复合材料学报 Acta Materiae Compositae Sinica
第28卷 第4期 8月 2011年
Vol. 28 No. 4 August 2011

文章编号：1000-3851(2011)04-0171-09

试件厚度对超高韧性水泥基复合材料弯曲性能的影响

侯利军[1]，张秀芳[1]，徐世烺*[2]

(1. 大连理工大学 土木工程学院，大连 116024；2. 浙江大学 建筑工程学院，杭州 310058)

摘 要： 通过不同厚度超高韧性水泥基复合材料(UHTCC)试件的四点弯曲试验，研究了厚度对其弯曲性能的影响，并通过理论量纲分析做了进一步解释。结合ASTM C 1609标准，提出了以单位塑性铰区体积的能量消耗T_v为参数的韧性评价方法。试验结果表明：不同厚度试件的名义弯曲应力-弯曲应变曲线与裂缝宽度变化曲线几乎重合；挠度随厚度增大呈反比例下降；在极限破坏时，中和轴高度与试件厚度比约为0.88。对于ASTM C 1609标准，韧性指数随厚度的增大而增大，而新提出的韧性指数T_v与试件厚度无关。对于拉应变硬化的超高韧性水泥基复合材料，弯曲强度、韧性性能和裂缝宽度均不存在尺寸效应。建议选用与普通FRC材料韧性及弯曲性能测定相同的试件尺寸(100 mm×100 mm×400 mm)作为标准试件形式。

关键词： 超高韧性水泥基复合材料；试件厚度；弯曲强度；裂缝宽度；中和轴高度；韧性指数

中图分类号： TU528.58 **文献标志码：** A

Influence of specimens' thickness on flexural behavior of ultrahigh toughness cementitious composite

HOU Lijun[1], ZHANG Xiufang[1], XU Shilang*[2]

(1. Department of Civil Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;
2. College of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China)

Abstract: Four-point bending tests were performed on ultrahigh toughness cementitious composite(UHTCC) specimens for the purpose of understanding the influence of specimens' thickness on its flexural behavior. The further explanation on this influence was made through theoretical dimension analysis. In the evaluation of toughness property, a new parameter, defined as energy dissipation per unit volume of plastic hinge region was proposed. The experimental results show that, the nominal flexural strength - flexural strain curves and crack width evolution curves of different thickness specimens are almost identical. Mid-span deflection decreases in an inversely proportional manner with the increase in specimen's thickness. The ratio of neutral axis depth to specimens' thickness at ultimate failure nearly keeps a constant value(about 0.88). Toughness index calculated based on ASTM C 1609 standard rises as the specimens' thickness increases, whereas new proposed toughness index T_v is independent of specimens' thickness. Therefore, for ultrahigh toughness cementitious composite exhibiting tensile strain-hardening characteristic, flexural strength, toughness capacity and crack width have no size effect. With these findings, standard specimen dimension, i.e., 100 mm×100 mm×400 mm specified for traditional FRC, is suggested for the flexural test of ultrahigh toughness cementitious composite.

Keywords: ultrahigh toughness cementitious composite(UHTCC); specimens' thickness; flexural strength; crack width; neutral axis depth; toughness index

收到初稿日期： 2010-05-03；**收到修改稿日期：** 2010-12-29

基金项目： 国家自然科学基金重点项目(50438010)；南水北调工程建设重大关键技术研究及应用(JGZXJ2006-13)

通讯作者： 徐世烺，长江学者特聘教授，主要从事混凝土断裂力学基本理论与工程应用，新型材料与结构，超高韧性水泥基复合材料，非金属纤维编织网增强混凝土结构 E-mail: slxu@zju.edu.cn

长期以来，掺加短切纤维一直被认为是提高水泥基材料韧性及抗裂性能的有效方法之一，从普通的植物纤维、钢纤维、部分有机纤维到自然纤维均广泛用于纤维增强水泥基材料的制作[1-3]，这些材料的应用有效地解决了许多实际工程问题。但是，它们大部分表现为拉应变软化行为，裂缝控制均达不到无害要求。近年来，一种有着优异拉伸性能的高性能纤维增强水泥基复合材料由美国密歇根大学的 Li 等研发[4]，并将其命名为 ECC(Engineered cementitious composites)。这种材料的主要特点是在直接拉伸载荷作用下表现出显著的应变硬化特性，在起裂后仍能承受较高的载荷，体现了类似金属材料的硬化特征，克服了传统水泥基材料在受拉载荷下的软化性能，具有非常突出的非线性变形、裂缝控制能力，以及优良的韧性和能量耗散性能[5]。其拉应变能力高达 2%～6%，为普通混凝土的 200～600 倍，裂缝间距仅为 1～2 mm，裂缝宽度限制在 100 μm 以内[6]，断裂能高达 24 kJ /m^2[7]。在国内，经过多年的研究，超高韧性水泥基复合材料(UHTCC)在轴拉载荷作用下已能稳定地达到 3%以上的应变水平且具有优良的裂缝分散能力[8]，并进一步对其基本力学性能、耐久性能[9]等进行了系统研究。

当前，就纤维增强水泥基材料的拉伸应变硬化性能，均采用直接拉伸试验所测的极限拉应变作为评价指标。然而直接拉伸试验对试件的制作(试件形式及浇筑方式)以及试验方法(加载方式及边界条件)较为敏感[10]，可操作性较低，不便于实际应用。弯曲性能是材料抗拉性能评价的一种间接方法[11]，与直接拉伸相比，弯曲试验操作简单，对试验设备要求较低，应用较为广泛。

