

文章编号:1000-582X(2012)06-080-05

多尺度聚丙烯纤维混凝土单轴拉伸试验

梁宁慧^{a,b}, 刘新荣^{a,b}, 孙 霁^{a,b}

(重庆大学 a. 土木工程学院; b. 山地城镇建设与新技术教育部重点实验室, 重庆 400045)

摘 要:采用环氧粘贴法对 21 个 100 mm×100 mm×250 mm 混凝土和聚丙烯纤维混凝土试块进行单轴抗拉试验,研究不同尺度聚丙烯纤维及其混杂对混凝土单轴抗拉性能的影响,分析不同尺度聚丙烯纤维混凝土的单轴拉伸应力-应变全曲线。试验结果表明:单掺及混掺粗细聚丙烯纤维对混凝土抗拉强提高幅度为 11%~27%;单掺粗聚丙烯纤维混凝土及粗细混掺聚丙烯纤维混凝土在单轴拉伸过程中出现了低应力应变硬化现象,单掺及混掺粗细聚丙烯纤维混凝土应力-应变曲线下降段所包围面积大于素混凝土应力-应变曲线下包面积。不同尺度聚丙烯纤维混凝土抗拉韧性增强效果排序:混掺粗细纤维混凝土>单掺粗纤维混凝土>单掺细纤维混凝土>素混凝土。

关键词:单轴抗拉试验;应力-应变全曲线;多尺度聚丙烯纤维;抗拉韧性

中图分类号:U456

文献标志码:A

Uniaxial tensile test of multi-scale polypropylene fiber reinforced concrete

LIANG Ning-hui^{a,b}, LIU Xin-rong^{a,b}, SUN Ji^{a,b}

(a. college of Civil Engineering; b. Key Laboratory of New Technology for Construction of Cities in Mountain Area, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China)

Abstract: Based on uniaxial tensile test on 21 plain and polypropylene fiber concrete specimens with the dimensions of 100 mm × 100 mm × 250 mm with epoxy paste method, the influence of the different scales of polypropylene fiber and hybrid fiber on concrete uniaxial tensile strength is investigated, and the uniaxial tensile stress-strain whole curves of the different scale polypropylene fiber reinforced concrete is analyzed. Single-doped and blended polypropylene fiber can improve the tensile strength of concrete by 11% to 27%. The strain hardening of low-stress occurs during the uniaxial tensile for the single-doped crude polypropylene fiber and blended polypropylene fiber concrete, and the surrounding area of the descent stage of single-doped and blended polypropylene fiber concrete stress-strain curves is larger than the plain concrete stress-strain curve of the package area. The tensile toughness enhancement effect of different scales of polypropylene fiber concrete is illustrated as blended fiber concrete > single-doped coarse fiber concrete > single-doped fine fiber concrete > plain concrete.

Key words: uniaxial tensile test; stress-strain whole curves; multi-scale polypropylene fiber; tensile toughness

聚丙烯纤维是改善水泥基复合材料抗裂性和韧性的有效组成材料之一。细聚丙烯纤维对阻止混凝土

收稿日期:2012-01-11

基金项目:中央高校基本科研业务费专项资助项目(CDJZR11200002);国家自然科学基金创新群体基金资助项目(50921063);重庆市科技攻关计划资助项目(CSTC 2011AC6159)

作者简介:梁宁慧(1971-),女,重庆大学博士研究生,主要从事建筑结构及岩土工程研究,(E-mail)lnh83249@yahoo.com.cn。

土的早期塑性开裂十分有效,但对硬化混凝土韧性和抗裂性的改善很小。以往用钢纤维阻止硬化混凝土的开裂,提高韧性。但钢纤维存在易锈蚀,重量大,易结团,易损伤搅拌机器,有磁性干扰、价格高等问题。而聚丙烯粗纤维是一种新型增强增韧材料,耐腐蚀性能好,重量轻,易分散,对搅拌机器损伤小,无磁性干扰,价格低等优点,在环境较为恶劣的工程中可代替钢纤维^[1-2]。聚丙烯细纤维与钢纤维混杂混凝土,国内外学者已进行了大量试验研究,但有关聚丙烯细纤维与聚丙烯粗纤维混杂混凝土的试验研究却极为少见,这方面的试验还有待进一步加强。纵观混杂纤维水泥基复合材料的研究现状,多数是采用不同弹性模量的纤维进行混杂,对于不同几何尺寸相同纤维品种的混杂来增强水泥基复合材料的研究鲜有报道。研究选用2种尺寸的聚丙烯细纤维与1种尺寸的聚丙烯粗纤维,在相同拌合工艺、相同配合比条件下进行单掺及混掺聚丙烯纤维混凝土的单轴抗拉试验。对比研究了相同类型不同尺度聚丙烯纤维及其混杂对混凝土抗拉性能的影响。

