

高温后混凝土的裂缝张开位移

俞可权, 商兴艳, 陆洲导

(同济大学 土木工程学院, 上海 200092)

摘要: 进行了高温后混凝土楔入劈拉法断裂试验, 研究裂缝扩展全过程中裂缝口张开位移与裂缝尖端张开位移之间的关系。根据裂缝口张开位移-裂缝尖端张开位移曲线判断起裂荷载, 并与采用荷载-裂缝口张开位移判断的起裂荷载进行比较, 两者能较好吻合。采用两参数和铰链模型由实测裂缝口张开位移值计算裂缝尖端张开位移, 并与试验尖端张开位移值进行比较, 发现两参数模型更为准确。确定高温后混凝土楔入劈拉试件裂缝尖端张开位移与裂缝扩展长度的关系, 两者呈指数关系。

关键词: 高温后混凝土; 楔入劈拉法; 裂缝尖端张开位移; 裂缝口张开位移; 起裂荷载

中图分类号: TU375.4

文献标志码: A

Crack Opening Displacement of Concrete Exposed to High Temperature

YU Kequan, SHANG Xingyan, LU Zhoudao

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

Abstract: Wedge splitting test was carried out on the concrete exposed to high temperature to investigate the relationship between crack tip opening displacement ω and crack mouth opening displacement δ during the whole fracture process. It is found that the initial cracking load determined from δ - ω curve shows a good coincidence with that determined from load-crack mouth opening displacement (P - δ) curve. The value of ω was calculated from δ based on the two parameters fracture model and hinge model, and the comparison with the experiment data show the two parameters fracture model has a better accuracy. Finally, the exponent relationship of ω and crack extension Δa was established.

Key words: post-fire concrete; wedge splitting method; crack tip opening displacement; crack mouth opening displacement; initial cracking load

1961年, Wells^[1]提出以裂缝尖端张开位移作为控制裂缝扩展的单一参量, 它不仅适用于线弹性情况, 也可用于弹塑性情况, 其临界值可作为金属材料断裂参数指标。1980年我国颁布的国家标准《裂缝张开口位移(COD)试验方法》^[2]和几年后美国颁布的《裂缝尖端张开位移标准试验方法》^[3]均把裂缝尖端张开位移作为一个有效的断裂参数指标。在线弹性断裂力学领域, 临界裂缝尖端张开位移与断裂韧度、临界能量释放率是等价的。在混凝土断裂力学中, 裂缝尖端张开位移是混凝土软化本构曲线的重要组成部分, 软化曲线又是计算混凝土非线性断裂性能的基础。所以, 准确地测定乃至计算裂缝尖端张开位移对混凝土断裂性能确定至关重要。

关于裂缝尖端张开位移的计算, Jenq等^[4]在其两参数断裂模型中提出了相应的计算式, 采用裂缝口张开位移计算裂缝尖端张开位移。该模型确定两个断裂参数: 失稳断裂韧度和临界裂缝尖端张开位移, 并认为它们均与尺寸无关。之后文献^[5]对不同体积和不同厚度三点弯曲梁的临界裂缝尖端张开位移进行了分析, 发现其基本是一个与试件尺寸无关的参数。文献^[6]对楔入劈拉试件临界裂缝尖端张开位移的尺寸效应进行了研究, 发现当试件高度大于400 mm时, 其值没有尺寸效应。

现阶段国内外关于裂缝口张开位移与裂缝尖端张开位移的研究均是在常温下进行的, 对高温后两者关系的研究成果至今鲜有相关报道。基于此, 本文实测高温后混凝土试件的裂缝口张开位移-裂缝尖端张开位移曲线, 尝试根据该曲线确定试件起裂荷载, 并与其他确定起裂荷载的方法进行精度比较。根据试验测得的裂缝尖端张开位移和裂缝口张开位移, 参照常温下两参数模型^[4]和铰链模型^[7]相应计算式, 由实测裂缝口张开位移值计算裂缝尖端张开

收稿日期: 2012-11-13

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: zjzykq@163.com

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

位移值,并与实测裂缝尖端张开位移值进行比较.最后确定裂缝尖端张开位移与裂缝扩展长度的关系.

