

# 新世纪海峡两岸高性能混凝土 研究与应用学术会议论文集

王培铭 黄兆龙 姚 武 主编

同济大学出版社

**图书在版编目(CIP)数据**

新世纪海峡两岸高性能混凝土研究与应用学术会议  
论文集/王培铭,黄兆龙,姚武主编. —上海:同济大学出  
版社,2002.6

ISBN 7-5608-2455-2

I. 新… II. ①王… ②黄… ③姚… III. 高强混  
凝土—学术会议—文集 IV. TU528.31-53

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2002)第 041011 号

**新世纪海峡两岸高性能混凝土研究与应用学术会议论文集**

作 者 王培铭 黄兆龙 姚 武

责任编辑 郁 峰 责任校对 钟文慧 装帧设计 陈益平

---

出 版 同济大学出版社  
发 行 (上海四平路 1239 号 邮编 200092 电话 021-65985622)  
经 销 全国各地新华书店  
印 刷 同济大学印刷厂印刷  
开 本 889mm×1194mm 1/16  
印 张 25  
字 数 640000  
印 数 1—1000  
定 价 80.00 元  
版 次 2002 年 6 月第 1 版 2002 年 6 月第 1 次印刷  
书 号 ISBN 7-5608-2455-2/TU·455

---

本书若有印装质量问题,请向本社发行部调换

# 海峡两岸高性能混凝土研究与应用学术会议

——新世纪的高性能混凝土

## 主办单位

同济大学混凝土材料研究国家重点实验室  
台湾科技大学  
中国建筑学会建筑材料分会  
上海市硅酸盐学会

## 协办单位

上海宝田新型建材有限公司  
嘉新京阳水泥有限公司  
HICON 启欣企业集团华西(四川)混凝土外加剂有限公司

## 学术委员会

主任: 吴科如 彭耀南  
委员: 许仲梓 梁正平 陆善后 朱稚石 王和源 陈建成 江 靖  
苏 南 许贯中

## 组织委员会

主任: 王培铭 黄兆龙 李 杰  
委员: 姚 武 孙振平 刘 威 湛渊源 李隆盛 茅 波 吴建国  
蔡机敏 陈开芳 王建国 钟文慧

# 前 言

高性能混凝土以其高工作性、高体积稳定性和高耐久性正日益受到科研人员和工程技术人员的关注,并逐渐在工程实践中得到推广应用。在新的世纪里,随着中国加入世贸组织和经济建设的蓬勃发展,作为最大宗的建筑材料,混凝土在大规模基础建设中仍将是不可替代的重要材料。伴随着社会的不断进步以及人们对资源、环保、施工和使用环境及使用性能要求的不断提高,使得混凝土材料的研究和应用面临新的挑战 and 新的机遇。高性能混凝土的研究和应用需要政府职能部门、学术团体、科研单位以及建筑施工单位的通力协作和共同努力。为了进一步推动高性能混凝土在中国的应用和发展,促进和加强海峡两岸混凝土技术的交流,探讨高性能混凝土材料与结构研究、应用和推广方面新的合作机制,同济大学混凝土材料研究国家重点实验室、土木工程学院建筑工程系、台湾科技大学营建系、中国建筑学会建筑材料分会和上海市硅酸盐学会共同组织并定于2002年6月在上海同济大学举办“新世纪海峡两岸高性能混凝土研究与应用”学术交流会。

为办好这次会议,特专门成立了学术会员会和组织委员会,负责论文征集、审稿及会议筹备工作。本届会议收到论文摘要80余份,经审查,最后选用了有代表性的60篇文章编入论文集。收录的论文主要包括以下几个主题:

## 特邀主题报告

高性能混凝土原材料及再生骨料混凝土研究

高性能混凝土材料力学性能研究

高性能混凝土的耐久性研究

高性能混凝土结构行为研究

高性能混凝土的工程应用

本书在编辑出版过程中,得到了学术界和企业界等有关单位的大力支持和帮助。尤其是同济大学出版社,在从论文编辑加工到印制出版的整个过程中,均给予了全力支持;上海宝田新型建材有限公司、嘉新京阳水泥有限公司和HI CON 启欣企业集团华西(四川)混凝土外加剂有限公司等企业为学术会议的举行和本书的出版提供了资助。在此,谨一并表示诚挚的谢意。

最后要特别感谢本书的全体论文作者,他们的厚爱、支持和辛勤劳动不仅促成了本届会议的顺利举行,而且将有力地促进海峡两岸高性能混凝土研究与应用成果的交流和发展。

编者

2002年5月

# 目 录

前言

## 特邀主题报告

高性能混凝土断裂面研究	吴科如 严 安 张 东等 (3)
高性能混凝土致密配比法耐久性的设计策略	黄兆龙 湛渊源 (14)
高性能机敏混凝土的研究	姚 武 (21)

## 高性能混凝土原材料及再生骨料混凝土研究

台湾南部骨材应用高性能混凝土之成效	林仁益 王和源 沉永年等 (31)
以飞灰取代水泥对高强度高性能混凝土质流性质之影响	颜 聪 陈冠宏 张朝顺等 (37)
水泥品质对高性能混凝土之影响	廖东升 黄兆龙 王建国等 (43)
矿渣粉大量替代水泥对混凝土外加剂作用效果的影响	孙振平 蒋正武 王玉吉等 (50)
新型羧酸系强塑剂的分子量对水泥浆体物化性质的影响	叶一贤 许贯中 林锦秀 (58)
混凝土减水剂作用机理探讨	何廷树 詹美洲 宋学锋 (62)
不同水库淤泥陶粒对高性能轻质混凝土性质之影响	洪盟峰 蔡昆城 (67)
HPC-1000 型强塑剂工程性质之研究	廖东升 黄兆龙 周文宗等 (73)
致密高性能混凝土水泥浆质与量分析	湛渊源 郑凯维 (80)
台湾再生骨材处理及应用于混凝土之研究	王和源 谢胜寅 罗国宪 (86)
混凝土外加剂与水泥适应性的改善措施	孙振平 蒋正武 王玉吉等 (92)
强塑剂对 C <sub>3</sub> A 水化行为之影响	郭文田 潘煌鏗 (99)
台湾南部地区骨材与预拌混凝土特性需求之研究	王和源 湛渊源 李隆盛 (105)
复掺混凝土性能的实验研究	孟伟峰 唐 华 史美伦等 (111)
再生混凝土强度性质之探讨	彭献生 陈豪吉 颜 聪 (115)
超轻量混凝土之配比及性质	陈豪吉 林建国 彭献生 (121)

