

喷锚支护与隧道自承拱的机理 Mechanism of grouted rockbolting and self-supporting arch of tunnels

孙河川¹, 张 廖², 施仲衡¹

(1. 北京交通大学 城市轨道交通研究中心, 北京 100044; 2. 总参工程兵第四设计研究院, 北京 100850)

摘要: 为了使岩石隧洞拱部稳定, 喷锚支护被广泛用于地下隧洞的支撑设计中。正确的喷锚支护设计应该基于对喷锚支护加固的特性和洞顶岩石拱结构的机理两方面都有一个清楚的认识。为此, 以三峡工程地下厂房拱顶设计为例, 研究洞顶岩石拱结构形成及加固机理。

关键词: 喷锚; 自承拱; 水平地应力; 拱形; 拱圈

中图分类号: TU 457; TV554

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2004)04-0490-05

作者简介: 孙河川(1968-), 男, 博士生, 高级工程师, 铁道部青年科技拔尖人才。现从事城轨设计及科研工作。

SUN He-chuan¹, ZHANG Ao², SHI Zhong-heng¹

(1. Urban Rapid Rail Transit Research Center, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China; 2. The Forth Design and Research Institute, Engineering Department, General Staff, PLA, Beijing 100850, China)

Abstract: To stabilize roof arches of rock tunnel, grouted rockbolts were widely used in the designs of supports of the underground tunnels. A proper design of rockbolts should be based on a clear understanding of both the features of rockbolt reinforcement and the mechanism of the rock roof arch structure. For this purpose the mechanism of forming a rock tunnel roof arch and reinforcement will be illustrated with the underground powerhouse in The Three Gorges Project.

Key words: grouted rockbolting; self-supporting arch; in situ horizontal stress; shape of arch; arch ring

0 引言*

为稳定岩体, 世界各地都在使用喷锚支护。因为锚杆便宜, 可灵活应用于改善地下隧洞的地质条件, 设置容易、快捷。喷锚支护为现代岩石支承系统做出了贡献, 它是基于帮助围岩形成自承岩石结构, 就像自然岩洞拱顶。正确的喷锚设计应基于对喷锚加固的特性和洞顶岩石拱结构的机理两方面都有个清楚的认识。喷锚支护可提高围岩的抗压强度, 激发围岩的自承能力, 提高岩石接缝或不连续处的剪切强度, 加固松散岩块。

为加强洞顶围岩强度而进行的合理的喷锚设计应该建立在对喷锚效果充分理解的基础上, 即应该清楚岩石结构的机理。洞顶岩体成拱的机理来源于拱桥的砌石拱。砌石拱具有“无限的”耐压强度。但应避免沿着砌块接缝产生的滑动以及拉应力。因此, 在实际的洞顶支撑设计中, 喷锚支护的目的就是阻止岩块沿接缝滑动及出现拉应力, 以形成自承拱。

三峡工程地下电站位于三峡坝址右岸白岩尖山体内部, 主厂房岩锚梁上部跨度为 31.6 m, 下部跨度为 30 m。厂房边墙开挖最大高度为 88.62 m, 长度为 352.6 m, 其中地下厂房部分长度为 280.6 m。其拱顶支撑和稳定将作为本次研究的实例。

1 洞顶成拱及加固机理

本节将阐述砌石拱的形成机理和以古典成拱理论

为基础研究加固拱顶所需要的因素, 分析加固岩洞拱顶机理以鉴别对加固有作用的因素。锚杆设计集中于以加固岩石拱的极限分析为基础的锚杆长度与间距之比, 推导出考虑水平地应力和拱圈厚度的拱推力线方程。

1.1 砌石拱的作用机理

如图 1 所示, Coulomb 在他的关于静力学的论文集中, 按照以下三种假定研究了砌石拱结构的特性: ①砌石没有抗拉强度; ②砌石具有“无限的”抗压强度; ③砌石间不出现滑动破坏。

