r_p)+\sigma_r(r_p)}{2}\cdot\sin\varphi_t+c_t\cos\varphi_t\tag{16}$$

当 $r=r_p$ 时,由式(13)、(14)得

$$\sigma_\theta(r_p)=-2\gamma H-\sigma_r(r_p)\tag{17}$$

将式(17)代入式(16)得弹性区、塑性区边界径向应力为

$$\sigma_r(r_p)=-\gamma H(1+\sin\varphi_t)-c_t\cos\varphi_t\tag{18}$$

4 覆盖岩层厚度计算公式的推导

4.1 塑性变形

当 $r_p=r_0$ 时,由式(18)可知出现塑性破坏的前提是,内压力 P_1 必须小于或等于弹塑性边界上的径向应力 $|\sigma_r(r_p)|$,即

$$P_1\leqslant\gamma H(1+\sin\varphi_t)+c_t\cos\varphi_t\tag{19}$$

由式(20)可求得巷道壁刚开始出现塑性变形时的巷道埋深 H 满足的条件,即

$$H\geqslant\frac{P_1-c_t\cos\varphi_t}{\gamma(1+\sin\varphi_t)}\tag{20}$$

覆盖岩层最小厚度 h_{\min} 为

$$h_{\min}=H_{\min}-r_0=\frac{P_1-c_t\cos\varphi_t}{\gamma(1+\sin\varphi_t)}-r_0\tag{21}$$

式中: H_{\min} 为巷道的最小埋深。

式(21)考虑了岩石的粘聚力、内摩擦角及中间主应力的影响,均在统一粘聚力和统一内摩擦角中体现。给定岩石的材料参数 c,φ 和中间主应力参数 b 时,可求得相应的覆盖岩层最小厚度。

当 $b=0$ 时,由式(21)得 Mohr-Coulomb 强度准则下的覆盖岩层最小厚度为

$$h_{\min}=H_{\min}-r_0=\frac{P_1-c\cos\varphi}{\gamma(1+\sin\varphi)}-r_0\tag{22}$$

式(22)未考虑中间主应力的影响。

当 $b=0,\varphi_t$ 趋于 0 时,可由 Tresca 屈服准则得到覆盖岩层最小厚度为

$$h_{\min}=H_{\min}-r_0=\frac{P_1-c}{\gamma}-r_0\tag{23}$$

式(23)未考虑岩石的内摩擦效应和中间主应力的影响。由 Mohr-Coulomb 强度准则和 Tresca 屈

服准则得到的计算公式均是由统一强度理论得到的计算公式的特例。

4.2 控制塑性区半径

在确定塑性区半径后,由式(8)可求得弹塑性边界条件 $r=r_p$ 上的径向应力 $\sigma_r(r_p)$,将其代入式(18),可得巷道埋深 H 为

$$H=\frac{-\sigma_r(r_p)-c_t\cos\varphi_t}{\gamma(1+\sin\varphi_t)}\tag{24}$$

覆盖岩层厚度为

$$h=H-r_0=\frac{-\sigma_r(r_p)-c_t\cos\varphi_t}{\gamma(1+\sin\varphi_t)}-r_0\tag{25}$$

5 算例分析

某砂岩岩体的粘聚力 $c=0.2\text{ MPa}$,内摩擦角 $\varphi=20^\circ$,岩体的重度 $\gamma=27\text{ kN}\cdot\text{m}^{-3}$,假定原岩的侧压系数 $\lambda=1$ (水平应力等于垂直应力),在该岩体中开挖一个半径为 $r_0=3\text{ m}$ 的水平输水巷道,内压力为 $P_1=2\text{ MPa}$,以此确定该巷道覆盖岩层最小厚度。当塑性区半径 $r_p=6\text{ m}$ 时,其覆盖岩层厚度为:

(1)已知 $c=0.2\text{ MPa},\varphi=20^\circ,P_1=2\text{ MPa}$,代入式(21),取中间主应力系数 $b=0.4$,得巷道覆盖岩层最小厚度 $h_{\min}=56.15\text{ m}$,文献[11]中 $h_{\min}=57\text{ m}$ 。

(2)已知 $c=0.2\text{ MPa},\varphi=20^\circ,r_p=6\text{ m}$,代入式(8),取中间主应力系数 $b=0.33$,求出 $\sigma_r(r_p)$,再代入式(25),得覆盖岩层厚度 $h=37.05\text{ m}$ 。

由式(21)分别计算当 $\varphi=20^\circ、24^\circ、28^\circ、32^\circ、36^\circ$ 时,中间主应力系数 $b=0.33、0.40、0.47$ 对应的覆盖岩层最小厚度 h_{\min} ,结果见表 1。

表 1 不同 φ 值对应的覆盖岩层最小厚度
Tab. 1 Minimum Overlying Rock Thicknesses with Drfferent φ

$\varphi/(^{\circ})$		20	24	28	32	36	
α		0.490	0.422	0.361	0.307	0.260	
不同主应力系数下的	0.33	50.97	48.47	46.30	44.40	42.74	
	0.40	50.77	48.28	46.12	44.24	42.60	
h_{\min}/mm		0.47	50.56	48.11	45.96	44.09	42.47