## 高性能混凝土材料力学性能研究

高性能混凝土抗拉强度的长期性能研究	姚 武 李 杰 (131)
飞灰对高性能混凝土力学性质影响之研究	沉得县 张文溢 (136)
高强混凝土的抗拉断裂特性研究	姚 武 (144)
炉石粉对高性能混凝土力学性质影响之研究	沉得县 吴长信 (149)
不同质量粒料高性能混凝土的力学行为探讨	李隆盛 郑铭富 (158)
孔隙对高性能混凝土弹性模数之影响	潘煌鏗 郭文田 潘南飞 (164)
高强混凝土收缩开裂趋势的研究	马丽媛 姚 燕 王 玲 (170)
高强混凝土的断裂性能及其影响因素初探	张 东 吴科如 李宗津 (178)
高流动高性能混凝土设计与力学性质之研究	赵文成 (183)
无硅灰 C80 高性能混凝土研究	詹美洲 何廷树 宋学锋等 (189)
高性能混凝土的脆性研究	姚 武 陈 兵 严 安等 (195)
高温及高压作用对高性能混凝土巨微观性质影响之研究	沉得县 林铜柱 张道光 (201)
蒸汽养护对高性能混凝土早期性质之探讨	杨至弘 陈建成 张裕民 (211)

## 高性能混凝土的耐久性研究

- |                       |                    |
|-----------------------|--------------------|
| 飞灰高性能混凝土防蚀效益之研究       | 侯威铭 张炳坤 黄兆龙 (219)  |
| 混凝土不同应力状态下碳化速度的研究     | 袁承斌 张德峰 刘荣桂等 (226) |
| X 粉超高强混凝土抗化学腐蚀性能研究    | 万朝均 蒲心诚 (232)      |
| 混凝土不同应力状态下氯离子侵蚀性的研究   | 袁承斌 张德峰 刘荣桂等 (237) |
| 抗酸雨混凝土的研究             | 陈寒斌 陈剑雄 吴建成 (245)  |
| 外加剂中的碱及其对混凝土碱-集料反应的影响 | 田培 王玲 姚燕等 (251)    |
| 高性能混凝土耐火性能之研究         | 陈建忠 王天志 萧江碧 (256)  |
| 高性能混凝土高温下断裂特性的研究      | 严安 张雄 吴科如 (265)    |
| 混凝土绿色性质之探讨            | 杜宗岳 黄兆龙 (270)      |

## 高性能混凝土结构行为研究

- |                            |                   |
|----------------------------|-------------------|
| 大尺寸混凝土试件轴向拉伸应力-变形全曲线的试验研究  | 陈萍 梁正平 黄书秦等 (279) |
| 预应力高性能混凝土梁低周反复荷载试验研究       | 程斌 薛伟辰 李杰 (285)   |
| 以类神经网络预测横箍筋对高强度钢筋混凝土柱之围束效应 | 汤兆纬 颜聪 (292)      |
| 高强混凝土框架边节点抗震性能分析           | 肖良丽 刘翠兰 (298)     |
| 高性能混凝土疲劳性能初步分析             | 肖建庄 陈德银 (304)     |
| 钢纤维混凝土轴拉应力-变形全曲线的试验研究      | 刘小艳 刘大智 王毅等 (310) |

## 高性能混凝土的工程应用

- |                            |                    |
|----------------------------|--------------------|
| 高性能刚性混凝土质量管理策略之研究          | 王和源 周达成 (317)      |
| 高强混凝土的配合比设计及其应用            | 姚武 (323)           |
| 高性能混凝土主动式质流测仪研发与应用         | 张朝顺 陈冠宏 颜聪 (329)   |
| 高耐久性混凝土在桥梁工程中的应用研究         | 杨全兵 张树青 朱蓓蓉 (335)  |
| 淡化海砂在高性能混凝土中应用研究           | 卢福海 肖建庄 史美鹏 (342)  |
| 预拌自密实混凝土外加剂的研究与应用          | 林政 林莺 李欢欢等 (348)   |
| 高性能混凝土工程性质之探讨              | 张炳坤 侯威铭 黄兆龙等 (353) |
| 松花江悬索斜拉桥 C50 级高强高性能混凝土应用研究 | 朱广祥 朱卫中 尹冬梅等 (358) |
| C100 级高强高性能混凝土泵送施工总结       | 王姿涵 孙国智 刘勇胜等 (363) |
| 高性能混凝土剪力墙的软化桁架模型分析         | 刘志伟 周克荣 (370)      |
| 采用立磨生产磨细粒化高炉矿渣微粉之初识        | 王彩英 (376)          |
| 预拌厂产制高性能混凝土品保策略之研究         | 王和源 江吉弘 (381)      |
| 现代高性能混凝土预制构件的应用领域和发展       | 朱稚石 (387)          |

# 特邀主题报告

# 高性能混凝土断裂面研究

吴科如, 严安, 张东, 姚武

(同济大学混凝土材料研究国家重点实验室, 上海, 200092)

**摘要:** 根据激光三角测量物体表面的原理, 研制了可对混凝土的断裂面进行三维轮廓重构的实验装置, 同时用数字图像分析仪测定了断裂面粗集料的信息。在此基础上, 提出了可利用断裂面分数维和粗集料的拉断概率两个参数表征断裂面的特征以及它们的测定和计算方法。研究了混凝土组成材料对断裂面参数的影响和断裂面参数与混凝土力学性能的关系。采用断裂面分数维确定了更为精确的混凝土断裂能测定值。探讨了根据上述结果进行混凝土改性的可能性。

