

DOI :10.3876/j.issn.1000-1980.2009.01.017

瞬态温度场作用的岩体裂缝扩展追踪

孙粤琳¹,沈振中¹,张国双²,张 倩³

(1.河海大学水利水电工程学院,江苏 南京 210098;2.灌南县建工质监站,江苏 连云港 222500;
3.江苏省环境科学研究院,江苏 南京 210036)

摘要:应用无单元法建立了瞬态温度场作用的岩体裂缝扩展模型.运用断裂力学理论,分析瞬态温度场作用下岩体表面裂缝尖端温度、应力和应力强度因子的变化规律,研究裂缝扩展的临界条件并追踪裂缝的扩展过程,探讨外界温度变化率以及裂缝深度对裂缝扩展的影响.结果表明:岩体表面裂缝在变化的温度场影响下有可能发展为贯穿型裂缝,破坏结构的整体性.较高的外界温度变化率可能在较短时间和较低温度下造成表面裂缝的扩展,且裂缝深度越大,裂缝开裂也就越容易和越迅速.

关键词:瞬态温度场 岩体 裂缝扩展 无单元法

中图分类号: TU452 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1980(2009)01-0080-06

目前,有关温度裂缝的研究都集中于混凝土结构^[1-3].但在实际水利工程中,岩体结构与混凝土结构一样,其表面及内部往往存在众多裂缝,这些裂缝在外界环境温度变化的影响下也有可能进一步发展,破坏结构的整体稳定性.为了揭示岩体温度裂缝扩展的某些规律,本文将对岩体温度裂缝进行研究.

以往对温度裂缝的研究,基本上都是通过有限元法、边界元法等数值方法计算得到应力与材料强度的对比来判断温度裂缝的出现和扩展的^[4-5],所得结论往往与实际存在偏差.例如,计算得到的拉应力不大,但实际却开裂了,就是因为没有考虑已有微裂纹的影响^[6].现在越来越多的研究都结合断裂力学原理,通过计算温度荷载影响下的裂缝缝端应力强度因子来判断裂缝的扩展类型和扩展稳定性^[7-9],但是对温度裂缝的扩展路径却鲜有研究.这是因为采用有限元法、边界元法等数值方法进行裂缝扩展计算时必须事先估计裂缝带的位置和方向,大大降低了计算的灵活性,同时对于大范围开裂,要细分的网格过多,这在很大程度上又增加了计算的工作量^[10].另外,目前的研究大都不考虑瞬态温度场的变化过程对裂缝扩展的影响,有的甚至只考虑稳态温度场的作用.针对上述情况,本文以在追踪裂缝扩展上具有显著优势^[11-13]的无单元法作为研究手段,对裂缝在瞬态温度场作用下从稳定到扩展的全过程进行了研究,同时探讨了外界温度变化率以及裂缝深度对裂缝扩展的影响.

1 瞬态温度场和温度应力计算原理

1.1 瞬态温度场基本方程

不计内热源的瞬态热传导方程为^[14]

$$\left\{\begin{aligned} \frac{\partial T}{\partial t} &= a\left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2}\right) \\ T\Big|_{\Gamma_1} &= T_B(x,y,t) \\ \lambda\frac{\partial T}{\partial x}l_x + \lambda\frac{\partial T}{\partial y}l_y\Big|_{\Gamma_2} &= -h(T-T_C) \end{aligned}\right. \quad (1)$$

式中： T ——温度场函数； a ——热扩散率； Γ_1, Γ_2 ——一类已知温度边界和二类对流边界； $T_B(x, y, t)$ ——一类边界给定的温度； λ ——导热系数； l_x, l_y ——二类边界表面外法线方向余弦； h ——二类边界的表面传热系数； T_C ——二类边界的流体温度。

根据变分原理可得到支配方程

$$HT + C\dot{T} - gT_C = 0 \tag{2}$$

其中

$$H = K + Q$$

$$\begin{aligned} k_{ij}^e &= \iint_{\Delta R} a \left(\frac{\partial N_i}{\partial x} \frac{\partial N_j}{\partial x} + \frac{\partial N_i}{\partial y} \frac{\partial N_j}{\partial y} \right) dx dy & q_{ij}^e &= \int_{\Delta c} \bar{h} N_i N_j ds & \bar{h} &= \frac{h}{c\rho} \\ c_{ij}^e &= \iint_{\Delta R} N_i N_j dx dy & \dot{T}_i &= \frac{\partial T}{\partial t} & g_i^e &= \int_{\Delta c} \bar{h} N_i ds \end{aligned}$$