对 UHTCC 来说，关于其弯曲性能的试验研究已很多，有的采用薄板试件形式，有的采用梁式试件形式，无论是薄板形式还是梁式形式，试件长度、宽度一般均为 400、100 mm[12]，然而对试件的厚度却缺乏一个统一的标准。而且 UHTCC 主要用于一些修补结构和桥面板结构中，这些应用均属于薄层体系，对于各种不同的工况，为达到经济、实用等指标，可能会设计不同的厚度尺寸，需要进一步研究厚度方向尺寸对其弯曲性能的影响。

本文中以厚度为主要参数，进行了不同厚度 UHTCC 的弯曲试验，研究厚度对其弯曲性能包括名义弯曲应力、弯曲应变、中性轴高度以及裂缝宽度的影响，并对试验结果进行了理论分析。应用 ASTM C 1609 标准方法评价不同厚度试件韧性能力，并从理论量纲分析的角度给出弯曲韧性与弯曲应力、截面上下边缘相对应变之间的对应关系。本文的工作对 UHTCC 弯曲性能标准化测定和评价方法的制定具有重要的参考价值。

1　实　验

1.1　试验材料

UHTCC 材料所用的主要成分为水泥、精细砂、减水剂、水、矿物材料和聚乙烯醇(PVA)纤维。PVA 纤维为人工合成纤维，长度为 12 mm，直径 40 μm，长径比为 300，抗拉弹性模量及强度分别为 40 GPa、1600 MPa。采用美国进口的霍巴特搅拌机进行 UHTCC 材料的搅拌，首先将干料混合搅拌 1～2 min 后，加水搅成面团状，随后缓慢加入适当的减水剂使基体呈流状，接着加入 2%体积分数的 PVA 纤维，再继续搅拌直至纤维均匀分散。

1.2　试件制作及加载装置

本次试验的变量参数为试件厚度，共选择五种厚度，包括 15、30、50、70、100 mm。所有试件长度与宽度保持不变为 400、100 mm，且跨长均为 300 mm。依据不同的厚度尺寸，分别记为 Sf15、Sf30、Sf50、Sf70、Sf100。同时浇筑了 350 mm×50 mm×15 mm 的薄板试件以及边长为 70.7 mm 的立方体试块以测定材料拉伸性能及抗压强度，材料的抗压强度为 44.1 MPa，直接拉伸性能见图 1，表现出显著的拉应变硬化性能。

试验采用三分点加载方式，试验装置如图 2 所示。试验设备为 1000 kN 液压电液伺服万能试验

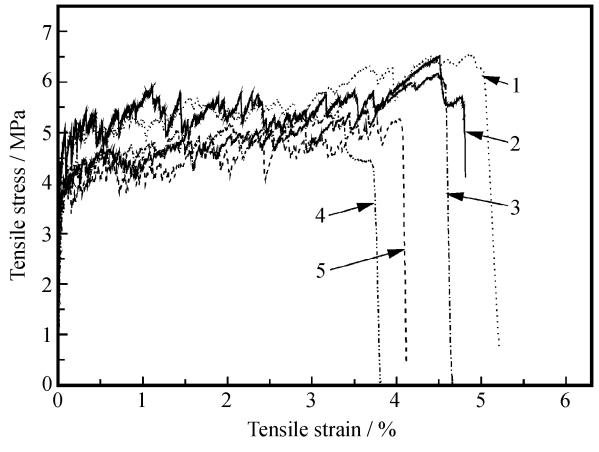

图 1　UHTCC 单轴拉伸应力-应变曲线(5 次试验)

Fig. 1　Uniaxial tensile stress－strain curves of UHTCC(five times)

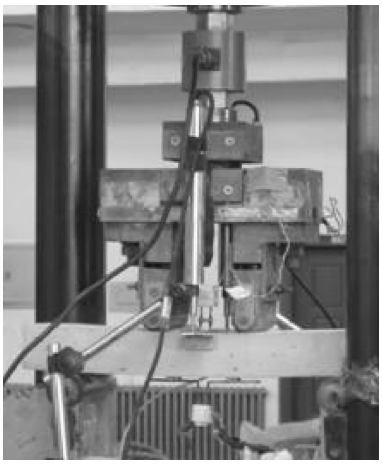

图 2 弯曲试验装置

Fig. 2 Bending test set-up

机，载荷由 5 t 载荷传感器测定，跨中挠度由两个位移传感器(LVDT)对称测定，在试件纯弯部位的上表面贴应变片，安装夹式引伸仪，下表面也安装夹式引伸仪，以测定上、下表面的拉、压应变。载荷传感器、LVDT 和应变片均通过 imc 与电脑连接，直接输出采集数据。

2 结果分析

2.1 破坏模式

图 3 给出了从 UHTCC 弯曲试验获得的典型载荷-挠度曲线图。可以看出，UHTCC 受弯试件的受力破坏过程可以分为两个阶段。第一阶段为弹性阶段，对应于曲线上屈服点之前的部分；第二阶段为裂缝发展阶段，对应于曲线上屈服点与峰值在第一阶段，载荷低于起裂载荷，试件上没有出现裂缝，在起裂载荷至屈服载荷之间，仅仅出现一些微细裂缝，很难分辨出来，载荷与挠点之间的部分。

