

三轴压缩载荷作用下单裂隙扩展的 CT 实时扫描试验

李廷春, 吕海波

(山东科技大学 山东省土木工程防灾减灾重点实验室, 山东 青岛 266510)

摘要: 为研究岩石裂隙在三轴加载作用下的扩展规律, 精选出一种与岩石物理力学性质相似的陶瓷制作试件, 并在试件中部预置一条圆币状裂隙, 进行三轴加载过程中的 CT 实时扫描试验。采取 3 种不同区域划分方案, 通过对不同层、不同阶段的 CT 数、CT 方差、CT 图像的对比分析, 获得裂隙被压密、自相似扩展、翼裂纹扩展、微裂纹扩展、裂纹加速扩展直到试件破坏的整个裂隙扩展过程。试验结果表明, 在三轴压缩荷载作用下, 裂隙被压密较为明显, 翼裂纹扩展缓慢, 自相似扩展更大, 而且翼裂纹的扩展是从自相似扩展后的边缘开始的。总之, 预置裂隙的扩展受围压影响很大, 扩展过程相当艰难, 试件破坏类似于延性破坏。

关键词: 岩石力学; 内置裂隙; 三轴压缩; 扩展规律; CT 实时试验

中图分类号: TU 45

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2010)02 - 0289 - 08

CT REAL-TIME SCANNING TESTS ON SINGLE CRACK PROPAGATION UNDER TRIAXIAL COMPRESSION

LI Tingchun, LU Haibo

(Shandong Provincial Key Laboratory of Civil Engineering and Disaster Prevention and Mitigation, Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266510, China)

Abstract: The propagation law of the single crack under triaxial compression is systematically studied through the CT real-time scanning tests. In the tests, through comparison of similar physico-mechanical parameters to the real rock, ceram is selected to precut the test specimens. From the comparative analysis of CT values, CT variances and CT images in different manifold areas, the damage evolution processes, such as the courses of compressed crack, self-similar propagation, wings growth, microcracks propagation, accelerated crack growth and the damage evolution of the specimen failure, of the crack is accurately obtained as follows: the test results show that under triaxial compressive stresses, the crack is obviously compressed at first; then, the propagation of wing crack is restricted, and the self-similar propagation is enlarged by comparison with the uniaxial test result and the propagation of wing crack starts from the edge of self-similar propagation. In conclusion, the propagation of initial crack is influenced obviously by the confining pressure, which makes it slower and similar to ductile failure.

Key words: rock mechanics; artificial initial cracks; triaxial compression; propagation rules; CT real-time test

1 引言

岩石三维裂隙的发育过程与扩展机制是岩体工

程领域重要的研究课题, 许多岩体工程的失稳和破坏都与裂隙扩展有关, 目前该研究还没有取得突破性进展。随着岩体工程复杂程度的增加, 对岩体三维裂隙扩展机制的研究引起了社会的广泛关注。岩

收稿日期: 2009 - 07 - 14; **修回日期:** 2009 - 09 - 15

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(50779073); 山东省“泰山学者”建设工程专项经费资助; 青岛市科技计划项目(07 - 2 - 3 - 16 - jch)

作者简介: 李廷春(1968 -), 男, 博士, 1991年毕业于山东矿业学院矿井建设专业, 现任副教授, 主要从事裂隙岩石力学特征方面的教学与研究。E-mail: tchli_sd@163.com

体三维裂隙扩展的研究结果不仅将会强化岩石力学和断裂力学中对有关三维断裂问题的进一步认识，而且也将促进对局部和广义岩石工程失效问题的深入了解。因此，本次研究具有重要的理论和现实意义。

事实上，早在 20 世纪 20 年代，W. F. Brace 等^[1, 2]就开始研究二维裂隙。但是，直到 20 世纪 70 年代，M. Adams 和 G. Sines^[3]才开始进行三维裂隙扩展的试验研究，他们使用有机玻璃材料制作三维椭圆裂隙试件，试验过程中发现了鱼鳍状裂纹和花瓣状裂纹。20 世纪 90 年代初，L. N. Germanovich 等^[4, 5]仍然使用有机玻璃材料制作裂隙，完成了币状裂隙扩展试验，没有看到鱼鳍裂纹的出现。但是观察到：在达到 1/3 抗压强度时，翼裂纹从预置裂隙的尖端开始扩展，然后它们以稳定的速度扩展并逐渐包裹初始裂隙，翼裂纹裂尖的扩展长度最大，能够达到 1.0~1.5 倍的初始裂隙半径。