**关键词:** 断裂面; 激光三角法; 分数维; 拉断概率; 力学性能

## 一、引言

自 Mandelbrot 开创了材料断裂面的分形研究以来<sup>[1]</sup>, 断裂面研究在材料科学中已成为一个重要方向。进行断裂面研究, 首先必须解决断裂面信息的收集及定量测定问题。为此, 曾采用过两类方法: 接触式测量和非接触式测量。接触式测量主要是通过计算机控制探针 LVDT (Linear Variable Differential Transformer) 的移动并采集数据; 非接触测量主要采用光学法。除了直接测量断裂面微观信息之外, 许多研究者还借助扫描电镜 SEM、原子力显微镜 AFTM 等显微技术在微观层次上对断裂面的信息进行过测量。在混凝土断裂面信息收集及定量测定方面, Saouma<sup>[2]</sup> 采用接触式测量方法测定了混凝土楔形劈裂试件的断裂面; Tandon 也采用该技术测定了不同加载速率下混凝土试件断裂面切缝端部的粗糙度值<sup>[3]</sup>; Issa 则利用试件断裂面在水中高度的变化在 CCD 上产生不同灰度值的原理, 采用图像分析技术无损测量了混凝土断裂面<sup>[4]</sup>; Lange 采用串联式的扫描共焦显微镜方法 (tandem scanning confocal microscope) 测定了水泥净浆和砂浆断面的粗糙度和分数维<sup>[5]</sup>; Addition 直接利用数字图像技术得到断裂面的数条线轮廓, 并建立了描述断裂面不规则轮廓的统计方程<sup>[6]</sup>; Wada 采用数字图像处理技术获得了断裂面的二维信息<sup>[7]</sup>; 最近, Carpinteri 采用激光测距仪结合计算机控制的步进电机直接测试了混凝土断裂面的三维轮廓<sup>[8]</sup>。此外, 不少研究工作者在研究混凝土材料的力学行为的同时, 直接观察了断裂面信息<sup>[9-15]</sup>。为了定量地表征断裂面的特征, 仅有断裂面信息是不够的, 还必须选取合理的断裂面参数。英国伯明翰大学在欧洲共同体科技开发项目的支持下, 对三维表面粗糙度的特征化作了初步的研究, 提出了一个包含 14 个参数的基本参数组<sup>[16]</sup>。由于上述粗糙度参数不能区分处处可导的连续面和处处连续不可导的奇异面, 对于断裂表面极端不规则混凝土材料, 需要借助适当的数学工具进行描述。分形几何学的创立为人们认识自然界广泛存在的 irregular 几何形貌及复杂的物理现象提供了强有力的数学工具。1984 年, Mandelbrot 等在其开创性的论文中指出, 金属材料的冲击断面具有分形特征, 且断裂面的分数维是材料韧性的一种度量。此后, 大量的试验研究表明, 许多材料的断裂表面在一定尺度范围内具有分形特征, 断裂表面的粗糙程度和不规则性可以用分维数来描述。目前, 确定断裂面分数维的方法有小岛法、码尺法、谱分析法、二次电子法、

相关函数法等。这些方法的一个共同特点是间接地通过剖面法（降低一维）来确定断面分数维。但它们所得到的结果不尽相同。

混凝土断裂面的分数维给出了断裂面形貌的定量表征，但混凝土材料中裂缝遇到粗集料时存在两种不同的扩展路径：穿过粗集料和绕过粗集料，而且它们与混凝土的力学性能有关<sup>[17]</sup>。分数维不能区分这两种裂缝扩展路径。因此，我们曾提出用粗集料的拉断概率，即断裂面上被拉断的粗集料的面积与断裂面上总的粗集料的面积之比，作为定量表征混凝土断裂面特性的另一参数<sup>[18]</sup>。

在混凝土类材料断裂面分数维与力学性能之间的关系方面，Issa 研究了三种不同集料粒径混凝土的临界应变能释放率与紧凑拉伸试件断裂面分数维之间的关系，发现断裂面分数维越大，能量释放率越大<sup>[4]</sup>。Saouma 测量了不同试件大小、不同集料类型和大小的楔形劈裂试件断裂面分数维，同时测量了断裂能  $G_F$  和断裂韧性  $K_{Ic}$ ，得出了分数维越大，混凝土的断裂韧性和断裂能越小的关系。由于相关系数较低，Saouma 指出这一关系能否应用应慎重考虑<sup>[2]</sup>。Lange 则测试了 7d 和 28d 龄期六种配合比的水泥净浆和砂浆切口三点弯曲梁的断裂面分数维和粗糙度指数，并测定了它们的线弹性断裂韧性、双参数模型的断裂韧性和临界裂缝增长的长度分数维，结果表明，粗糙度越大，断裂韧性和临界裂缝扩展长度越大<sup>[5]</sup>。可见他们之间所得结果是不一致的。

本文利用自行研制的、基于激光三角测距原理的数字图像系统重构了混凝土断裂面三维轮廓，并利用图像分析仪收集了断裂面上粗集料的信息，提出了描述断裂面特征的断裂面参数及其测定方法，开展了混凝土组成材料与断裂面参数以及断裂面参数与混凝土力学性能关系的研究。此外还探讨了通过采用断裂面分数维确定更为精确的混凝土断裂能测定值和根据上述结果进行混凝土改性的可能性。

## 二、断裂面信息的测量

### 2.1 断裂面轮廓三维重构

本研究采用无接触激光表面测量技术重构断裂面三维轮廓<sup>[19]</sup>。其基本原理为激光束经柱状透镜扩束并准直后成为一束很薄的片状光束投射到物体上，载有物体的平台在步进电机带动下沿给定方向以一定速度平移，完成片光投影在物面上的二维扫描，在另一方向上用面阵 CCD 接受该片光图像。在试件平移过程中控制图像采集卡的采集间隔，使平移速度与图像采集速度匹配，以完成图像的适时采集。由于物面的高低不同，每条投影线在 CCD 光敏面上的像为一曲线，计算该曲线上各像素点偏离标准像（参考平面）的位置，按激光三角测距原理可得出物面的深度变化。图像处理及数值转换借助计算机软件及自编程序完成。整个试验装置由光路系统、传动系统和成像系统三部分组成。

### 2.2 断裂面上粗集料的信息收集

采用 LEICA 公司生产的 Quantiment600 图像分析仪收集断裂面上粗集料的信息<sup>[18]</sup>。它是组合式高效能图像处理设备，由成像系统、图像处理器及输出系统三部分组成。试验中，对同一断裂面进行两次处理。第一次对断裂面上所有粗集料相进行测试，选中断裂面上所有粗集料投影，图像分析仪能根据所选定的参数（本试验中为长度、面积），自动计算出每个粗集料的长度、面积、粗集料个数以及总粗集料面积等。第二次仅考虑断裂面上被拉断的粗集料相，即在第一次处理的图像基础上，对照原断裂面，去掉拔出的粗集料相，采用与第一次处理相同的方法，计算出被拉断的粗集料的各参数。对每一组混凝土进行六个断裂面的图像处理，并分别统计六个断面的第一、二次处理的结果，再计算每组混凝土断面上总粗集料面积平均值（TCAA）以及被拉断的粗集料面积平均值（RCAA）。