式中： c ——比热容； ρ ——岩体的密度； N_i, N_j —— i 节点和 j 节点的形函数； T ——温度向量。

对时间域的离散采用向后差分法,得到求解瞬态温度场的基本方程

$$\left(H + \frac{1}{\Delta t} C \right) T_{n+1} = \frac{1}{\Delta t} C T_n + T_{C,n+1} g \tag{3}$$

式中： Δt ——时间步长； T_{n+1}, T_n ——第 $n + 1$ 和第 n 时步的温度向量； $T_{C,n+1}$ ——二类边界在第 $n + 1$ 时步的流体温度。

1.2 温度应力计算方法

当温度发生变化时,物体将由于热变形而产生线应变,温度应力可以作为初始应力加入离散平衡方程

$Ku = f$ 中,即在 f 中增加一项

$$f_T = \iint_{\Delta R} B_i^T D \epsilon_0 dx dy \tag{4}$$

其中

$$\epsilon_0 = (\alpha_x (T_n - T_0), \alpha_y (T_n - T_0), 0)^T$$

式中： α_x, α_y —— x, y 方向的线膨胀系数； T_0 ——初始温度向量； T_n ——现时温度向量。

2 裂缝扩展模拟方法

2.1 裂缝不连续面的模拟

将裂缝作为一种界面来处理,其上下两表面分别编号为 1,2. 在实际计算中,若某个节点位于裂缝面上,则应将其分为 2 个位于裂缝两侧的距裂纹面为一微小距离的节点,这样可提高计算精度。

不连续面对平衡方程的贡献为

$$\int_S (N_i^{(1)}(s))^T \cdot A \cdot N_j^{(1)}(s) \cdot dS \rightarrow K_{ij} \quad (i, j = 1, 2, \cdots, n) \tag{5}$$

$$\int_S (N_i^{(2)}(s))^T \cdot A \cdot N_j^{(2)}(s) \cdot dS \rightarrow K_{ij} \quad (i, j = 1, 2, \cdots, n) \tag{6}$$

$$- \int_S (N_i^{(1)}(s))^T \cdot A \cdot N_j^{(2)}(s) \cdot dS \rightarrow K_{ij} \quad (i, j = 1, 2, \cdots, n) \tag{7}$$

$$- \int_S (N_i^{(2)}(s))^T \cdot A \cdot N_j^{(1)}(s) \cdot dS \rightarrow K_{ij} \quad (i, j = 1, 2, \cdots, n) \tag{8}$$

其中

$$N_j^{(i)}(s) = \begin{bmatrix} n_j^{(i)}(s) & 0 \\ 0 & n_j^{(i)}(s) \end{bmatrix} \quad (j = 1, 2, \cdots, n)$$

$$A = T^T P T \quad T = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \quad P = \begin{bmatrix} k_s & 0 \\ 0 & k_n \end{bmatrix}$$

式中： $n_j^{(i)}(s)$ —— j 节点的形函数在 i 表面 s 点的取值； θ ——裂缝走向与整体坐标轴 x 的夹角； k_s, k_n ——切向和法向的刚度。

2.2 裂缝的断裂准则

裂缝开裂判断以断裂力学最大周向正应力理论为依据,并采用如下 2 个假设：(a)裂缝初始扩展沿着周向

正应力 σ_θ 达到最大的方向 ;(b)当这个方向上的周向正应力的最大值 $(\sigma_\theta)_{\max}$ 达到临界值时,裂缝就开始扩展. 根据上述假定可以得出 I 型和 II 型复合裂缝的开裂判据为

$$K_\theta = \frac{1}{2} \cos \frac{\theta_0}{2} [K_I (1 + \cos \theta_0) - 3 K_{II} \sin \theta_0] = K_{IC}$$

(9)

式中 : K_θ ——有效应力强度因子 ; K_I, K_{II} —— I 型和 II 型应力强度因子 ; K_{IC} ——材料的断裂韧度 ; θ_0 ——开裂角,

$$\theta_0 = \begin{cases} \arctan \frac{-3 K_I \pm \sqrt{K_I^2 + 8 K_{II}^2}}{8 K_{II}} & (K_{II} \neq 0) \\ 0 & (K_{II} = 0, K_I \neq 0) \end{cases}$$

(10)

