

高温后混凝土断裂韧度阻力曲线的权函数求解

俞可权, 商兴艳, 陆洲导

(同济大学 土木工程学院, 上海 200092)

摘要: 基于虚拟裂缝黏聚应力分布, 采用解析法与权函数法, 对高温后混凝土断裂全过程的裂缝扩展阻力曲线进行求解。试验采用楔入劈拉法, 设置 20~600 °C 共 10 组温度。混凝土断裂全过程划分为四个部分, 裂缝黏聚应力按照 Petersson 及 CEB-FIP Model 1990 两类双线性软化本构曲线分布。结果表明: 断裂韧度阻力曲线随裂缝扩展长度的增加而增长, 但随温度的上升呈下降趋势; 解析法与权函数法计算结果吻合较好; 软化本构曲线对断裂韧度阻力曲线的形状有明显影响。

关键词: 楔入劈拉法; 高温后; 权函数; 软化本构曲线; 断裂韧度阻力曲线

中图分类号: TU528.01

文献标志码: A

Determination of Residual Crack Extension Resistance of Post-fire Concrete by Weight Function Method

YU Kequan, SHANG Xingyan, LU Zhoudao

(College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: The residual crack extension resistance curves ($K_R(\Delta a)$ -curves) of post-fire concrete, associated with cohesive force distribution on fictitious crack zone of complete fracture process, were obtained by analytical method and weight function method. Wedge-splitting tests of 10 groups at temperatures from 20 °C to 600 °C were made. The cohesive force distribution corresponding to four different crack propagation stages was determined according to Petersson and CEB-FIP Model 1990 bi-linear softening traction-separation law. It is found that the residual fracture toughness increases with the increasing of the crack length, whereas, the $K_R(\Delta a)$ -curves decrease with the increasing temperatures for the thermal damage induced. $K_R(\Delta a)$ -curves calculated by analytical and weight function method have a good coincidence. The softening curves have an obvious influence

on the shape of $K_R(\Delta a)$ -curves.

Key words: wedge-splitting method; post-fire; weight function; softening traction-separation curves; crack extension resistance curves

在带有裂缝的混凝土类准脆性材料中, 裂缝扩展阻力由两部分组成: 一是其起裂前材料本身固有的抗裂能力, 称为起裂韧度 K_I^m , 此时荷载水平较低, 材料处于弹性阶段、微裂区很小, 且主裂缝尚未扩展; 另一部分是由主裂缝扩展引起的, 称为黏聚韧度 K_{II} , 由于虚拟裂缝面上黏聚应力的存在, 裂缝扩展过程中材料抵抗裂缝扩展的阻力会随等效裂缝长度的增加而增长, 表现出类似金属材料的断裂增韧现象。它与材料的抗拉强度、黏聚力分布及等效裂缝发展长度有关。

文献[1]采用解析法对断裂韧度阻力曲线进行研究, 指出裂缝阻力曲线随裂缝长度与混凝土强度的增加而增长; 作为材料基本属性, 其值显示出较小的尺寸效应, 但混凝土软化方程将影响阻力曲线的形状。在此基础上, 文献[2]进一步采用权函数法研究了不同几何形式(三点弯曲梁与紧凑拉伸试件)对阻力曲线的影响, 结果表明不同几何形式对确定尺寸与初始裂缝比试件的阻力曲线没有明显影响, 且权函数法计算结果与解析法计算结果吻合良好。

国内外众多学者对高温后混凝土的断裂性能进行了研究, 主要集中在断裂能的确定上^[3-6], 对断裂韧度的研究相对较少^[7-8]。研究表明, 高温后混凝土断裂能随温度基本保持先上升后下降的变化趋势, 高温后残余断裂韧度基本随温度保持单调下降的趋势。但高温后混凝土全过程断裂韧度阻力曲线的研究至今鲜见相关文献。

笔者对高温后混凝土断裂性能已进行了较为系

收稿日期: 2013-04-23

基金项目: 土木工程防灾国家重点实验室基金(SLDRCE09-D-02)