表 2 为中间主应力系数 $b=0、0.2、0.4、0.6、0.8、1.0$ 对应的覆盖岩层最小厚度 h_{\min} 。

表 2 $\varphi=20^\circ$ 时覆盖岩层最小厚度计算结果
Tab. 2 Calculation Results of Minimum Overlying Rock Thicknesses when $\varphi=20^\circ$

b	0.0	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0
h_{\min}/m	52.2	51.39	50.77	50.28	49.89	49.56

6 结 语

(1) 基于统一强度理论和弹塑性理论对地下埋深有压巷道在运行期时的巷道围岩进行了应力分析, 得出了塑性区应力、塑性区半径和覆盖岩层最小厚度的计算公式。该公式考虑了岩石的拉压强度差效应和中间主应力效应, 因此更适合实际工程的岩体情况。

(2) 随着内摩擦角增大、拉压强度比减小, 中间主应力系数增大, 覆盖岩层最小厚度减小。考虑中间主应力效应有助于提高岩体的强度, 有较大的工程实用价值。

(3) 本文中只考虑侧压系数等于 1 的情况, 未考虑巷道空隙水压力等的作用。

参考文献:

References:

- [1] 孙 钧. 海底隧道工程设计施工若干关键技术的商榷[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(8): 1513-1521.
SUN Jun. Discussion on Some Key Technical Issues for Design and Construction of Undersea Tunnels[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(8): 1513-1521.
- [2] 杨家岭, 邱祥波, 陈卫忠, 等. 海峡海底隧道及其最小岩石覆盖厚度问题[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(增1): 2132-2137.
YANG Jia-ling, QIU Xiang-bo, CHEN Wei-zhong, et al. Subsea Tunnel Through Channel and Its Minimum Rock Cover [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22 (S1): 2132-2137.
- [3] 王培勇, 刘元雪, 刘亚辉, 等. 水下隧道合理覆盖层厚度的有限元模拟研究[J]. 现代隧道技术, 2007, 44(2): 5-9.
WANG Pei-yong, LIU Yuan-xue, LIU Ya-hui, et al. FEM Adopted to Determine the Reasonable Overburden Thickness for a Subaqueous Tunnel[J]. Modern Tunnelling Technology, 2007, 44(2): 5-9.
- [4] 张 欣, 李术才. 爆破荷载作用下青岛胶州湾海底隧道覆盖岩层稳定性分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(11): 2348-2355.
ZHANG Xin, LI Shu-cai. Stability Analysis of Rock Cover of Qingdao Kiaochow Bay Subsea Tunnel Under Explosive Loads [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(11): 2348-2355.
- [5] 许东俊, 耿乃光. 岩石强度随中间主应力变化规律[J]. 固体力学学报, 1985, 6(1): 72-80.
XU Dong-jun, GENG Nai-guang. The Variation Law of Rock Strength with Increase of Intermediate Principal Stress [J]. Chinese Journal of Solid Mechanics, 1985, 6(1): 72-80.
- [6] SINGH B, GOEL R K, MEHROTRA V K, et al. Effect of Intermediate Principal Stress on Strength of Anisotropic Rock Mass [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 1998, 13(1): 71-79.
- [7] 刘汉东, 曹 杰. 中间主应力对岩体力学特性影响的试验研究[J]. 人民黄河, 2008, 30(1): 59-60.
LIU Han-dong, CAO Jie. Test and Study on Influence of Intermediate Main Stress to Characteristic of Rock Mechanics [J]. Yellow River, 2008, 30(1): 59-60.
- [8] 咎月稳, 吉嶺充俊, 俞茂宏, 等. 岩石强度理论与岩石强度试验的关系[C]//中国岩石力学与工程学会. 中国岩石力学与工程学会第七次学术大会论文集. 北京: 中国科学技术出版社, 2002: 117-120.
ZAN Yue-wen, MITSUTOSHI Y, YU Mao-hong, et al. Relationship Between Rock Strength Theory and Strength Test [C]//Chinese Society of Rock Mechanics and Engineering. Proceedings of the 7th Rock Mechanics and Engineering Conference. Beijing: China Science and Technology Press, 2002: 117-120.
- [9] YU Mao-hong, HE Li-nan. A New Model and Theory on Yield and Failure of Materials Under Complex Stress State [M]. Oxford: Pergamon Press, 1991: 841-846.
- [10] 俞茂宏. 岩土类材料的统一强度理论及其应用[J]. 岩土工程学报, 1994, 16(2): 1-10.
YU Mao-hong. Unified Strength Theory for Geomaterials and Its Applications [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1994, 16(2): 1-10.
- [11] 宋建波, 刘 宏. 基于经验强度准则的有压隧洞覆岩厚度计算[J]. 矿业研究与开发, 2005, 25(5): 33-36.
SONG Jian-bo, LIU Hong. Calculation of Overlay Strata Thickness of the Tunnel with Pressure Based on the Experienced Strength Criterion [J]. Mining Research and Development, 2005, 25(5): 33-36.
- [12] 宋建波, 窦丽云. 经验强度准则确定有压隧洞上覆岩层最小厚度的方法[J]. 地球与环境, 2004, 32(2): 78-82.
SONG Jian-bo, DOU Li-yun. Method of Determining Overlying Strata Minimum Thickness of Tunnel in Hydraulic Engineering with Hoek-Brown Strength Criterion [J]. Earth and Environment, 2004, 32(2): 78-82.
- [13] 徐志英. 岩石力学 [M]. 3 版. 北京: 中国水利水电出版社, 2001.