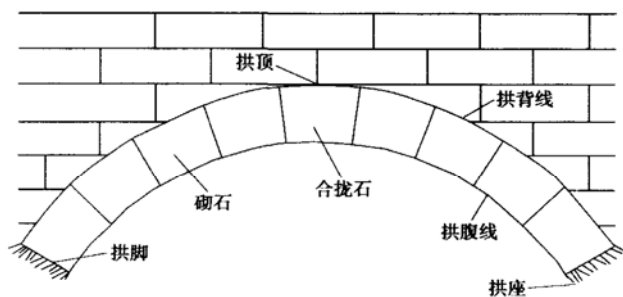


图 1 典型砌石拱

Fig. 1 A typical voussoir arch

砌石拱是由砌块抹上灰泥, 一块一块排列形成拱, 这种建造方式确保这种结构在砌石间不出现拉力和滑动的情况。整个拱的稳定是靠重力作用下砌石间产生的压紧和砌石的高抗压强度形成的。因此, 砌石拱

的作用与砌石材料的特性紧密相关。同时,拱通过其特殊的形状把垂向荷载沿拱的推力线传向拱脚,起到支撑作用。

1.2 岩洞自然成拱机理及应用

洞顶围岩成拱的机理来源于拱桥的砌石拱。在古典拱理论中,还有一个保持拱稳定的更重要的因素就是拱的形状,它甚至比砌石具有“无限的”抗压强度这个特性更重要。文献[1]中指出,结构的稳定性主要靠其形状来决定,不主要依赖其组成材料的坚固性。因此,设计和开挖拱形顶的形状并设法维持是最本质的。

拱桥的砌石拱稳定是靠拱脚处基础提供的强大的反作用力形成的。与砌石拱相似的是,岩石拱的稳定是靠地应力形成的;不同的是,砌石拱拱脚处的反作用力是被动的,而岩体内的地应力是主动的。与砌石拱的建造相比较,岩石拱可以靠挖掘产生,这是因为水平地应力的存在。水平地应力有利于保持岩石拱的形状。

水平地应力直接提高围岩的承载力,紧压岩块形成岩石拱。所以,额外的支撑对于拱的形成可能不是必需的。合理的水平地应力对拱形成时的有利作用是 Gerdeen 等在矿井洞顶锚固的稳定性分析时发现的。

文献[2]中给出了岩石拱形成的根据。一个典型的自承岩石拱形成的实例是 1991 年在挪威建造的奥林匹克(Gjøvik)冰球馆。

此馆跨度为 61 m,高度为 24 m,岩石覆盖层为 25 ~ 50 m。岩体质量(前寒武纪片麻岩)绝对是上等的, Q 值为 4~40。大部分水平地应力大约为 3.5 MPa。最大垂直压应力为 1 MPa,作用于拱顶面以上 5 m 处。预测洞顶最大位移量在 5~10 mm 之间,洞顶变形仪测得的最大变形为 7 mm。值得注意的是,在靠近洞门的地方,由于地应力太大,还发现了一些轻微的抬起(拱向上)。拱顶加固使用了长 6~12 m,间距布置为 2.5 m × 2.5 m 的锚杆和锚索。Broch 等建议用 3~4 m 长的短锚杆作支撑,因为在锚杆上测得的应力很小,且仅仅在锚杆的一定长度上存在。

由此可见,水平地应力和拱的形状是保持岩石拱稳定的两大重要因素。

1.3 洞顶拱加固

由于塑性或弹性区域岩体的挖掘会导致岩体的破坏,另外,岩缝和破碎处产生趋于坠落的松散岩块,也改变了拱顶的几何形状。如果没有足够的支撑和衬砌保护,那么具有侵蚀性的空气和水会进一步加速暴露岩体的破坏。水会产生水压,在不连续断面处增大张力,进一步扩大岩缝,减小岩缝处抗剪强度;岩块间会出现拉应力,进而产生滑动;岩缝或不连续断面在风化

的作用下将减小岩体的耐压强度。所有这些都与成拱机理相矛盾。因此,洞顶加固的目的就是为了阻止这些情况的发生。洞顶喷锚支护或衬砌设计是为了提供围岩压力以提高围岩的力学性能,增大岩体的抗压强度、弹性模量、 c 和 φ 值,消除拉应力,阻止岩块相对滑动,以保证岩体形成一个完整的、被加固的洞顶拱。