第一作者: 俞可权(1986—), 男, 博士生, 主要研究方向为混凝土抗火。E-mail: 12yukequan@tongji.edu.cn

通讯作者: 陆洲导(1957—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为混凝土抗火。E-mail: lzd@tongji.edu.cn

统的研究,包括断裂能的确定^[9],解析法求解断裂韧度及软化本构曲线对其影响^[10],断裂韧度阻力曲线的解析求解^[11]. 基于已有研究,本文采用权函数法确定高温后混凝土全过程断裂韧度阻力曲线,确定温度对断裂韧度阻力曲线的影响,并与解析法结果进行比较,讨论高温后混凝土软化本构曲线对断裂韧度阻力曲线的影响.

1 断裂韧度阻力曲线计算理论

1.1 软化本构曲线的确定

混凝土软化本构曲线描述了断裂过程区的特性. 根据直接拉伸试验,许多研究者提出了不同形式的混凝土软化本构曲线($\sigma-w$)表达式,包括线性与非线性软化本构曲线. 综合考虑计算结果的准确性以及软化本构曲线的简洁性,本文采用双线性软化本构曲线来计算黏聚韧度.

黏聚韧度由虚拟裂缝上的黏聚应力积分得到,黏聚应力的不同分布将对黏聚韧度的计算造成直接影响. 本文分别采用 Petersson^[12]与欧洲规范 CEB-FIP Model 1990^[13]双线性软化本构曲线来确定高温后混凝土断裂韧度阻力曲线及其对断裂韧度($K_R(\Delta a)$)的影响.

Petersson 双线性软化本构曲线

$$\begin{cases} \sigma_s(w_s) = \frac{f_t}{3} \\ w_s = \frac{0.8G_F}{f_t} \\ w_0 = \frac{3.6G_F}{f_t} \end{cases} \quad (1)$$

CEB-FIP Model 1990 双线性软化本构曲线

$$\begin{cases} \sigma_s(w_s) = 0.15f_t \\ w_s = \frac{2G_F}{f_t} - 0.15w_0 \\ w_0 = \frac{\alpha_F G_F}{f_t} \end{cases} \quad (2)$$

式中: f_t 为混凝土抗拉强度; G_F 为混凝土断裂能; $\sigma_s(w_s)$, w_s 分别为软化本构曲线转折点处应力与开口位移; w_0 为应力等于零时对应的开口位移; α_F 为混凝土变形系数,对于最大骨料粒径为 16 mm 的混凝土取为 7.

1.2 断裂韧度阻力曲线解析计算过程略述

文献^[11]详细地描述了高温后混凝土断裂韧度阻力曲线的解析计算过程,为与权函数计算断裂韧度阻力曲线进行比较,在此略述解析过程.

根据裂缝发展情况,在整个裂缝发展中需将断裂全过程划分为以下四个阶段: $a = a_0$, $a_0 < a \leq a_c$, $a_c < a \leq a_{w_0}$, 及 $a > a_{w_0}$. 其中, a_0 为预制裂缝长度, a_c 为临界等效裂缝长度, a_{w_0} 为裂缝尖端开口位移 w 达到软化本构曲线上最大开口位移 w_0 时对应的裂缝扩展长度. 随后根据各裂缝扩展阶段的黏聚应力分布情况,就能计算出断裂韧度阻力曲线.

1.2.1 第一阶段($a = a_0$)

通常,此阶段荷载较小,试件处于弹性状态,裂缝没有扩展. 因此, $K_R(\Delta a)$ 是常值,大小为起裂韧度 K_I^{ini} .

$$K_R(\Delta a) = K_I^{\text{ini}} \quad (3)$$

1.2.2 第二阶段($a_0 < a \leq a_c$)

对温度不超过 120 °C 的试件,裂缝失稳扩展前,临界裂缝尖端开口位移 w_c 值小于等于其转折点开口位移值(见图 1a),虚拟等效裂缝面上黏聚应力呈线性分布(见图 2a). 对温度超过 120 °C 的试件,裂缝失稳扩展前,混凝土临界裂缝尖端开口位移 w_c 值大于其转折点开口位移值(见图 1b),虚拟等效裂缝面上黏聚应力呈双线性分布(见图 2b). 图 2 中 h 为混凝土试件高度, $\sigma(w)$ 为裂缝口处应力, a_s 为软化本构曲线转折点处开口位移对应的裂缝长度.

