【土木建筑工程 / Architecture and Civil Engineering】

三点抗折下纤维混凝土加载过程的体应变研究

张健超1,2, 翁建武2, 匡 川2, 彭少成2, 董必钦2, 洪舒贤2, 邢 锋1,2

- 1) 中国地震局工程力学研究所, 地震工程与工程振动重点实验室, 黑龙江哈尔滨 150080;
- 2) 深圳大学土木与交通工程学院,广东省滨海土木工程耐久性重点实验室,广东深圳518060

摘 要:为提高混凝土的受拉性能,通常会在混凝土中添加纤维材料改善材料的力学性能.纤维混凝土在受外力荷载时,内部应变场非常复杂,现有技术很难对应变进行测量.采用 X 射线断层扫描(X-ray computed tomography, XCT)原位三点抗折实验,对纤维混凝土加载过程进行跟踪测试,用数字体积相关(digital volume correlation, DVC)计算不同纤维质量分数的试样在不同加载阶段材料内部的体应变.结果表明,在混凝土中加入纤维能较好地改善混凝土的断裂性能,明显减少裂缝的长度、宽度和体积.通过 XCT结合 DVC 的方法得到不同纤维质量分数试样在不同加载阶段的体应变演化,发现试样破坏时,断裂面外仍然存在着不可忽略的变形耗能.通过体应变的分析可以得到试样受载后的内部变形响应.

关键词:建筑材料;纤维混凝土;X射线断层扫描;断裂形貌;数字体积相关;体应变中图分类号:TU528 文献标志码:A doi:10.3724/SP.J.1249.2021.06664

The volume strain of fiber reinforced concrete with three points bending during loading

ZHANG Jianchao^{1, 2}, WENG Jianwu², KUANG Chuan², PENG Shaocheng², DONG Biqin², HONG Shuxian², and XING Feng^{1, 2}

- Key Laboratory of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, Institute of Engineering Mechanics,
 China Earthquake Administration, Harbin 150080, Heilongjiang Province, P. R. China
- 2) College of Civil and Transportation Engineering, Guangdong Province Key Laboratory of Durability for Marine Civil Engineering, Shenzhen University, Shenzhen 518060, Guangdong Province, P. R. China

Abstract: In order to improve the tensile properties of concrete, fiber materials are usually added into concrete to improve its mechanical properties. The internal strain fields in the external loaded fiber reinforced concrete are very complex, and it is still difficult to test them currently. In this paper, the X-ray microcomputed tomography (XCT) in situ three-point bending test is used to track the loading process of fiber mortar. The digital volume correlation (DVC) is used to calculate the internal volume strain and the internal strain field of mortar with different fiber contents at different loading stages. The results show that adding fiber into concrete can improve the fracture performance of concrete, and the length, width and volume of crack are obviously reduced. The volumetric strain evolution of samples with different fiber content at different loading stages can be obtained by combining XCT with

Received: 2020-08-23; Revised: 2021-07-14; Accepted: 2021-09-18

Foundation: National Natural Science Foundation of China (51878411, 51727813); National Science Foundation for Outstanding Youth of China (51925805)

Corresponding author: Professor XING Feng. E-mail: xingf@ szu.edu.cn

Citation: ZHANG Jianchao, WENG Jianwu, KUANG Chuan, et al. The volume strain of fiber reinforced concrete with three points bending during loading [J]. Journal of Shenzhen University Science and Engineering, 2021, 38(6): 664-669. (in Chinese)



DVC. There is still non-negligible deformation energy consumption outside the fracture surface when samples fail. The internal deformation response of the specimen under load can be obtained by volume strain analysis.

