

文章编号: 1000-4750(2011)08-0215-04

基于断裂力学的混凝土坝裂缝灌浆压力计算模型

*谭 力¹, 黄达海¹, 王祥峰²

(1. 北京航空航天大学交通科学与工程学院, 北京 100191; 2. 三峡大学土木水电学院, 湖北, 宜昌 443002)

摘 要: 根据大坝工程上对裂缝种类的分类以及经常采用的化学灌浆方法, 以某在建高拱坝中出现的几种裂缝为实例, 考虑了浆液流动时的沿程阻损及重力影响, 建立了基于断裂力学的化学灌浆计算模型。运用权重法, 通过积分计算了灌浆时 3 种模型下的裂缝尖端应力强度因子。在不同的大体积混凝土断裂韧度条件下, 对不同缝长及 3 种裂缝类型进行化学灌浆的容许灌浆压力研究, 给出了具体灌浆压力和分段长度的建议。

关键词: 混凝土大坝; 裂缝灌浆; 计算模型; 断裂力学; 容许压力; 权重方法

中图分类号: TU318 **文献标志码:** A

CONCRETE DAM CRACK-GROUTING MODEL BASED ON FRACTURE MECHANICS

*TAN Li¹, HUANG Da-hai¹, WANG Xiang-feng²

(1. School of Transportation Science and Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China;

2. School of Civil Engineering & Hydroelectricity, China Three Gorges University, Yichang, Hubei 443002, China)

Abstract: Considering crack patterns in dams and the used grouting method, this paper establishes a calculation model of crack mechanical grouting in concrete dams, which accounts for the on-way resistant, the gravity impact and some actual cracks found in a dam construction project. The stress intensity factors of crack tips of the three different models under grouting are obtained through weight function method and integration. With different fracture toughness of the mass concrete, the allowable mechanical grouting pressures of variable cracks and three crack models are studied. Finally the specific grouting methods for the three cracks are proposed.

Key words: concrete dam; crack grouting; computation model; fracture mechanics; allowable pressure; weight function

大坝等大体积混凝土结构, 施工期和运行期常因温度变化而产生较大的拉应力, 由于混凝土抗拉强度较低, 在拉应力的作用下坝体混凝土常出现不同程度的裂缝^[1]。灌浆是常见的裂缝修补措施, 目前工程中关注的一个主要问题是合理的灌浆压力, 而这与混凝土裂缝断裂扩展理论紧密相关, 压力太小灌浆材料不能渗透到裂缝所有部位, 压力太大则可能引起裂缝尖端应力集中从而导致裂缝扩展。张国新提出了将断裂力学用于混凝土允许灌浆压力分析^[2], 采用基本的大平板中心缝模型对竖向长裂缝灌浆进行的数值模拟, 只考虑了注入浆液的压力

大小。本文根据工程实际灌浆情况采用基于断裂力学的裂缝扩展模型, 考虑了不同的裂缝分布形式和灌浆压力分布形式及粘滞阻损和重力的影响, 利用权重方法, 研究了混凝土灌浆的临界压力, 为工程提供参考。

从断裂力学的角度, 实际构件和试样中的裂纹, 由于外加作用力的不同, 可以分为 3 种基本组态: 张开型裂纹(I 型), 滑开型裂纹(II 型)和撕开型裂纹(III 型)^[3]。1957 年美国学者 Irwin G R 通过分析裂纹尖端附近的应力场, 提出应力强度因子理论和断裂韧性新观念, 建立了临界应力强度因子准则,

收稿日期: 2010-09-02; 修改日期: 2010-10-21

作者简介: *谭 力(1983—), 女(土家族), 湖北人, 博士, 从事准脆性材料断裂特性研究(E-mail: tanli@ce.buaa.edu.cn);

黄达海(1964—), 男, 湖北人, 教授, 博士, 从事大体积混凝土施工过程仿真与温度控制的研究(E-mail: huangdh@tsinghua.edu.cn);