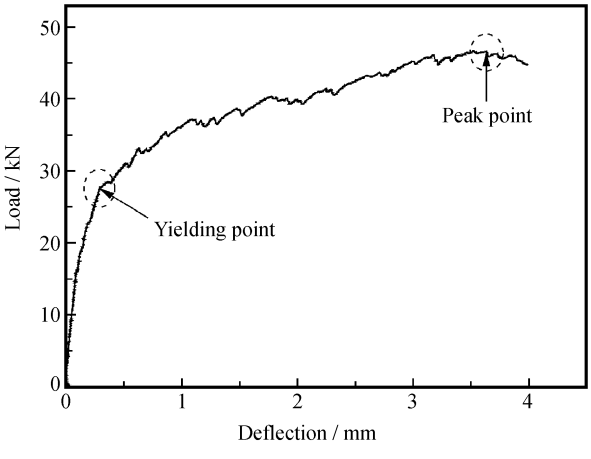

图 3 UHTCC 典型的载荷-挠度曲线

Fig. 3 Typical load-deflection curve of UHTCC

度曲线基本上呈线性比例关系。在第二阶段，随着挠度的增加，载荷缓慢增加，表现出显著的弯曲变形硬化特性。在这个阶段，载荷-挠度曲线上有很多载荷抖动点，有的肉眼可以从曲线上观察到，有的肉眼很难观察到，需要局部放大才能看到，抖动点的数量与裂缝的条数相对应。这主要是由于纤维与基体之间依靠界面粘结应力的反复传递作用所致。图 4 为极限状态时纯弯段裂缝发展的典型形态。

图 4 UHTCC 极限状态时纯弯段裂缝形态

Fig. 4 Crack pattern in pure bending zone of UHTCC beam at ultimate state

2.2 弯曲性能分析

2.2.1 名义弯曲应力-截面上下边缘相对应变关系

图 5 为 UHTCC 名义弯曲应力-截面上下边缘相对应变($\sigma-\varepsilon_{t-c}$)曲线。可以看出，不同厚度 UHTCC 试件的曲线基本重合，在同一弯曲应变下，名义弯曲应力较为接近。极限状态时，名义弯曲应力大致在12～14 MPa之间，大约为图 1 所示的极限抗拉强度的 2.5 倍，截面上下缘相对应变大致在 4.3%～4.8%之间。因此，可以认为它们均不存在尺寸效应。

名义弯曲应力-截面上下边缘相对应变的关系能够转化为弯矩-曲率关系曲线，它反映材料的弯曲承载能力和弯曲刚度的变化。其中，弯矩 M、曲率 φ 分别根据以下公式[13]获得

$$M=\sigma W \tag{1}$$

$$\varphi=(\varepsilon_t-\varepsilon_c)/h=\varepsilon_{t-c}/h \tag{2}$$

其中：ε_t 为受拉区下边缘拉应变；ε_c 为受压区上边缘压应变；h 为试件厚度；$W=bh^2/6$ 为毛截面抵抗矩。从式(2)可推出，在截面上下边缘相对应变 ε_{t-c} 基本相当的情况下，曲率与厚度呈反比例的关系。

2.2.2 中和轴高度的变化

一般认为，受弯试件的中和轴高度变化能够反

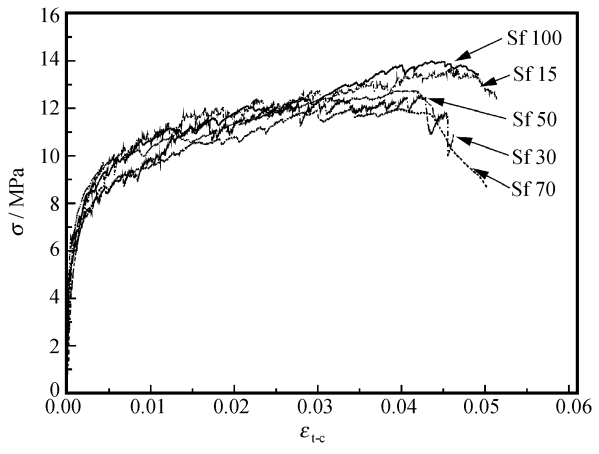

图 5　UHTCC 名义弯曲应力-截面上下边缘相对应变的关系

Fig. 5　Relationship of nominal flexural strength to relative strain between the top and the bottom of cross section of UHTCC

映材料的韧性能力，其决定了受压区压应力分布的饱满程度。试验中通过安设夹式引伸仪确定纯弯区上表面及下表面的变形，从而得到这一区域受压区压应变及受拉区拉应变的全曲线，依据平截面假定，通过下式[13]获得了中和轴高度 x_c(梁底面到中和轴的高度)的变化情况：

$$x_c = h \cdot \varepsilon_t / \varepsilon_{t-c} \tag{3}$$

图 6 所示为中和轴高度比随梁底面拉应变变化的曲线。可以看出，对不同厚度的 UHTCC 试件，中和轴高度比随拉应变的变化曲线几乎重合。中和轴高度随拉应变的增大逐渐增大，在加载初始阶段(拉应变为 0.01 之内)，中和轴高度上升很快；随后上升速度减慢，曲线十分平缓(在拉应变大于0.01之后其增大值不到 0.1)，这一阶段压应力分布趋于

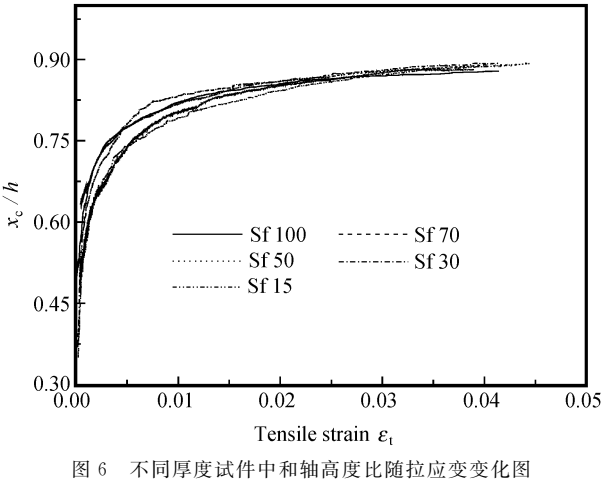

图 6　不同厚度试件中和轴高度比随拉应变变化图

Fig. 6　Relationship between neutral axis depth to specimen depth ratio(x_c/h)and the tensile strain for different depth specimens