假定隧洞顶用锚杆加固后形成了一个加固岩石拱(RRA,如图2中的ABCD),它由相邻的岩石加固单元组成(RRU,如图2中的abcd),假设岩石拱顶是稳定不变的,且岩石加固单元已经变形到了剪应力达到最大的程度。应用 Mohr-Coulomb 压力法则,能够得到在拱顶内表面上的平均压应力^[3]:

$$\sigma_A = \frac{\gamma s (1 - e^{-4fk_0 H/s})}{4fk_0 (1 - e^{-4fk_0 L/s})}, \quad (1)$$

式中 γ 为岩体容重; s 为岩石加固单元宽度; f 为岩体内摩擦系数; k_0 为侧向地应力比值; H 为拱矢高; L 为锚杆长度。

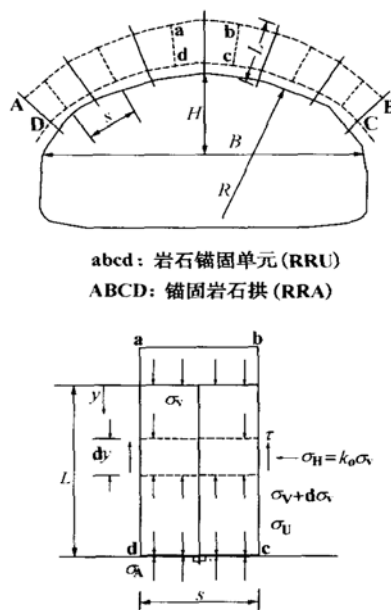


图2 由岩石锚固单元(RRU)组成的锚固岩石拱(RRA)

Fig. 2 Reinforced rock arch (RRA) composed of reinforced rock units (RRU)

一个加固拱单元带有一根锚杆,由锚杆提供的平均围岩压应力 $\sigma_A = T/A$,整理式(1),同时定义一个与锚杆提供的平均围岩压应力等效的岩石高度 $H_s = \sigma_A / \gamma$,得出一个关于围岩压应力的关系式:

$$\begin{aligned} \frac{H_s}{s} &= \frac{T}{A \gamma s} = \frac{1}{4fk_0} \frac{1 - e^{-4fk_0 H/s}}{1 - e^{-4fk_0 L/s}} \\ &= f(H/s, L/s, \varphi, k_0), \end{aligned} \quad (2)$$

式中 H_s 为由锚杆提供的围岩压应力的等效岩石高度; A 为岩石加固单元面积(s^2 指一个锚杆模式的间隔是 $s \times s$); T 为锚杆张力; φ 为岩体内摩擦角。

假定在锚杆设计中取 $H/s = 20$, 那么, 在 $k_0 = 0.6$, $k_0 = 1.0$ 的情况下, H_s/s 随着 L/s 和 φ 的变化就能表示出来(如图 3 所示)。当锚杆密度(L/s)增加到一定范围时, 围岩压应力逐渐减小到极小值。因此, 太长的锚杆对于加固拱顶不一定是有益的。锚杆过长, 其平均应力就会降低, 不能充分发挥效用; 锚杆过短, 难以起到稳定围岩和保护岩体的作用。锚杆长度一般不应超出塑性区范围, 也不应小于围岩松动区厚度。锚杆的长度与间距之比(L/s), 考虑临界安全系数时, 应该大于 2, 考虑系统锚杆的效果时, 应该小于 4。当然, 由坠落的孤石以及楔形体岩石等引起的不稳定情况除外。