Key words: building materials; fiber reinforced concrete; X-ray microcomputed tomography; fracture morphology; digital volume correlation; volume strain

随着建筑工业的发展,工程结构的安全性要求 越来越高. 混凝土作为主要的建筑材料, 对强度的 要求也越来越高. 但随着混凝土强度的增加, 脆性 也增加. 在混凝土基体中添加纤维可以减小脆性, 提高材料的拉伸性能、抗裂性能和韧性[1-2]. 与普 通混凝土相比,随着纤维质量分数的增加,峰值强 度略有增加[3],纤维的主要作用是改善应力-应变 曲线的峰后行为[45]. 现有很多研究都是基于宏观 尺寸的力学特征[6]或者利用数字图像相关(digital image correlation, DIC)分析试样表面的断裂行 为[7-8],而对材料内部在加载过程中的变化则研究 较少,只停留在对表面裂缝的观察,缺乏对内部的 体应变进行相应分析和断裂过程的定量研究[9]. 混 凝土的断裂在很大程度上削弱了结构的耐久性,影 响结构使用寿命. 纤维混凝土因良好的抗裂性能得 到了广泛应用,有必要对其内部的断裂形貌及加载 过程中的应变场演化进行深入研究.

X 射线断层扫描(X-ray computed tomography, XCT)是一种无损检测试样内部微观形貌的方法,能够根据试样内部的密度和原子序数的不同,对试样进行连续扫描,然后通过对图像重构得到试样的三维形貌演化,这有助于更好地理解各种材料内部的力学性能。目前,XCT 技术已被广泛用于研究混凝土的微观结构及其在变形过程中的演化^[9-11].数字体积相关(digital volume correlation, DVC)可以对XCT 获得的变形前后两组数据进行分析,将子集作为匹配对象进行相关运算,计算出子集在变形前后的位移向量,并通过位移向量计算其体应变^[12].XCT 与 DVC 相结合可以测量不同加载阶段材料内部变形后的位移和体应变。目前,它们的应用已经从骨骼扩展到复合材料的微观力学研究^[13-14].但是,该技术在纤维混凝土领域还没有足够的应用.

本研究采用 XCT 和 DVC 对三点抗折下纤维混凝土加载过程的体应变演化进行研究,通过原位加载实验跟踪其加载过程,对纤维混凝土的断裂形貌进行 XCT 的提取和分析,并用 DVC 研究不同纤维质量分数试样在不同加载阶段的体应变演化.

1 材料与实验方法

1.1 原材料

本研究制备的试样原材料包括水泥、砂、纤维和水.水泥采用普通硅酸盐水泥(P.O.42.5).对标准砂进行筛分,得到粒径小于300 μm的砂子,堆积密度为1610 kg/m³.纤维为聚乙烯醇纤维,纤维断裂强度为1.4 GPa,断裂伸长率为6.0%~8.0%,杨氏模量为35 GPa,长度为(3±0.5) mm.水为去离子水.砂子、水泥和水的质量比为4:2:1.在砂子、水泥和水的混合物中分别添加不同质量分数的纤维(0和0.5%).在10 mm×10 mm×10 mm的立方体模具中制备试件,然后在标准养护室中养护24h,拆模后在相同的养护条件下养护28 d.在XCT扫描前,用砂纸磨平试样表面,使试样在加载时受力均匀.

1.2 三点抗折试验

本研究采用的 XCT 设备为 Xradia Micro XCT-400. 试样前对设备的相关参数设置如下: X 射线激发电压为 80 kV, 功率为 8 W, 放大倍数为 0.4 倍, 曝光时间为 10 s. 当对图像进行重构后,得到矩阵体积为 1 024 × 1 024 × 1 000 像素的图像. 每个体素代表的实物体积为 38.249 4 μm × 38.2

表 1 不同纤维质量分数的极限荷载

Table 1 Ultimate loads for the samples with different fibre contents

w(纤维)/	极限荷载/N					
%	试样1	试样 2	试样 3	试样 4	试样 5	试样 6
0	210	220	200	230	200	230
0.5	270	250	280	240	270	260

表 2 四次扫描下不同纤维质量分数试样的荷载
Table 2 Loads of the four scans on specimens with
different fibre contents

(((((((((((((((((((荷载/N					
w(纤维)/ %	第1次 扫描	第 2 次 扫描	第 3 次 扫描	第 4 次 扫描		
0	0	110	185	220		
0.5	0	130	200	260		

1.3 数字体积相关技术

DVC 是一种基于图像处理技术的位移和体应变分析方法.通过跟踪两幅三维图像中灰度值的变化得到位移矢量场,并计算体应变.在跟踪过程中,需要散斑材料用于图像匹配^[15].本研究采用复合材料内部的孔隙作为散斑.当对两个三维图像执行匹配计算时,需要先选取基本计算单元(子集)的尺寸和子集中心点的间距(步长).子集尺寸影响匹配和计算结果的精度,步长则影响计算点的数量和计算时间^[16].