更加饱满的形态，充分发挥 UHTCC 抗压韧性性能。由于弯曲韧性与中和轴高度相关，这就意味着对于不同厚度的 UHTCC 试件，它们的韧性性能应该相差不大。下面将通过弯曲韧性指数来进一步验证这一预测。

在极限破坏时，测量的中和轴高度见表 1。发现，对不同厚度 UHTCC 弯曲试件，极限中和轴高度均在 0.88h 左右。文献[11]理论分析表明中和轴高度为 0.9h，这与本文中五种厚度类型试件的弯曲试验结果相一致。

表 1　不同厚度 UHTCC 试件极限破坏时中和轴高度

Table 1　Neutral axis depth of different depth specimens at ultimate failure state of UHTCC

	Sf15 (15 mm)	Sf30 (30 mm)	Sf50 (50 mm)	Sf70 (70 mm)	Sf100 (100 mm)
x_c/mm	13.62	26.70	44.12	61.88	87.70
x_c/h	0.891	0.890	0.883	0.884	0.877

2.2.3　载荷-挠度关系

图 7 为实测的不同厚度试件的载荷-挠度曲线，由于试验的最大厚度试件 Sf100 和最小厚度试件 Sf15 的载荷相差甚大，前者极限载荷大约为后者的 40 多倍，因此在图 7 中分别给出了每一组试件平均的载荷-位移曲线。可以看出，载荷随试件厚度增大而逐渐增大，而相应的挠度却呈逐步下降的趋势。表 2 给出了图 7 中如图 3 所示转折点即屈服点及峰值点的载荷和挠度。

对载荷来说，由于其与弯矩线性相关，故载荷与厚度的关系和弯矩与厚度的关系呈相同的趋势；而对于挠度来说，可以通过下式[13]来解释：

$$\delta = \int_0^{L/2} x\varphi(x)\mathrm{d}x \tag{4}$$

其中：x 为支座距某一截面的距离；$\varphi(x)$为此截面的曲率；L 为试件净跨长度。事实上，跨中挠度为弯矩-曲率曲线所包围的面积矩，因此，挠度与曲率大小直接相关，而随着截面高度的增大，曲率越来越小，故挠度也表现出越来越小的趋势。

图 7(f)给出了不同厚度试件在极限破坏时挠度值的拟合曲线，发现挠度与厚度基本呈反比例函数关系。

2.2.4　弯曲韧性

韧性是材料性能的主要指标，目前对应变硬化的纤维增强水泥基材料的韧性测定没有统一的方法。纤维增强混凝土材料的韧性一般采用弯曲韧性

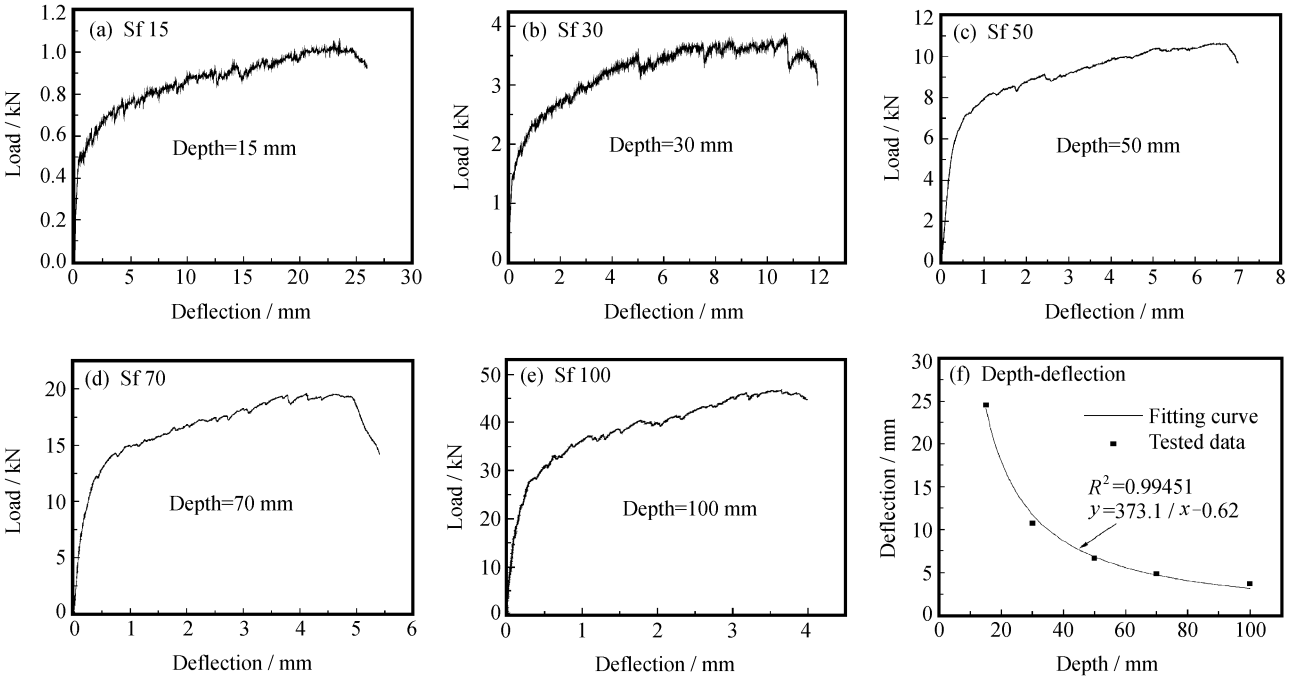

图 7　不同厚度 UHTCC 试件的荷载-挠度曲线

Fig. 7　Load versus deflection curves of UHTCC specimens with different depths

表 2　屈服点与峰值点的荷载及挠度

Table 2　Load and deflection at yielding point and peak point

	Sf15	Sf30	Sf50	Sf70	Sf100
P_1/kN	0.49	1.89	6.4	8.66	28.10
P_p/kN	1.01	3.73	10.61	19.47	46.56
δ_1/mm	0.49	0.44	0.38	0.33	0.28
δ_p/mm	24.58	10.74	6.67	4.87	3.69

Note: P_1 and δ_1 are the load and deflection at yielding point, respectively; P_p and δ_p denote the load and deflection at peak point, respectively.

