洞周岩体内裂纹水力劈裂临界水压分析计算

李宗利，王亚红

（西北农林科技大学水利与建筑工程学院，陕西 杨凌 712100）

摘　要：水力劈裂是深埋隧洞施工涌水重要因素之一，对其破坏机理研究是岩土工程界的热点课题。根据裂纹面的应力状态，从断裂力学角度将岩体的裂纹扩展分为拉剪复合扩展和压剪复合扩展。应用地下岩体复合失稳扩展判据分别推导出两种破坏模式的临界水压计算公式，并对其随裂纹在隧洞洞周围的位置、方位变化规律进行分析。分析结果表明，在发生拉剪复合扩展情况下，裂纹方向与最大地应力平行时，最易失稳扩展；在压剪复合扩展情况下，裂纹与最大地应力夹角约介于30°～75°之间时，最易失稳扩展。

关键词：岩体裂纹；水力劈裂；断裂模式；临界水压

作者简介：李宗利(1967－)，男，博士，副教授，主要从事水工结构计算理论科研与教学。

0　前　　言

水力劈裂是地下水改造岩体结构的一种重要方式，高压水作用下，岩体断续裂隙（空隙）发生扩展，连通率增大，改变了岩体原有的结构，使渗透性大大增大，同时伴随侵蚀及泥化等作用。渗透性的增加又会加速渗流，使水力劈裂作用进一步加强。深埋洞室施工时的涌水现象就是水力劈裂的典型例子。

水力劈裂研究最初是应用在油气田的开发和地应力的测量方面[1-2]，近几十年来，大型水利水电工程及交通运输工程的建设，许多与水力劈裂相关的课题出现，极大推动了这方面的研究。1957年M.K休伯特和D.G.威利斯假定岩体是均质脆性线弹性介质的前提下，利用弹性力学理论研究了水压致裂产生的张破裂与应力场的关系[1]。断裂力学的发展为水力劈裂研究注入了新的活力，文献[3]将裂纹内水压力视为作用在节理中心的一对集中力作用，依据节理线附近弹性应力场与脆断应力场匹配，研究水力致裂问题。研究岩体发生水力劈裂时的临界水压对地下洞室施工时的涌水预报，地下工程渗流分析等有重要理论及应用价值。文献[4]已对该问题进行了积极的探索研究，文献[5]在没有考虑洞室存在的前提下，对岩体压剪复合扩展破坏模式，裂纹的方向及侧压力系数与临界水压大小变化规律等方面进行了初步研究。洞室周围往往存在某一条或一组控制性裂纹，控制着是否发生水力劈裂破坏，本文就对其临界水压计算问题进行探讨。

1　岩体裂纹扩展破坏模式

地下岩体内存在初始节理等裂隙，即初始裂纹，地应力作用下则多处于压缩闭合状态。由于人为开挖洞室，改变了原有的应力场和渗流场，势必造成个别部位的裂纹张开、扩展，发生水力劈裂。当岩体裂纹张开面积较大时，会形成大量涌水、岩体失稳等灾害。大量研究[6-9]表明，岩体裂纹扩展力学行为与金属类材料之间存在较大的差异，尤其是扩展破坏模式较为复杂，如若再考虑开挖卸载与孔隙水压的变化作用，则使破坏模式更为复杂。岩体内裂纹的扩展模式不仅与远场地应力的大小、垂直与水平地应力的相对值有关，而且与孔隙水压大小、裂纹的方位及抗剪力学特性有关。因而岩体裂纹扩展破坏模式的判别是分析计算临界水压的必要前提。洞周岩体内裂纹分布一般是随机的，呈三维分布，为研究简单，本文以图1示的平面穿透闭合单裂纹为研究对象，探求水压对扩展破坏模式的影响及临界水压计算。图1示隧洞半径为 r_a，远场地应力为 σ_1 和 σ_3。在极坐标为（θ，r）处存在一长度为 $2a$ 的裂纹，裂纹与水平轴间夹角为 α，雁形分支裂纹的偏转角为 ψ，裂纹内作用有孔隙水压力 p。假定水压力沿裂纹各个方向作用力相等，岩体属于脆弹性。