DVC 通常将未变形的图像对象作为参考对象. 其他对象被认为是变形对象. DVC 进行图像匹配的相关函数是差的平方体积和(volumetric sum of squared differences, VSSD)^[15],

$$VSSD = \sum_{k=1}^{N} \sum_{j=1}^{N} \sum_{i=1}^{N} \left[I' \left(x_{ijk}, y_{ijk}, z_{ijk} \right) - I \left(x_{iik}, y_{iik}, z_{ijk} \right) \right]^{2}$$
(1)

其中, $I(x_{ijk}, y_{ijk}, z_{ijk})$ 为参考图像中整数位置 $(x_{ijk}, y_{ijk}, z_{ijk})$ 处的灰度值; $I'(x_{ijk}, y_{ijk}, z_{ijk})$ 为变形图像中整数位置 $(x_{ijk}, y_{ijk}, z_{ijk})$ 处的灰度值,下标 i, j 和 k 分别为体图像中 x, y 和 z 方向上的体素编号.

实体对象的变形会导致图像中每个子集的平移和变形,变形图像中子体积的形状会变得更加复杂。图 1 显示了匹配过程中变形后子集中心点的估计位置 Q. 参考图像中子集中心点 P 的坐标位置记为(x_p , y_p , z_p),则任意点 Q(x, y, z) 的子集坐标为

$$x = x_p + \gamma, y = y_p + \eta, z = z_p + \xi$$
 (2)

其中, γ 、 η 和 ξ 分别为 P 点到 Q 点位移矢量在 x、y 和 z 方向的分量. 子集中单个点的位移矢量场记为 $f(\gamma,\eta,\xi)$. 因此,变形图像中任意点的特征函数的值可表示为

$$I'(x, y, z) = I[x_p + \gamma + f_1(\gamma, \eta, \xi), y_p + \eta + f_2(\gamma, \eta, \xi), z_p + \xi + f_3(\gamma, \eta, \xi)]$$
(3)

如式(3)所示,可以使用泰勒级数近似表示点 *P* 和 *Q* 的灰度值. 假设子集内的位移呈线性变化,则任何点的位移矢量场可表示为

$$f(\gamma, \eta, \xi) = [f_1, f_2, f_3] \approx \begin{bmatrix} u(\gamma, \eta, \xi), v(\gamma, \eta, \xi), w(\gamma, \eta, \xi) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_1 + b_1 \gamma + c_1 \eta + d_1 \xi \\ a_2 + b_2 \gamma + c_2 \eta + d_2 \xi \end{bmatrix}^{\mathsf{T}}$$

$$(4)$$

其中, $u(\gamma,\eta,\xi)$ 、 $v(\gamma,\eta,\xi)$ 和 $w(\gamma,\eta,\xi)$ 分别是变形后任意点 Q 的位移矢量场在 x、y 和 z 方向一阶近似下的分量. a_i 、 b_i 、 c_i 和 d_i (i=1,2,3) 是多项式系数. 体应变分量 ε_{xx} 、 ε_{yy} 、 ε_{xz} 、 ε_{xy} 、 ε_{xz} 和 ε_{yz} 和

$$\begin{cases} \varepsilon_{xx} = \frac{\partial u}{\partial x}, \ \varepsilon_{yy} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) \\ \varepsilon_{zz} = \frac{\partial v}{\partial y}, \ \varepsilon_{xy} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \right) \\ \varepsilon_{xz} = \frac{\partial w}{\partial z}, \ \varepsilon_{yz} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right) \end{cases}$$
(5)

为提高计算精度,一般在子集变形中引入非整数位移. 因此,必须将图像中离散的数据转换为连续函数,通常采用三维插值方法. 本研究采用的三维插值方法为三次 Hermite 多项式. Hermite 插值^[15]为

$$I(x_i + \gamma, y_i + \eta, z_i + \xi) = \sum_{k=0}^{3} \sum_{j=0}^{3} \sum_{i=0}^{3} A_{ijk} H_i(\gamma) H_j(\eta) H_k(\xi)$$
 (6)

其中, $H_i(i = 0,1,2,3)$ 为三次 Hermite 多项式; A_{ijk} 是插值系数.