测定方法，主要有美国 ASTM C 1018[14]标准测试方法和日本的 JCI SF－4[15]方法。ASTM C 1018 方法得出的结果是弯曲韧性的相对值，它要求确定第一条弯曲裂缝出现的载荷和跨中挠度值，然而这两个参数通常很难准确测量[16]，因此采用该方法评价纤维增强材料特别是低纤维掺量的纤维增强材料结果并不准确[17]；JCI SF－4 方法给出的是弯曲韧性的绝对值，在低纤维掺量情况下此方法较 ASTM C 1018 方法更为可靠[18]。

考虑到 ASTM C 1018 的不足，2005 年对该方法进行了修正，提出了 ASTM C 1609 标准。改进的 ASTM C 1609[19]标准测量方法，克服了初始起裂点确定的困难，与 JCI SF－4 方法比较相近，也是计算韧性绝对值。目前，该标准主要用于评价低纤维掺量增强的纤维增强混凝土材料的韧性能力，在高纤维掺量和弯曲变形硬化的纤维增强水泥基材料韧性评价方面的研究几乎空白[20]。文献[20]采用 ASTM C 1609 标准研究了高性能钢纤维混凝土的韧性性能，虽然这一材料表现出弯曲变形硬化特征，但极限载荷时对应的跨中挠度均小于 1 mm，远远小于本文中研究的 UHTCC。

对于试件尺寸与 ASTM C 1609 标准相一致的 Sf100，本文中试验测得的峰值挠度几乎可达 4 mm（见图 7）。如果仍然按照 ASTM C 1609 标准计算挠度在 L/600(0.5 mm)、L/150(2.0 mm) 处的载荷、应力及载荷-挠度曲线下的面积，并不足以反映 UHTCC 材料的韧性能力。因此就标准尺寸(100 mm×100 mm×400 mm)试件 Sf100，本文中定义了 7 个控制点，即峰值点和挠度分别为 L/600(0.5 mm)、L/300(1.0 mm)、L/200(1.5 mm)、L/150(2.0 mm)、L/120(2.5 mm)及 L/100(3.0 mm)的点。此外，如图 7 载荷-挠度曲线所示，试件的挠度随厚度减小而越来越大，相比于梁式试件 Sf100，薄板试件 Sf15 在峰值点的挠度已几乎达到了25 mm（见图 7）。因此，为了便于与其他厚度试件进行对比，以厚度为 100 mm 的试件 Sf100 所定义的挠度控制点为标准，对其他系列试

件的挠度控制点进行了转换，转换关系为

$$\delta = \delta_{100} \times 100 / h \tag{5}$$

其中：δ_{100}为 Sf100 试件挠度控制点的挠度值；h 为各组试件的厚度值。

对于应变软化材料，能量主要集中在有限的几条宏观裂缝面内，在裂缝面外消耗的能量相对较小。但是对 UHTCC 材料，由于其多条细密裂缝稳态扩展的开裂模式，能量的消耗不是仅仅集中在有限的几个裂缝面内，而是发生在整个多缝开裂的体单元内。因此，为了能够更好解释 UHTCC 能量耗散机制，提出了以单位塑性铰区体积内消耗的能量作为韧性性能评价的 1 个新参数 T_v：

$$T_v = T/V_{p\text{-}h} \tag{6}$$

其中：T 为各组试件换算挠度点处的载荷-挠度曲线下包面积；$V_{p\text{-}h}$为塑性铰区体积。依据文献[21]，认为整个纯弯段即为塑性铰区。就前文给出的 7 个挠度控制点以及不同厚度系列的换算挠度点，单位塑性铰区体积内的能量消耗 T_v 在这些点处分别标记为 $T_{v,0.5}$、$T_{v,1.0}$、$T_{v,1.5}$、$T_{v,2.0}$、$T_{v,2.5}$、$T_{v,3.0}$和 $T_{v,peak}$。

根据上面的算法，计算了换算挠度点处的弯曲应力 σ、T_v，以及相应的载荷-挠度曲线下包面积 T，即面积韧性指数，评价了五种不同厚度试件的韧性能力，结果见表 3。可以看出，在各换算挠度处的弯曲应力 σ 均接近，相差均在 10%之内，且各换算点处的韧性指数 T_v 相差很小，误差不超过 5%，但指数 T 却相差很大，基本随厚度呈线性关系增大。经过式(5)、式(6)的转换后，韧性参数 T_v 存在着如图 8 所示的关系。对不同厚度的 UHTCC 试件，