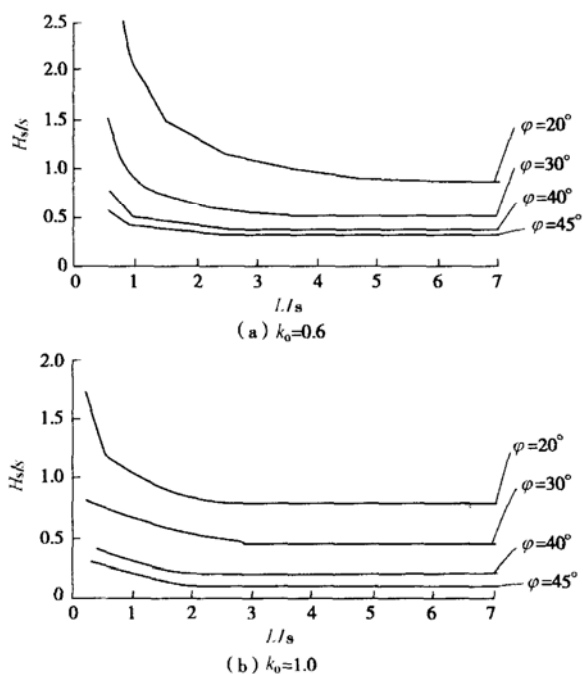


图 3 H_s/s 和 L/s 的关系曲线

Fig. 3 Curves of H_s/s vs L/s

三峡工程地下主厂房的锚杆支撑采用的是 6 m 长的锚杆, 锚杆间距分别为 $3 \text{ m} \times 3 \text{ m}$ 和 $1.5 \text{ m} \times 1.5 \text{ m}$, 因此 L/s 的值分别为 4.0(即 $\frac{6}{1.5}$) 与 2(即 $\frac{6}{3}$), 这是趋于合理的。

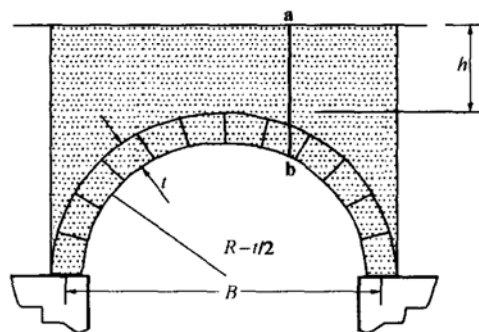
2 拱圈的作用

2.1 拱的推力线

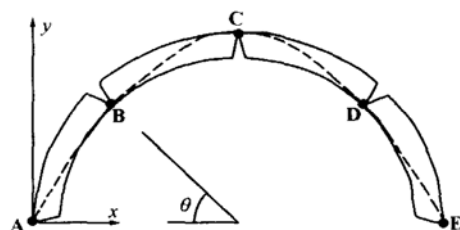
拱圈的作用可以用拱的推力线描述出来。对于一般形状的地下隧洞拱的推力线, 采用极限平衡分析方法即可求得。当拱顶处于静定极限状态时, 推力线的极限位置将通过 A, B, C 三个铰(如图 4 所示)。

垂向荷载 $\gamma q(x)$ 包括拱圈的自重和拱圈以上的由松散岩石形成的对称分布荷载。水平荷载来自于地

应力的水平分量, 并被简化成不变的集中荷载 $k_0 \gamma h H$, 作用于整个拱。 h, H 分别是拱顶以上覆盖层的厚度和拱的矢高, 隧洞纵轴方向按一个单位长度计算。垂向荷载和水平荷载均假定是对称的, 因为非对称荷载通常会形成第四个铰, 并导致拱的坍塌。



(a) 罗马拱模型



(b) 铰位置和推力线模型

图 4 罗马拱模型及其铰位置和推力线模型

Fig. 4 The models of the Roman arch and the locations of its hinges and thrust line

只在垂向荷载的作用下, 拱的左半部分推力线方程为:

$$y = \frac{F_v}{F_H} x - \frac{W_x}{F_H} (x - x_d). \quad (3)$$

在包括水平地应力荷载的作用下, 拱的左半部分推力线方程为:

$$y = \frac{F_v}{F_H} x - \frac{W_x}{F_H} (x - x_b). \quad (4)$$

上两式中: F_v 为拱中推力的垂向分量; F_H 为拱中推力的水平分量; B 为拱的跨度; $W_x = \int_0^x \gamma q(x) dx$; $x_d = \int_0^x q(x) x dx / \int_0^x q(x) dx$; $x_b = \int_0^{B/2} q(x) dx / \int_0^{B/2} q(x) x dx$; $F_H' = F_H - 0.5 k_0 \gamma h H$ 。

比较式(4)和式(3)可以看出: 垂向荷载和水平地应力荷载同时考虑时, 比单一考虑垂向荷载时更能引起拱推力线的抬高。 k_0 值越大, 拱推力线越高。这与后面图 6 中的数值模拟分析结果相一致。