王祥峰(1985—), 男, 山东人, 硕士, 从事大体积混凝土温度控制研究(E-mail: wangxiangfeng@gmail.com)。

认为裂纹尖端应力强度因子达到临界值时, 裂纹就会扩展, 奠定了线弹性断裂力学理论基础^[4]。大坝中最危险的常见裂缝是张开型裂缝, 所以将 I 型裂缝的裂纹扩展准则,

$$K_I \leq K_{IC} \quad (1)$$

作为构件是否安全的判断依据^[3]。式中 K_I 为 I 型应力强度因子, 受试件形状、大小, 外力作用方式及裂缝分布形式的影响。 K_{IC} 为材料断裂韧性, 属于材料自身固有特性。混凝土作为准脆性材料, 受拉强度较低, 其断裂过程表现出明显的非线性断裂特性, 存在明显的尺寸效应的材料, 因此混凝土断裂试验所得的断裂韧性值与尺寸相关。当试件尺寸足够大时, 试验断裂韧性值相对固定, 作为一种材料特性, 仅与混凝土的配合比、强度和龄期等有关。我国的徐世烺教授在此方面做了大量的工作^[5], 试验得到了不同级配大体积混凝土的断裂韧性值 K_{IC} 在 $0.8\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \sim 1.2\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ 之间。

1 工程背景

大坝中常见的裂缝按照走向分布可分为水平缝和垂直缝, 按所产生的裂缝性质、所在部位、是否位于基础约束区及对结构应力和运行安全影响程度, 可分为 4 大类^[6]。其中 III 类裂缝(缝宽 $0.3\text{mm} \leq \delta \leq 0.5\text{mm}$ 和缝深 $100\text{cm} < h \leq 500\text{cm}$ 者, 缝平面长度 $\leq$ 坝块宽度的三分之一, 侧面长度大于 1 个~2 个浇筑层厚度, 呈规则状; 缝宽 $0.2\text{mm} \leq \delta < 0.3\text{mm}$ 和缝深 $30\text{cm} < h \leq 100\text{cm}$ 者, 裂缝长度贯穿整个坝块; 缝宽 $0.2\text{mm} \leq \delta < 0.3\text{mm}$ 和缝深 $30\text{cm} < h \leq 100\text{cm}$ 者, 且裂缝位于上游迎水面; 缝宽 $0.2\text{mm} \leq \delta < 0.3\text{mm}$ 和缝深 $30\text{cm} < h \leq 100\text{cm}$ 者, 且裂缝位于迎水块基础强约束区内), IV 类裂缝(裂缝宽度 $\delta > 0.5\text{mm}$, 深度 $h > 500\text{cm}$, 侧(立)面长度 $L > 5\text{m}$, 和贯穿裂缝)需要采用化学灌浆等措施进行裂缝修补。以某在建大坝工程为例, 出现的裂缝形式包括: 中心水平缝(缝长约 14m), 边缘水平缝(缝长约 8m), 边缘垂向缝(缝长约 3m)。裂缝分布形式如图 1~图 3 所示。

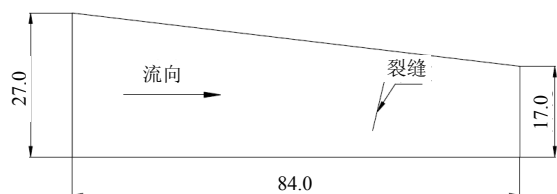


图 1 水平中心缝

Fig.1 Horizontal center crack

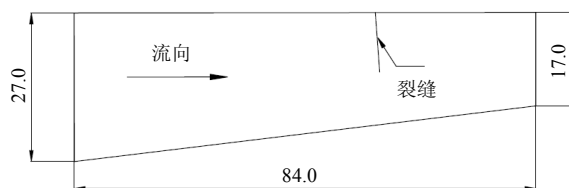


图 2 水平边缘缝

Fig.2 Horizontal edge crack

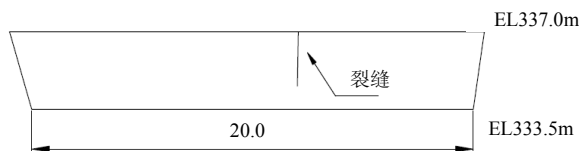


图 3 竖向边缘缝

Fig.3 Vertical edge crack

现有化学灌浆工艺步骤包括造孔、埋管、嵌缝、压水检查、试漏、灌浆、并浆、封孔等工序^[6]。在灌浆施工过程中, 水平缝根据具体情况可由一端向另一端或者先中间后两边、先深孔后浅孔顺序进行逐孔灌注, 接近水平状裂缝可从低端或吸浆量大、先深孔后浅孔逐孔灌注。因此对水平缝而言, 水平向主要是防止灌浆时裂缝向两端扩展, 在竖直向主要是防止灌浆时裂缝向深处扩展。施工中对竖直缝由下向上、先深孔后浅孔逐孔灌注; 因此对竖直缝而言, 主要防止裂缝在竖直方向上向两端扩展以及往深处扩展。