测定混凝土抗拉强度有直接拉伸法、弯拉法、劈裂法^[3]。直接拉伸法是单轴抗拉试验首选,最能反映构件实际受力情况,但试验过程较为复杂,难度大,要求高。对混凝土来说,目前还没有统一的轴拉试验标准可循,国外学者在这方面涉及较

早^[4-6],其采用的加载方式主要有2种:一是采用楔形夹具通过摩擦作用于试件两端加载;另一种是采用环氧树脂粘结试件端面加载。文献[7]采用大头试件对高掺量的纤维砂浆进行了轴向拉伸全过程试验。而文献[8-9]则从另一个角度出发,设计出了环状试件加内水压加载的形式来模拟轴拉试验,并得到了材料的拉伸全曲线。文献[3]对常用的粘贴型试件进行了改进,采用了“双钢板”的夹持设计。综合上述试验方法,采用粘贴端面法,将粘贴钢板与拉杆一次成型,且通过机械方法严格对中。采用无切口的等截面棱柱体进行轴拉试验,得到纤维混凝土的应力-应变全曲线。

1 试验

1.1 试验材料

采用重庆小南海水泥 42.5R;细骨料为重庆渠河特细砂,细度模数 0.7;粗骨料为粒径 5~20 mm 碎石;聚丙烯纤维采用北京融耐尔工程材料有限公司和宁波大成新材料有限公司生产的,性能参数见表 1。混凝土强度等级为 C30,配合比见表 2。试验粗、细聚丙烯纤维的掺量是根据大量试验和工程经验确定的。为了增加其可比性,各组混凝土均采用相同的配合比,并尽量避免因原材料性能差异给混凝土性能带来的离散性。

表 1 聚丙烯纤维的物理力学指标

纤维编号	直径/mm	长度/mm	抗拉强度/ MPa	弹性模量/ GPa	断裂伸 长率/%	密度/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	推荐掺量/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	产地
FF1	0.026	12	641	8.5	40	0.91	0.9	北京
FF2	0.1	19	322	3.9	15	0.91	0.9	宁波
CF1	0.8	50	706	7.4	10	0.95	6.0	宁波

表 2 C30 混凝土配合比

编号	纤维种类	水泥	砂	石	水	纤维掺量	砂率/%
A0	无	406	548	1 221	207	0	23
A1	FF1	406	548	1 221	207	0.9	23
A2	FF2	406	548	1 221	207	0.9	23
A3	CF1	406	548	1 221	207	6.0	23
A4	(CF1+FF1)▲	406	548	1 221	207	6.9	23
A5	(CF1+FF2)▲	406	548	1 221	207	6.9	23
A6	(CF1+FF1+FF2)●	406	548	1 221	207	6.9	23

注:带▲指 CF1 纤维掺量为 6.0 kg/m^3 ,FF1 或 FF2 纤维掺量为 0.9 kg/m^3 ;带●指 CF1 纤维掺量为 6.0 kg/m^3 ,FF1 与 FF2 纤维各掺量为 0.45 kg/m^3 。

1.2 试验过程

聚丙烯纤维在混凝土中的分散性非常重要,是保证聚丙烯纤维混凝土抗裂效果的关键^[10]。试验采用的搅拌流程:1)将砂、石子倒入搅拌筒内,开动搅拌机同时将聚丙烯纤维均匀撒入搅拌筒内;聚丙烯纤维撒完后搅拌时间约 2 min;2)将水泥缓慢倒入搅拌筒,开动搅拌机约 2 min,此时可见聚丙烯细纤维在搅拌筒上方飘动;3)将水缓慢均匀倒入,搅拌时间 2 min 左右。经观察发现聚丙烯纤维在混凝土中的分布较均匀,和易性可满足施工要求。