1 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 $230\text{ mm} \times 200\text{ mm} \times 200\text{ mm}$,预制开口裂缝高 80 mm ,厚 3 mm ,试件形式详见图 1(图中 $b=200\text{ mm}$, $d=65\text{ mm}$, $h=200\text{ mm}$, $f=30\text{ mm}$, $a_0=80\text{ mm}$, $\theta=15^\circ$, P_h 为经过楔形加载架转换后的水平荷载, P 为试验施加的试验荷载).试件混凝土质量配合比为水泥:砂:石子:水 = $1.00:3.44:4.39:0.80$,粗骨料最大粒径为 16 mm ,标准配合强度为 C30.每个试件内均插有热电偶以便后期温度控制,试件自然洒水养护 60 d .每个温度均设有五个试块.

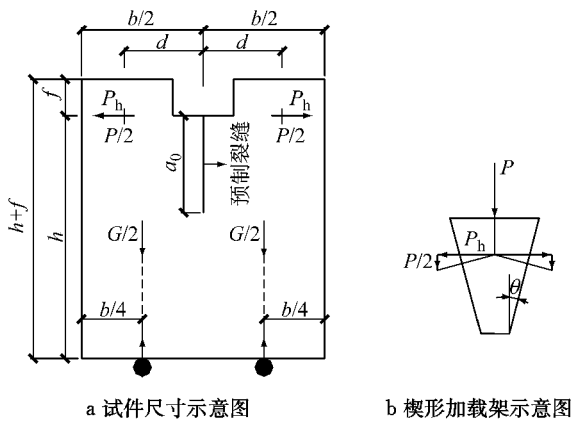


图 1 试件几何形式
Fig.1 Geometry of specimens

试验中采用净尺寸为 $300\text{ mm} \times 300\text{ mm} \times 900\text{ mm}$ 电炉对混凝土试件进行加热,历经 $65,120,200,300,350,400,450,500$ 和 600°C 高温.轴压试验和楔入劈拉法试验均在 $1\,000\text{ kN}$ 的电液伺服万能试验机上进行,利用动静态数据采集系统进行试验数据采集,加载全过程及试验全貌如图 2 和 3 所示.劈拉试验中在预制裂缝开口和尖端处分别安装量程为 4 mm 的夹式引伸计,以测得试件的裂缝口张开位移和裂缝尖端张开位移,引伸计位置如图 4 所示.试验中控制试验机加载速度为 $0.4\text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$,以保证试验得到稳定的荷载-裂缝口张开位移曲线($P-\delta$)和荷载-裂缝尖端张开口位移曲线($P-\omega$).