2 裂缝尖端应力强度因子计算

2.1 计算建模

2.1.1 沿程阻损

浆液在裂缝中流动时受到的水力阻力包括外摩擦力、内摩擦力和相摩擦力三种。外摩擦力表现为流体流动时与混凝土间的摩擦力; 内摩擦力是指流体流动时, 流体内部分子间的摩擦力, 表现为流体的粘度; 相摩擦力是指多相流体混合流动时, 各相流体之间的摩擦力, 表现为多相流体渗流时渗透率大大降低。由于大坝化学灌浆时不但控制压力还控制灌浆时间, 可以假定浆液在裂缝里是缓慢的匀速流动, 因此可以忽略内摩擦力及相摩擦力。由于外摩擦力导致的沿程阻损可表达为^[7]:

$$\Delta p = \lambda \frac{l}{d_i} \frac{\rho v^2}{2} \quad (2)$$

其中: $\lambda = \frac{64}{Re}$ 为沿程阻力系数(通过雷诺数 $Re = \frac{\rho v d_i}{\mu}$); l 为管道长度; d_i 为等效水力直径; ρ 为

液体密度； v 为液体流速； μ 为大坝浆体流体粘度，一般为 $0.03\text{Pa}\cdot\text{s}$ 。

以此在建大坝中出现的某边缘缝为例，缝长 $l=7\text{m}$ ，缝宽为 $\delta\approx 0.15\text{mm}$ ，缝深 $h=0.4\text{m}$ 。灌浆时从一端到另一端进行灌注，计算浆液通道的等效水力直径 $d_i = \frac{2\delta h}{\delta + h} = 0.0003\text{m}$ ；浆液密度取

$\rho=1.05\times 10^3\text{kg}/\text{m}^3$ ；根据工程中常用灌浆流量推算流速，流速 $v=Q/A\approx 0.02\text{m}/\text{s}$ ；所以雷诺数

$$Re = \frac{\rho v d_i}{\mu} \approx 0.21, \text{ 属于层流； } \lambda = \frac{64}{Re} \approx 290,$$

$$\Delta p = \lambda \frac{l}{d_i} \frac{\rho v^2}{2} \approx 0.06l, \text{ } l \text{ 为缝长单位取 m。因此沿}$$

程阻损可计为 $0.06l$ (MPa)。

2.1.2 重力影响

考虑竖直向的液体重力，因为浆液流动极为缓慢，可假设为匀速流动，则根据 N-S 方程^[7]：

$$\frac{\partial v_z}{\partial t} = -g - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \Delta p}{\partial z} = 0 \quad (3)$$

所以由于重力产生的压强为 $\Delta p = -\rho g z$ 。工程中处理竖直缝，从底部开始灌浆，浆液往上流动时需要克服重力产生的压强 $\rho g z$ (Pa)。

2.1.3 计算模型

综合以上施工工艺，根据此在建大坝特性及上述出现的 3 条缝，考虑计算模型如下，分别对应图 1~图 3 的裂缝，初始裂缝长为 A ，所受外力为 $\sigma(X)$ ：

1) 水平中心缝模型：平板宽 18m，长 84m，最大缝长 14m。中心板裂缝均匀分布受力：

$$\sigma(X) = \sigma_0 \quad (4)$$

2) 水平边缘缝模型：平板宽 17m，长 84m，最大缝长 8m。边缘裂缝均匀分布受力：

$$\sigma(X) = \sigma_0 \quad (5)$$

3) 竖向边缘缝模型：平板宽 4m，长 20m，最大缝长 3m。灌浆压力受沿程阻损和重力影响：

$$\sigma(X) = \sigma_0 - \rho g(A - X) \times 10^{-6} - 0.03X \quad (6)$$

其中： σ_0/MPa 为灌浆容许压力； $\sigma(X)/\text{MPa}$ 为沿裂缝压力分布； A/m 为缝长表现形式，根据工程所用化灌材料，密度 $\rho=1.05\times 10^3\text{kg}/\text{m}^3$ 。

2.2 计算方法

现阶段用于求解二维裂缝应力强度因子的方法主要包括^[8]：Muskhelishvili 的复变函数法、积分方程法、边界配置法、边界力法、有限元法、权函数法等。其中，权函数法是一种求解在任意受载条

件下裂纹应力强度因子的高效方法，这种解法的高效性在于它把影响应力强度因子的两个因素，载荷与几何，作了变量分离，除了灵活通用、简单经济等特点外，这一方法所得的结果有较高可靠性。