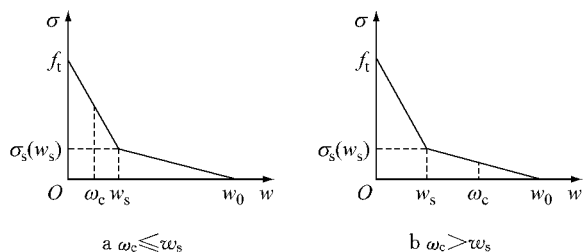


图 1 软化本构曲线对应的两种情况

Fig.1 Two different situations for softening traction-separation curves

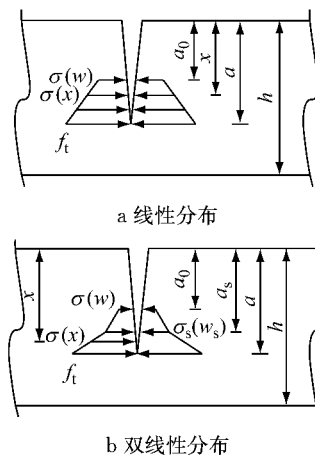


图 2 裂缝扩展第二阶段黏聚应力分布 ($a_0 < a \leq a_c$)
Fig.2 Cohesive force distribution on the crack propagation Stage II ($a_0 < a \leq a_c$)

(1) 当黏聚应力近似呈线性分布时,断裂韧性阻力曲线可由下式计算:

$$K_R(\Delta a) = K_I^{\text{ini}} + \int_{a_0}^a 2\sigma(x)F\left(\frac{x}{a}, \frac{a}{h}\right)/\sqrt{\pi a}dx \quad (4)$$

其中 $\sigma(x)$ 参照文献[11], $F(x/a, a/h)$ 参照文献[14].

(2) 当黏聚应力如图 2b 所示时(具体表达式参见文献[11]),黏聚韧性表达式为

$$K_I^c = \int_{a_0}^{a_s} 2\sigma_1(x)F\left(\frac{x}{a}, \frac{a}{h}\right)/\sqrt{\pi a}dx + \int_{a_s}^a 2\sigma_2(x)F\left(\frac{x}{a}, \frac{a}{h}\right)/\sqrt{\pi a}dx \quad (5)$$

其中 $\sigma_1(x)$ 和 $\sigma_2(x)$ 参照文献[11], a_s 参照文献[15]求解. 将起裂韧度和黏聚韧性代入式(4)计算断裂韧性阻力曲线.

1.2.3 第三阶段($a_c < a \leq a_{w_0}$)

该阶段中,黏聚应力呈双线性分布,计算过程同第 1.2.2 节情况(2),黏聚应力分布如图 3 所示,按照式(4)和(5)计算断裂韧性阻力曲线.

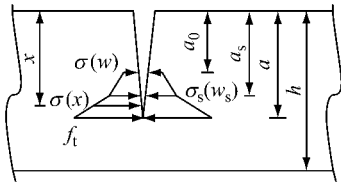


图3 裂缝扩展第三阶段黏聚应力分布($a_c < a \leq a_{w_0}$)

Fig.3 Cohesive force distribution on the crack propagation Stage III

1.2.4 第四阶段($a > a_{w_0}$)

在此阶段,荷载-裂缝开口位移($P-\delta$)曲线处于下降段.由于裂缝扩展长度已超过 a_{w_0} ,黏聚应力呈完全分布状态,预制缝端出现了新的无应力自由裂缝,黏聚应力分布如图 4 所示,其具体表达式参见文献[11].黏聚韧性表达式为