2.3 开裂步长的选取

裂缝开展一般不会一直沿着原有的方向扩展,而是以一定的开裂步长沿任意方向扩展.从精度上而言,步长越小越好,从计算效率出发,则希望步长越大越好.由有效应力强度因子 K_θ 的表达式可以看出, K_θ 越大裂缝越易于扩展,因此可以采用下面的形式^[10]来定义每一步的开裂步长.

$$\Delta b_n = \Delta b_0 \frac{K_\theta^{(n)}}{K_\theta^{(0)}}$$

(10)

式中 : Δb_0 ——裂缝初始开裂步长 ; Δb_n ——裂缝第 n 步开裂步长 ; $K_\theta^{(0)}$ ——裂缝初始有效应力强度因子 ; $K_\theta^{(n)}$ ——裂缝开裂到第 n 步时的有效应力强度因子.

3 算例分析

3.1 计算模型

如图 1 所示,建立岩体平面模型,底面固定,材料参数见表 1.模型尺寸为高 $\times$ 宽 = 6 m $\times$ 4 m,裂缝 AB 两端的坐标分别为 (0,3) 和 (0.5,3).底边界为一类边界,固定温度 0℃,其余 3 个边界都为二类边界, h 为 2.5 J/(m²·s·℃),边界流体的温度随时间不断增长,初始值为 0℃,增长率为 1℃/h.

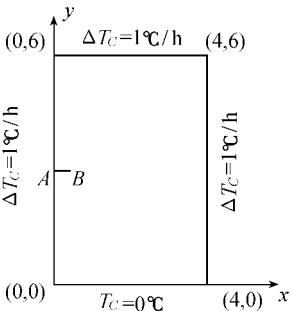


图 1 岩体模型
Fig. 1 Rock model

表 1 材料参数

Table 1 Material properties

弹性模量/ GPa	泊松比	λ /(J·(m ³ ·s·℃) ⁻¹)	c /(J·(kg·℃) ⁻¹)	断裂韧度/ (MN·m ^{3/2})	抗拉强度/ MPa	抗压强度/ MPa	α /℃ ⁻¹
2.0	0.167	2.5	1000	1.0	10	100	0.00001

3.2 结果分析

计算瞬态温度场的时间步长取 1.0 h.裂尖 B 处的温度、第 1 和第 3 主应力以及裂尖强度因子在时间序列上的变化如图 2~图 4a 段所示,图 4b 段为裂缝开裂后扩展过程中的裂尖应力强度因子,此时的横向坐标代表裂缝开裂步数.裂缝的扩展路径如图 5 所示.

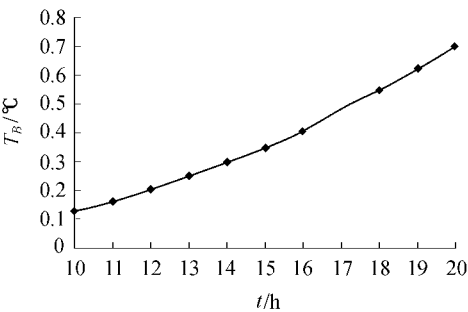


图 2 裂尖 B 的温度变化曲线

Fig. 2 Variation of temperature at crack tip B

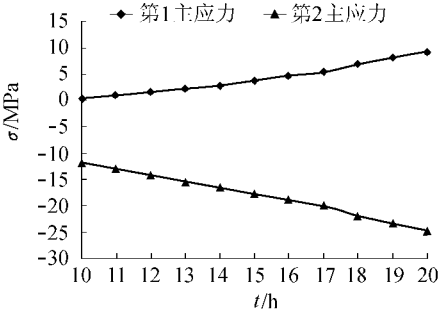


图 3 裂尖 B 的应力变化曲线

Fig. 3 Variation of stress at crack tip B

从图 2 可以看出,结构内部的温度与外界温度保持基本一致的增长趋势. 由于材料的热传导性能与时间有关,因此结构内部的温度变化率远小于外界,在时间上出现明显的滞后现象. 从图 3 可以看出,较小的温度变化会在裂尖处产生较大的温度应力,当外界温度达到 20℃ 时,裂尖 *B* 的温度只增到 0.7℃,但第 1 主应力已接近材料的抗拉强度 10 MPa,可见温度的细微变化也会在裂尖处产生非常大的温度应力.