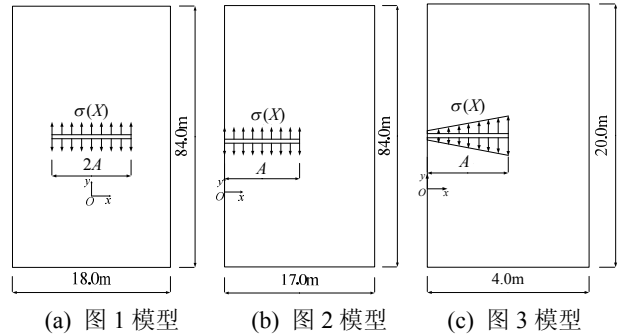


图 4 断裂力学计算模型

Fig.4 Fracture models

本文采用权函数方法计算裂缝尖端应力强度因子，应力强度因子由下式计算^[9]：

$$K = \frac{E'}{K_r(A)} \int_0^A \sigma(X) \frac{\partial U_r(A, X)}{\partial A} dX \quad (7)$$

其中： $E' = E$ (平面应变)，或 $E' = E/(1-\nu^2)$ (平面应力)， $K_r(A)$ 与 $U_r(A, X)$ 分别为参考方法的应力强度因子和裂缝扩展开度。将式(7)无量纲化，取 $x = X/W$ ， $a = A/W$ (W 为特征尺寸)， $\sigma(x) = \sigma(X)$ ， $u_r(a, x) = U_r(A, X)/W$ ， $f_r(a, x) = K_r(A)/[\sigma\sqrt{\pi aW}]$ ，可得：

$$K = f \sigma_0 \sqrt{\pi aW} \quad (8)$$

其中：

$$f = \int_0^a \frac{\sigma(x)}{\sigma_0} \frac{m(a, x)}{\sqrt{\pi a}} dx \quad (9)$$

权函数 $m(a, x) = \frac{E'}{f_r(a)\sigma_0\sqrt{\pi a}} \frac{\partial u_r(a, x)}{\partial a}$ 反映裂纹体的几何特征。

$\sigma(x)$ 为无裂纹体中假想裂纹处的应力， σ_0 为参考应力。式(8)和式(9)表明，在任意裂纹面载荷 $\sigma(x)$ 作用下，只要知道了该裂纹体的权函数 $m(a, x)$ ，则应力强度因子可以通过一个简单的积分求得。该方法的关键是权函数 $m(a, x)$ 的推导。文献[9]给出了有限大平板中心缝和边缘缝的权函数计算方法：

中心缝：

$$f = \int_0^a \frac{\sigma(x)}{\sigma_0} \frac{m(a, x)}{\sqrt{\pi a}} dx = \frac{1}{\pi a} \int_0^a \frac{\sigma(x)}{\sigma} \sum_{i=1}^3 \beta_i(a) \cdot \left[1 - \left(\frac{x}{a} \right)^2 \right]^{i-\frac{3}{2}} dx$$

边缘缝:

$$f = \int_0^a \frac{\sigma(x)}{\sigma_0} \frac{m(a,x)}{\sqrt{\pi a}} dx = \frac{1}{\sqrt{2\pi a}} \int_0^a \frac{\sigma(x)}{\sigma} \sum_{i=1}^5 \beta_i(a) \cdot \left(1 - \frac{x}{a}\right)^{i-\frac{3}{2}} dx$$

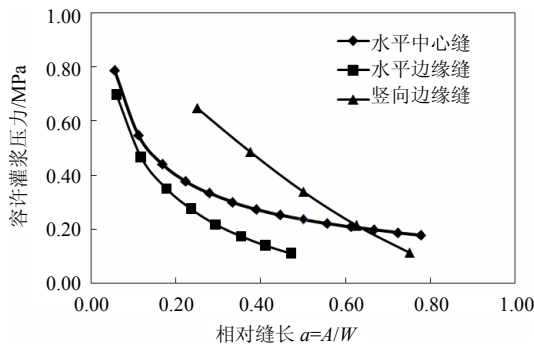
$\beta_i(a)$ 计算方法见文献[9]。结合式(4)~式(6), 采用 MAPLE 积分, 可计算得出三种情况不同缝长时的 f 值, 结果如表 1 所示。结果表明, 裂缝尖端应力强度因子随着相对缝长的增加而大幅度增大; 在同一几何模型下, 考虑了重力影响和粘滞力影响后使应力强度因子减小, 且随着缝长增大减小幅度增大, 以水平边缘缝模型为例, 其垂向的 f 值相对非垂向的最多可减小约 30%。