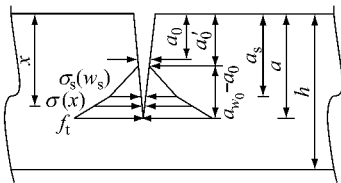


图4 裂缝扩展第四阶段黏聚应力分布($a > a_{w_0}$)

Fig.4 Cohesive force distribution on the crack propagation Stage IV

$$K_I^c = \int_{a-(a_{w_0}-a_0)}^{a_s} 2\sigma_1(x)F\left(\frac{x}{a}, \frac{a}{h}\right)/\sqrt{\pi a}dx +$$

$$\int_{a_s}^a 2\sigma_2(x)F\left(\frac{x}{a}, \frac{a}{h}\right)/\sqrt{\pi a}dx \quad (6)$$

其中 $a_0' = a - (a_{w_0} - a_0)$. 此时将起裂韧度和黏聚韧性代入式(4)计算断裂韧性阻力曲线.

1.3 断裂韧性阻力曲线权函数计算过程

采用权函数可以确定裂缝尖端应力强度因子的表达式^[16],文献[2]采用权函数法对常温下断裂韧性阻力曲线进行求解.在此基础上,本文对高温后混凝土断裂韧性阻力曲线进行确定.权函数法具体计算公式为

$$K_I^c = \int_0^a \sigma(x)m(x,a)dx \quad (7)$$

其中 $m(x,a)$ 为权函数. 当采用四项权函数时,

$$m(x,a) = \frac{2}{\sqrt{2\pi(a-x)}} \left[1 + M_1 \left(1 - \frac{x}{a}\right)^{1/2} + M_2 \left(1 - \frac{x}{a}\right) + M_3 \left(1 - \frac{x}{a}\right)^{3/2} \right] \quad (8)$$

其中 M_1, M_2, M_3 参见文献[2].

1.3.1 第一阶段($a = a_0$)

通常,此阶段荷载较小,试件处于弹性状态,裂缝没有扩展.因此, $K_R(\Delta a)$ 是常值,大小等于起裂韧度.

$$K_R(\Delta a) = K_I^{\text{ini}} \quad (9)$$

1.3.2 第二阶段($a_0 < a \leq a_c$)

(1) 当黏聚应力近似呈线性分布(见图 2a)时,黏聚韧性可由下式计算:

$$K_I^c = \frac{2}{\sqrt{2\pi a}} (A_1 B_1 a + A_2 B_2 a^2) \quad (10)$$

其中 A_1, A_2, B_1, B_2 参见文献[17].

(2) 当黏聚应力近似呈双线性分布(见图 2b)时,黏聚韧性可由下式计算:

$$K_I^c = \frac{2}{\sqrt{2\pi a}} [A_1 a (B_1 - B_3) + A_3 a^2 (B_1 - B_3 - B_4 + B_5)] - \frac{2}{\sqrt{2\pi a}} [A_3 a a_0 (B_1 - B_3)] + \frac{2}{\sqrt{2\pi a}} (A_4 B_3 a + A_5 B_3 a^2) - \frac{2}{\sqrt{2\pi a}} A_5 a a_s B_3 + \frac{2}{\sqrt{2\pi a}} A_5 B_5 a^2 \quad (11)$$

式中: $A_3, A_4, A_5, B_3, B_4, B_5$ 参照文献[17]. 将计算得到的黏聚韧性值代入式(4)计算断裂韧性阻力曲线.

1.3.3 第三阶段($a_c < a \leq a_{w_0}$)

该阶段中,黏聚应力呈双线性分布,计算过程同第 1.3.2 节中情况(2),黏聚应力分布如图 3 所示,

按式(4)和(11)计算断裂韧性阻力曲线。

1.3.4 第四阶段($a > a_{w0}$)

黏聚韧性表达式可参照式(11)确定,其中应力为零时所处的位置 a_{w0} 以及转折点 a_s 处的位置,参照文献[15]进行确定。此时将起裂韧度和黏聚韧度代入式(4)计算断裂韧性阻力曲线。