从图 4 a 段可以发现,裂尖 *B* 的Ⅰ型应力强度因子远大于Ⅱ型应力强度因子,基本相差一个数量级,具有明显的Ⅰ型占优特征. 随着时间的推移,裂尖 *B* 的应力强度因子与外界温度一样保持线性增加状态,当 $t = 16\text{ h}$,即对流边界温度达到 16℃ 时,有效应力强度因子超过了材料的断裂韧度 $1.0 \times 10^6\text{ N/m}^{-3/2}$,裂缝开裂,而此时裂尖 *B* 的第 1 主应力为 4.7 MPa,第 2 主应力为 -19.1 MPa,远小于材料抗拉和抗压强度. 这是因为与金属在裂尖附近一定范围内会出现塑性区类似,岩体裂尖附近一定范围内会出现微裂缝区,导致在应力达到抗拉强度前就开始扩展. 计算结果较为真实地反映了裂缝临界开裂阶段的机理.

对照图 4b 段与图 5 可以看出 裂尖 *B* 在临界开裂时刻的Ⅰ型应力强度因子远大于Ⅱ型应力强度因子,为Ⅰ型绝对占优,裂缝扩展角几乎为 0°,即沿着裂缝 *AB* 的走向扩展. 在新裂尖点 1 处Ⅱ型应力强度因子超过了Ⅰ型应力强度因子,转为Ⅱ型占优,扩展角为 54°,后来的扩展又以Ⅰ型占优为主,裂缝的扩展方向基本没有发生偏离. 另外,裂缝开裂后裂尖处的应力强度因子与开裂前相比有大幅度增加,裂缝扩展一路发展直至贯通. 由此可见,结构表面的小裂缝在温度变化的作用下也极有可能发展为失稳型的贯穿断裂,影响结构的稳定性.

3.3 边界温度变化率的影响

外界温度以不同速率变化时,结构内部的温度变化规律也大不一样,造成的裂缝扩展规律也会有所不同. 变化计算模型 3 个对流边界的温度增长率,分别取 0.5℃/h,0.6℃/h,0.7℃/h,0.8℃/h,0.9℃/h 和 1.0℃/h 6 种情况,对裂缝 *AB* 的开裂状态进行计算. 图 6 为这 6 种情况下 *B* 裂尖的有效应力强度因子随时间的变化曲线,表 2 为 6 种情况下 *B* 裂尖临界开裂时对应的边界温度.

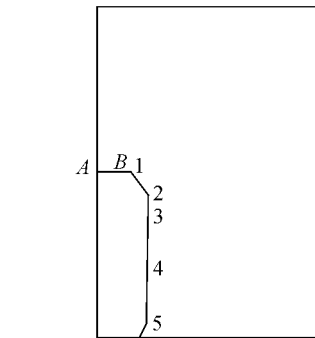


图 5 裂缝扩展路径
Fig. 5 Trace of crack propagation

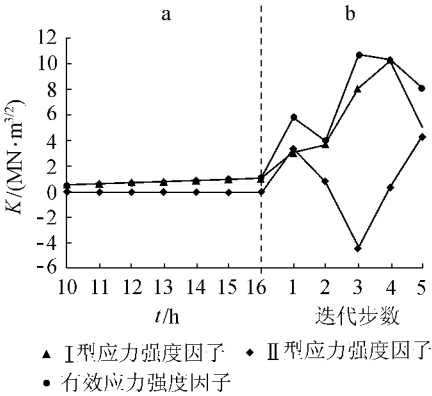


图 4 裂尖 *B* 的应力强度因子变化曲线
Fig. 4 Variation of stress intensity factor at crack tip *B*

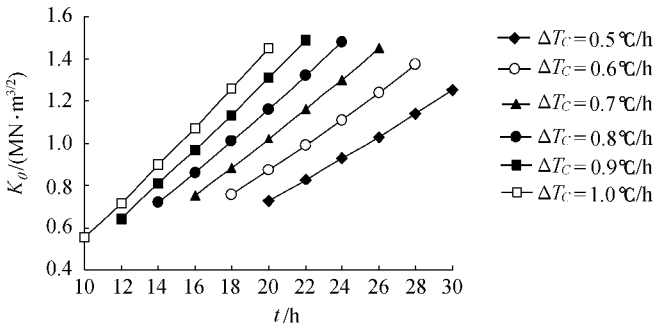


图 6 裂尖 *B* 在不同边界温度增长率下的
应力强度因子变化曲线
Fig. 6 Variation of stress intensity factor at crack tip *B*
under different growth rates of external temperature