模具为尺寸 100 mm×100 mm×300 mm 的棱柱体试块,参照《钢纤维混凝土试验方法》(CECS 13:2009)的规定,每种混凝土类型的试件为 1 组,每组 3 个试件。共浇筑 21 个试件。所有试块成型后在室温放置 24 h 后,拆模编号,在标准养护室养护 7 d 后用岩石切割机切割试件的 2 个端部,试件 2 个端部各切掉 25 mm。缓慢切割,保证端部截面的平整度^[11]。试件切割后在标准养护室养护 21 d。试验前 24 h 将试件从养护室取出,待试件表面干燥后,用磨石机磨光端部,将试件端部与试验钢板表面分别用酒精擦干净。再用配合比为 3:10 的结构胶将试件的两端粘结在 20 mm 厚试验钢板上。试验拉伸设备如图 1 所示。最大荷载为 2 500 kN,加载按恒位移控制,加载速率为 0.02 mm/min,2 个变形引伸计分别安置在试件的两侧,引伸计量程 100 mm。试件 4 个侧面又分别贴有 100 mm 长的混凝土应变片,数据采集及加载控制均采用计算机进行。

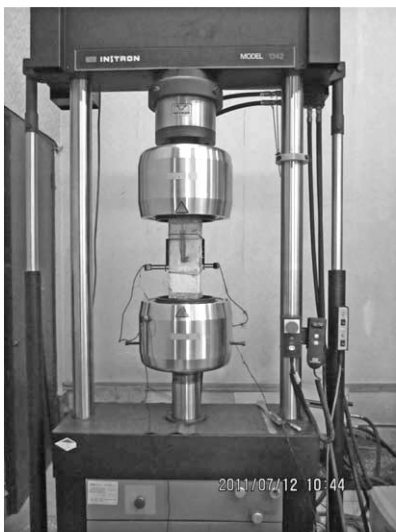
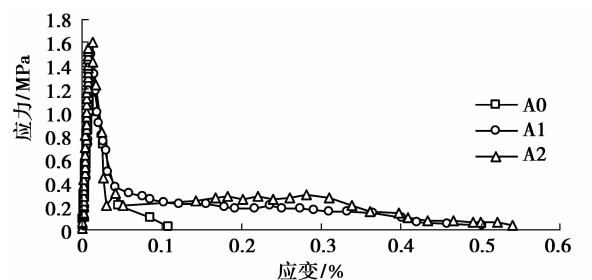


图 1 聚丙烯纤维混凝土轴心拉伸试验设备

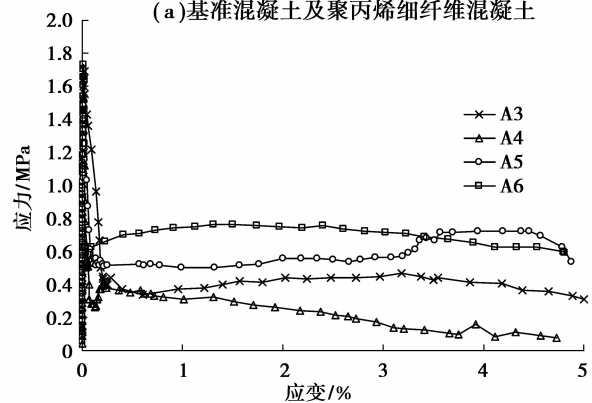
2 试验结果与分析

2.1 轴拉变形

图 2 给出了多尺度聚丙烯纤维混凝土轴拉应力-应变曲线,由图 2(a)可知:1)无纤维的基准混凝土试件 A0 开裂后,应力下降较快,表现为明显的脆性性质,曲线的下降段较短;2)聚丙烯细纤维的掺入,改善了混凝土的脆性性质。聚丙烯细纤维混凝土试件 A1、A2 应力-应变曲线下降段所包面积比基准混凝土试件 A0 大,且随纤维直径增大而略有增大。