## 三、断裂面的特征参数

### 3.1 断裂面的分数维

对测到的断裂面三维轮廓数据可以采用分形几何进行处理。众所周知，确定分维时，覆盖法是最通用的方法，它是通过变化面积微元的尺寸  $r$  得到不同的断裂面总面积  $A$ ，并据此计算断裂面的分数维  $D$ ：

$$D = 2 - \lim_{r \rightarrow 0} \frac{\log A(r)}{\log r} \quad (1)$$

图1为采用不同大小的网格覆盖断裂面，当选定尺度为  $r \times r$  的投影网格中第  $i$  个正方形方格  $abcd$  ( $a, b, c, d$  为第  $i$  个方格的四个角点) 后，由本文的测试系统可得出对应  $a, b, c, d$  点表面的高度值。根据这些角点的高度值可以近似计算出该投影网格  $abcd$  对应断裂表面上的粗糙表面积  $S_i = S_{1i} + S_{2i}$  (图2)。 $S_{1i}$  和  $S_{2i}$  由点  $a_i, b_i, c_i$  和  $d_i$  决定：

$$\begin{aligned} S_{1i} &= \frac{1}{2} \sqrt{r^2 (h(i, j+1) - h(i, j))^2 + r^2 (h((i+1), j) - h(i, j))^2 + r^4} \\ S_{2i} &= \frac{1}{2} \sqrt{r^2 (h((i+1), j+1) - h((i+1), j))^2 + r^2 (h((i+1), j+1) - h(i, j+1))^2 + r^4} \end{aligned} \quad (2)$$

$h(i, j)$ 、 $h((i+1), j)$ 、 $h((i+1), j+1)$  和  $h(i, j+1)$  为微元上各点的高度坐标， $r$  为网格尺码的大小。整个投影网格对应断裂面上的总的粗糙面积可近似为：

$$S_T(r) = \sum_{k=1}^{N(r)} S_k(r) \quad (3)$$

式中  $N(r)$  为在尺度为  $r \times r$  下粗糙面积的投影网络的网格数目。若取不同的  $r$  值，将测得不同的覆盖面积  $S_T(r)$ 。

对投影覆盖法中面积对数与尺码对数进行回归分析，根据式 (1)，回归直线斜率的绝对值加 2 即为用投影覆盖法所得的分形维数。

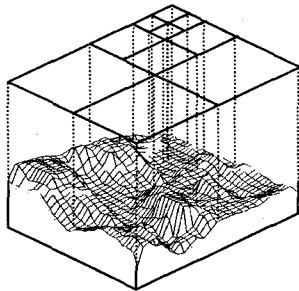


图1 网格覆盖法

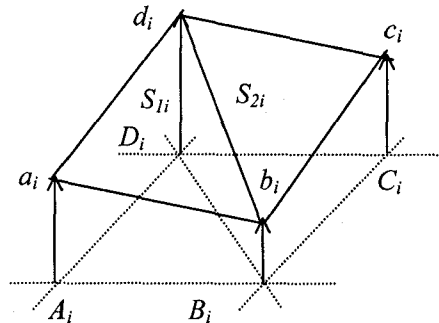


图2 面积微元

### 3.2 断裂面粗集料拉断概率

混凝土材料在细观层次上可视为由粗集料相和砂浆相组成，这两相力学性能有较明显的不同。通常，混凝土破坏时，可能出现：(1) 裂缝沿集料的偏转，即粗集料的脱粘；(2) 裂缝穿过粗集料，即粗集料被拉断。为了能体现断裂面上粗集料的特征，我们定义断裂面上被拉断的粗集料面积 ( $RCAA$ ) 与断裂面上全部粗集料的面积 ( $TCAA$ ) 之比作为粗集料的拉断概率 ( $RPCA$ )：

$$RPCA = \frac{RCAA}{TCAA} \quad (4)$$

#### 四、实验结果及讨论

水泥为 525# 普通硅酸盐水泥, 28d 抗压强度 63.5MPa; 超细矿渣的勃氏比表面积 600m<sup>2</sup>/kg; 细集料为细度模数为 2.85 的天然河砂; 粗集料包括碎石、卵石和陶粒, 碎石集料的最大粒径分别为 5mm, 10mm, 16mm 和 20mm。碎石和卵石的压碎指标分别为 8.3%和 8.45%; 超塑化剂为花王高效减水剂。试验的水胶比为 0.26, 0.30 和 0.44 三个系列的混凝土。集料粒径范围在 5~16mm, 有 C-44, C-30 和 C-26; 集料粒径范围在 0~5mm, 5~10mm, 10~16mm 和 16~20mm 的有 C-44 和 C-26; 集料粒径为 10~16mm 的还有 C-30; 对于集料粒径为 10~16mm 的 C-44 和 C-26, 采用碎石、卵石和陶粒等不同的集料; 此外, 还用粒径为 5~20mm 的赤铁矿作为集料置换集料总体积率 25%, 50%和 75%的粗集料配制了 M-26 和 M-30。高性能混凝土的配合比和力学性能如表 1。

表 1 高性能混凝土的配合比

编号	水胶比	粗集料粒径 /mm	水泥 kg/m <sup>3</sup>	超细矿渣 kg/m <sup>3</sup>	粗集料品种 /kg/m <sup>3</sup>				抗压强度 MPa	劈拉强度 MPa	断裂韧性 N/m	断裂能	分数维	拉断概率
					碎石	卵石	陶粒	冶金						
C44-5-10	0.44	5~10	267	115	1100				60.3	5.11	0.88	160	2.087	0.596
C44-10-16	0.44	10~16	267	115	1100				68.1	5.30	1.17	194	2.121	0.594
R44-10-16	0.44	10~16	267	115		1100			47.5	3.60	0.70	174	2.0831	0.426
L44-10-16	0.44	10~16	267	115			1100		33.3	3.20	1.08	88	2.0724	0.418
C44-16-20	0.26	16~20	267	115	1100				59.1	4.23	0.83	212	2.126	0.508
C26-5-10	0.26	5~10	472	202	948				81.7	6.89	1.09	172	2.0479	0.646
C26-10-16	0.26	10~16	472	202	948				84.6	7.50	0.97	200	2.0744	0.799
R26-10-16	0.26	10~16	472	202		948			65.7	4.80	0.55	143	2.0806	0.794
L26-10-16	0.26	10~16	472	202			948		57.0	2.80	0.37	73	2.1003	0.654
C26-16-20	0.26	16~20	472	202	948				75.7	6.32	1.23	205	2.0785	0.697
M30-5-20-1	0.30	5~20	420	180	986				66.1	5.03	1.27	111	2.145	
M30-5-20-2	0.30	5~20	420	180	740			363	73.4	5.55	1.31	160	2.167	
M30-5-20-3	0.30	5~20	420	180	493			727	79.5	5.67	1.35	190	2.181	
M30-5-20-4	0.30	5~20	420	180	246			1090	80.6	5.71				
M26-5-20-1	0.26	5~20	472	202	948				86.5	6.15	1.33	146	2.074	
M26-5-20-2	0.26	5~20	472	202	711			354	88.5	6.91	1.46	173	2.083	
M26-5-20-3	0.26	5~20	472	202	474			708	89.8	7.29	1.69	179	2.088	
M26-5-20-4	0.26	5~20	472	202	237			1062	90.8	7.32				