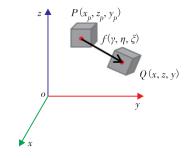


图 1 子集的未变形和变形位置示意

Fig. 1 Schematic diagram of undeformed and deformed locations of subset

2 结果与讨论

2.1 XCT 结果

在 XCT 扫描后将获得一系列 2D 投影图像,将

这些图像进行重构后得到三维的体图像.图2显示了纤维质量分数为0的试样在极限载荷下的XCT重构结果,通过图2可得到试样裂缝的空间位置及走向等信息.试样中间高度处的2D切片图见图3.由图3可以明显看到裂缝、孔隙、水泥和砂子的分布情况,由于它们具有不同的X射线吸收系数,在图像上呈现出的灰度值不同.这几种材料的孔隙灰度值最具区分性,因此可以作为DVC分析的散斑材料.通过阈值分割,可以从重构图像直接提取裂缝和孔隙(图4).提取的裂缝形貌图可以用来计算试样在三点抗折实验下最大的裂缝长度(竖向)、最



图 2 w (纤维) = 0 试样在极限荷载作用下的三维重构图 Fig. 2 3D reconstruction of the sample without fiber under ultimate load

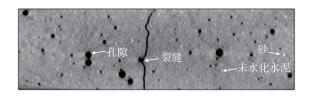


图 3 w (纤维) = 0 试样在极限荷载下 中间高度处的切片

Fig. 3 Slice of the sample without fiber at middle height under ultimate load

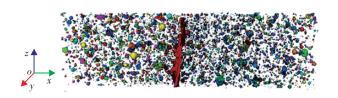


图 4 w (纤维) = 0 试样在极限荷载下 提取的孔隙裂缝

Fig. 4 The pores and crack extracted from the sample without fiber under ultimate load

大裂缝宽度和裂缝的总体积,结果如表 3. 从表 3 可见,在试样中加入纤维能有效提高抗弯强度.纤维对试样的增强作用主要体现在两个方面:一方面,纤维在试样中的三维随机分布提高了材料的抗收缩性能,进而提高了试样的强度;此外,在纤维

增韧的情况下,裂纹开展需要克服纤维与基体界面处的摩擦剪应力,这也会增大试样破坏的极限荷载^[17].另一方面,纤维桥接作用引起的应力重分布使样品出现裂缝后纤维仍能提供力的传递^[17].在试样中加入纤维后,极限荷载下的裂缝长度、宽度和总体积显著减小,尤其是最大裂缝处宽度和裂缝总体积,是不掺纤维时的 1/3 左右. 这说明在试样中加入纤维不仅能提高其抗弯强度,还能抑制裂缝的开展,降低裂缝长度和宽度.

表 3 不同纤维质量分数的 XCT 结果获得的 极限荷载下的裂纹参数

Table 3 Crack parameters obtained from XCT results with different fiber contents at ultimate load

w(纤维)/ %	最大裂缝长度 (竖向)/mm	最大裂缝 宽度/mm	裂缝总 体积/mm³
0	9.156	0.326	7.483
0.5	7.224	0.113	2.316

2.2 DVC 结果

通过 DVC 计算 x、y 和z 方向的位移分量后,可得到试样内部各个方向的体应变分量. 因为三点抗折试验中试样的体应变主要由 x 方向的应变分量控制,所以主要分析了不同纤维质量分数试样的 x 方向应变结果. 图 5 给出了纤维质量分数为 0 的试样在不同加载阶段的 x 方向应变分量. 通过对不同纤维质量分数的试件在不同加载阶段的原位检测,可以直观地观察加载过程的体应变演化. 试样在 50%极限载荷下,试样基本处于弹性应变状态,应变相对较小. 当载荷达到极限值的 90%时,应变值在部分区域逐渐增大,开始出现应变不均匀现象. 当荷载达到极限值时,试样内部突然出现损伤,产生破坏裂缝,且荷载开始下降. 开裂后裂缝处应变明显增大,超出极限拉应变. 断裂面外区域的弹性应变流入断裂带,不过仍有部分残余应变.