图 2 高温后混凝土试件试验全貌
Fig.2 Testing phenomenon of post-fire specimens

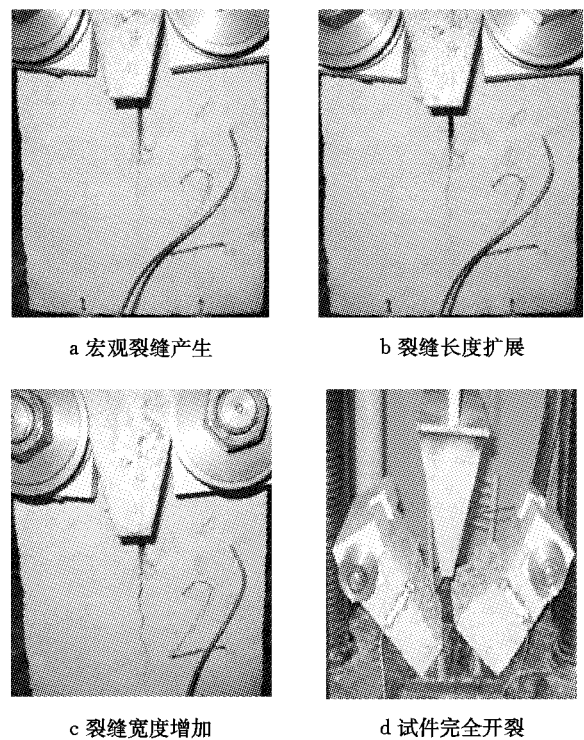


图 3 试件裂缝发展全过程
Fig.3 Whole fracture process

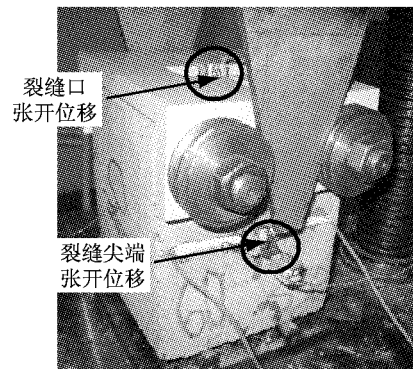


图 4 夹式引伸计位置
Fig.4 Location of extensometers

2 试验结果与分析

2.1 裂缝口张开位移与裂缝尖端张开位移的关系曲线

图 5 和 6 分别描述了各温度下典型试件的 $P-\delta$ 与 $P-\omega$ 曲线. 试验结果表明, $P-\delta$ 和 $P-\omega$ 曲线形状基本一样, 可以推测裂缝口张开位移与裂缝尖端张开位移之间存在着某种关系. 文献[8]提出裂缝口张开位移与裂缝尖端张开位移呈现出三段线性关系, 分别对应裂缝起裂、裂缝的稳定扩展与裂缝的失稳扩展, 且两个转折点分别对应起裂荷载和失稳荷载.

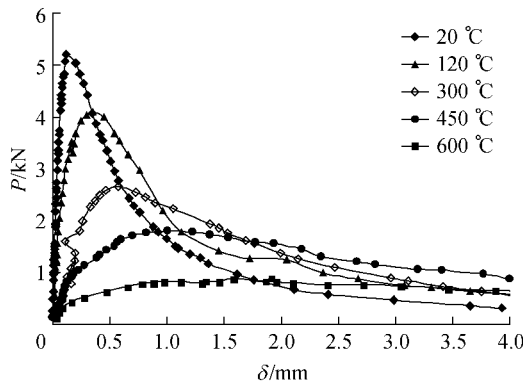


图 5 各温度下典型试件的 $P-\delta$ 曲线

Fig. 5 $P-\delta$ curves at different temperatures

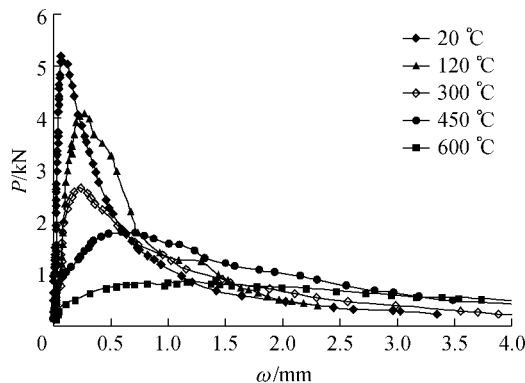


图 6 各温度下典型试件的 $P-\omega$ 曲线

Fig. 6 $P-\omega$ curves at different temperatures

本文作出各温度下实测裂缝口张开位移与裂缝尖端张开位移之间的关系, 如图 7 所示, 可以看出两者之间存在单一线性关系.

但局部放大后, 可以发现两者在某处存在较为明显的转折, 参照文献[3], 将该转折点对应荷载位移曲线, 确定试件起裂荷载 P_{ini} , 如图 8 所示. 在此需指出的是, 本文大部分试件的裂缝口张开位移-裂缝尖端张开位移曲线($\delta-\omega$)并没有出现三段式的转折,

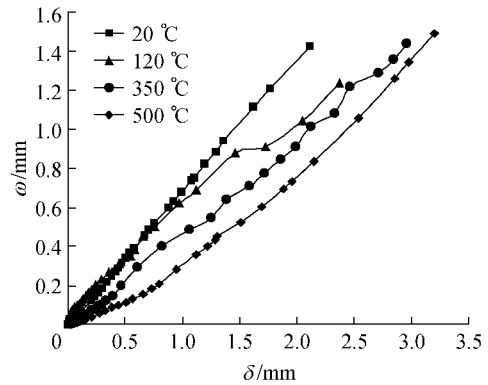
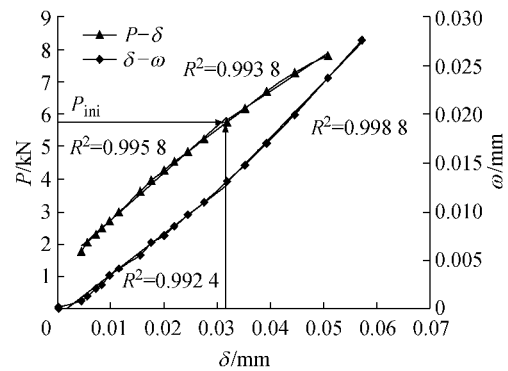
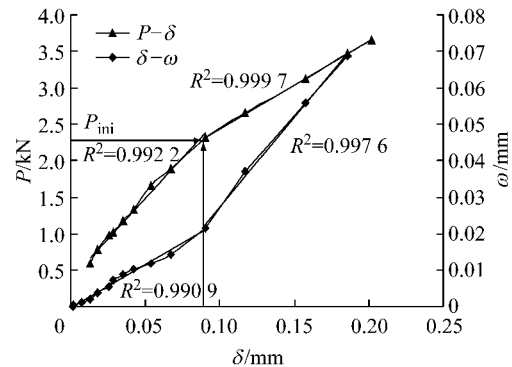