测定试件 28d 的抗压强度  $f_c$ 、劈拉强度  $f_{st}$ 、断裂韧性  $K_{Ic}$  和断裂能  $G_F$ 。文献<sup>[20]</sup>建议采用断裂能与混凝土荷载-挠度全曲线的峰值荷载  $P_u$  的比值  $D_u$  ( $D_u = G_F/P_u$ ) - 延性指数来表示混凝土的开裂变形的特征, 并用它作为反映材料脆性程度的参数  $P_u$ 。考虑到  $P_u$  与试件的尺寸和形状有关, 我们采用 Bazant 的尺寸效应模型中的名义应力  $\sigma_n$  代替  $P_u$ , 将延性指数定义为

$$D_u = \frac{G_F}{\sigma_N}, \quad \sigma_N = c_n \frac{P_u}{BW} \quad (5)$$

式中  $c_n$ —与试件的尺寸和形状有关的常数； $B$ 、 $W$ —分别为试件的宽度和高度。

#### 4.1 材料组成对断裂面参数的影响

图3—图5给出了分数维与水胶比、最大集料粒径和集料品种的关系。从图中可以看出，分数维随水胶比的增大而增加，当集料粒径增加时，分数维也随之增加，特别是水胶比较大一组；对于三种不同品种的集料，在水胶比为 0.44 时，集料强度越高，断裂面分数维越大；而在水胶比为 0.26 时，则各种集料混凝土的断裂面分数维较为接近。

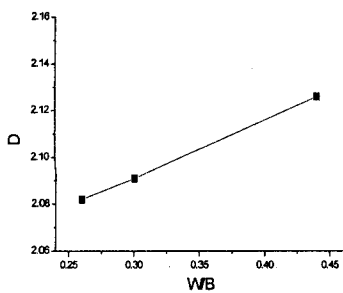


图3 分数维与水胶比的关系

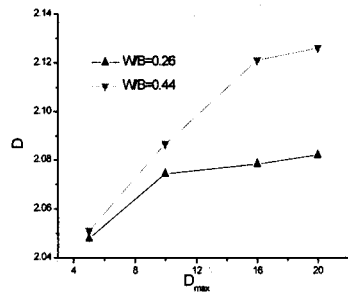


图4 分数维与最大集料粒径的关系

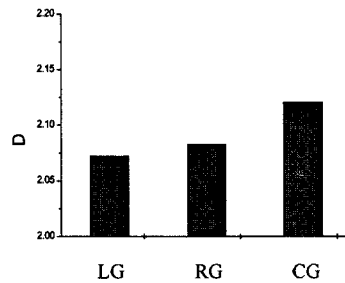


图5 分数维与集料品种的关系

图6—图8是混凝土断裂面的物理参数——RPCA（拉断概率）与材料组成之间的关系。结果表明：当水胶比增大时，集料的拉断概率大大降低；当集料最大粒径较小时，集料拉断概率随粒径增大而增大；集料最大粒径较大时，集料拉断概率随粒径增大而减小；当集料最大粒径为 16mm 时，粗集料的拉断概率最大；当水胶比为 0.44 时，碎石混凝土的拉断概率低于卵石混凝土；当水胶比为 0.26 时，卵石混凝土的拉断概率低于碎石混凝土。

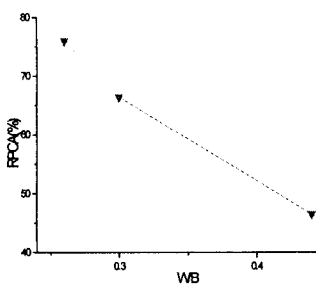


图6 拉断比率与水胶比的关系

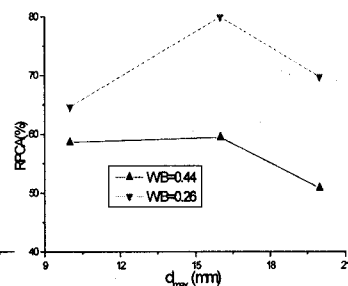


图7 拉断比率与最大集料粒径的关系

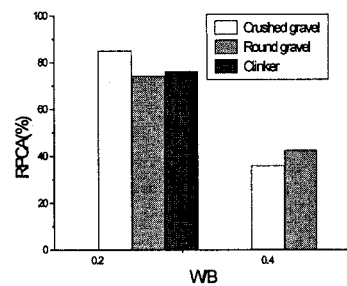


图8 拉断比率与集料品种的关系

由表1可以看出，粗集料拉断概率与抗压强度、抗拉强度及断裂韧性有较好的关系；分数维与断裂能及延性指数有较好的关系。众所周知，混凝土的破坏包括弹性变形的可逆能量消耗、产生微裂纹的不可逆能量耗散及裂缝扩展的不可逆能量耗散。一般认为，在混凝土受荷时的荷载-变形曲线峰值前，主要是前两部分能量耗散，它与混凝土的抗压强度、抗拉强度、弹性模量及断裂韧性有关；在峰值后，主要是后一部分能量耗散，它与混凝土的断裂能及延性指数有关。因此，可以认为，粗集料拉断概率与荷载-变形曲线峰值荷载有关的性能(强度、断裂韧性)有较好的关系；分数维可较好地描述与荷载-变形曲线峰值荷载后形状有关的性能(断裂能、延性指数)。