R. H. C. Wong 等^[6-8]对含三维表面裂隙的 PMMA 和大理岩材料分别进行了裂隙扩展试验，研究了半圆形三维表面裂隙的扩展机制。试验中发现了花瓣形裂纹(III 型裂纹)。研究表明，表面裂隙的扩展过程受裂隙深度、试件厚度、裂隙的倾角以及材料性质的影响。R. H. C. Wong 等^[6-8]在三维表面裂隙扩展的研究方面获得了大量成果，但这仅仅限于三维表面裂隙，人们对于三维内置裂隙的研究至今也没有取得突破性进展。三轴加载下三维内置裂隙的扩展一直是通过双轴下二维裂隙的扩展和单轴下透明均质材料三维内置裂隙的扩展进行推演的。随着 CT 技术^[9-14]被引入岩体工程领域，使得对三维内置裂隙扩展的研究成为可能。本文精选出一种与岩石物理力学性质较为接近的陶瓷材料制作标准试件^[15]，并在其内部预制单币状裂隙，利用 CT 扫描无损探测技术进行三轴加载过程中的 CT 实时扫描试验，根据试验所得的 CT 图像及数据对裂隙扩展过程进行分析。

2 试验介绍

本次试验在中国科学院寒区旱区环境与工程研究所冻土工程国家重点实验室进行，试验中采用与岩石具有相似物理力学性质的精选陶瓷制作内含币状裂隙试件，利用人工预置内部裂隙模拟裂隙岩体，陶瓷试件的参数如表 1 所示。试验采用三轴压缩的准静态加载方式，施加 5 MPa 的围压，通过液压控制装置控制纵向加载的应变速率，在加载过程中的

表 1 陶瓷试件参数

Table 1 Parameters of ceram specimens

底面直径 /mm	高度 /mm	裂隙直径 /mm	裂隙厚度 /mm	裂隙倾角 /(°)	密度 /(g·cm ⁻³)	弹性模量/GPa
51.46	102.89	10	0.5	71	2.265	5.1

不同阶段，对关键截面进行 CT 实时扫描，图 1 为试件的安装及定位线。试验过程中，将试件截面从上到下分为 5 层(见图 2)，依次扫描 8 次，扫描层厚度均为 2 mm。通过对各层的实时扫描，可以得到大量 CT 扫描图像和数据，用来分析岩石裂隙的发育过程和扩展机制。

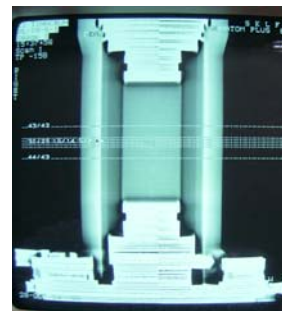


图 1 试件的安装及定位线

Fig.1 Specimen installation and lines of position

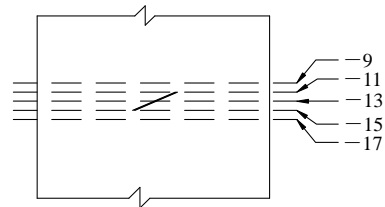
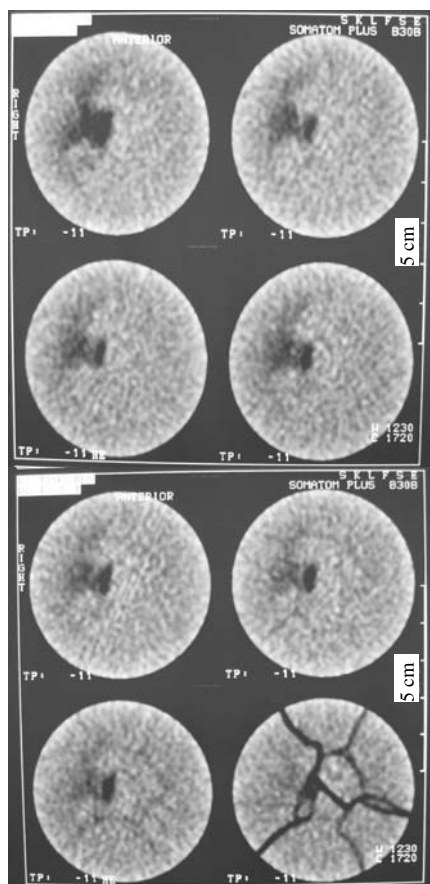