(a) 基准混凝土及聚丙烯细纤维混凝土



(b) 聚丙烯粗纤维及混杂纤维混凝土

图 2 多尺度聚丙烯纤维混凝土轴拉应力-应变全曲线

结合试验观察过程及图 2(b)可知:1)聚丙烯粗纤维及其混杂纤维的掺入在提高基体混凝土强度的同时极大地改善了混凝土的脆性性质。2)基体开裂后,试件承载力瞬间有较大幅度的降低,但随外荷载的持续,试件承载力会有回升,当听到试件内纤维“嘭”的沉闷断裂声,就可看到承载力的下降,而后有所上升,纤维断裂,承载力降低而后上升,如此反复,直至试件内大部分粗纤维被拉断或拔出,试件逐渐丧失承载力。整个破坏过程粗纤维的桥接作用非常明显,试件下降段出现较长的平缓过程。3)聚丙烯粗细纤维混掺混凝土试件 A5、A6,开裂后应力-应变曲线下包面积比单掺粗纤维混凝土试件 A3 要大,尤其是试件 A6 下包面积几乎是试件 A3 的 2 倍。由此可知,粗细聚丙烯纤维的适当混掺能充分

发挥聚丙烯纤维各自在不同受力阶段的作用,提高混凝土的抗裂能力,增强混凝土的韧性性能。

将图 2(b) 典型曲线局部放大如图 3 所示。结合图 2(b) 和图 3 可知,聚丙烯粗纤维混凝土及混杂聚丙烯纤维混凝土轴拉应力-应变曲线可大致分为 4 个阶段:1) 上升段(裂缝出现前),应力与应变几乎成比例发展,裂缝出现时的荷载为峰值荷载,对应的应力为抗拉强度,对应的应变为峰值应变。2) 下降段(裂缝出现并扩展),粗纤维还来不及发挥桥接作用,试件承载力有大幅下降。3) 应力缓慢上升到应变硬化阶段,粗纤维桥接作用发挥到极致,试件承载力随粗纤维的断裂而起伏,在较大变形范围内,应力无减少现象。4) 应变软化阶段,此时粗纤维不是被拔出就是被拉断,纤维桥接作用失效,试件承载力基本丧失。

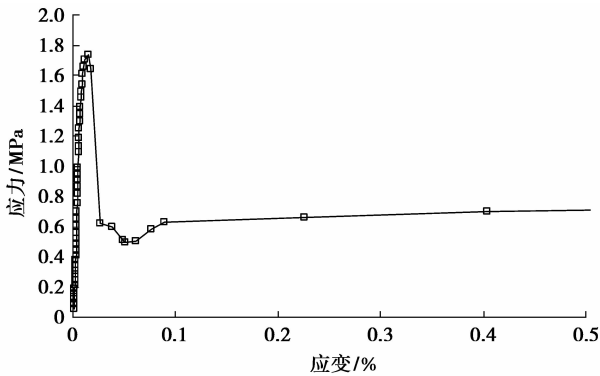


图 3 典型聚丙烯纤维混凝土轴拉应力-应变曲线

由图 2(a) 可知基准混凝土 A0 只有前 2 阶段,聚丙烯细纤维混凝土 A1、A2 有 2 阶段,缺第 3 阶段应力缓慢上升到应变硬化阶段^[12]。

2.2 轴拉强度

表 3 给出了不同尺度聚丙烯纤维混凝土轴心受拉测试结果,其中 f_t 为抗拉强度, ϵ_p 为峰值应变, E_t 为混凝土受拉变形模量(参考文献[13], E_t 取应力为 50% 抗拉强度时的割线模量)。试验结果表明:1) 聚丙烯纤维的掺入不同程度的提高了混凝土的抗拉强度、峰值应变,相同纤维掺量时纤维混凝土抗拉强度和峰值应变随纤维直径的增大而增大;2) 单掺聚丙烯细纤维混凝土 A1、A2 相对基准混凝土 A0 抗拉强度分别提高 11% 和 18%, 峰值应变提高 1% 和 4%。单掺聚丙烯粗纤维混凝土 A3 相对基准混凝土 A0 抗拉强度提高 24%, 峰值应变提高 49%。说明聚丙烯粗纤维的加入不仅提高了基体混凝土的抗拉强度同时改善了混凝土的变形性能;3) 混掺粗、细聚丙烯纤维混凝土 A4、A5 抗拉强度的提高并不