- XU Zhi-ying. Rock Mechanics[M]. 3rd ed. Beijing: China Water Power Press, 2001.
- [14] 邵小平, 石平五, 张嘉凡. 亚急斜煤层采空场覆岩变形破坏数值与相似模拟[J]. 西安科技大学学报, 2008, 28(2): 249-253.
- SHAO Xiao-ping, SHI Ping-wu, ZHANG Jia-fan. Numerical Simulation and Similarity Simulation of Overburden Deformation in Abandoned Stope in Mining Sub-steep Seams[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2008, 28(2): 249-253.
- [15] 段王拴, 高喜才, 窦娟. 坚硬特厚煤层综放工作面覆岩破坏运动规律[J]. 西安科技大学学报, 2008, 28(2): 211-214.
- DUAN Wang-shuan, GAO Xi-cai, DOU Juan. Law of Movement and Fracture of Overburden Strata of Fully-mechanized Top-coal Caving Face in the Hard and Thick Coal Seam[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2008, 28(2): 211-214.
- [16] 王贵虎, 何廷峻. 高承压水体上开采底板岩层变形特征研究[J]. 西安科技大学学报, 2007, 27(3): 359-363, 400.
- WANG Gui-hu, HE Ting-jun. Coal Floor Movement Damage Character for Mining on the Top of Water-pressured[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2007, 27(3): 359-363, 400.
- [17] 张永兴, 饶泉宇, 唐树名, 等. 预应力锚索注浆体与岩石黏结界面抗剪强度试验[J]. 中国公路学报, 2008, 21(6): 1-6.
- ZHANG Yong-xing, RAO Xiao-yu, TANG Shu-ming, et al. Experiment on Shear Strength of Cementation Plane Between Grout and Rock in Prestressed Anchor[J]. China Journal of Highway and Transport, 2008, 21(6): 1-6.
- [18] 来弘鹏, 林永贵, 谢永利, 等. 不同应力场下软弱围岩公路隧道的力学特征试验[J]. 中国公路学报, 2008, 21(4): 81-87.
- LAI Hong-peng, LIN Yong-gui, XIE Yong-li, et al. Mechanical Characteristic Tests of Soft-weak Surrounding Rock Highway Tunnel Under Different Stress Fields[J]. China Journal of Highway and Transport, 2008, 21(4): 81-87.
- [19] 夏永旭, 王文正, 胡庆安. 公路双连拱隧道施工过程中中隔墙的变形及稳定性[J]. 中国公路学报, 2007, 20(5): 83-88.
- XIA Yong-xu, WANG Wen-zheng, HU Qing-an. Deformation and Stability of Mid-board in Process of Highway Double-arch Tunnel Construction[J]. China Journal of Highway and Transport, 2007, 20(5): 83-88.
- [20] 俞茂宏. 双剪强度理论及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 1998.
- YU Mao-hong. Twin Shear Strength Theory and Its Application[M]. Beijing: Science Press, 1998.
- [21] 俞茂宏. 工程强度理论[M]. 北京: 高等教育出版社, 1999.
- YU Mao-hong. Engineering Strength Theory[M]. Beijing: Higher Education Press, 1999.
- [22] YU Mao-hong. Unified Strength Theory and Applications[M]. Berlin: Springer-Verlag, 2004.
- [23] 翟所业, 贺宪国. 巷道围岩塑性区的德鲁克-普拉格准则解[J]. 地下空间与工程学报, 2005, 1(2): 223-226.
- ZHAI Suo-ye, HE Xian-guo. Solution of D-P Criterion of Plastic District of Surrounding Rock of Roadway[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2005, 1(2): 223-226.
- [24] 俞茂宏, 杨松岩, 刘春阳, 等. 统一平面滑移线场理论[J]. 土木工程学报, 1997, 30(2): 14-26.
- YU Mao-hong, YANG Song-yan, LIU Chun-yang, et al. Unified Plane-strain Slip Line Field Theory System[J]. China Civil Engineering Journal, 1997, 30(2): 14-26.
- [25] 郑颖人, 沈珠江, 龚晓南. 岩土塑性力学原理[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002.
- ZHENG Ying-ren, SHEN Zhu-jiang, GONG Xiaonan. Principles of Geotechnical Plastic Mechanics[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2002.