#### 4.2 力学性能与断裂面参数的关系

混凝土的断裂能与分数维的关系如图 9 所示, 可见, 在相同水胶比下, 断裂能与断裂面分数维之间有良好的线性关系:

$$G_F = \begin{cases} -12.48+1802(D-2) & W/B=0.44 \\ -21.00+2730(D-2) & W/C=0.26 \end{cases} \quad (6)$$

延性指数与分数维的试验关系如图 10 所示, 可以看出, 对于本试验所有的配合比, 延性指数均与分数维之间存在线性增加的关系:

$$D_u = 0.118 \times 10^{-3} + 2.16 \times 10^{-3}(D-2) \quad (7)$$

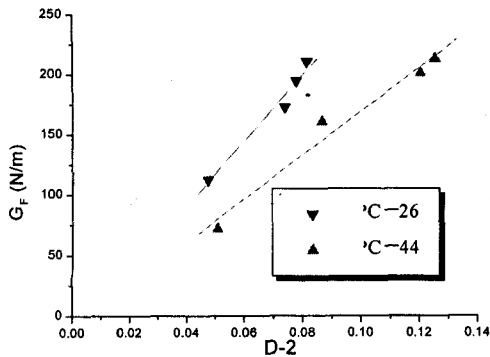


图 9 断裂能与分数维增量的关系

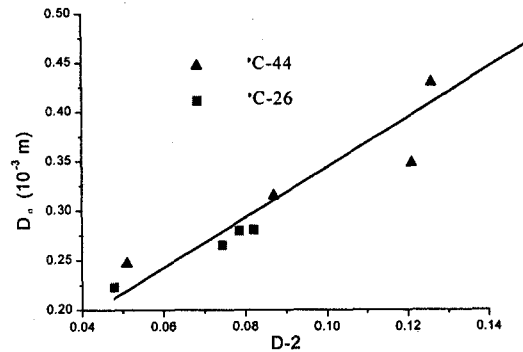


图 10 延性指数与分数维增量的关系

图 11—图 13 为本试验中所有各种配合比混凝土的  $f_c$ ,  $f_{st}$  和  $K_{Ic}$  与  $RPCA$  的关系, 数据点包括三种水胶比、三种集料粒径。可见  $f_c$ ,  $f_{st}$  和  $K_{Ic}$  与  $RPCA$  之间的线性关系较好。其线性回归公式为:

$$\begin{cases} f_{st} = -1.67 + 11.9RPCA & (r = 0.943) \\ f_c = 14.3 + 88.1RPCA & (r = 0.862) \\ K_{Ic} = 0.182 + 1.32RPCA & (r = 0.881) \end{cases} \quad (8)$$

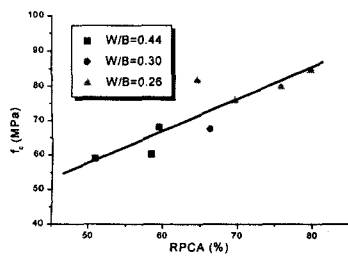


图 11 抗压强度与拉断概率的关系

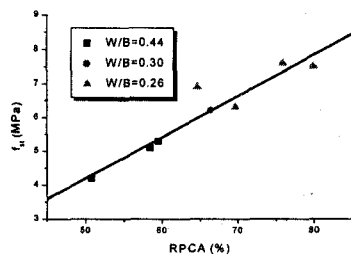


图 12 劈拉强度与拉断概率的关系

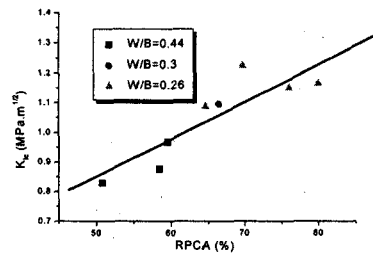


图 13 断裂韧性与拉断概率的关系

### 4.3 真实的混凝土断裂能数值的测定

对于脆性材料，断裂能为：

$$G_F = W/A_0 \quad (9)$$

式中  $W$ ——断裂材料所消耗的能量， $A_0$ ——断裂面的投影面积。

考虑断裂面的分形特征，上式可修正为

$$G_F^D = W/A^D \quad (10)$$

令用测量宏观长度的尺码  $S_0$  测量得到的断裂面投影面积为  $A_0$ ，用小于测量长度  $S_0$  的某一尺码  $S_D$  测量得到的宏观断裂面真实面积为  $A^D$  则令用测量宏观长度的尺码  $S_0$  测量得到的断裂面投影面积为  $A_0$ ，用小于测量长度  $S_0$  的某一尺码  $S_D$  测量得到的宏观断裂面真实面积为  $A^D$  则

$$A^D = \left(\frac{S_D \times S_D}{S_0 \times S_0}\right)^{1-D} A_0 = \left(\frac{S_D}{S_0}\right)^{2(1-D)} \quad (11)$$

因而

$$G_F^D = \left(\frac{S_0}{S_D}\right)^{2(1-D)} G_F \quad (12)$$

$D$ 为取测量长度分别为  $S_0$ 和  $S_D$ 时得到的分数维。

取  $S_0=0.1$  in， $S_D=0.0004$  in，计算了各种配合比混凝土的  $G_F$ 和  $G_F^D$ 。图14为不同集料粒径时混凝土的断裂能  $G_F$ 、 $G_F^D$ 与分数维的关系，可以看出，断裂能  $G_F$ 随断裂面的分数维增加而增加，而断裂能  $G_F^D$ 基本不随断裂面的分数维或集料粒径而变化。图15为在0.26和0.44两种水胶比下，碎石、卵石和陶粒三种不同集料混凝土的断裂能与分数维的关系。可见在相同水胶比下，断裂能  $G_F^D$ 与断裂能  $G_F$ 一样，对于不同的集料  $G_F$ 是不同的，但  $G_F^D$ 随集料品种的变化较  $G_F$ 小。可见，断裂能  $G_F^D$ 几乎不随粗集料粒径变化，随集料品种变化较小，随强度增加而增加，可以认为它更为接近混凝土断裂能的真实值。