优于单掺聚丙烯粗纤维混凝土 A3, 峰值应变低于单掺聚丙烯粗纤维混凝土 A3 高于单掺聚丙烯细纤维混凝土试件 A1、A2。多尺度聚丙烯纤维混凝土试件 A6, 其抗拉强度及峰值应变分别比基准混凝土 A0 提高 27% 和 22%, 是本次试验抗拉强度最好的一种组合。4) 单掺聚丙烯粗纤维混凝土变形模量影响不大, 混掺粗细聚丙烯纤维对混凝土变形模量略有提高。由此说明粗细聚丙烯纤维的混杂能改善混凝土内部微结构, 但变形模量的大小主要取决于混凝土粗、细骨料的性质^[14-16]。

表 3 纤维混凝土轴心受拉测试结果

试件	f_t /MPa	f_t 比值	$\epsilon_p/\mu\epsilon$	ϵ_p 比值	E_t /GPa	E_t 比值
A0	1.362	1	119.63	1	18.30	1
A1	1.498	1.11	120.41	1.01	17.25	0.94
A2	1.602	1.18	124.64	1.04	18.40	1.0
A3	1.690	1.24	178.51	1.49	18.45	1.01
A4	1.530	1.12	133.68	1.12	18.24	1
A5	1.485	1.09	141.37	1.18	19.80	1.08
A6	1.728	1.27	145.62	1.22	18.89	1.03

3 机理分析

由断裂力学可知, 当均匀受拉的混凝土构件内部存有孔隙、气泡等先天缺陷时, 薄弱区就会产生应力集中, 当应力峰值达到材料的抗拉强度时, 裂缝便开始扩展, 应力集中加剧, 缓慢的裂缝扩展将转变成迅速的裂缝失稳扩展。因此其拉伸破坏通常是断裂破坏, 材料本身的抗拉强度并没有得到充分发挥, 所以一般混凝土的抗拉强度都很低。掺入混凝土中的聚丙烯纤维束缚了裂缝的扩展, 给裂缝尖端施加了个抵消开裂的应力场, 从而使混凝土的抗拉强度得到一定提高^[17]。

加载过程中, 基体内部初始微裂纹出现, 截面内纵横交错的纤维桥接作用体现, 分散应力集中, 抑制微裂纹的发展, 应力重分布后产生新的微裂纹。随外荷载的增大, 基体某薄弱截面微裂纹贯穿、开裂, 在断裂面处起桥接作用的纤维承受荷载并将荷载传递给未开裂的部分。此时基体的抗拉能力取决于纤维自身的抗拉能力及其与基体界面的粘结强度。随裂缝不断张开, 桥接纤维不断被拔出或拉断, 阻碍纤维被拔出主要靠纤维-基体界面的粘结力及纤维表面异形造成的机械咬合力。图 4 是聚丙烯粗纤维使用前后表面对照图, 粗纤维在基体完全断裂时, 表面

波纹已被拉直,纤维所经受的拉力较大,所以在轴拉破坏第 3 阶段时,出现了低应力应变硬化现象。由表 1 可知,聚丙烯粗纤维 CF1 抗拉强度优于细纤维 FF1、FF2,且粗纤维表面还有波纹,粗纤维与混凝土之间的粘接性要优于细纤维与混凝土之间的粘接性。所以,聚丙烯粗纤维混凝土抗拉强度高于聚丙烯细纤维混凝土。聚丙烯粗细纤维混掺后,细纤维能有效阻止微裂纹的发展,粗纤维在宏观裂缝出现后能有效阻止裂缝开展。其抗拉强度从理论分析,应有提高。但 2 种粗细纤维混掺较单掺粗纤维并没增大,反而有所降低,究其原因还需进一步研究。但 3 种不同尺度的粗细聚丙烯纤维的混掺,其抗拉强度却有增大,符合理论分析结果。