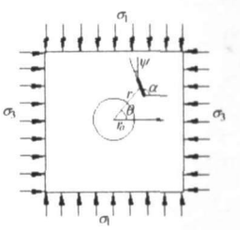


图1　洞周单裂纹计算模型

由于裂纹是闭合的，而且裂纹面还具有一定粘结力。由此忽略岩体内裂纹的影响，近似按均质材料计算洞周应力。由弹性力学知[10]，洞周岩体内任一点应力为

$$\sigma_r=\frac{\sigma_1}{2}\left[(1+\lambda)(1-\frac{r_a^2}{r^2})-(1-\lambda)(1-4\frac{r_a^2}{r^2}+3\frac{r_a^4}{r^4})\cos 2\theta\right], \quad (1)$$

$$\sigma_\theta=\frac{\sigma_1}{2}\left[(1+\lambda)(1+\frac{r_a^2}{r^2})+(1-\lambda)(1+3\frac{r_a^4}{r^4})\cos 2\theta\right], \quad (2)$$

$$\tau_{r\theta}=\frac{\sigma_1}{2}\left[(1-\lambda)(1+2\frac{r_a^2}{r^2}-3\frac{r_a^4}{r^4})\sin 2\theta\right], \quad (3)$$

基金项目：西北农林科技大学人才基金资助项目

收稿日期：2006－07－30

© 1994-2007 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

式中 λ为侧压力系数，$\lambda=\frac{\sigma_3}{\sigma_1}$；$\sigma_r$为径向应力；$\sigma_\theta$为切向应力；$\tau_{r\theta}$为剪应力；其它符号见图1。

由应力状态分析可知，裂纹面上正应力σ_α和剪应力τ_α分别为

$$\sigma_\alpha=\sigma_\theta\cos^2(\theta-\alpha)+\sigma_r\sin^2(\theta-\alpha)-\tau_{r\theta}\sin 2(\theta-\alpha)-p\,, \quad (4)$$

$$\tau_\alpha=(\sigma_r-\sigma_\theta)\sin(\theta-\alpha)\cos(\theta-\alpha)-\tau_{r\theta}\cos 2(\theta-\alpha)\ 。 \quad (5)$$

当裂纹表面的法向正应力为拉应力时，裂纹面分开且滑动摩擦力减小，甚至消失。裂纹的扩展问题属于断裂力学中的Ⅰ-Ⅱ拉剪复合型，裂纹扩展呈雁形。由文献[11，12]知，该扩展模式下裂纹尖端应力强度因子为

$$K_\mathrm{I}=\frac{3}{2}\sqrt{\pi a}\cos\frac{\psi}{2}\left[\tau_\alpha\sin\psi+\frac{2}{3}\sigma_\alpha\cos^2(\frac{\psi}{2})\right]。 \quad (6)$$

将上式对ψ求偏导数并使其等于零，即可得到支裂纹的开裂角ψ_0的求解式

$$\sigma_\alpha\tan\frac{\psi_0}{2}+\tau_\alpha(2\tan^2\frac{\psi_0}{2}-1)=0\ 。 \quad (7)$$

将上式得到的ψ_0代入式（6）中，即可得到拉剪扩展模式下，分支裂纹起裂时的应力强度因子计算式为

$$K_\mathrm{I}=\frac{3}{2}\sqrt{\pi a}\cos\frac{\psi_0}{2}\left[\tau_\alpha\sin\psi_0+\frac{2}{3}\sigma_\alpha\cos^2(\frac{\psi_0}{2})\right]。 \quad (8)$$

当裂纹表面法向正应力为压应力时，则裂纹的扩展问题属于Ⅰ-Ⅱ压剪复合型，与拉剪复合型有截然不同的扩展失稳特性。大量研究[6-9]表明，岩体内的裂纹在压力和剪力作用下要经历闭合压紧和滑动两个阶段，受岩体节理构造及岩体组成晶格等因素影响，在滑动时裂尖部位存在明显的涨容现象，但由于围压的存在，又会抑制这种发展。从微观上分析，岩体的压剪扩展过程实质是裂尖微裂纹发展、局部体积膨胀与围压的抑制交互作用过程。在宏观上表现为裂纹失稳扩展呈雁形，分支裂纹方向基本平行于最大压应力。裂纹面所产生的有效剪应力为

$$\tau_e=|\tau_\alpha|-(\sigma_\alpha\tan\varphi+c)\ , \quad (9)$$

式中 c为裂纹面的粘结力；φ为裂纹面的摩擦角。

由文献[11，12]知，压剪扩展模式下，裂纹尖端的应力强度因子为

$$K_\mathrm{I}=\frac{3}{2}\tau_e\sqrt{\pi a}\sin\psi\cos\frac{\psi}{2}\ 。 \quad (10)$$