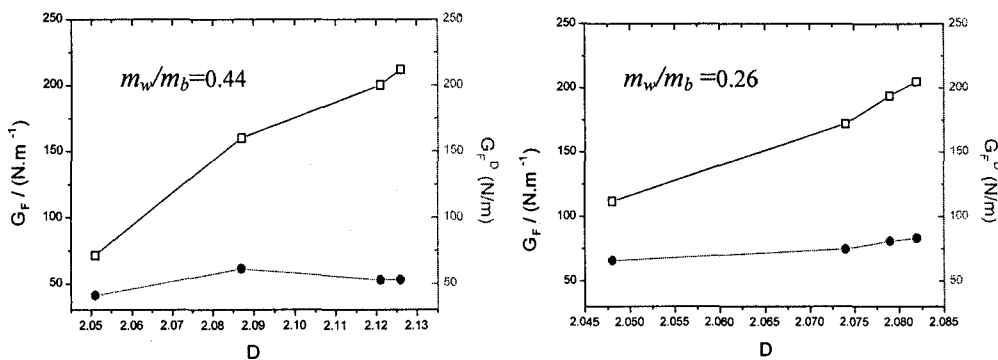


图 14 断裂能和真实断裂能与分数维的关系

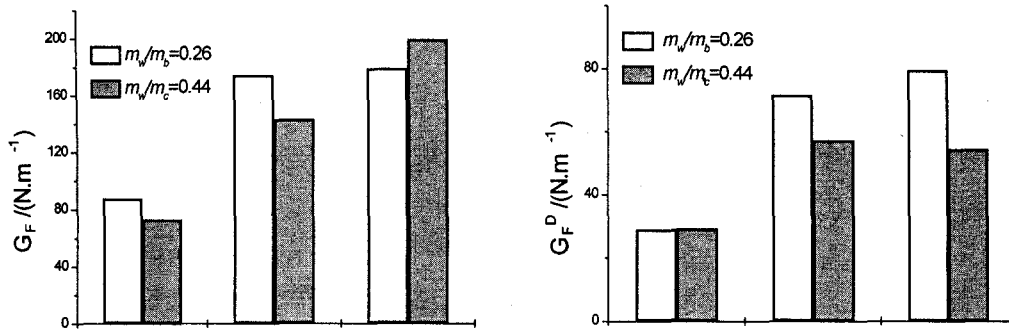


图 15 断裂能与真实断裂能与粗集料品种的关系

#### 4.4 改善混凝土性能的可能性探讨

根据前面的研究，集料品质对断裂面参数的影响较为显著，而裂面参数又与混凝土的力学性能有关，因此我们尝试通过用冶金集料（赤铁矿）置换部分普通集料来改善混凝土的性能。

图 16—图 17 为冶金集料混凝土的抗压强度和劈拉强度随冶金集料体积置换率的变化，可以看出通过置换部分普通集料，混凝土的抗压强度  $f_c$  和劈拉强度  $f_{st}$  均提高。通过冶金集料置换普通集料的 C-30 系列混凝土的抗压强度提高幅度较 C-26 系列大；C-26 系列混凝土劈拉强度较 C-30 系列提高幅度大。图 18 为掺与未掺冶金集料混凝土的切口三点弯曲梁的荷载—挠度曲线，可以看出，掺入冶金集料后混凝土曲线的下降段较普通混凝土平缓。图 19—图 20 表明断裂能  $G_F$  和延性指数  $D_u$  也随冶金集料体积置换率的提高而增加。当冶金集料体积置换率分别为 25% 和 50% 时，C-30 系列的断裂能分别增加了 43.9% 和 71.5%，C-26 系列的断裂能分别增加了 18.4% 和 22.7%。图 21 为含不同体积比的冶金集料的断裂面数字化三维轮廓及分数维，掺入部分强度较高的冶金集料，使裂缝扩展遇到集料时绕过集料的概率增加，裂缝扩展路径曲折，所以断裂分数维随冶金集料体积率增加而增加。