表 2 不同边界温度增长率情况下裂缝临界开裂时刻的边界温度						
Table 2 External temperature at critical crack initiation under different growth rates of external temperature						
边界温度变化率/(℃·h ⁻¹)	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
临界开裂时刻边界温度/℃	12.75	13.20	13.86	14.48	14.86	15.20

对照图 6 和表 2 可以发现,外界温度变化率越大,裂尖有效应力强度因子的增长就越迅速,超过材料断裂韧度所需时间也就越短,裂缝开裂就越快,同时裂缝开裂所需外界温度也越低.另外,温度变化率都较小时,上述这种差别十分明显,但是随着温度增长率的增加,这种差异就越来越小,即温度变化率都较大时,裂缝开裂的时刻会比较接近.因此,即便是在较短的时间内和较低的外界温度下,外界快速的温度变化也能导致结构表面裂缝开裂.若较为缓慢的温度变化在足够的时间内保持不变,则也有可能导致裂缝开裂.

3.4 裂缝深度的影响

为了研究温度荷载作用下表面裂缝深度对裂缝扩展的影响,变化模型中裂尖 B 点的位置,其中 y 坐标不变, x 坐标分别取为 0.25 m, 0.50 m, 0.75 m, 1.0 m, 1.25 m, 1.5 m, 1.75 m 和 2.0 m. 图 7 为历时 20 h 后 8 种裂缝深度对应的裂尖有效应力强度因子,图 8 为 8 种裂缝深度下开裂所需的时间.从图 7 可以看出,随着裂缝深度的增加,裂缝尖端有效应力强度因子也显著增加,且增加的程度也越来越明显.可见,裂缝深度越大,裂缝受外界温度变化的影响越明显,裂尖开裂也就更加容易.从图 8 可以发现,深度为 0.25 m 的表面裂缝在 20 h 后,外界温度增加到 20℃后才会开裂,而深度为 2.0 m 的裂缝在 5 h 后外界温度达到 5℃时就开裂了.因此,裂缝越深,裂尖开裂就越迅速.

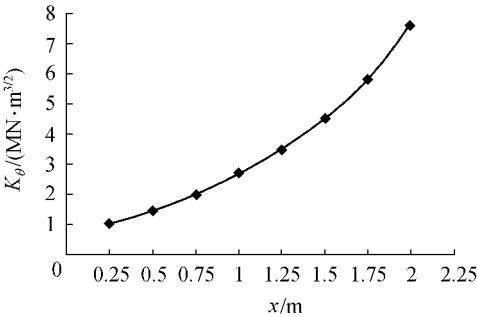


图 7 裂缝深度与裂尖应力强度因子的关系
Fig. 7 Relationship between crack depth and stress intensity factor

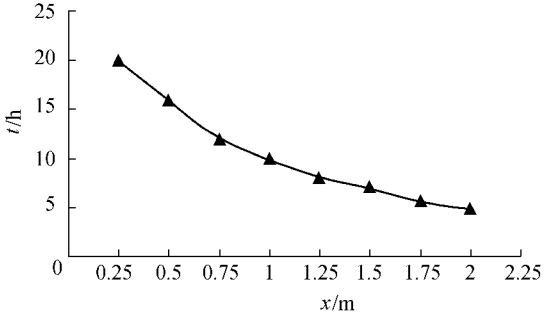


图 8 裂缝深度与开裂时间的关系
Fig. 8 Relationship between crack depth and crack time

4 结 论

- a. 裂尖区域在温度荷载作用下会出现微裂缝区,裂缝在应力达到材料强度前就开始扩展.
- b. 结构表面裂缝在一定的温度变化作用下有可能发展为失稳型的贯穿断裂,影响结构的稳定性.
- c. 外界温度的快速变化容易在较短时间和较低温度下造成结构表面裂缝开裂.即使是较为缓慢的温度变化,如果这种温度变化在足够的时间内保持不变,也有可能造成裂缝的开裂.
- d. 裂缝的深度越大,裂尖开裂就越容易和越迅速.

