

# 压力隧洞洞壁裂纹应力强度因子影响研究

刘晓晖 李宗利

(西北农林科技大学 水利与建筑工程学院, 陕西 杨凌 712100)

**摘要:**将衬砌和洞周岩体视为均质线弹性体,建立压力隧洞洞壁裂纹应力强度因子计算模型,研究不同内水压力、洞周地应力、裂纹长度和裂纹位置对洞壁裂纹应力强度因子的影响规律,并分析裂纹内水压的劈裂效应。结果表明:裂纹内水压作用可以使洞壁裂纹的失稳模式由压剪破坏转变为拉剪失稳,水力劈裂效应明显。在相同的地应力、长度和位置条件下,内水压力越大,裂纹越易发生拉剪失稳。在相同的内水压力、长度和位置条件下,侧压力系数很小或很大时,裂纹均易发生失稳破坏。在相同的内水压力和地应力条件下,裂纹越长,越易发生失稳破坏;裂纹与最小主应力方向的夹角越小,越易发生压剪失稳,裂纹与最小主应力方向的夹角越大,越易发生拉剪失稳。

**关键词:**压力隧洞; 裂纹; 水力劈裂; 强度因子; 影响规律

**中图分类号:** TV554 **文献标识码:** A

不发生水力劈裂是压力隧洞的设计原则之一,目前我国主要依据挪威准则、水力劈裂准则和初始应力场最小主应力准则来确定压力隧洞的埋深和线路,其目的即在于此<sup>[1,2]</sup>。但是许多工程实例表明,压力隧洞即使设计上满足上述准则,仍有可能发生水力劈裂破坏<sup>[3]</sup>。如著名的广州抽水蓄能电站二期工程压力隧洞高压岔管段在充水试验时,围岩发生了局部水力劈裂,使排水廊道出现高达 32 L/s 的漏水即是一例<sup>[4]</sup>。

由于地质条件及施工等原因,压力隧洞的围岩内不同程度地存在着很多断层、节理裂隙等构造,衬砌体内也常会存在一些微小的裂纹,且岩石与混凝土本身的抗拉强度均较小,在高水头作用下,压力隧洞的水力劈裂总是沿着一条或几条位于洞壁的控制性裂纹发生的。从这个角度来讲,压力隧洞的水力劈裂与石油开采中的水压致裂、地应力测量中的水力压裂,均属于单裂纹水力劈裂问题<sup>[5]</sup>。对于这一问题,因混凝土及岩体属于脆性材料,可以应用线弹性断裂力学理论来求解,而线弹性断裂力学的核心问题是计算裂纹尖端的应力强度因子,许多学者以此为出发点,针对压力隧洞围岩内某条裂纹在高压水流作用下的断裂失稳问题进行了研究<sup>[6-9]</sup>。但是,对压力隧洞洞壁裂纹应力强度因子本身变化规律的研究并不多。事实上,应力强度因子与裂纹的受力状态、裂纹的长度及位置等因素密切相关。因此,有必要对不同情况下裂纹尖端应力强度因子的变化规律进行研究。文献[10,11]针对石油钻井工程中的井壁失稳问题,对不同工程情况下某一条裂纹应力强度因子的变化规律进行了研究,而具体针对压力隧洞工程的研究则还未见报道。

本文以某压力隧洞为工程背景,以通用的有限元计算软件 ADINA 为平台,建立压力隧洞平面应变模型,研究不同的内水

压力,洞周地应力,裂纹长度以及裂纹位置对洞壁裂纹应力强度因子的影响规律,以期为进一步研究水力劈裂作用对压力隧洞洞壁裂纹稳定性的影响问题提供理论基础,同时,也可以为压力隧洞工程的合理设计及安全运行提供参考。