表 1 三种模型 f 值计算结果
Table 1 f results of three models

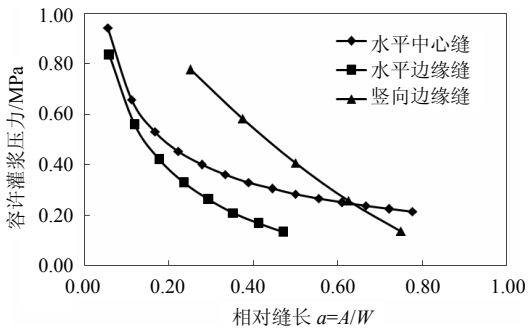
水平缝模型		劈头缝模型		劈头缝模型垂向		边缘缝垂向模型	
缝长/m	f	缝长/m	f	缝长/m	f	缝长/m	f
1	1.2500	1	1.1467	1	1.1039	1.0	1.4188
2	1.5000	2	1.2127	2	1.1239	1.5	1.8292
3	1.7500	3	1.3158	3	1.1739	2.0	2.5502
4	2.0000	4	1.4562	4	1.2506	2.5	3.9496
5	2.2500	5	1.6392	5	1.3355	3.0	7.3222
6	2.5000	6	1.8744	6	1.4659		
7	2.7500	7	2.1789	7	1.6350		
8	3.0000	8	2.5773	8	1.8558		
9	3.2500						
10	3.5000						
11	3.7500						
12	4.0000						
13	4.2500						
14	4.5000						

3 容许灌浆压力计算

取大坝混凝土断裂韧度分别为 $1.0\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ 和 $1.2\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$, 根据式(1)、式(8)及表 1 的 f 值, 可以计算出不同断裂韧度下的容许灌浆压力 σ_0 , 结果如图 5(a)和图 5(b)所示。



(a) 断裂韧度 $1.0\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$



(b) 断裂韧度 $1.2\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$

图 5 容许灌浆压力

Fig.5 Allowalbe grouting stress

结果表明, 裂缝灌浆容许应力随相对缝长增大迅速减小, 且随着断裂韧度的增大而等比例增大。三种计算模型中, 水平中心缝容许灌浆压力下降幅度最大。考虑到目前工程中灌浆压力基本控制在 $0.4\text{MPa}^{[10]}$, 应按照要求进行分段灌浆。

4 结论

本文通过工程实际化学灌浆方法提炼出了基于断裂力学的灌浆计算模型, 考虑了浆液流动过程中的沿程阻损及重力影响, 采用权重方法积分计算得出了灌浆时的裂缝尖端应力强度因子, 从而根据混凝土断裂韧度反推出容许灌浆压力。针对某在建大坝工程中出现的三种裂缝进行模型建立和分析计算, 得出结论如下:

(1) 裂缝尖端应力强度因子随着相对缝长的增加而大幅度增大, 并随裂纹外应力分布大小变化显著变化; 裂缝灌浆容许应力随相对缝长增大而迅速减小, 且随着断裂韧度的增大而等比例增大。

(2) 考虑了重力和沿程阻损之后, 应力强度因子有所减小, 且随着缝长的增大明显减小。如表 1 中水平边缘缝模型垂向的 f 值相对非垂向的最多可减小约 30%。

(3) 就此工程中出现的裂缝而言得出了具体的灌浆措施。考虑到目前工程中常用灌浆压力基本控制在 0.4MPa , 则图 1 所示的水平中心缝, 宜将灌浆段控制在 6m 以内; 图 2 所示的水平边缘缝, 宜将灌浆段控制在 3m 以内; 图 3 所示的考虑了重力和沿程阻力的垂向灌浆, 由于裂缝长与坝段宽比例较大, 宜将灌浆段控制在 2m 以内。

(参考文献转第 239 页)