图 7 各温度下典型试件的 $\delta-\omega$ 曲线

Fig. 7 $\delta-\omega$ curves of specimens at different temperatures



a 65 °C 时采用 $P-\delta$ 曲线与 $\delta-\omega$ 曲线判断起裂荷载比较



b 300 °C 采用 $P-\delta$ 曲线与 $\delta-\omega$ 曲线判断起裂荷载比较

图 8 采用 $P-\delta$ 曲线与 $\delta-\omega$ 曲线判断起裂荷载比较
Fig. 8 Comparison of initial cracking loads with $P-\delta$ curve and $\delta-\omega$ curve

故在此不能采用如文献[8]中所述方法判断峰值荷载.

根据 $P-\delta$ 曲线与 $\delta-\omega$ 曲线得出的起裂荷载值见表 1(限于篇幅, 本文列出部分温度下数据).

由表可知, 采用 $\delta-\omega$ 曲线的转折点来判断起裂荷载与采用 $P-\delta$ 曲线判断的起裂荷载基本一致. 在总共 50 个试件中, 能够采用 $P-\delta$ 曲线来判断的共有 42 个试件, 采用 $\delta-\omega$ 判断起裂荷载的试件为 31 个, 并

且除三个试件采用两种方法判断的起裂荷载差距在 20% 以上外,其余试件两种方法的起裂荷载差距均在 20% 以内,误差在混凝土试验允许的范围,说明两种方法判断起裂荷载准确性较好. 但需要指出的是,部分 $\delta-\omega$ 曲线并不存在明显的转折点,其判断效果不如 $P-\delta$ 曲线来得稳定.

表 1 两者方法判断起裂荷载比较
Tab.1 Comparison of initial cracking load with two methods

试件编号	温度/°C	由 $P-\delta$ 曲线确定的起裂荷载/kN	由 $\delta-\omega$ 确定的起裂荷载/kN	两者比值
WS1	20	5 677.00	5 677.00	1.00
WS2		5 877.00	5 082.09	0.86
WS3		6 854.00	无法判断	—
WS4		4 015.10	4 973.80	1.24
WS5		5 652.99	5 652.99	1.00
WS11	120	5 828.35	无法判断	—
WS12		4 688.40	4 688.40	1.00
WS13		4 712.68	无法判断	—
WS14		2 794.50	3 589.55	1.28
WS15		—	—	—
WS21	300	1 886.19	无法判断	—
WS22		3 479.48	2 311.57	0.66
WS23		1 819.02	1 563.43	0.86
WS24		2 298.50	2 298.50	1.00
WS25		1 964.55	1 794.78	0.91
WS36	450	1 522.38	1 522.38	1.00
WS37		—	—	—
WS38		1 522.38	1 522.38	1.00
WS39		1 121.20	1 121.20	1.00
WS40		988.80	无法判断	—
WS46	600	757.46	无法判断	—
WS47		703.30	无法判断	—
WS48		805.90	805.90	1.00
WS49		582.09	582.09	1.00
WS50		763.00	654.85	0.86

2.2 临界裂缝尖端张开位移计算值与试验值的对比分析

裂缝尖端张开位移通常由裂缝口张开位移间接计算得到,目前比较公认的是在两参数模型中^[4]提到的三点弯曲梁的临界裂缝尖端张开位移计算式

$$\omega_c = \delta_c \{ (1 - a_0/a_c)^2 + (1.081 - 1.149a_c/D)[a_0/a_c - (a_0/a_c)^2] \}^{1/2} \quad (1)$$

式中: $a_0=80$ mm 为试件初始缝长度, a_c 为临界裂缝长度, D 为三点弯曲梁高度, 临界裂缝口张开位移 δ_c 可由试验直接测定. 此外, 还可以沿用金属断裂力学中采用“铰链模型”由裂缝口张开位移间接计算裂缝尖端张开位移的方法. 文献^[7]假设临界裂缝尖端张开位移只与裂缝亚临界扩展有关, 临界状态下 ω_c 与 δ_c 的关系为

$$\omega_c = \frac{a_c - a_0}{a_c + h_0} \delta_c \quad (2)$$

式中: h_0 为夹式引伸计刀口高度.