1.4 等效裂缝长度的确定

在确定断裂韧性阻力曲线的公式中,弹性等效裂缝长度根据线性渐进叠加假定^[18]可以求得,采用下式得到断裂全过程等效裂缝长度^[19]:

$$a = (h + l_0) \left[1 - \left(\frac{13.18}{\delta Et / P + 9.16} \right)^{1/2} \right] - l_0 \quad (12)$$

式中: l_0 为裂缝开口处刀口厚度; t 为试件厚度; δ 为高温后试件裂缝开口位移; P 为试件各时刻荷载,详细数值参见文献[20]; E 为高温后混凝土抗拉弹性模量,其计算公式如下:

$$E = \frac{1}{tc} \left[13.18 \left(1 - \frac{a_0 + l_0}{h + l_0} \right) - 9.16 \right] \quad (13)$$

其中 $c = \delta / P$ 可以通过试件 P - δ 曲线上弹性段以前任一点的数值计算。

2 试验概况

采用楔入劈拉法试验研究高温后混凝土断裂性能,试件尺寸统一采用 $230 \text{ mm} \times 200 \text{ mm} \times 200 \text{ mm}$,预制开口裂缝长度 80 mm ,厚 3 mm ,试件形式详见图 5(图中 $b=200 \text{ mm}$, $d=65 \text{ mm}$, $h=200 \text{ mm}$, $p=30 \text{ mm}$, $a_0=80 \text{ mm}$, $\theta=15^\circ$, P_h 为水平转化荷载, G 为试件自重)。试件混凝土配合强度为 C30。每个试件内均插有热电偶,位于预制裂缝附近,深入试件深度为 100 mm ,以使热电偶能够得到试件中心温度。试件自然洒水养护 60 d 后,采用 $300 \text{ mm} \times 300 \text{ mm} \times 900 \text{ mm}$ 的电炉对混凝土进行加热,历经 65, 120, 200, 300, 350, 400, 450, 500 和 600°C 高温,当试件达到设计温度时,即关闭电炉。

完整的 P - δ 曲线是求解断裂韧性阻力曲线的前提条件。图 6 描述了典型温度下混凝土试件的荷载-裂缝开口位移曲线以及各个温度下某一荷载-裂缝开口位移曲线,图中 WS11 等表示试件编号,余下皆同。由图 6a, b 可见,随着温度的上升,每个温度下试件的离散性增加, 600°C 时各试件极限荷载最大相差 23%。由图 6c 可知,各温度下极限荷载持续下降,而开口位移则明显增加,试件表现出明显的延性。

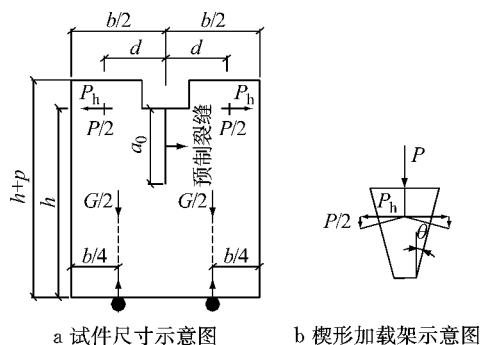
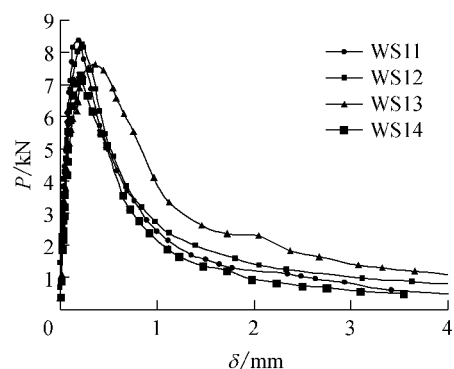
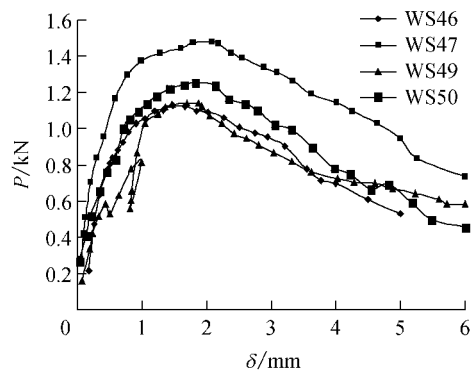