## 1 应力强度因子计算方法

在断裂力学中,按裂纹的受力情况,可以将裂纹分为张开型(I型)、滑开型(II型)和撕开型(III型)3种基本类型<sup>[12]</sup>。对于压力隧洞来说,在地应力、隧洞内水压力和裂纹内水压的共同作用下,洞壁裂纹既会受到拉应力或压应力的影响,还可能受到剪应力的影响,属于 I-II 复合型裂纹,即拉剪或压剪裂纹<sup>[6,8]</sup>。

对于压力隧洞洞壁裂纹应力强度因子的计算,有多种思路。文献[13]是将隧洞看作裂纹的一部分,按无限大体对称裂纹进行分析,将裂纹端部的应力强度因子表达为各种简单荷载所引起的应力强度因子的叠加。当洞径较小时,该方法的计算结果与实际接近,但当洞径较大或裂纹较短时,计算误差则较大。文献[14]是将洞壁的裂纹看作半无限体边缘的一条裂纹进行分析,并提出了相应的应力强度因子解析表达式。实际上隧洞的受力状况与半无限大体不同,裂纹附近的应力不仅与洞径直接相关,而且与洞内水压、洞周地应力、位置和裂纹内水压力等因素有关。文献[10]则是应用有限元计算软件,通过对井壁裂纹的模拟直接求解其应力强度因子,由于该方法可以考虑各种复杂的边界条件和荷载情况,对于大部分的工程实际问题均可以获得精度较高的近似解。

在本文的研究中,将结合 ADINA 有限元软件进行应力强度

收稿日期:2009-07-15

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50779057)

作者简介:刘晓晖,女,西北农林科技大学水利与建筑工程学院,硕士研究生。

因子的计算。ADINA 软件是基于有限元技术的大型通用分析仿真平台,利用 ADINA 软件的断裂模块,可以很好地解决线性的、非线性的断裂力学问题。ADINA 软件的断裂力学分析方法有 2 种,即 J 积分方法(the line contour method)和虚拟裂纹扩展法(the virtual crack extension method)<sup>[15]</sup>。J 积分方法要求裂纹面上无面力作用,而对于本文所研究的问题,恰好在裂纹面上存在水压力,且是影响应力强度因子大小的重要因素之一,因此 J 积分法是不适用的。虚拟裂纹扩展法是从计算裂纹尖端的能量释放率着手,在线弹性情况下可以换算得出裂纹尖端的应力强度因子值,这一方法不拘泥于裂纹的形状和载荷形式,因而具有广泛的适应性<sup>[15,16]</sup>。因此,本文将采用虚拟裂纹扩展法,并根据如下关系式计算裂纹尖端的应力强度因子<sup>[15]</sup>:

$$G = \frac{K_I^2 + K_{II}^2}{E'} \quad (1)$$

式中  $G$  为裂纹尖端的能量释放率; $K_I$ 、 $K_{II}$  分别为 I 型(张开型)、II 型(滑开型)裂纹的裂纹尖端应力强度因子,对于 I-II 复合型裂纹,裂纹尖端复合应力强度因子为  $K_0 = \sqrt{K_I^2 + K_{II}^2}$ ;对于平面应变问题, $E' = \frac{E}{1-\nu^2}$ ;对于平面应力问题, $E' = E$ , $E$  为材料的弹性模量; $\nu$  为材料的泊松比。

假定裂纹为径向直线型静态裂纹,用自由表面模拟裂纹面。为了保证计算精度,计算网格在裂尖周围区域设置为退化的 6 节点等参单元局部加密,并且将与裂尖相接的各边中点移至靠裂纹尖端的 1/4 边长处以模拟裂尖的奇异性,其他区域仍为常规的 8 节点等参单元。