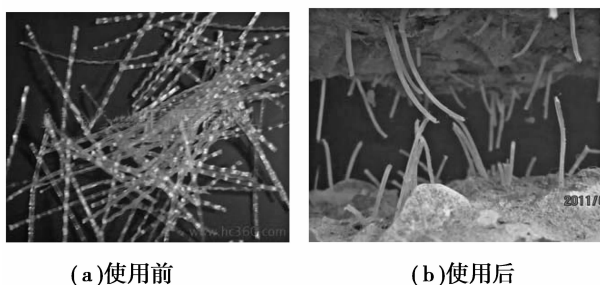


图 4 聚丙烯粗纤维

4 结 论

由上述试验结果与分析可知,聚丙烯粗细纤维单掺和混掺都能提高基准混凝土的抗拉强度和变形性能,能增加混凝土的抗拉韧性。

1) 不同尺度聚丙烯纤维的掺入,不同程度地提高了混凝土的抗拉强度,强度比 1.09~1.27。3 种不同尺度的粗细聚丙烯纤维的混掺混凝土 A6 抗拉强度增强率达到 27%,优于掺量接近的单一纤维混凝土。

2) 得到不同尺度聚丙烯纤维混凝土的轴拉应力-应变全曲线,聚丙烯粗纤维混凝土在破坏第 3 阶段出现了低应力应变硬化现象,抗拉韧性的改善幅度远大于聚丙烯细纤维混凝土。在试验所测试的纤维中,粗纤维对混凝土抗拉韧性的提高幅度大于细纤维,粗细纤维的混杂对混凝土抗拉韧性的提高幅度大于粗纤维,A6 抗拉韧性最好。

3) 聚丙烯纤维的掺入对混凝土受拉变形模量的影响不大,这进一步说明了混凝土模量主要取决于混凝土的粗、细骨料,与添加的低模量聚丙烯纤维关系不大。

参考文献:

- [1] 邓宗才. 高性能合成纤维混凝土[M]. 北京: 科学出版社, 2003.
- [2] 沈荣熹, 王璋水, 崔玉忠. 纤维增强水泥与纤维增强混凝土[M]. 北京: 化学工业出版社, 2006.
- [3] 彭勃, 郑伟. 混凝土单轴直接拉伸强度试验方法的研究[J]. 湖南大学学报: 自然科学版, 2004, 31(2): 79-83.
PENG BO, ZHENG WEI. Study on the test method of concrete strength in uniaxial direct tension [J]. Journal of Hunan University: Natural Sciences, 2004, 31(2): 79-83.
- [4] JOHNSTON C D, GRAY R J. Uniaxial tensile testing of steel-fibre-reinforced cementitious composites [C]// SWAMY R N. Testing and Test Method of Fibre Cement Composites. Lancaster, U. K: The Construction Press, 1978.
- [5] WANG Y J, LI V C, BACKER S. Experimental determination of tensile behavior of fiber reinforced concrete [J]. ACI Materials Journal, 1990, 87(5): 461-468.
- [6] LI V C, WU H C, MAALEJ M, et al. Tensile behavior of cement-based composites with random discontinuous steel fibers[J]. Journal of the American Ceramic Society, 1996, 79(1): 74-78.
- [7] 曲福进, 赵国藩, 黄承逵. 砂浆渗透钢纤维混凝土轴拉应力-应变全曲线的研究[J]. 大连理工大学学报, 1996, 36(6): 113-115.
QU FU-JIN, ZHAO GUO-FAN, HUANG CHENG-KUI. Experimental study of stress-strain curve of SIFCON in tension[J]. Journal of Dalian University of Technology, 1996, 36(6): 113-115.
- [8] 卢亦焱, 何少溪. 钢纤维混凝土环向受拉全过程曲线试验研究[J]. 武汉水利电力大学学报, 1995, 28(3): 285-292.
LU YI-YAN, HE SHAO-XI. Experimental research on the complete stress-strain curve with hoop tension for SFRC [J]. Journal of Wuhan University of Hydraulic & Electric Engineering, 1995, 28(3): 285-292.
- [9] 田稳苓, 黄承逵, 李子祥. 钢纤维膨胀混凝土管状构件受拉应力-应变全曲线研究[J]. 大连理工大学学报, 2000, 40(1): 112-115.
TIAN WEN-LING, HUANG CHENG-KUI, LI ZI-XIANG. Study on tension stress-strain full curve for annual member of steel fiber reinforced expansive concrete [J]. Journal of Dalian University of Technology, 2000, 40(1): 112-115.