以上公式推导中σ_α以压为正，同时注意表达式（10）成立的前提条件是式（9）计算值$\tau_e\geq 0$，因为所应用的莫尔－库仑准则表示的是极限状态时的关系。另外，在实际计算得到得临界水压若小于零，则表示在该条件下不会发生压剪复合扩展破坏。

支裂纹将沿着使K_I最大的方向扩展，因而，对式（10）求关于ψ的偏导数并使其等于零，即可得到裂纹的开裂角$\psi_0=70.5°$。由此可得压剪扩展模式下，支裂纹的起裂时应力强度因子为

$$K_\mathrm{I}=\frac{2}{\sqrt{3}}\tau_e\sqrt{\pi a}\ 。 \quad (11)$$

不管拉剪还是压剪复合扩展，分支裂纹起裂的判据为

$$K_\mathrm{I}\geq K_{\mathrm{I}c}\ 。 \quad (12)$$

2 裂纹扩展临界水压计算

2.1 拉剪复合型扩展

定义分支裂纹在发生起裂扩展时内部孔隙水压为临界水压。为了得到临界水压，将式（4）、（5）代入式（7）及（8）得到支裂纹起裂偏转角及强度因子，再将结果代入裂纹失稳准则式（12）即可得拉剪复合型扩展时广义临界水压计算式为

$$p'=\frac{2}{3}\frac{\sigma'_\alpha}{\sigma_1}\cos^3\frac{\psi_0}{2}+\frac{\tau_\alpha}{\sigma_1}\sin\psi_0\cos\frac{\psi_0}{2}\ , \quad (13)$$

式中 $\sigma'_\alpha=\sigma_\theta\cos^2(\theta-\alpha)+\sigma_r\sin^2(\theta-\alpha)-\tau_{r\theta}\sin 2(\theta-\alpha)$；广义临界水压为$p'=\frac{2}{3\sigma_1}(\frac{K_{\mathrm{I}c}}{\sqrt{\pi a}}+p_c\cos^3\frac{\psi_0}{2})$；$p_c$为裂纹内临界水压。

引入广义临界水压是为了后面分析其规律方便、直观，除以σ_1则转化为无量纲数。结合广义临界水压定义式及式（13）可见，在一定地应力水平下，临界水压主要与裂纹表面的应力大小有关，而裂纹表面的应力大小又决定于裂纹的位置及方位。

2.2 压剪复合型扩展

同前，应用压剪复合强度因子计算式（11），再结合断裂判据可得分支裂纹起裂时，压剪广义临界水压计算式为

$$p''=\frac{\sigma'_\alpha}{\sigma_1}-\frac{1}{\sigma_1\tan\varphi}|\tau_\alpha|\ , \quad (14)$$

式（14）中p''为与压剪扩展广义临界水压，具体计算式为$p''=\left(p_c-\frac{\sqrt{3}}{2}\frac{2c\sqrt{\pi a}+K_{\mathrm{I}c}}{\sqrt{\pi a}\tan\varphi}\right)\Big/\sigma_1$ 。

3 实例分析

隧洞半径为2 m，洞周附近地应力$\sigma_1=$ 38.16 MPa，$\sigma_3=14.81$ MPa。岩体的Ⅰ型裂纹断裂韧度$K_{\mathrm{I}c}=15.2$ MN/m$^{3/2}$，裂纹面上的内摩擦角为30°，裂纹长度为1.1 m。为了解洞周不同位置裂纹失稳扩展时临界水压分布规律，分别选取不同的r/r_a、θ和α来计算。