## 2 实例分析

### 2.1 基本资料

某水工圆形压力隧洞,半径 2 m,采用钢筋混凝土衬砌,混凝土等级为 C30,衬砌厚度为 0.5 m。假定衬砌和洞周围岩为均匀的线弹性体。衬砌混凝土的弹性模量为 30 GPa,泊松比为 0.167;围岩的弹性模量为 20 GPa,泊松比为 0.3。洞周竖直向地应力为  $\sigma_1$ ,水平向地应力为  $\sigma_3$ ,侧压力系数  $\lambda = \sigma_3/\sigma_1$ ,内水压力为  $p$ 。隧洞洞壁存在一条径向初始裂纹,与水平方向的夹角为  $\theta$ ,裂纹内水压为均匀分布的全水头水压,如图 1 所示。按平面应变问题分析,计算范围取为洞径的 10 倍。

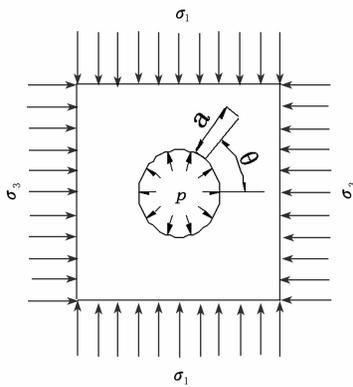


图 1 隧洞分析实例

### 2.2 结果分析

#### 2.2.1 内水压力对裂纹尖端应力强度因子的影响

取洞周竖直向地应力  $\sigma_1 = 7.5$  MPa、水平向地应力  $\sigma_3 =$

2.25 MPa,裂纹长度 0.8 m,  $\theta = \pi/2$ 。不同洞内水压时裂纹尖端应力强度因子的变化规律见图 2。由图 2 可知,不考虑裂纹内水压时,应力强度因子随着内水压力的增大逐渐减小,而考虑裂纹内水压时,应力强度因子随着内水压力的增大先减小至 0,而后逐渐增大,二者分布规律不同。由应力分析可知,实例隧洞在地应力作用下,洞顶裂纹尖端附近环向是处于受压状态;当洞内水压增大时,该处的应力状态逐渐由压应力减小到 0,然后变化为拉应力,而后逐渐增大。因而不考虑考虑裂纹内水压与否,均会出现裂尖强度因子随洞内水压的增大而减小的趋势。但是,考虑裂纹内水压作用时,裂纹附近的应力转变要超前于不考虑情况,表现出明显的水力劈裂效应。不考虑裂纹内水压的作用,则会低估压力隧洞发生水力劈裂破坏的危险性。因此,考虑裂纹内水压存在的分析更能真实地反映出裂纹周围的应力场和位移场,从而获得较为真实的裂尖应力强度因子。鉴于此点,在下面的分析中均按考虑裂纹内水压情况来分析其他因素的影响。

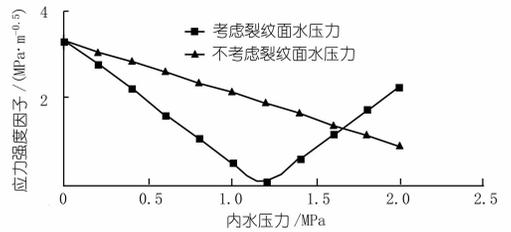


图 2 内水压力对裂纹尖端应力强度因子的影响

#### 2.2.2 洞周地应力对裂纹尖端应力强度因子的影响

取洞周水平向地应力  $\sigma_3 = 2.25$  MPa,内水压力  $p = 1.5$  MPa,裂纹长度  $a = 0.8$  m,  $\theta = \pi/2$ 。不同侧压力系数时裂纹尖端应力强度因子的变化规律见图 3。由图 3 可知,在侧压力系数较小时,应力强度因子值最大,随着侧压力系数的增大,应力强度因子很快降低,直至取得极小值,而后随着侧压力系数的继续增大,应力强度因子值也相应逐渐增大。侧压力系数的变化,反映了裂纹附近应力状态的变化,在侧压力系数很小时,裂纹尖端附近环向是处于受拉状态,较易发生拉剪失稳,随着侧压力系数的增大,裂纹周围的环向拉应力很快变为压应力并逐渐增大,裂纹也逐渐由张开变为闭合状态并逐渐压紧,较易发生压剪失稳破坏。可见,在相同的内水压力、长度和位置条件下,侧压力系数很小或很大时,裂纹尖端应力强度因子均较大,较易发生失稳破坏。