2.2 拱圈的厚度

保持拱的推力线在拱圈中间三分之一面积以内是防止拱坍塌的关键。所以, 必需计算出包含拱的推力

线在内的拱的最小厚度,以决定锚杆的设计长度。下面是文献[4]中根据坍塌理论得出的典型罗马拱(如图4)的结论。

拱圈的临界厚度 t 和标明铰在拱内弧面位置的角度 θ 是覆盖层厚度 h 以及拱圈半径 R 的函数,图5中给出了它们的关系曲线。

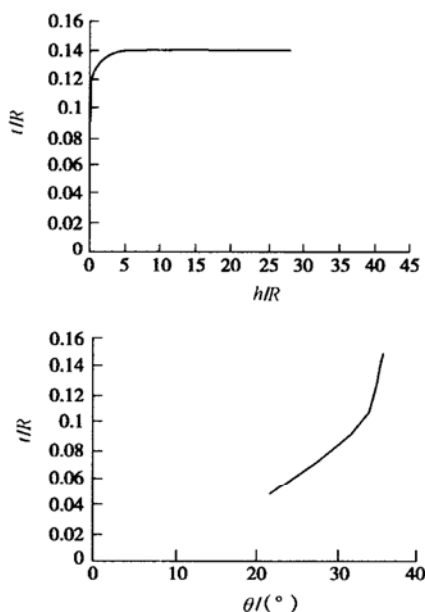


图5 t/R 与 h/R 、 t/R 与 θ 的关系曲线

Fig. 5 Curves of t/R vs h/R and t/R vs θ

当 c 取无限大时,得出以下结论:

$$\theta = \sin^{-1}(1/\sqrt{3}) = 35.3^\circ, \quad (5)$$

$$t/R = 2(7 - 4\sqrt{3}) = 0.144. \quad (6)$$

拱圈的厚度一般来说是拱圈半径的0.144倍,而与覆盖层的厚度无关。值得注意的是,即使 t/R 增加了3倍, θ 也只增加了0.5倍。这表明:即使拱的形状改变了很多,铰在拱内弧面的位置也变化很小。这就暗示着拱肋在拱稳定中的决定性作用。

式(6)中,没有考虑水平荷载。随着水平地应力的增加,为了能包住抬高的拱推力线,需要增加拱圈的厚度。由此推断:对于拱的形成,强水平地应力并不总是有利的,拱的跨度应该与水平地应力相匹配。

2.3 拱圈的作用

数值模型分析结果表明:岩石拱可以用一个位于拱顶面附近的均衡的压应力带来表示。岩石拱的作用在于将荷载由拱顶传到拱脚,进而传到边墙,这说明岩石拱是一个自承岩石结构。

当岩体非常破碎,裂隙发达时,岩体的单轴极限抗压强度极低。开挖隧洞时,洞顶附近的岩体内部会沿着接缝出现张性变形和滑动。在岩石拱未形成之前经常会出现剪切破坏。所以,岩石拱的加固要及时。全断面喷锚支护对于防止裂纹和岩块滑动的效果是十分

明显的。而单一的锚杆支护不能快速增强围岩强度,也不能在大的剪切变形发生之前,有效阻止剪切破坏。

3 三峡工程地下主厂房拱顶分析

3.1 地质概况及支护型式

厂房洞顶上覆岩体厚为77~86 m,其中微新岩体厚为56~60 m,洞室处于微新岩体中,以块状结构的I、II类围岩为主^[5]。细粒闪长岩、细粒闪云斜长花岗岩及混合岩微新岩石具有比坝基中粗粒闪云斜长花岗岩更好的物理性质和高的力学强度。其力学参数分别为 $\gamma = 27.0 \text{ kN/m}^3$, $E = 40 \text{ GPa}$, $\mu = 0.22$, $f = 1.8$, $c = 1.80 \text{ MPa}$, $\sigma_1 = 1.5 \text{ MPa}$ 。 k_0 大约为1.2。拱顶采用喷锚支护,锚杆长6 m,间距分别为 $3 \text{ m} \times 3 \text{ m}$ 和 $1.5 \text{ m} \times 1.5 \text{ m}$ 。

3.2 UDEC 结果分析

建立原岩模型,按“没有支护”状态(F1)和“喷锚支护”状态(F2)进行UDEC分析。相关分析结论如下:

(1)表1显示,水平地应力的增加会引起洞顶拱位移的减小,但同时边墙的位移也增加。由此可以看出水平地应力在洞顶拱形成时的作用。全断面开挖后,上游边墙最大位移量为16.8 mm,下游边墙最大位移量为16.3 mm,拱脚处最大位移量为8.5 mm,拱顶上抬2.2 mm,这与UDEC程序分析结果近似。拱顶的反向位移与挪威建造的奥林匹克(Gjovik)冰球馆的拱顶变形相似,是水平地应力超过垂直地应力的结果。