图 2 试件截面上各扫描层位置(单位: mm)

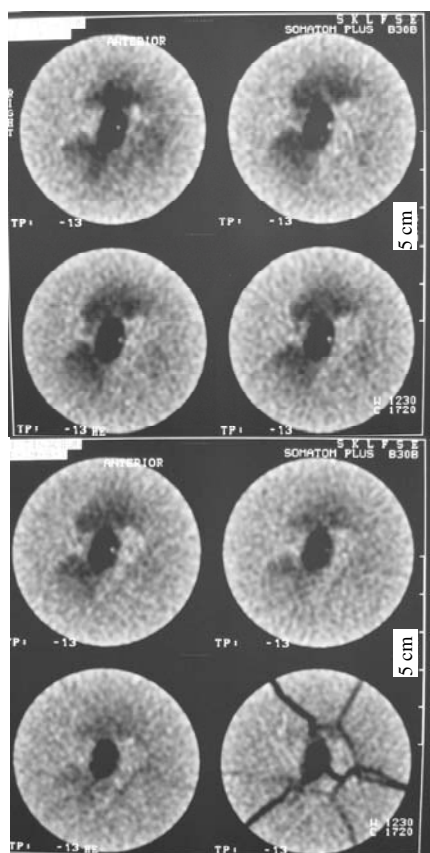
Fig.2 Locations of various scanning layers on the specimen cross-section(unit: mm)

3 CT 扫描图像分析

考虑各扫描层位置上的对称性，文中只给出裂隙上缘层和裂隙中心层(第 2, 3 层)的 CT 扫描图像(见图 3(a), (b))。CT 扫描图像实际上是密度图像，高密度区显示白色，低密度区显示黑色。由于每个切层密度不同，因此黑白度也不相同，中间含裂隙截面密度低，显示为黑色区域，与其他区域对比鲜明。因此，可以通过 CT 图像的变化来分析试件的损伤演化过程。从试验各加载阶段的 CT 扫描图(见图 3(a), (b))可以看出，在试件破坏之前，裂隙上缘与裂隙中心的裂纹扩展情况相差很大，裂隙上缘扩



(a) 第 2 层



(b) 第 3 层

图 3 CT 扫描图
Fig.3 CT images

展较大, 裂隙中心扩展较小, 主要以压密为主。同时, 由试验结束后裂隙中心纵向 CT 扫描图(见图 4)可以看出, 自相似扩展较明显, 并且翼裂纹是从自相似扩展后的边缘开始扩展, 导致裂隙上、下缘扩展产生的翼裂纹距离预置裂隙上、下缘更远一些。当然, 这些只是依据 CT 图像的判断, 裂隙扩展的具体过程要根据后面的数据分析确定。



图 4 裂隙扩展后的纵向 CT 扫描图

Fig.4 CT images of longitudinal scanning section after crack propagation

4 CT 数据分析

4.1 分析方案

(1) 同心圆分析方案

在同心圆分析方案中(见图 5), 用 3 个同心圆 C1, C2, C3 把切层分成三部分, 最内侧的圆为中心圆, 用 C1 表示, 其包含的区域为裂隙区, C1, C2 围成的部分为中环, 用 R1 表示, C2, C3 围成的部分为外环, 用 R2 表示, 中环和外环为非裂隙区。