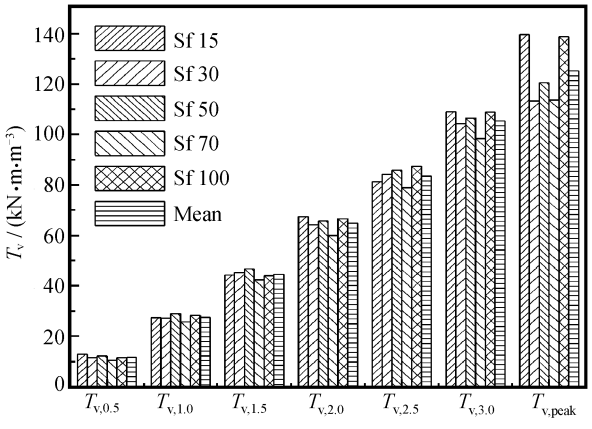

图 8　不同厚度试件在各换算挠度点处的 T_v

Fig. 8　T_v of different thickness specimens at each transformed deflection point

在同一换算挠度点处，T_v 值基本在同一水平上，而且随着挠度的增大，T_v 值逐渐增大。

以下从量纲分析的方法来对此现象作进一步的理论解释，具体见以下公式（注：跨长 L 和宽度 b 为定值）。

载荷 F 可由下式表示：

$$F = \sigma b h^2 / L \tag{7}$$

将式(2)代入式(4)，即可得到挠度计算式

$$\delta = \int_0^{L/2} x\varphi(x)\mathrm{d}x = \int_0^{L/2} x\varepsilon_{t\text{-}c}(x)h^{-1}\mathrm{d}x \tag{8}$$

分别将式(7)和式(8)代入下式，得到其关于应力、应变的表达式：

$$\begin{aligned} T &= \int_0^{\delta_n} F\mathrm{d}\delta \\ &= \int_0^{L/2} \sigma(x) b h^2 L^{-1} x\varepsilon_{t\text{-}c}(x)h^{-1}\mathrm{d}x \end{aligned} \tag{9}$$

其中：δ_n 为不同系列试件挠度控制点处的挠度值。将式(9)代入式(6)，得到 T_v 与半跨范围内截面应力、相对应变的关系：

$$\begin{aligned} T_v &= T(h)/V_{p\text{-}h} = 3(bhL)^{-1}\int_0^{L/2} \mathrm{d}T(h) \\ &= 3L^{-2}\int_0^{L/2} \sigma(x)\varepsilon_{t\text{-}c}(x)x\mathrm{d}x \end{aligned} \tag{10}$$

式中分子、分母中 h 均全部抵消，又由于弯曲应力 σ、截面相对应变 $\varepsilon_{t\text{-}c}$均与厚度无关，且其他参数均相同，因此，积分后为一常数，与图 8 所示的试验计算结果相一致。

2.3　裂缝形态分析

UHTCC 作为一种超高韧性材料，除了有较高的非线性变形能力外，还有着很好的裂缝分散性能。在试验中使用裂缝侧宽仪在不同应变时刻测量了梁底肉眼可观察到的最大裂缝宽度，结果如图 9 所示，同时也画出了不同拉应变下裂缝扩展的外包络曲线。可以看出，极限拉应变时最大裂缝宽度不超过 150 μm。在混凝土结构设计规范规定的0.01钢筋极限拉应变时，裂缝宽度更为细微，最大值仅为 80 μm。从图中还可以发现，与其他组试件相比，Sf30 试件的裂缝宽度较宽，外包线几乎与它的裂缝发展相重合，在同一拉应变下，不同厚度试件的裂缝宽度差异较小。在拉应变小于 0.25%的范围内，裂缝宽度发展较快，但均小于 60 μm，随后裂缝增长速度减缓。由此可以得出，对 UHTCC 材料来说，裂缝宽度是材料的固有属性，与试件尺寸无关，这一结论与文献[6]的结论相一致。