图 5 试件几何形式

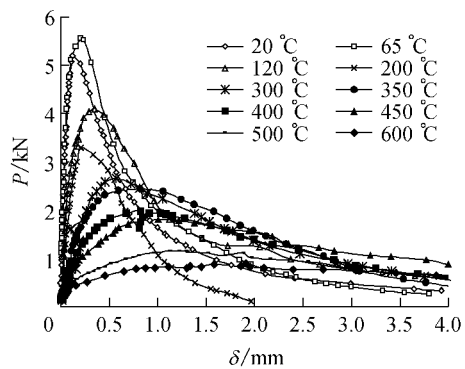
Fig.5 Geometry of specimen



a 120 °C



b 600 °C



c 各温度

图 6 高温后试件荷载-裂缝开口位移曲线

Fig.6 Curves of specimen load and the crack opening displacement

图7和8描述了典型荷载参数(起裂荷载 P_{ini} 与峰值荷载 P_{max})及典型位移参数(临界裂缝开口位移 δ_c 与临界裂缝尖端开口位移 ω_c)随温度 T 的变化趋势. 起裂荷载与峰值荷载随温度均单调下降, 起裂荷载平均值由常温下的 6.55 kN 下降到 600 °C 的 0.62 kN; 峰值荷载平均值由常温下 9.17 kN 到 600 °C 的 1.38 kN, 图中直线表示拟合曲线.

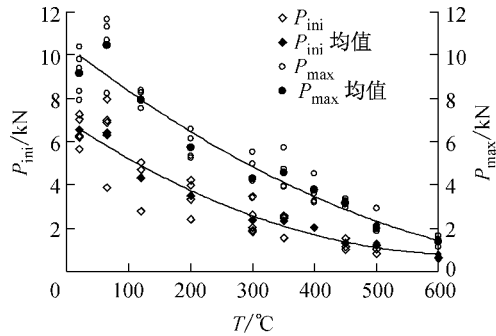


图7 起裂荷载与峰值荷载随温度的变化趋势

Fig.7 Variation tendency of P_{ini} and P_{max} with T

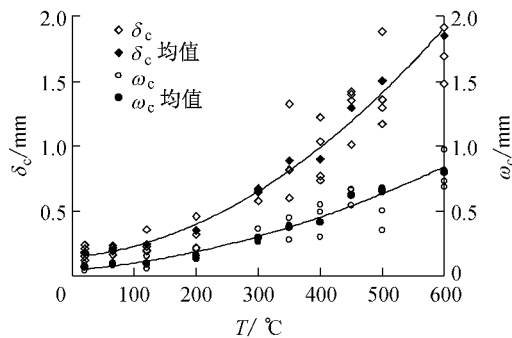


图8 临界裂缝尖端开口位移与临界裂缝开口位移随温度的变化趋势

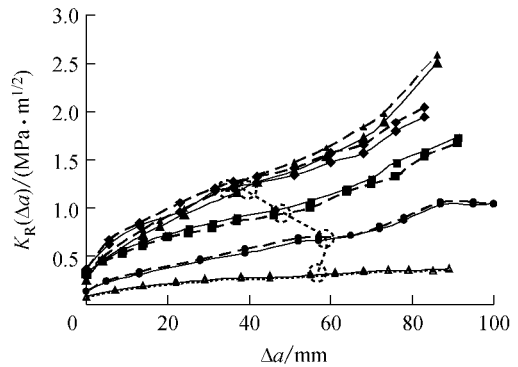
Fig.8 Variation tendency of ω_c and δ_c with T

与之相反, 临界裂缝开口位移 δ_c 与临界裂缝尖端开口位移 ω_c 随温度单调递增. 两者 600 °C 值均为常温下值的 10 倍左右.