图 6 给出了纤维质量分数为 0.5% 的试样在不同加载阶段的 x 方向应变分量. 可以看出体应变演化过程与纤维质量分数为 0 的试样呈现相同的趋势. 通过对比图 5 和图 6 可以发现,破坏时,纤维质量分数为 0.5% 的试样具有更大的拉伸应变,最大拉伸应变是纤维质量分数为 0 的试样的 1.5 倍左右. 而且,90% 极限荷载时,两组试样均出现应变不均匀现象. 但是纤维质量分数为 0 的试样应变集中程度更高,这是因为纤维的掺入减弱了试样的脆性,增大了变形能力,使试样在受载后的应变分布

http://iournal.szu.edu.cn

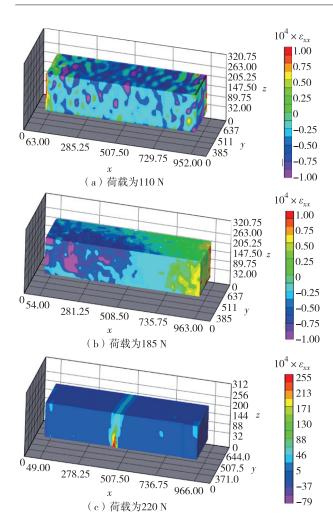


图 5 w (纤维) = 0 试样在不同加载阶段的 x 方向应变分量

Fig. 5 ε_{xx} without fiber content at different loading stages

更加均匀.

另外,两组试样断裂后断裂面外均存在残留的应变,且纤维质量分数为 0.5% 的试样的残余应变更大些. 这说明即使试样破坏时断裂面外仍然存在着变形能. 这与 PLANAS 等^[18]的研究一致,他们认为开裂过程区外试样基体的变形能会影响断裂能的确定. 因此,变形能是不可忽略的(特别是在变形能力较大的试样中),在研究断裂能时应予以考虑.

3 结 论

采用 XCT 和 DVC 进行不同纤维质量分数的纤维混凝土在三点抗折实验下不同加载阶段的体应变进行研究,可知:

http://iournal.szu.edu.cn

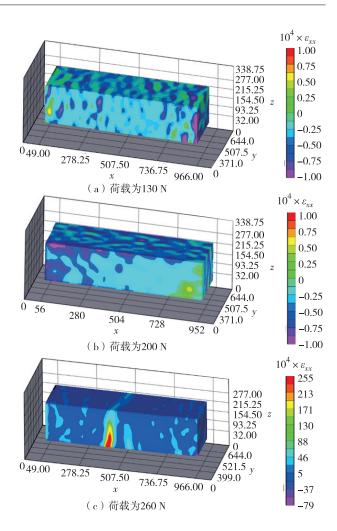


图 6 0.5%纤维质量分数试样在不同加载阶段的 x 方向应变分量

Fig. 6 ε_{xx} with 0.5% fiber content at different loading stages

- 1) 纤维的掺入会导致试样承受的极限荷载更高. 另外, 开裂后裂缝的长度、宽度和体积都明显减少.
- 2) 通过对纤维混凝土加载过程的跟踪和不同加载阶段体应变的计算,可以用 XCT 和 DVC 方法分析纤维混凝土在加载过程中的体应变演化.
- 3) 试样破坏时断裂面外仍然存在着不可忽略的变形能(特别是在变形能力较大的试样中),在研究断裂能时应予以考虑.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51878411, 51727813); 国家杰出青年科学基金资助项目 (51925805)

作者简介: 张健超 (1991—), 深圳大学博士研究生. 研究方向: 土木工程无损检测, 混凝土结构耐久性. E-mail: zhangjianchao728@163.com

引 文: 张健超, 翁建武, 匡 川, 等. 三点抗折下纤维混凝土 加载过程的体应变研究[J]. 深圳大学学报理工版, 2021, 38(6): 664-669.