- C24(4): 555—562.
- [23] Tezduyar T E, Wheeler L T, Giaux L. Finite deformation of a circular elastic membrane containing a concentric rigid inclusion [J]. *International Journal Non-Linear Mechanics*, 1987, 22: 61—72.
- [24] Yang E E, Frecker M, Mockensturm E. Large electroelastic deformation of a dielectric elastomer annulus [C]. *International Mechanical Engineering Congress & Exposition*, Washington D.C: ASME, 2003.
- [25] Wissler M, Mazza E. Modeling of a pre-strain circular actuator made of dielectric elastomers [J]. *Sensors and Actuators*, 2005, A120: 184—192.
- [26] Goubourne N, Mockenssturm E, Frecher M. A nonlinear model for dielectric elastomer membranes [J]. *Journal Applied Mechanics*, 2005, 72: 899—906.
- [27] Goubourne N, Mockenssturm E, Frecher M. Electro-elastomers: Large deformation analysis of silicone membranes [J]. *International Journal of Solids and structures*, 2007, 44: 2609—2626.
- [28] Charlie D. Commercial actuators and issues [C]. *Dielectric Elastomers as Electromechanical Transducers: Fundamentals, Materials, Devices, Models and Applications of an Emerging Electroactive Polymer Technology*. UK: Elsevier, 2008.
- [29] Dorfmann A, Ogden R W. Nonlinear electroelasticity [J]. *Acta Mechanica*, 2005, 174: 167—183.
- [30] Ogden R W. Large deformation isotropic elasticity [J]. *Proceedings of the Royal Society*, 1972, A(328): 567—583.
- [31] Zhao X H, Suo Z G. Method to analyze electromechanical stability of dielectric elastomers [J]. *Applied Physics Letters*, 2007, 91: 061921-1—061921-3.
- [32] Treloar L R G. Stress-strain data for vulcanized rubber under various type of deformation [J]. *Transactions of the Faraday Society*, 1944, 40: 59—70.
- [33] Treloar L R G. The elasticity of a network of long chain molecules (I) [J]. *Transactions of the Faraday Society*, 1943, 39: 36—41.

(上接第 218 页)

参考文献:

- [1] 朱伯芳. 大体积混凝土温度应力与温度控制[M]. 北京: 中国电力出版社, 2003.
Zhu Bofang. Thermal stresses and temperature control of mass concrete [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2003. (in Chinese)
- [2] 张国新, 李海枫. 用断裂力学研究混凝土裂缝的允许灌浆压力[J]. *水利水电技术*, 2009, 40: 52—55.
Zhang Guoxin, Li Haifeng. Research on allowable grouting pressure of concrete crack by means of fracture mechanics [J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2009, 40: 52—55. (in Chinese)
- [3] 褚武扬. 断裂力学基础[M]. 北京: 科学出版社, 1979.
Chu Wuyang. Basic fracture mechanics [M]. Beijing: Science Press, 1979. (in Chinese)
- [4] Irwin G R. Analysis of stress and strains near the end of a crack traversing a plate [J]. *Journal of Applied Mechanics*, 1957(24): 361—364.
- [5] 徐世烺, 周厚贵, 高洪波. 各种级配大坝混凝土双 K 断裂参数试验研究-兼对《水工混凝土断裂试验规程》制定的建议[J]. *土木工程学报*, 2006, 11: 50—62.
Xu Shilang, Zhou Hougui, Gao Hongbo. An experimental study on double-K fracture parameters of concrete for dam construction with various grading aggregates [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2006, 11: 50—62. (in Chinese)
- [6] SL230-98, 混凝土坝养护修理规程[S]. 北京: 中华人民共和国水利部, 1999.
SL230-98, Specifications for maintenance and repair for concrete dam [S]. Beijing: the Ministry of Water Resources of the People's Republic of China, 1999. (in Chinese)
- [7] Bruce R Munson. 工程流体力学[M]. 邵卫云, 改编. 北京: 电子工业出版社, 2006.
Bruce R Munson. Fundamentals of fluid mechanics [M]. Adapt for Shao Weiyun. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2006. (in Chinese)
- [8] 中国航空研究院. 应力强度因子手册[M]. 北京: 科学出版社, 1993.
Chinese Aeronautical Establishment. Handbook of stress intensity factors [M]. Beijing: Science Press, 1993. (in Chinese)
- [9] Wu Xueren, Carlsson Janne A. Weight functions and stress intensity factor solutions [M]. Oxford: British Library Cataloguing in Publication Date, 1991.
- [10] 王春华, 邹少军. 青铜峡大坝电站坝段三大条贯穿性裂缝及 3#胸墙裂缝处理[J]. *大坝与安全*, 1998, 4: 61—65.
Wang Chunhua, Zou Shaojun. Treatment of three major penetrating cracks and 3# parapet crack of Qingtongxia hydropower dam [J]. *Dam and Safty*, 1998, 4: 61—65. (in Chinese)