本文采用式(1)和(2)两种方法计算得到各温度下临界裂缝尖端张开位移, 并与试验测试值比较(见图 9), 详细结果见表 2(限于篇幅, 只列部分温度下数据).

表 2 临界裂缝尖端张开位移计算值与测试值的比较
Tab.2 Comparison of the calculated and experimental value of critical crack tip opening displacement

ω_c						
试件编号	温度/°C	a_c /mm	δ_c 试验测试值/mm	ω_c 试验测试值/mm	式(1) ω_c 计算值/mm	式(2) ω_c 计算值/mm
WS1	20	0.107	0.174	0.072	0.065	0.043
WS2		0.097	0.120	0.067	0.039	0.021
WS3		0.114	0.210	0.100	0.079	0.057
WS4		0.112	0.152	0.060	0.060	0.043
WS5		0.107	0.237	0.100	0.096	0.069
平均值		0.107	0.178	0.080	0.068	0.046
WS11	120	0.095	0.191	0.115	0.056	0.029
WS12		0.107	0.224	0.151	0.084	0.055
WS13		0.119	0.357	0.172	0.152	0.100
WS14		0.117	0.198	0.107	0.083	0.062
WS15		—	—	—	—	—
平均值		0.109	0.243	0.136	0.094	0.062
WS21	300	0.121	0.653	0.275	0.283	0.216
WS22		0.117	0.667	0.317	0.280	0.206
WS23		0.113	0.672	0.293	0.271	0.191
WS24		0.105	0.577	0.296	0.262	0.170
WS25		0.137	0.651	0.380	0.361	0.306
平均值		0.119	0.644	0.312	0.291	0.218
WS36	450	0.125	1.009	0.713	0.544	0.430
WS37		—	—	—	—	—
WS38		0.123	1.419	0.915	0.660	0.540
WS39		0.127	1.348	0.617	0.617	0.500
WS40		0.137	1.394	0.660	0.666	0.568
平均值		0.128	1.293	0.726	0.622	0.510
WS46	600	—	—	—	—	—
WS47		0.128	2.082	0.862	0.684	0.557
WS48		0.152	1.908	1.404	0.813	0.654
WS49		0.131	1.687	1.596	0.973	0.880
WS50		0.124	2.082	1.266	0.727	0.570
平均值		0.133	1.848	1.282	0.799	0.665

图 9 为计算临界裂缝尖端张开位移值与试验测试值的比较, 由图可见, 随着温度的上升临界裂缝尖端张开位移值呈明显增大趋势, 由两参数式得到的计算值与实测值较为吻合, 采用式(2)计算的临界裂缝尖端张开位移值较实测值小. 600 °C 时试件临界裂缝尖端张开位移试验测试值比计算值明显偏大, 可能原因为试件经受 600 °C 高温后, 裂缝尖端出现了较多的细微裂缝, 在加载时局部细微裂缝扩展, 造成所测临界裂缝尖端张开位移值较大.

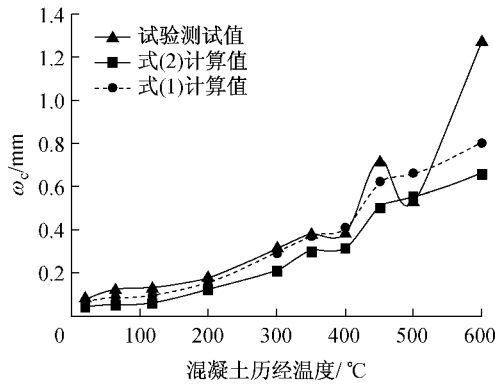


图 9 各温度下临界裂缝口张开位移实测值与计算值比较
Fig.9 Comparison of calculated and experimental value of ω_c .

2.3 裂缝尖端张开位移与裂缝扩展长度的关系

裂缝尖端张开位移 ω 和裂缝扩展长度 Δa 之间的关系反映了混凝土材料断裂过程区的基本特征,也是近年来许多学者关心的一个研究焦点. Du 等^[9]采用长、宽、厚分别为 162.4,40.6,51 mm,预制裂缝长 20.3 mm 的三点弯曲梁,采用白光云纹干涉法测定断裂过程区的裂缝尖端张开位移,得到了 $\omega-\Delta a$ 的实测关系曲线,并且 $\omega-\Delta a$ 呈现指数关系.