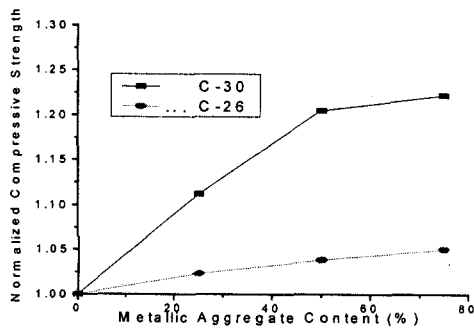


图 16 抗压强度与冶金集料置换率的关系

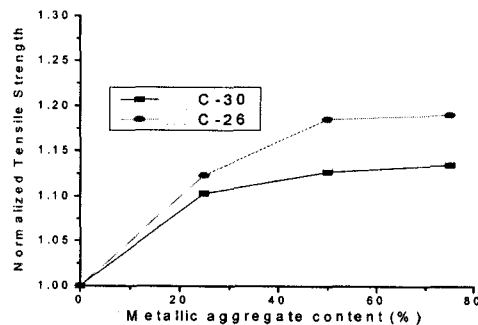


图 17 劈拉强度与冶金集料置换率的关系

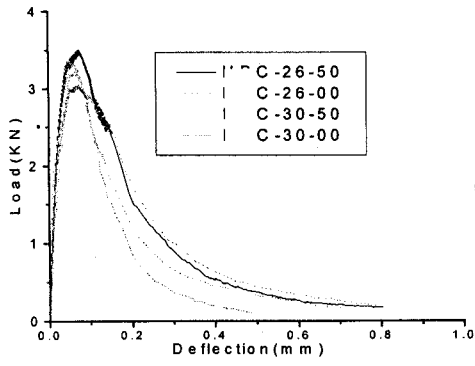


图 18 不同冶金集料含量下的荷载挠度曲线

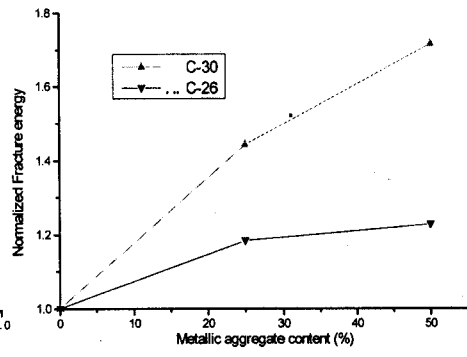


图 19 断裂能与冶金集料置换率的关系

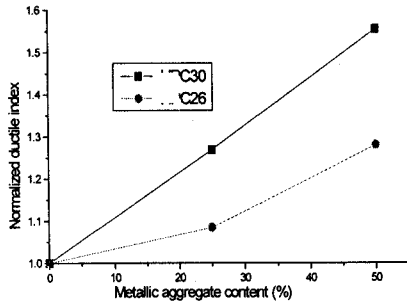


图 20 延性指数与冶金集料掺量关系

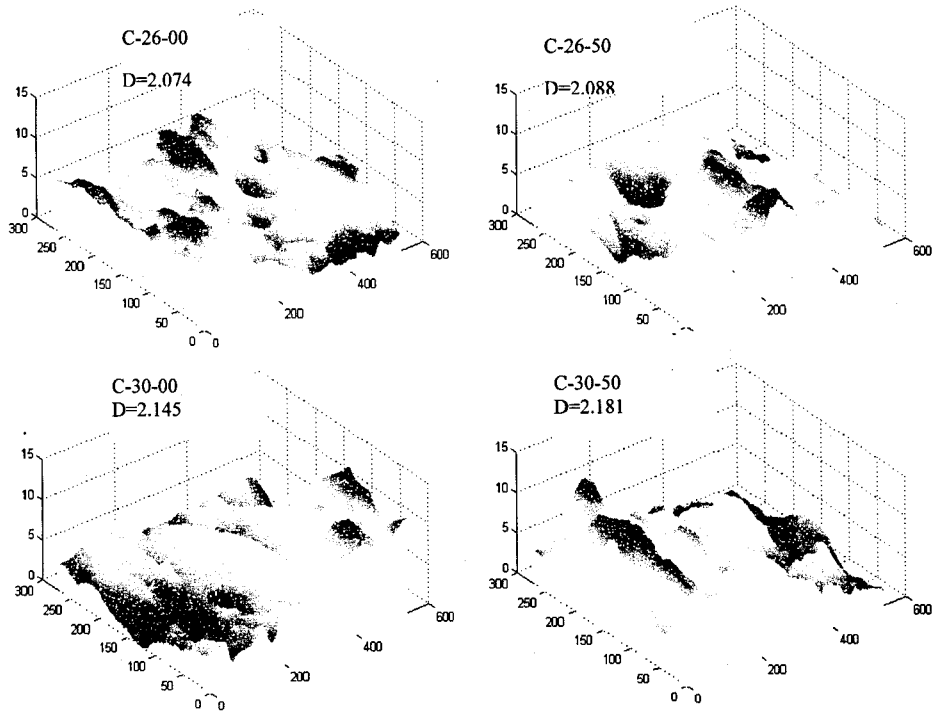


图 21 数字化三维断裂面和分数维值

## 五、结论

1. 开发研制的表面测试系统, 方法简便、准确, 对表面不造成损坏, 可重现混凝土断裂面三维轮廓; 图像分析系统可获取断裂面上粗集料破坏的清晰图像。
2. 可用分数维 (几何参数) 和粗集料拉断概率 (物理参数) 表征混凝土断裂面的特性及所提出的测定它们的方法是可行的。
3. 混凝土组成材料与断裂面参数之间存在一定的关系。
4. 粗集料拉断概率与与荷载-变形曲线峰值荷载有关的性能(强度、断裂韧性)有较好的关系; 分数维可较好地描述与与荷载-变形曲线峰值荷载后形状有关的性能(断裂能、延性指数)。
5. 断裂面参数的研究对混凝土的改性具有指导意义。
6. 通过分数维的测定和研究, 可获得更为精确的混凝土断裂能的数值。

## 参考文献

- [1] B.Mandelbrot, D.E.Passoja, A.J.Paullay, Fractal character of fracture surface of metal, Nature (London) 308(19), 1984: 3-6.
- [2] V.C.Saouma and C.C.Barton, Fractals, Fractures and Size Effects in Concrete, J. of Engineering Mechanics ASCE, 120(4),1994: 835-854
- [3] S.Tandon, Effects of loading rate on the fracture of cementitious materials ,Cement and Concrete Research , 29(3), 1999: 376-401.
- [4] M. A. Issa and A. M. Hammad, Assessment and Evaluation of Fractal Dimension of Concrete Fracture surface digitized Images, Cement and Concrete Research, 24(3), 1994: 325-334.
- [5] D.A. Lange ,H.M. Jennings and S.P. Shah, Relationship between fracture surface roughness and fracture behavior of cement paste and mortar, J. Am. Ceram. Soc, 76 (3), 1993: 589-597.
- [6] P. S. Addison, W. M. C. McKenzie ,A .S. Ndumu, L. T. Dougan, R. Hunter, Fractal cracking of concrete :parameterization of spatial diffusion , J. of Engineering Mechanics, ASCE, 125(6), 1999: 622-629.
- [7] T.Wada, R.Sato, New 2-Dimension analytical method for determination of shape properties of concrete crack surfaces using a laser-beam, Fracture Mechanics of Concrete Structures, Proceedings FRAMCOS-3, 1998: 293-304.
- [8] A.Carpinteri, B.Chiaia, S.Invernizzi, Three-dimensional fractal analysis of concrete fracture at the meso-level, Theoretical and Analytical Fracture Mechanics 31(1), 1999: 47-53.
- [9] Canan Tasdemir, Mehmet A. Tasdemir, Nicholas Mills, Ben I. G. Barr, and Frank D. Lydin Combined effects of silica fume, aggregate type, and size on postpeak response of concrete in bending, ACI Materials Journal, 96(1), 1999, 23-31.
- [10] Canan Tasdemir, Mehmet A. Tasdemir, Frank D. Lydin ,Ben I. G. Barr, Effects of silica fume, aggregate size on the brittleness of concrete, Cement and Concrete Research, 26(1), 1996: 663-668.
- [11] G.Giaccio, C.Rocco, D.Violini, J.Zappitelli, and R.Zerbino, High-Strength Concrete incorporating Different Coarse Aggregates, ACI Materials Journal, 89(3), 1992: 242-246.
- [12] Aykut Cetin, Ramon L Carrasquillo, High -Performance Concrete: Influence of Coarse Aggregates on Mechanical Properties, ACI Materials Journal, 95(3), 1998: 252-261.
- [13] P. C. Aitcin and P. K. Mehta, Effect of Coarse-Aggregate Characteristics on Mechanical Properties of High -Strength Concrete, ACI Materials Journal, 87(2), 1990: 103-107.
- [14] Francois de Larrard and Albert Belloc ,The Influence of Aggregate on the Compressive Strength of Normal and High -Strength Concrete , ACI Materials Journal, 94(5), 1997: 421-430.
- [15] 栾曙光, David Darwin, 混凝土断裂能  $G_f$  随龄期、强度的变化规律, 水利学报, 29(10), 1999: 895-890
- [16] 王信义、董卫平、朱小燕, 生产系统中的监控检测技术, 北京理工大学出版社, 北京: 1998.