由于结构的对称性，具体计算时，θ角仅在第一象限取值。应用式（7）计算分支裂纹偏转角时，需求解一元二次方程，依据分支裂纹方向基本平行于最大压应力原则取舍。当洞周岩体内裂纹发生拉剪扩展时，广义临界水压随r/r_a、θ和α变化规律如图2，裂纹越远离洞室，洞室对裂纹表面的应力影响逐渐减小，临界水压就趋于某一个常值。在$\alpha=\theta$情况下，即裂纹沿径向，当裂纹位于隧洞顶部沿最大压应力方向（$\theta=90°$）时广义临界水压最小；而当裂纹位于水平（$\theta=0°$），裂纹平行于最小压应力方向时广义临界水压最大。在$\alpha=\theta+\pi/4$情况下，裂纹远离洞径2倍以上，当$\theta=45°$，即裂纹仍是平行于最大压应力方向（$\alpha=\pi/2$）时，广义临界水压最小；当$\theta=0°$、$\alpha=45°$时，

© 1994-2007 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

广义临界水压最大。在 $\alpha=\theta+\pi/2$ 情况下，裂纹远离洞径 2 倍以上，当 $\theta=0°$、$\alpha=90°$，即裂纹位于隧洞侧面，方向与最大压应力平行时广义临界水压最小；而 $\theta\geq45°$ 时，广义临界水压相对较高。

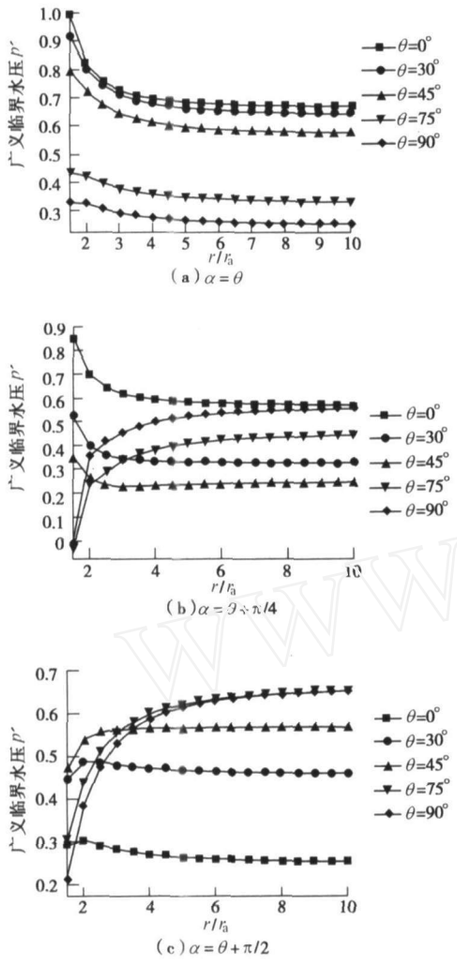


图 2 拉剪断裂广义临界水压分布规律

总之，在远离隧洞前提下，裂纹平行于最大压应力时，最易发生拉剪水力劈裂。当洞周岩体内裂纹发生压剪扩展时，广义临界水压随 r/r_a、θ 和 α 变化规律如图 3，裂纹远离洞室时，临界水压分布规律与拉剪时相同，也趋于某一个常值。在 $\alpha=\theta$ 情况下，即裂纹沿径向，当裂纹位于 $\theta=45°$ 与 75° 时，广义临界水压最小；而当裂纹位于水平（$\theta=0°$），裂纹平行于最小压应力方向时广义临界水压最大。在 $\alpha=\theta+\pi/4$ 情况下，当 $\theta=30°$，即 $\alpha=75°$ 时广义临界水压最小；当 $\theta=90°$、$\alpha=135°$ 时，广义临界水压最大。

在 $\alpha=\theta+\pi/2$ 情况下，裂纹远离洞径约 5 倍以上，当 $\theta=75°$，即 $\alpha=165°$ 时广义临界水压最小；裂纹在 5 倍洞径内，当 $\theta=30°$，即 $\alpha=120°$ 时广义临界水压最小。总之，裂纹与最大压应力夹角位于约 30° 与 75° 之间时，最易发生压剪水力劈裂。