- [7] AN Y J, GELLER J, WU Y T, et al. Semantic deep web: automatic attribute extraction from the deep web data sources[C]//Proceedings of the 22nd Annual ACM Symposium on Applied Computing, March 11-15, 2007. Seoul, Korea; [s. n.], 2007: 1667-1672.
- [8] QIANG B H, XI J Q, ZHANG L. An effective schema extraction algorithm on the deep web[C]//Proceedings of the 4th International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing, Oct. 12-14, 2008. Dalian, China; IEEE, 2008: 1-4.
- [9] WANG F, AGRAWAL G. Extracting output metadata from scientific deep web data sources[C]//Proceedings of the 9th IEEE International Conference on Data Mining, December 6-9, 2009. Miami, FL, USA; IEEE Computer Society, 2009: 552-561.
- [10] LIU W, MENG X F, MENG W Y. Deep web data integration [R]. WAMDM; Technical Report WAMDM-TR-2006-3, 2006.
- [11] ALPUENTE M, ROMERO D. A visual technique for web pages comparison [J]. Electronic Notes in Theoretical Computer Science, 2009, 235: 3-18.
- [12] CAI D, YU S P, WEN J R, et al. Extracting content structure for web pages based on visual representation [C]//Proceedings of the 5th Asia-Pacific Web Conference on Web Technologies and Applications, April 23-25, 2002. Xi'an, China; [s. n.], 2003: 406-417.
- [13] BRODER A Z. On the resemblance and containment of documents [C]//Proceedings of the Compression and Complexity of Sequences, June 11-13, 1997. Positano, Italy; IEEE Computer Society, 1997: 21-29.
- [14] BUTTLER D. A short survey of document structure similarity algorithms [C]//Proceedings of the 5th International Conference on Internet Computing, March 5, 2004. Las Vegas, Nevada, USA; [s. n.], 2004: 3-9.

(编辑 侯 湘)

~~~~~

(上接第 84 页)

- [10] 史小兴, 金剑. 建筑工程纤维应用技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2008.
- [11] 董振英, 李庆斌, 王光纶, 等. 钢纤维混凝土轴拉应力应变试验研究[J]. 水利学报, 2002(5): 47-50.  
DONG ZHEN-YING, LI QING-BIN, WANG GUANG-LUN, et al. Experimental study on stress-strain characteristics of steel fiber reinforced concrete under uniaxial tension [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2002(5): 47-50.
- [12] 张君, 居贤春, 郭自力. PVA 纤维直径对水泥基复合材料抗拉性能的影响[J]. 建筑材料学报, 2009, 12(6): 706-712.  
ZHANG JUN, JU XIAN-CHUN, GUO ZI-LI. Tensile properties of fiber reinforced cement composite with different PVA fibers[J]. Journal of Building Materials, 2009, 12(6): 706-712.
- [13] 过镇海, 时旭东. 钢筋混凝土原理和分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003: 24-33.
- [14] 杨萌, 黄承逵. 钢纤维高强混凝土轴拉性能试验研究[J]. 土木工程学报, 2006, 39(3): 55-61.  
YANG MENG, HUANG CHENG-KUI. Study on stress-strain curve of high strength steel fiber reinforced concrete under uniaxial tension [J]. China Civil Engineering Journal, 2006, 39(3): 55-61.
- [15] 高丹盈, 赵 军, 汤寄予. 掺有纤维的高强混凝土劈拉性能试验研究[J]. 土木工程学报, 2005, 38(7): 21-27.  
GAO DAN-YING, ZHAO JUN, TANG JI-YU. An experimental study on the behavior of fiber reinforced high strength concrete under splitting tension[J]. China Civil Engineering Journal, 2005, 38(7): 21-27.
- [16] 王起帆, 李洁, 田强, 等. 塑钢混杂纤维轻骨料混凝土力学性能研究[J]. 四川建筑科学研究, 2010, 36(4): 204-208.  
WANG QI-FAN, LI JIE, TIAN QIANG, et al. The mechanical properties research of HPP fiber lightweight aggregate concrete[J]. Sichuan Building Science, 2010, 36(4): 204-208.
- [17] 王晓飞, 丁一宁. 聚丙烯粗纤维混凝土轴拉性能的试验研究[J]. 混凝土, 2011, 255(1): 81-84.  
WANG XIAO-FEI, DING YI-NING. Experimental study on uniaxial tensile properties of macro-PP fiber reinforced concrete [J]. Concrete, 2011, 255(1): 81-84.

(编辑 陈移峰)