表 3 不同厚度试件弯曲韧性对比

Table 3 Comparison of flexural toughness between specimens with different depths

	$\delta_{0.5}$/mm	$\sigma_{0.5}$/MPa	$\sigma_{0.5}$/mean	$T_{0.5}$/(kN·mm)	$T_{v,0.5}$/(kN·m·m^{-3})	$T_{v,0.5}$/mean	$\delta_{1.0}$/mm	$\sigma_{1.0}$/MPa	$\sigma_{1.0}$/mean	$T_{1.0}$/(kN·mm)	$T_{v,1.0}$/(kN·m·m^{-3})	$T_{v,1.0}$/mean
Sf15	3.33	9.41	1.05	1.91	12.73	1.13	6.67	10.04	0.99	4.09	27.27	1.01
Sf30	1.67	8.48	0.95	3.43	11.43	1.01	3.33	10.05	0.99	8.12	27.07	1.01
Sf50	1.00	9.53	1.06	6.08	12.16	1.08	2.00	10.47	1.03	14.45	28.90	1.07
Sf70	0.71	8.68	0.97	7.30	10.43	0.92	1.43	9.53	0.94	18.02	25.74	0.96
Sf100	0.50	8.69	0.97	9.65	9.65	0.86	1.00	10.61	1.05	25.60	25.60	0.95
Mean		8.96			11.28			10.14			26.92	
	$\delta_{1.5}$/mm	$\sigma_{1.5}$/MPa	$\sigma_{1.5}$/mean	$T_{1.5}$/(kN·mm)	$T_{v,1.5}$/(kN·m·m^{-3})	$T_{v,1.5}$/mean	$\delta_{2.0}$/mm	$\sigma_{2.0}$/MPa	$\sigma_{2.0}$/mean	$T_{2.0}$/(kN·mm)	$T_{v,2.0}$/(kN·m·m^{-3})	$T_{v,2.0}$/mean
Sf15	10.00	10.90	0.99	6.65	44.33	1.00	13.33	11.83	1.01	10.12	67.47	1.05
Sf30	5.00	11.42	1.04	13.58	45.27	1.02	6.67	11.96	1.03	19.26	64.20	1.00
Sf50	3.00	11.01	1.00	23.40	46.80	1.05	4.00	11.77	1.01	32.88	65.76	1.02
Sf70	2.14	10.38	0.94	29.64	42.34	0.95	2.86	10.92	0.94	41.98	59.97	0.93
Sf100	1.50	11.45	1.04	44.00	44.00	0.99	2.00	11.84	1.01	63.64	63.64	0.99
Mean		11.03			44.55			11.66			64.21	
	$\delta_{2.5}$/mm	$\sigma_{2.5}$/MPa	$\sigma_{2.5}$/mean	$T_{2.5}$/(kN·mm)	$T_{v,2.5}$/(kN·m·m^{-3})	$T_{v,2.5}$/mean	$\delta_{3.0}$/mm	$\sigma_{3.0}$/MPa	$\sigma_{3.0}$/mean	$T_{3.0}$/(kN·mm)	$T_{v,3.0}$/(kN·m·m^{-3})	$T_{v,3.0}$/mean
Sf15	16.67	11.72	0.97	12.20	81.33	0.98	20.00	13.00	1.04	16.35	109.00	1.04
Sf30	8.33	12.07	1.00	25.27	84.23	1.02	10.00	12.17	0.97	31.30	104.33	1.00
Sf50	5.00	12.41	1.02	42.93	85.86	1.04	6.00	12.44	0.99	53.25	106.50	1.02
Sf70	3.57	11.73	0.97	55.17	78.81	0.95	4.29	11.75	0.94	68.91	98.44	0.94
Sf100	2.50	12.61	1.04	83.82	83.82	1.01	3.00	13.41	1.07	105.41	105.41	1.01
Mean		12.11	1.00		82.81	1.00		12.55	1.00		104.74	1.00
	δ_{peak}/mm	σ_{peak}/MPa	σ_{peak}/mean	T_{peak}/(kN·mm)	$T_{v,peak}$/(kN·m·m^{-3})	$T_{v,peak}$/mean						
Sf15	24.58	13.51	1.00	20.95	139.67	1.12						
Sf30	10.74	12.42	0.96	34.02	113.40	0.91						
Sf50	6.67	12.73	0.99	60.31	120.62	0.97						
Sf70	4.87	11.92	0.92	79.59	113.70	0.91						
Sf100	3.69	13.97	1.08	137.23	137.23	1.10						
Mean		12.91			124.92							

Note: $T_{0.5}$, $T_{1.0}$, $T_{1.5}$, $T_{2.0}$, $T_{2.5}$, $T_{3.0}$ and T_{peak} are the area under load-deflection curve up to each transformed deflection and peak deflection for these five series, respectively; Mean is the average value of σ or T_v of five series at each transformed deflection point.

3 尺寸效应讨论

对于普通混凝土而言，由于拉伸软化行为特征，其弯曲强度和弯曲韧度表现出随着尺寸增大而逐渐减小的趋势[22]，即存在尺寸效应。这可以通过断裂力学尺寸效应及 Weibull's 最弱连接理论来解释。鉴于此，许多国家的混凝土结构设计规范都考虑了混凝土的尺寸效应，其中欧洲(CEB1990)及日本(JSCE1996)通过减小混凝土强度的方法来考虑构件尺寸增大的影响。传统的纤维增强混凝土能够改善混凝土的脆性，但仍然存在明显的尺寸效应，这主要是由于其拉伸软化行为，并没有改变普

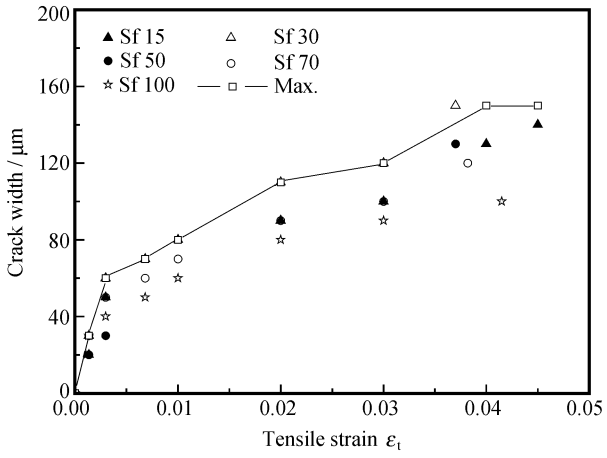

图 9　裂缝发展示意图及外包络线

Fig. 9　Illustration of crack width development for different depth specimens and its envelope curve

通混凝土的单条裂缝发展的开裂模式。

UHTCC 具有应变硬化特性，可以有效地限制宏观局部裂缝的形成，趋向于饱和细密裂缝的形式，能够将具有尺寸效应的脆性断裂破坏模式转化为无尺寸效应的延性破坏模式。UHTCC 的弯曲性能试验结果表明，在工程允许的离散范围内，名义弯曲应力、弯曲拉压应变、中和轴高度、换算挠度点处的韧性参数以及裂缝宽度的变化幅度较小，均可认为与试件厚度无关。也就是说，若 UHTCC 材料强度一定时，弯曲性能不存在尺寸效应。

因此，为与传统纤维混凝土(FRC)韧性测定标准方法 ASTM C 1609 等相统一，同时在实际应用中，100 mm×100 mm×400 mm 模具使用较为普遍，建议选用 100 mm×100 mm×400 mm 尺寸作为 UHTCC 材料弯曲韧性测定的标准试件形式。

4　结　论

(1) 整个受弯过程中名义弯曲应力与截面上下缘相对应变关系曲线随厚度的增大变化很小，厚度尺寸几乎没有影响。而载荷、弯矩随厚度增大而增大，挠度随着厚度增大呈反比例减小。