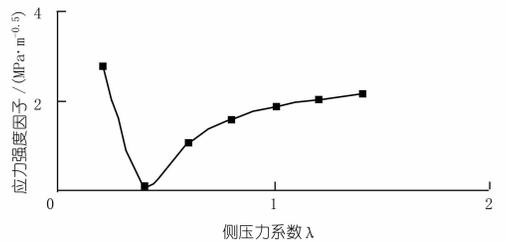


图 3 洞周地应力对裂纹尖端应力强度因子的影响

#### 2.2.3 裂纹长度对裂纹尖端应力强度因子的影响

取洞周水平向地应力  $\sigma_3 = 2.25$  MPa,内水压力  $p = 1.5$  MPa,  $\theta = \pi/2$ 。不同裂纹长度、不同侧压力系数时裂纹尖端应力强度因子的变化规律见图 4。由图 4 可知,在不同的地

应力水平下,裂纹尖端应力强度因子的变化趋势是一致的,均是随着裂纹长度的增大,应力强度因子逐渐增大,并且近似呈线性变化。可见,在相同的地应力、内水压力和位置条件下,裂纹越长,裂纹尖端应力强度因子越大,越易发生失稳破坏,失稳类型则视具体的应力分布情况而判别。

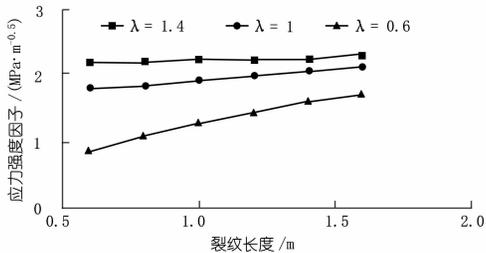


图 4 裂纹长度对裂纹尖端应力强度因子的影响

### 2.2.4 裂纹位置对裂纹尖端应力强度因子的影响

取洞周水平向地应力  $\sigma_3 = 2.25$  MPa, 内水压力  $p = 1.5$  MPa, 裂纹长度为 0.8 m。不同裂纹位置、不同侧压力系数时裂纹尖端应力强度因子的变化规律见图 5。由于计算模型的对称性,且忽略了自重,故  $\theta$  值的变化范围只取  $0 \leq \theta \leq \pi/2$  即可。由图 5 可知,当  $\lambda < 1$  时,即最小主应力为水平向,应力强度因子随着  $\theta$  值的增大而逐渐减小,在  $\theta = 0$  位置取得极大值;当  $\lambda > 1$  时,即最小主应力为竖直向,应力强度因子随着  $\theta$  值的增大而逐渐增大,在  $\theta = \pi/2$  位置取得极大值;当  $\lambda = 1$  时,应力强度因子变化曲线近似为一直线,表明应力强度因子值不随裂纹位置变化而变化。

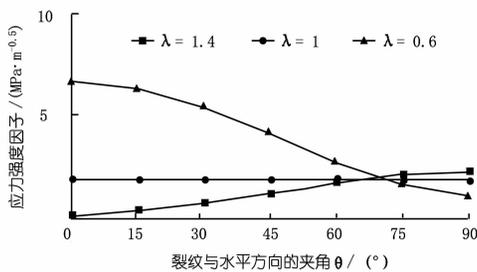


图 5 裂纹位置对裂纹尖端应力强度因子的影响

由应力分析可知,当  $\lambda < 1$  时,在  $\theta = 0$  附近,裂纹周围的环向应力为压应力,裂纹最易发生压剪破坏。随着夹角  $\theta$  的逐渐增大,裂纹周围的环向压应力逐渐减小,如果地应力及内水压力足够大,裂纹周围的环向压应力甚至可能转变为拉应力,则裂纹又有发生拉剪失稳的可能性。当  $\lambda > 1$  时,情况与  $\lambda < 1$  时恰恰相反。当  $\lambda = 1$  时,随着夹角  $\theta$  的增大,裂纹周围的环向应力与径向应力均近似不变,应力强度因子也相应不变。