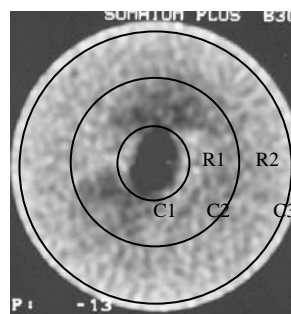


图 5 同心圆分析方案示意图

Fig.5 Sketch of concentric circles analysis program

(2) 等圆分析方案

在等圆分析方案中(见图 6), 用 3 个面积均为 0.85 cm^2 的圆选择了 3 个具有代表性的区域进行分

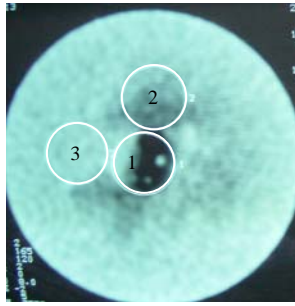


图6 等圆分析方案示意图

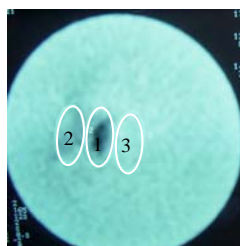
Fig.6 Sketch diagram of equal circles analysis program

析,使分析结果更具有针对性。其中圆1为包括裂隙的区域,圆2,3为不包括裂隙的区域。

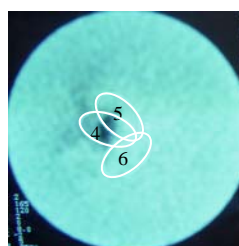
(3) 等椭圆分析方案

由于各CT扫描层中裂隙位置不同,为了更好地研究裂隙的扩展过程,本次研究共采用了4种等椭圆区域位置分布形态对裂隙的扩展过程进行分析。

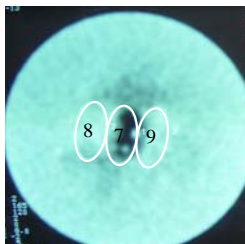
图7的4个图分别表示等椭圆区域位置分布形态1,2,3,4,此方案的所有椭圆面积均为0.60 cm²。其中,椭圆1为包括裂隙上缘的区域,椭圆2和3位于椭圆1的两侧,并紧挨着椭圆1,都是没有裂隙的区域;椭圆4为包括裂隙上缘中部的大部分区域,椭圆5和6与椭圆4相交于椭圆4的两侧,椭圆5为包括裂隙上缘边缘的部分区域,椭圆6为靠近裂隙上缘边缘的区域;椭圆7为包括裂隙中心的区域,椭圆8和9位于椭圆7的两侧,并紧挨着椭圆7,都是没有裂隙的区域;椭圆10为包括裂隙中心中部的大部分区域,椭圆11和12与椭圆10相



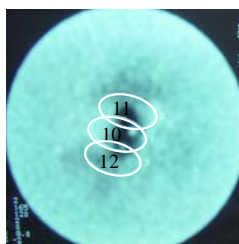
(a) 区域位置分布形态1



(b) 区域位置分布形态2



(c) 区域位置分布形态3



(d) 区域位置分布形态4

图7 等椭圆分析方案示意图

Fig.7 Sketch diagram of equal ellipses analysis program

交于椭圆10的两侧,都是包括裂隙中心边缘的小部分区域。

4.2 CT 试验数据分析

在本次试验中,由于裂隙上缘和下缘的扩展相差不大,可以只对裂隙中心、上缘及上方进行详细的CT分析,重点分析裂隙上缘层和裂隙中心层(第2,3层)。

4.2.1 裂隙上缘层(第2层)的数据分析

(1) 应变为(0~2.92) × 10⁻³时的数据分析

从表2可知,中心圆区域的CT数(ME,下同)由1311.6上升至1397.5,升高65.49%,方差(SD,下同)下降幅度较大,由198.66下降至96.73,中环与外环的CT数都有所升高,其中,中环升高较大。这些数据表明,此阶段裂隙上缘区域受压密合很大,无裂隙区也以压密为主;从表3可知,圆1的CT数迅速上升,升高88.72%,方差迅速下降,降低51.36%,圆2和3的CT数也升高,可以得出与同心圆分析方案相同的结论;从表4可知,椭圆1的CT数迅速上升,升高169.50%,方差迅速下降,降低40.55%,椭圆2的CT数升高,椭圆3的CT数稍有降低,方差稍有升高。这些数据表明椭圆1及2都以压密为主,当应变达到2.92 × 10⁻³时,裂隙中心自相似扩展已波及到椭圆3区域;从表5可知,椭圆4和5的CT数迅速升高,方差迅速降低,椭