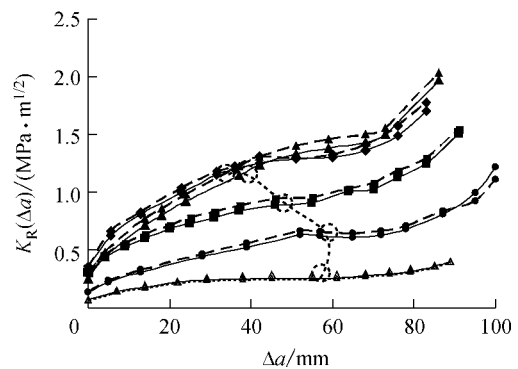
3 断裂韧性阻力曲线的计算

3.1 解析法与权函数法的比较

基于 Petersson 与 CEB-FIP Model 1990 两种软化本构曲线, 分别采用解析法与权函数法求解高温后混凝土断裂韧性阻力曲线. 由图9可见, 由两种方法求得的断裂韧性阻力曲线能够很好地吻合. 由于权函数法在积分计算中相较解析法的优势, 故今后在计算中可采用权函数法进行断裂韧度的计算, 不会产生明显误差. 图中圆圈标示出各温度下峰值荷载对应的断裂韧性.



a Petersson



b CEB-FIP



图9 解析法与权函数法断裂韧性阻力曲线比较

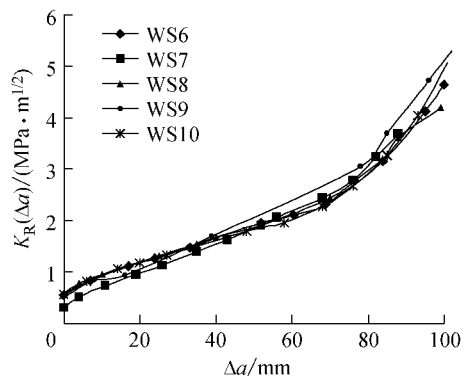
Fig.9 Comparison of crack extension resistance curves between analytical and weight function method

3.2 软化本构曲线对断裂韧性阻力曲线的影响

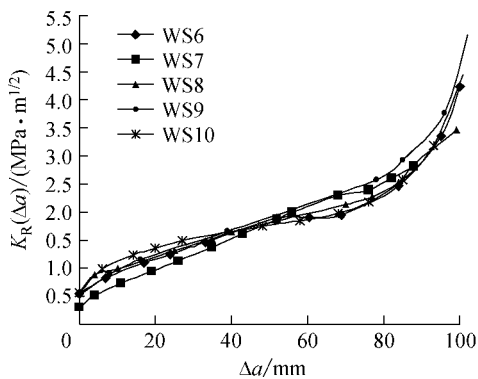
图10描述了采用解析法求解的 $K_R(\Delta a)$ 随裂缝扩展长度的变化关系. 由 Petersson 与 CEB-FIP 软化本构曲线求得的阻力曲线具有相似的变化趋势与变化形状. 断裂韧性随裂缝扩展长度的增加而增长. 由图10c可知, 软化本构曲线对高温后混凝土断裂韧性阻力曲线的具体变化形状是有影响的. 在裂缝扩展到一定长度前, 两者几乎重合, 而后采用 Petersson 曲线计算得到的韧性值大于采用 CEB-FIP 曲线计算值, 最后两者趋于接近.

断裂韧性阻力曲线的不同变化形状可由软化本构曲线间的关系加以阐述. 图11为两种软化本构曲线归一化后的对比图. 由图可知, 当裂缝扩展长度较小时(A阶段), 裂缝尖端位移尚未超过转折点开口位移 ω_s , 此时两类软化曲线相差甚微, 由此计算得到的阻力软化本构曲线基本重合. 当裂缝处于B阶