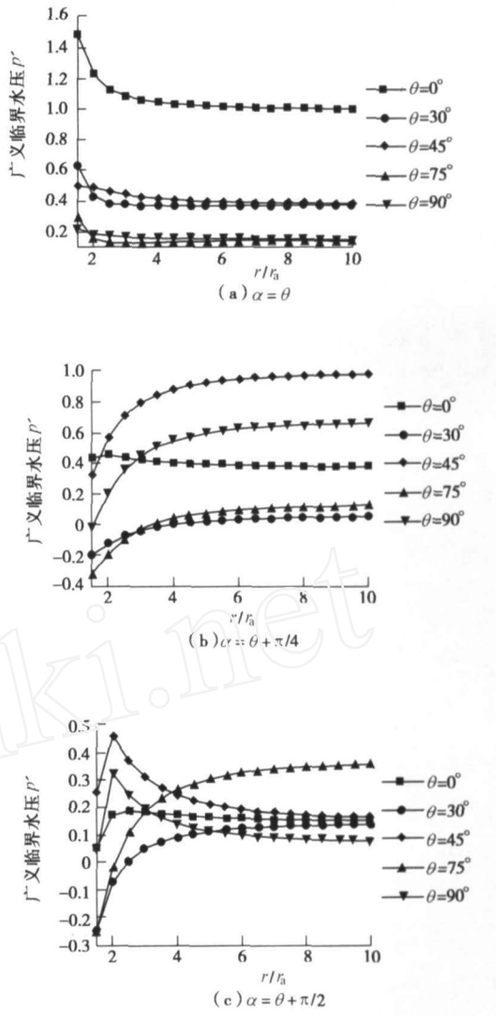


图 3 压剪断裂广义临界水压分布规律

4 结　论

(1) 在孔隙水压作用下，岩体内裂纹扩展失稳既可能发生拉剪复合型破坏，也可能发生压剪复合型扩展破坏。一定地应力、洞径、裂纹的方位等因素下，失稳类型受控于孔隙水压的大小，但一般多发生压剪复合型扩展破坏。

(2) 在拉剪复合型扩展模式下，裂纹方向与最大压应力平行时，裂纹最易开裂失稳。在压剪复合型扩展模式下，裂纹与最大地应力间夹角约介于 30° 与 75° 之间时，裂纹最易开裂失稳。对于具体工程问题，究竟发生拉剪还是压剪扩展，需要依据裂纹面的法向应力来判断。

(3) 本文所依据的裂纹面应力公式与该处岩体存在误差，势必影响计算结果的精度，但反映出的规律性是正确的，对地下隧洞施工涌水预报等问题研究，仍有参考价值。

参考文献：

[1] 赵阳升. 矿山岩石流体力学[M]. 北京：煤炭工业出版社，1994：125－135.

© 1994-2007 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

[2] 蔡美峰，乔　兰，李华斌．地应力测量原理和技术[M]．北京:科学出版社，1995.

[3] 王　成，邓安福．岩体节理内压致裂解析研究[J]．岩石力学与工程学报，2002,**21**(5): 640－643.

[4] 黄润秋，王贤能，陈龙生．深埋隧道涌水过程的水力劈裂作用分析[J]．岩石力学与工程学报，2000, **19**(5): 573－576.

[5] 李宗利，张宏朝，任青文，等．岩石裂纹水力劈裂分析与临界水压计算[J]．岩土力学，2005, **26**(8): 1216－1220.

[6] Horii H, Nemat-Nasser S .Compression-Induced micro-crack growth in brittle solids: Axial splitting and shear failure[J]. Journal of geophysical research, 1985, **90**(B4): 3105－3125.

[7] 周群力，刘格非．脆性材料的压剪断裂[J]．水利学报，1982(7): 63－69.

[8] 王桂尧，孙宗颀，徐纪成．岩石压剪断裂机理及强度准则的探讨[J]．岩土工程学报，1996, **18**(4): 68－74.

[9] 陈卫忠，李术才，朱维申，邱祥波．岩石裂纹扩展的实验与数值分析研究[J]．岩石力学与工程学报，2003, **22**(1):18－23.

[10] 沈明荣．岩体力学[M]．上海：同济大学出版社，1999:132－141.

[11] 李术才，朱维申．复杂应力状态下断续节理岩体断裂损伤机理研究及其应用[J]．岩石力学与工程学报，1999, **18**(2):142－146.

[12] 伍佑伦，许梦国，盛建龙．基于断裂力学的巷道围岩破坏区分析[C]//第八次全国岩石力学与工程学术大会论文集.北京:科学出版社，2004:343－347.

© 1994-2007 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net