图 10 描述了各个温度下典型试件实测裂缝尖端张开位移与裂缝扩展长度的关系. 随着温度的上升,相同裂缝扩展长度对应混凝土试件的裂缝尖端

张开位移值呈增大趋势. 其原因归结为试件历经高温后,内部存在较多微裂缝,微裂缝数量及宽度随历经温度的升高而增加;另一方面混凝土内部骨料与砂浆之间的黏结作用将随高温作用而削弱.

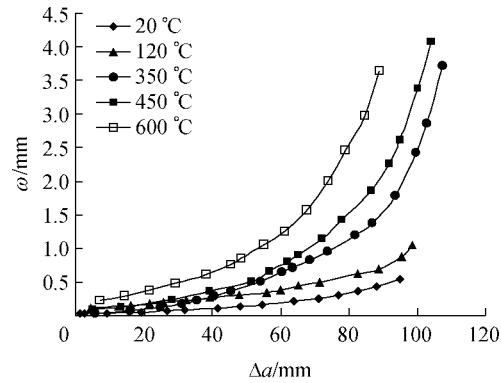


图 10 实测裂缝尖端张开位移与裂缝扩展长度的关系
Fig.10 Relationship of ω and Δa

采用式(1)计算各时刻裂缝尖端张开位移值,计算值与实测值随裂缝扩展长度关系如图 11 所示. 由图可知,各温度下计算裂缝尖端张开位移值与实测裂缝尖端张开位移值基本吻合,两者随裂缝扩展长度呈指数形式,这与已有文献中常温下 $\omega-\Delta a$ 的数学关系一致^[10]. 但如图 11b 所示,200 °C 下各试件采用多项式拟合效果更好.

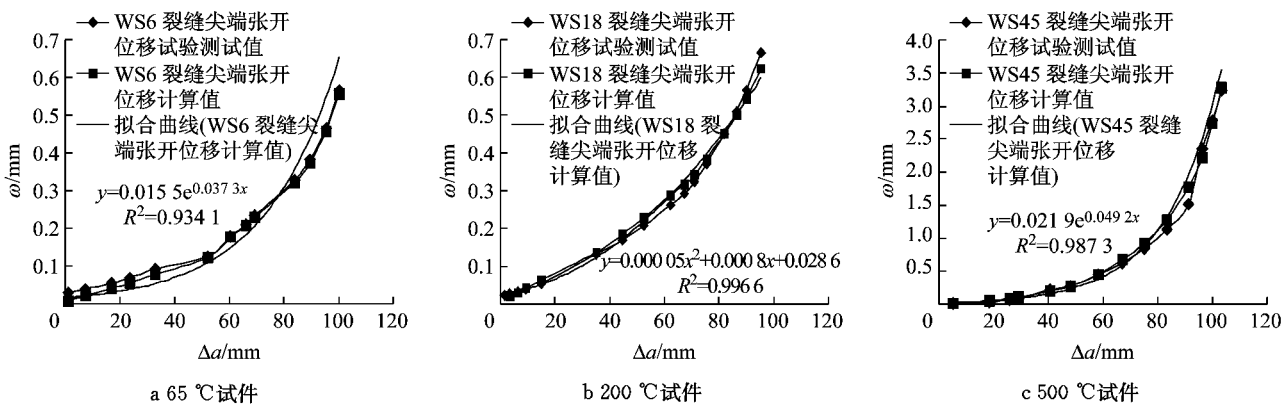


图 11 各温度下试件实测与计算裂缝尖端张开位移值和裂缝扩展长度的关系
Fig.11 Relationship of ω and Δa of specimens subjected to various temperatures

3 结论

本文对高温后混凝土试件裂缝口张开位移与裂缝尖端张开位移($\delta-\omega$)及两者的相互关系进行研究,采用 $\delta-\omega$ 关系曲线存在的转折点来判断起裂荷载并与由 $P-\delta$ 曲线得到的起裂荷载对比,发现两者具有较好的吻合性,但使用 $\delta-\omega$ 曲线判断起裂荷载的稳

定性不如 $P-\delta$ 曲线. 采用两参数模型,根据临界裂缝口张开位移试验测试值,计算临界裂缝尖端张开位移值,结果表明随着温度的上升,临界裂缝尖端张开位移值呈明显的增大趋势,且与试验测试值接近. 考虑到裂缝尖端张开位移在混凝土断裂性能计算中的作用,现阶段高温后混凝土断裂性能研究较少,本文的结论对今后的研究工作将有一定的参考作用. 最后