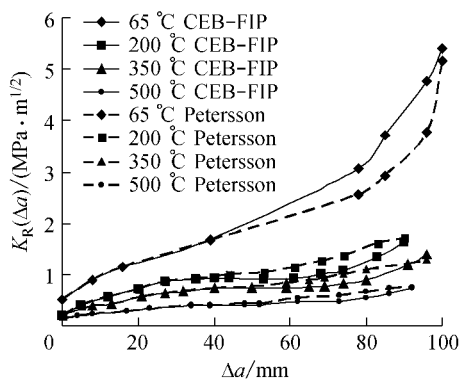
段时, Petersson 曲线高于 CEB-FIP 曲线, 故在此阶段两类断裂韧性阻力曲线出现偏差. 而当裂缝发展处于 C 阶段时, Petersson 曲线在部分裂缝长度上已退出工作, 而 CEB-FIP 仍在整个裂缝扩展区域存在黏聚应力, 故此时两类断裂韧性阻力曲线趋于接近.



a Petersson(65 °C)



b CEB-FIP(65 °C)



c 两类软化本构曲线各温度

图 10 软化本构曲线对断裂韧性阻力曲线的影响

Fig.10 Effect of softening traction-separation curves on crack extension resistance curves

4 结论

本文采用楔入劈拉法试验, 基于虚拟裂缝黏聚应力, 采用解析法与权函数法对高温后混凝土断裂

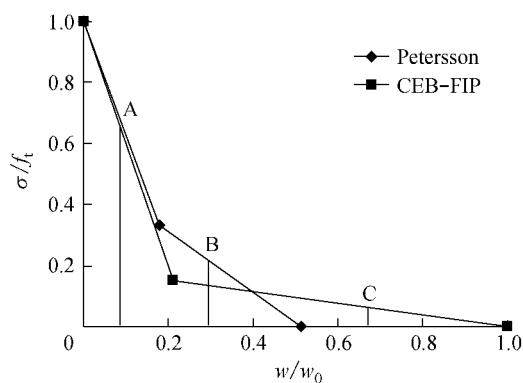


图 11 两类软化本构曲线对比

Fig.11 Comparison of two softening traction-separation curves

全过程的裂缝扩展断裂韧性阻力曲线进行求解, 并考虑不同软化本构曲线对断裂韧性曲线的影响. 将混凝土断裂全过程划分为四个部分, 各部分的裂缝黏聚应力按照 Petersson 及 CEB-FIP Model 1990 两类双线性软化本构曲线分布. 在裂缝扩展的第二阶段, 由于混凝土试件所受温度不同, 黏聚应力分布有两种情况, 这有别于常温普通混凝土的性能. 计算结果表明: 断裂韧性阻力曲线随着裂缝扩展长度的增加而增长, 但是随着温度的升高, $K_R(\Delta a)$ 值下降. 解析法与权函数计算结果能够较好地吻合, 但是黏聚应力的不同分布形式, 即不同软化本构曲线对断裂韧性阻力曲线的形状有较明显的影响.

参考文献:

- [1] Xu S L, Reinhardt H W. Crack extension resistance and fracture properties of quasi-brittle materials like concrete based on the complete process of fracture [J]. International Journal of Fracture, 1998, 92(2): 71.
- [2] Kumar S, Barai S V. Influence of specimen geometry and size-effect on the K_R -curve based on the cohesive stress in concrete [J]. International Journal of Fracture, 2008, 152(4): 127.
- [3] Baker G. The effect of exposure to elevated temperatures on the fracture energy of plain concrete [J]. Materials and Structures, 1996, 29 (6): 383.
- [4] Zhang B, Bicanic N, Pearce C J, et al. Residual fracture properties of normal and high-strength concrete subject to elevated temperatures [J]. Magazine of Concrete Research, 2000, 52(2): 123.
- [5] Nielsen C V, Bicanic N. Residual fracture energy of high-performance and normal concrete subject to high temperatures [J]. Materials and Structures, 2003, 36 (8): 515.
- [6] Zhangt B, Bicanic N. Fracure energy of high-performance concrete at high temperatures up to 450 °C: the effects of heating temperatures and testing conditions (hot and cold) [J]. Magazine of Concrete Research, 2006, 58 (5): 277.

(下转第 557 页)