可见,在相同的内水压力、长度条件下,当侧压力系数  $\lambda = 1$  时,裂纹尖端应力强度因子不随裂纹位置而变化;当侧压力系数  $\lambda \neq 1$  时,裂纹与最小主应力方向的夹角越小,越易发生压剪失稳,裂纹与最小主应力方向的夹角越大,越易发生拉剪失稳。

## 3 结语

(1) 对于洞壁存在裂纹的压力隧洞来说,裂纹内水压可以使裂纹失稳模式由压剪破坏转变为拉剪失稳,水力劈裂效应明显。考虑裂纹内水压存在的分析,能够得到正确的应力强度因子计算结果,进而获得较为可靠的结论。反之,如果不考虑裂纹

内水压的作用,得出的计算结果将会是错误的,从而会低估压力隧洞发生水力劈裂破坏的危险性。

(2) 对于压力隧洞洞壁的裂纹来说,在相同的地应力、长度和位置条件下,内水压力越大,裂纹越易发生拉剪失稳。在相同的内水压力、长度和位置条件下,侧压力系数很小或很大时,裂纹均易发生失稳破坏。在相同的内水压力和地应力条件下,裂纹越长,越易发生失稳破坏;裂纹与最小主应力方向的夹角越小,越易发生压剪失稳,裂纹与最小主应力方向的夹角越大,越易发生拉剪失稳。

### 参考文献:

- [1] SL279-2002 水工隧洞设计规范.
- [2] 侯靖,胡敏文.水工高压隧洞结构设计中若干问题的讨论.水利学报,2001,(7):36-40.
- [3] 张有天.岩石水力学与工程.北京:中国水利水电出版社,2005.
- [4] 伍智钦,刘学山.广蓄二期工程高压岔管渗漏问题的探讨.水力发电,2001,(2):27-30.
- [5] 李宗利,任青文.自然营造力作用下岩体混凝土水力劈裂分析与探讨.岩土力学,2008,29(8):2121-2125.
- [6] 盛金昌,赵坚,速宝玉.高水头作用下水工压力隧洞的水力劈裂分析.岩土力学与工程学报,2005,24(7):1226-1230.
- [7] 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.岩石力学与工程学报,2000,19(5):573-576.
- [8] 李宗利,王亚红.洞周岩体内裂纹水力劈裂临界水压分析计算,见:第一届中国水利水电岩土力学与工程学术讨论会论文集(上册).2006:83-86.
- [9] 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.岩土力学,2005,26(8):1216-1220.
- [10] 朱荣东,陈平,夏泉泉等.裂缝井壁力学稳定性研究.断块油气田,2007,14(5):56-58.
- [11] 屈平,申瑞臣,杨恒林等.节理煤层井壁稳定性的评价模型.石油学报,2009,30(3):455-459.
- [12] 丁遂栋.断裂力学.北京:机械工业出版社,1997.
- [13] (英)B. K. 阿特金森(B. K. Atkinson)主编.尹祥群,修济刚译.岩石断裂力学.北京:地震出版社,1992.
- [14] 蔡晓鸿,蔡勇平.水工压力隧洞结构应力计算.北京:中国水利水电出版社,2004.
- [15] ADINA R&D, Inc. Theory and Modeling Guide Volume I: ADINA. ADINA R&D, Inc, 2004:621-625.
- [16] 谢和平,陈忠辉.岩石力学.北京:科学出版社,2004.

(编辑:赵凤超)