(2) 弯曲试验结果表明，在加载初始阶段(拉应变<0.01)，中和轴高度随拉应变的增加迅速增大，随后增速逐渐变缓，达到极限载荷时，中和轴高度与试件厚度比约为 0.88。

(3) 通过计算 100 mm 厚度的试件在各挠度控制点处以及其他厚度试件在相应换算挠度点处的韧性能力 T_v，发现各换算点处不同系列试件的 T_v 基本相当，且理论量纲分析进一步验证了试验结果。

(4) 所有 UHTCC 试件均表现出很好的裂缝分散性能，裂缝宽度的扩展与试件厚度无关。拉应变在 0.25%之内，裂缝扩展较快，随后裂缝扩展速度减慢，直到 1%，最大裂缝宽度为 80 μm。

参考文献：

[1] 叶颖薇，冼定国，冼杏娟. 竹纤维和椰纤维增强水泥复合材料[J]. 复合材料学报，1998，15(3)：92-98.
Ye Yingwei，Xian Dingguo，Xian Xingjuan. Bamboo fiber and coconut husk fiber reinforced cement composite materials [J]. Acta Materiae Compositae Sinica，1998，15(3)：92-98.

[2] Andrzej M B. Fiber reinforced cement - based (FRC) composites after over 40 years of development in building and civil engineering [J]. Compos Struct，2008，86(1-3)，3-9.

[3] 李为民，许金余，沈刘军，等. 玄武岩纤维混凝土的动态力学性能 [J]. 复合材料学报，2008，25(2)：135-142.
Li Weimin，Xu Jinyu，Shen Liujun，et al. Dynamic mechanical properties of basalt fiber reinforced concrete using a split Hopkinson pressure bar [J]. Acta Materiae Compositae Sinica，2008，25(2)：135-142.

[4] Li V C，Leung C K Y. Theory of steady state and multiple cracking of random discontinuous fiber reinforced brittle matrix composites [J]. ASCE Journal of Engineering Mechanics，1992，118(11)：2246-2264.

[5] 徐世烺，李贺东. 超高韧性水泥基复合材料研究进展及其工程应用 [J]. 土木工程学报，2008，41(6)：45-60.
Xu Shilang，Li Hedong. A review on the development of research and application of ultra high toughness cementitious composites [J]. China Civil Engineering Journal，2008，41(6)：45-60.

[6] Li V C，Wang S，Wu C. Tensile strain - hardening behavior of PVA - ECC [J]. ACI Materials Journal，2001，98(6)：483-492.

[7] Li V C，Hashida T. Engineering ductile fracture in brittle matrix composites [J]. Journal of Materials Science Letters，1993，12(12)：898-901.

[8] Li H D，Xu S L，Leung C K Y. Tensile and flexural properties of ultra high toughness cemontious composite [J]. Journal of Wuhan University of Technology-Mater Sci Ed，2009，24(4)：677-683.

[9] 徐世烺，蔡新华. 超高韧性水泥基复合材料碳化与渗透性能试验研究 [J]. 复合材料学报，2010，27(3)：177-183.
Xu Shilang，Cai Xinhua. Experimental studies on permeability and carbonation properties of ultra high toughness cementitious composites [J]. Acta Materiae Compositae Sinica，2010，27(3)：177-183.

[10] Kanakubo T. Tensile characteristics evaluation method for ductile fiber - reinforced cementitious composites [J]. Journal of Advanced Concrete Technology，2006，4(1)：3-17.

[11] Qian S，Li V C. Simplified inverse method for determining the tensile strain capacity of SHCCS [J]. Journal of Advanced

Concrete Technology，2007，5(2)：235-246.

[12] 李贺东. 超高韧性水泥基复合材料试验研究[D]. 大连：大连理工大学，2008.

[13] Park R，Pauley T. Reinforced concrete structure[M]. New York：John Wiley & Sons，1975.

[14] American Society for Testing and Materials. ASTM C 1018—97 Standard test method for flexural toughness and first-crack strength of fiber-reinforced concrete (using beam with third-point loading)[S]. Philadelphia，USA：ASTM International，1997.

[15] Japan Concrete Institute. JCI SF-4 method of tests for flexural strength and flexural toughness of fiber-reinforced concrete[S]. Tokyo，Japan：Japan Concrete Institute Standards for Test Methods of Fiber Reinforced Concrete，1984.

[16] Naaman A E，Reinhardt H W. High performance fiber reinforced cement composites 2 (HPFRCC 2)[M]. Lodon：E & FN Spon，1996：210-212.

[17] Johnston C D，Skarendahl A. Comparative flexural performance evaluation of steel fiber-reinforced concrete according to ASTM C 1018[J]. Materials and Structures，1992，25(4)：191-200.

[18] Shah S P，Brandt A M，Quyang C，et al. Toughness characterization and toughening mechanisms[C]// Naaman A E，Reinhardt H W. Proceedings of the Second International RILEM Workshop. London：E & FN Spon，1995：193-228.

[19] American Society for Testing and Materials. ASTM C 1609 Standard test method for flexural performance of fiber-reinforced concrete (using beam with third-point loading)[S]. Philadelphia，USA：ASTM International，2005.

[20] Marijan S，Dubravka B. Toughness testing of ultra high performance fiber reinforced concrete[J]. Materials and Structures，2009，42(8)：1025-1038.

[21] Soranakom C，Mobasher B. Closed-form solutions for flexural response of fiber reinforced concrete beams[J]. ASCE Journal of Engineering Mechanics，2007，133(8)：933-941.

[22] Ward R，Li V C. Dependence of flexural behavior of fiber reinforced motor on material fracture resistance and beam size[J]. ACI Material Journal，1990，87(6)：627-637.