表1 用UDEC程序计算的位移量

Table 1 Displacement calculated with the UDEC mm				
模型	k_0	UDEC 分析结果		
		拱顶	上游边墙	下游边墙
F1	1.2	-0.9	20.9	20.1
F2	0.6	8.3	11.8	11.2
F2	1.0	6.2	15.2	14.5
F2	1.2	-0.7	18.3	17.8

(2)图6显示,在高水平地应力($k_0 = 1.0, 1.2$)的作用下,洞顶拱附近在垂直地应力作用下形成的均匀拱是为了适应拱的形状而进行的应力调整所产生的结果。 k_0 值越高,拱圈越厚,径向和切向的均匀压应力体现了洞顶拱的特性。同时,在低水平地应力($k_0 = 0.6$)作用下,因为水平地应力不能抵抗垂直地应力的作用,拱顶处不能形成均匀压应力区,岩块会溃落。所以,不能形成稳定的洞顶拱或地层拱。

(3)图6(d)显示,当隧洞开挖后,岩体原岩应力平衡遭到破坏,应力锥内存在水平主应力和垂向主应力。而拱圈内只存在环向应力,这说明隧洞开挖后,自承拱就已经形成了。但这时的自承拱很难维持长期稳

定,需要喷锚支护加固。

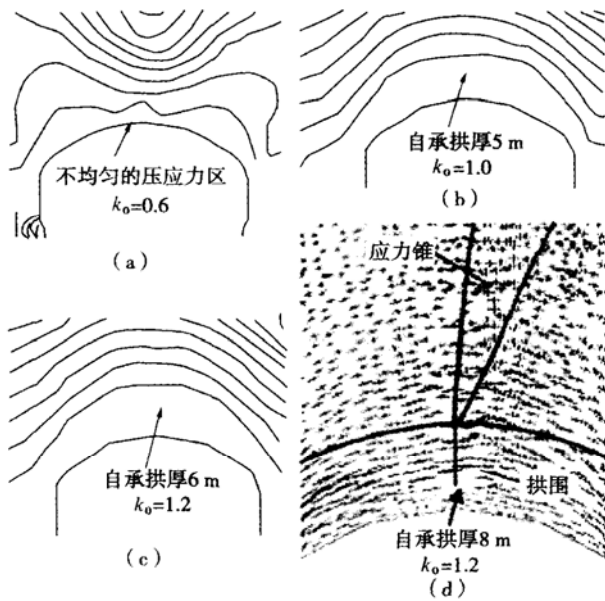


图6 应力等值线及主应力向量(模型 F1)

Fig. 6 Stress contour and principal stress vector(model F1)

4 结 语

正确的喷锚设计应该基于对喷锚加固的特性和洞顶岩石拱结构的机理两方面都有个清楚的认识。通过

喷锚支护提高围岩的抗压强度,激发围岩的自承能力,提高岩石接缝或不连续处的剪切强度,加固松散岩块。

水平地应力和拱的形状是保持岩石拱稳定的两大重要因素。根据水平地应力的大小、围岩的质量设计合理的拱的形状,可以保证形成一个自承拱。数学模型有利于检验自承拱的拱圈厚度,以此设计锚杆长度和间距。锚固的目的在于将岩块锚固在一起,防止洞顶岩块翻转和沿接缝滑动。依靠提高围岩强度、阻止围岩开裂和沿接缝处的剪切,形成自承岩石拱。

参考文献:

- [1] Herman J. The stone skeleton structural engineering of masonry architecture[M]. Cambridge University Press, 1995.
- [2] Hibino S, et al. Behavior of rocks around large caverns during excavations[C]. Melbourne, 1983.
- [3] Lang T A, Bischoff J A, Wagner P L. A program plan for determining optimum roof bolt tension: Theory and application of rock reinforcement systems in coal mines[R]. USA, 1979.
- [4] Ziping H, et al. Cavern roof stability-mechanism of arching and stabilization by rockbolting[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2002, 17: 249- 261.
- [5] 鄧爱清, 等. 三峡工程地下厂房围岩稳定性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 20(5): 690- 695.