参考文献 / References:

- [1] WANG Yonggang, LONG Wanpeng. Complete stress-strain curves for pine needle fibre reinforced concrete under compression [J]. Construction and Building Materials, 2021, 302: 124134.
- [2] GAO Danying, HUANG Yunchao, YUAN Jiansong, et al. Probability distribution of bond efficiency of steel fiber in tensile zone of reinforced concrete beams [J]. Journal of Building Engineering, 2021, 43: 102550.
- [3] BENCARDINO F, RIZZUTI L, SPADEA G, et al. Experimental evaluation of fiber reinforced concrete fracture properties [J]. Composites Part B: Engineering, 2010, 41(1): 17-24.
- [4] USMAN M, FAROOQ S H, OMAIR M, et al. Axial compressive behavior of confined steel fiber reinforced high strength concrete [J]. Construction and Building Materials, 2020, 230: 117043.
- [5] BENCARDINO F, RIZZUTI L, SPADEA G, et al. Stressstrain behavior of steel fiber-reinforced concrete in compression [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2008, 20(3): 255-263.
- [6] SMARZEWSKI P. Influence of basalt-polypropylene fibres on fracture properties of high performance concrete [J]. Composite Structures, 2019, 209: 23-33.
- [7] GAO Xueliang, ZHUANG Ye, LIU Shu. High-speed 3D digital image correlation for measuring tire rolling resistance coefficient [J]. Measurement, 2020, 171(2): 108830.
- [8] HAMRAT M, BOULEKBACHE B, CHEMROUK M, et al. Flexural cracking behavior of normal strength, high strength and high strength fiber concrete beams, using digital image correlation technique [J]. Construction and Building Materials, 2016, 106: 678-692.
- [9] SKARZYNSKI L, TEJCHMAN J. Experimental investigations of damage evolution in concrete during bending by continuous micro-CT scanning [J]. Materials Characterization, 2019, 154: 40-52.

[10] 滕晓娟, 刘昱清, 刘 鹏, 等. 弯曲荷载诱发微型梁

开裂演化过程的可视分析 [J]. 深圳大学学报理工版, 2018, 35(5): 460-466.
TENG Xiaojuan, LIU Yuqing, LIU Peng, et al. Visual analysis for cracking evolution of micro-beam under three-point bending [J]. Journal of Shenzhen University

- Science and Engineering, 2018, 35 (5): 460-466. (in Chinese)
- [11] HONG Shuxian, LIU Peng, ZHANG Jianchao, et al. Visual and quantitative identification of cracking in mortar subjected to loads it using X-ray computed tomography method [J]. Cement and Concrete Composites, 2019, 100: 15-24.
- [12] PAN Bing, WANG Bo. Some recent advances in digital volume correlation [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2020, 135: 106189.
- [13] SCHLUTER, S, LEUTHER F, VOGLER S, et al. X-ray microtomography analysis of soil structure deformation caused by centrifugation [J]. Solid Earth, 2016, 7(1): 129-140.
- [14] 毛灵涛, 袁则循, 连秀云, 等. 基于 CT 数字体相关法测量红砂岩单轴压缩内部三维应变场[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(1): 21-30.

 MAO Lingtao, YUAN Zexun, LIAN Xiuyun, et al.

 Measurement of 3D strain field in red stone sample under uniaxial compression with computer tomography and digital volume correlation method [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(1): 21-30. (in Chinese)
- [15] HUBERT S, JEAN-JOSE O, MICHAEL A S. Image correlation for shape, motion and deformation measurements [M]. US: Springer, 2009.
- [16] KARALI A, KAO A, ZEKONYTE J, et al. Micromechanical evaluation of cortical bone using in situ XCT indentation and digital volume correlation [J]. Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials, 2021, 115: 104298.
- [17] CAO Mingli, XIE Chaopeng, GUAN Junfeng. Fracture behavior of cement mortar reinforced by hybrid composite fiber consisting of CaCO₃ whiskers and PVA-steel hybrid fibers [J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2019, 120: 172187.
- [18] PLANAS J, ELICES M, GUINEA G V. Measurement of the fracture energy using three-point bend tests: part 2-influence of bulk energy dissipation [J]. Materials and Structures, 1992, 25: 305312.

【中文责编:坪 梓;英文责编:之 聿》