表2 同心圆方案中的CT数据

Table 2 CT data of concentric circles program

扫描层	应变 /10 ⁻³	中心圆 (1.16 cm ²)		中圆 (7.90 cm ²)		外圆 (18.57 cm ²)		中环 ME	外环 ME
		ME	SD	ME	SD	ME	SD		
2	0.00	1311.6	198.66	1381.0	106.22	1428.0	88.59	1392.9	1462.8
2	2.92	1397.5	96.73	1406.6	68.90	1439.7	64.89	1408.2	1464.2
2	4.86	1395.0	103.04	1407.0	69.62	1439.8	65.07	1409.1	1464.1
2	6.80	1392.8	116.20	1408.0	71.94	1440.5	46.08	1410.6	1464.6
2	8.75	1387.6	131.27	1404.8	74.13	1437.8	68.13	1407.8	1462.2
2	10.69	1381.2	121.37	1403.8	68.13	1440.1	65.12	1407.7	1467.0
2	12.63	1378.5	120.11	1400.5	66.42	1437.3	65.10	1404.3	1464.5
2	14.58	1314.8	174.36	1366.9	112.01	1413.2	104.25	1375.9	1447.5
3	0.00	1166.0	210.26	1316.2	127.01	1405.6	118.36	1342.1	1471.8
3	2.92	1180.1	214.49	1334.8	128.77	1411.9	112.52	1361.4	1469.0
3	4.86	1179.2	220.66	1338.0	129.98	1414.2	112.50	1365.3	1470.6
3	6.80	1177.8	212.42	1341.4	127.04	1416.6	110.62	1369.6	1472.3
3	8.75	1184.1	206.70	1344.9	121.86	1416.3	107.54	1372.6	1469.2
3	10.69	1183.5	210.51	1356.0	118.90	1423.8	102.77	1385.7	1474.0
3	12.63	1193.7	211.92	1364.3	117.04	1426.7	99.19	1393.7	1472.9
3	14.58	1182.9	215.39	1348.9	141.33	1410.1	122.87	1377.5	1455.4

表 3 等圆方案中的 CT 数据

Table 3 CT data of equal circles program

扫描层	应变 / 10^{-3}	圆 1(0.85 cm ²)		圆 2(0.85 cm ²)		圆 3(0.85 cm ²)	
		ME1	SD1	ME2	SD2	ME3	SD3
2	0.00	1 279.3	221.58	1 418.9	39.97	1 288.4	82.90
2	2.92	1 392.8	107.77	1 434.5	30.23	1 297.4	68.89
2	4.86	1 389.9	114.54	1 437.6	34.85	1 298.9	61.75
2	6.80	1 382.7	127.91	1 440.0	34.52	1 306.3	58.51
2	8.75	1 377.6	144.43	1 436.6	36.06	1 311.0	56.95
2	10.69	1 371.5	135.11	1 430.3	33.63	1 330.1	56.46
2	12.63	1 370.1	135.36	1 423.0	39.55	1 343.8	49.64
2	14.58	1 296.3	183.46	1 354.1	129.09	1 383.7	40.59
3	0.00	1 038.6	273.26	1 232.9	99.28	1 442.4	32.85
3	2.92	1 015.6	258.50	1 253.6	57.93	1 422.7	60.62
3	4.86	1 021.9	252.41	1 255.7	54.94	1 424.1	55.89
3	6.80	1 026.6	250.02	1 266.4	57.80	1 433.3	49.23
3	8.75	1 037.6	240.67	1 280.2	55.12	1 432.1	44.75
3	10.69	1 064.0	224.54	1 309.4	56.21	1 435.3	38.85
3	12.63	1 094.4	214.58	1 341.0	47.40	1 437.4	35.77
3	14.58	1 095.3	209.18	1 302.2	124.68	1 445.6	32.70