参考文献:

[1] 韦未,姚纬明.混凝土裂缝扩展模拟的研究进展[J].水利水电科技进展,2004,24(4):53-56.
[2] 邓爱民,张小芹,王向东,等.混凝土拱坝温度裂缝及其扩展稳定性分析[J].河海大学学报:自然科学版,2002,30(6):91-94.
[3] 王振波,徐道远,黄海燕,等.钢筋混凝土结构的裂缝扩展分析及断裂准则的设计方法[J].河海大学学报:自然科学版,1997,25(增刊3):28-32.
[4] 黄蔚,刘迎曦,周承芳.大坝防渗层新浇筑混凝土的水化热温度应力分析[J].湖南大学学报,2001,28(5):91-95.
[5] 李守巨,刘迎曦,张军,等.混凝土大坝闸墩裂缝预应力锚固过程中的应力分析及其加固实践[J].岩石力学与工程学报,2005,24(增刊2):5464-5468.
[6] 麦家煌,李惠娟,裴文林.用断裂力学法研究混凝土表面温度裂缝问题[J].水力发电学报,2002(2):31-36.
[7] 冯伯林,徐道远,周先贵,等.温度荷载作用下拱坝裂缝的断裂力学分析方法[J].合肥工业大学学报,2000,23(6):1003-1008.
[8] 周伟,常晓林,刘杏红,等.基于温度应力仿真分析的碾压混凝土诱导缝开裂研究[J].岩石力学与工程学报,2006,25(1):

122-127.

[9] LIM I L,JOHNSTON I W,CHOI S K. Anumerical model for simulation of fracture propagation in rock[C]//LI Huai-heng. Proc of Int Conf on Application of Computer Methods in Rock Mechanics and Engineering. Xi'an Shanxi Science and Technology Press,1993 : 397-404.

[10] 周维垣,寇晓东. 无单元法及其工程应用[J]. 力学学报,1998,30(2) :193-201.

[11] BELYTSCHKO T,LU Y Y. Element-free Galerkin methods[J]. Int J Numer Meth Engng,1994,37(2) :229-256.

[12] KRYSL P,BELYSCHKO T. Analysis of thin shells by element-free Galerkin method[J]. Comput Mech,1995,17 :26-35.

[13] BEISSEL S,BELYTSCHKO T. Nodal integration of the element-free Galerkin method[J]. Comput Methods Appl Mech Engrg,1996,139 : 4-74.

[14] 孔祥谦. 有限单元法在传热学中的应用[M]. 北京 科学出版社,1998.

Trace of crack propagation of rock under action of transient temperature field

SUN Yue-lin¹, SHEN Zhen-zhong¹, ZHANG Guo-shuang², ZHANG Qian³

(1. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China ;

2. Guannan County Quality Supervision Station for Construction Engineering, Lianyungang 222500, China ;

3. Jiangsu Provincial Academy of Environmental Science, Nanjing 210036, China)

Abstract: The EFM was employed to establish the crack propagation model of rock under the action of transient temperature field. By use of the theories of the fracture mechanics, variation of temperature, stress and stress intensity factor at the crack tip on the rock surface under the action of transient temperature field was analyzed. The critical conditions for and the process of the crack propagation or rock were studied, and the effects of the growth rate of external temperature and crack depth on the crack propagation were analyzed. The results show that the surface crack may possibly develop into the penetrative crack under variable external temperature, resulting in the damage to the structural stability, and the high growth rate of the external temperature may lead to the surface crack propagation in shorter time and at lower temperature. The larger the crack depth, the easier and faster the crack initiation.

Key words: transient temperature field ; rock ; crack propagation ; EFM

.....

《河海大学学报(哲学社会科学版)》征订启事

(CN32 - 1521/C, ISSN1671 - 4970, 季刊, 自办发行)

《河海大学学报(哲学社会科学版)》以马列主义、毛泽东思想、邓小平理论和‘三个代表’重要思想为指导,认真贯彻落实科学发展观,坚持实事求是的思想路线,贯彻‘双百’方针,弘扬时代主旋律,理论联系实际,为社会主义物质文明与精神文明建设服务.

《河海大学学报(哲学社会科学版)》为哲学与社会科学类学术期刊,主要刊登哲学、政治学、文学、语言学、法学、社会学、心理学、经济学、管理学、高等教育学等社会科学方面的研究成果、学术论文、综述等学术性文章.本刊可供上述有关专业的研究人员、管理人员和大专院校师生阅读与参考.《河海大学学报(哲学社会科学版)》为中国学术期刊(光盘版)入编期刊与中国学术期刊网入编期刊.

《河海大学学报(哲学社会科学版)》由河海大学主办,每季末出版,国内外公开发行.2009 年每本定价 5 元,每本邮费 1 元,全年订费 24 元.欢迎广大读者直接向编辑部订阅.联系地址:南京市西康路 1 号《河海大学学报(哲学社会科学版)》编辑部,邮政编码 210098.联系电话 025-83786376.