表 4 等椭圆分布形态 1 的 CT 数据

Table 4 CT data of equal ellipses allocation of shape 1

扫描层	应变 / 10^{-3}	椭圆 1 (0.60 cm ²)		椭圆 2 (0.60 cm ²)		椭圆 3 (0.60 cm ²)	
		ME1	SD1	ME2	SD2	ME3	SD3
2	0.00	1 145.7	175.13	1 254.2	81.43	1 454.3	38.69
2	2.92	1 339.9	106.11	1 288.0	78.78	1 445.8	38.93
2	4.86	1 336.0	116.79	1 293.7	74.81	1 446.4	33.94
2	6.80	1 322.2	129.59	1 295.4	65.70	1 453.7	37.80
2	8.75	1 300.8	139.11	1 303.4	67.55	1 461.1	37.92
2	10.69	1 308.9	132.03	1 320.3	59.25	1 442.9	42.51
2	12.63	1 304.3	128.42	1 334.5	55.64	1 441.8	40.32
2	14.58	1 222.4	161.17	1 370.3	40.61	1 390.3	132.44

表 5 等椭圆分布形态 2 的 CT 数据

Table 5 CT data of equal ellipses allocation of shape 2

扫描层	应变 / 10^{-3}	椭圆 4 (0.60 cm ²)		椭圆 5 (0.60 cm ²)		椭圆 6 (0.60 cm ²)	
		ME4	SD4	ME5	SD5	ME6	SD6
2	0.00	1 165.8	203.43	1 309.7	182.49	1 437.7	47.82
2	2.92	1 332.0	114.42	1 407.7	86.20	1 436.8	40.61
2	4.86	1 328.4	120.93	1 409.8	90.59	1 440.8	31.84
2	6.80	1 317.4	132.32	1 411.6	92.95	1 441.7	40.26
2	8.75	1 306.8	146.48	1 403.5	106.41	1 451.0	40.33
2	10.69	1 311.8	136.74	1 403.8	93.73	1 440.6	36.72
2	12.63	1 316.6	134.06	1 401.9	91.59	1 434.2	44.27
2	14.58	1 242.5	176.18	1 305.4	185.10	1 370.5	122.40

圆 6 的 CT 数和方差都稍有降低, 表明此阶段裂隙上缘及附近区域以压密为主。

(2) 应变为(2.92~6.80)×10⁻³时的数据分析

从表 2 可知, 中心圆的 CT 数下降了 4.7, 方差上升了 19.47, 虽然数据上变化都不大, 但意义却是重大的, 它们表明裂隙上缘在此阶段开始扩展了, 结合纵向扫描图(见图 4)可知, 裂隙上缘首先发生自相似扩展, 然后发生翼裂纹的扩展。与此同时, 中环和外环的 CT 数变化很小, 表明此阶段其他区域仍然以弹性变形为主; 从表 3~5 数据可知, 裂隙上缘区域 CT 数下降, 方差上升(圆 1 的 CT 数由 1 392.8 上升到 1 382.7, 方差由 107.77 上升到 127.91; 椭圆 1 的 CT 数下降 17.7, 方差增加 23.48; 椭圆 4 的 CT 数下降 14.6, 方差增加 18.12), 其他圆和椭圆所在区域的 CT 数上升。由此可以得出与等圆分析方案相同的结论。同时, 根据第 1 层扫描数据, 椭圆 2 的 CT 数下降, 方差升高, 结合试验结束后裂隙中心纵向 CT 扫描图(见图 4)可知, 自相似裂纹的扩展长度达到了预置裂隙半径的 1 倍以上, 而且翼裂纹的扩展是从自相似扩展后的边缘开始, 导致裂隙上、下缘扩展产生的翼裂纹距离裂隙上、下缘更远一些。

(3) 应变为(6.80~12.63)×10⁻³时的数据分析

从表 2 可知, 中心圆的 CT 数由 1 392.8 下降至 1 378.5, 方差由 116.2 上升至 120.11, 中环的 CT 数略有下降, 外环的 CT 数先下降后上升再下降, 最后与应变为 6.80×10⁻³时的 CT 数基本持平, 这表明此阶段裂隙上缘翼裂纹继续扩展并张开, 其他区域也出现了微裂纹的扩展; 从表 3 可知, 圆 1 和 2 的 CT 数分别下降 12.6 和 17.0, 方差分别上升 7.45 和 5.03, 圆 3 的 CT 数上升 37.5, 方差下降 8.87, 变化都比较平稳, 表明此阶段裂隙上缘翼裂纹继续扩展, 但是由于围压对翼裂纹的扩展存在抑制作用, 在裂隙边缘区域出现剪切裂纹, 而裂隙上缘外侧区域继续被压密; 从表 4 可知, 椭圆 1 的 CT 数先下降后上升, 椭圆 2 的 CT 数继续上升, 椭圆 3 与 1 的 CT 数变化趋势相反, 这些表明此阶段裂隙上缘裂纹继续扩展, 而且以翼裂纹扩展为主, 当应变达到 8.75×10⁻³以后, 椭圆 1 和 2 的 CT 数一直上升, CT 方差一直下降, 直到试件破坏, 表明当应变达到 8.75×10⁻³时, 翼裂纹的扩展已基本停止, 再次被压密。由翼裂纹的扩展状况看出, 三轴状态

下翼裂纹的扩展相当艰难，结合第 1 层扫描所得数据及试验结束后裂隙中心纵向 CT 扫描图(见图 4)可知，试件破坏前翼裂纹的扩展长度约为预置裂隙半径长度的 1 倍；从表 5 可知，椭圆 4 的 CT 数先下降后上升，椭圆 5 的 CT 数下降，椭圆 6 的 CT 数先上升后下降，表明此阶段裂隙上缘先继续扩展(以翼裂纹扩展为主)，然后又稍被压密，边缘附近区域开始扩展微裂纹。

(4) 应变为(12.63~14.58)×10⁻³时的数据分析

此阶段是裂纹贯通、加速扩展，试件破坏的阶段。从表 2, 5 可知，裂隙及其周边区域的 CT 数迅速降低，方差迅速升高；从表 3 可知，圆 1 的 CT 数由 1 370.1 下降为 1 296.3，降低 53.86%，方差由 135.36 上升为 183.46，升高 35.53%，圆 2 的 CT 数降低 48.42%，方差升高幅度很大，达到 226.40%，圆 3 与圆 2 的数据变化相反，但方差变化幅度不大，以上共同表明在此阶段裂隙上缘及其周边区域裂纹扩展较大，而外侧初始损伤较大的区域被压密；从表 4 可知，椭圆 1 的 CT 数降低 62.79%，方差升高 25.50%，椭圆 3 的 CT 数降低，方差升高 228.47%，椭圆 2 的 CT 数变化趋势与它们相反，表明裂隙上缘扩展的翼裂纹随试件的破坏才得以延伸，而椭圆 2 区域再次被压密。综合上述数据，并与单轴压缩单裂隙试件破坏过程所得试验数据^[15]进行对比，可见在最后裂纹加速扩展阶段，裂纹扩展区域的 CT 数和方差变化幅度较单轴小，宏观裂纹的扩展受围压的作用变得缓慢，更类似于延性破坏，脆性破坏不明显。

4.2.2 裂隙中心层(第 3 层)的数据分析

(1) 应变为(0.00~2.92)×10⁻³时的数据分析

从表 2 可知，中心圆 CT 数升高 14.1，中环的 CT 数升高 19.3，外环的 CT 数下降 2.8，变化不大，但其方差降低，这表明此阶段裂隙中心区域以压密为主；从表 3 可知，圆 1 和 3 的 CT 数下降，圆 2 的 CT 数升高，方差降低，由此判断，当应变达到 2.92×10⁻³时裂隙中心开始扩展(自相似扩展)，圆 2 以压密为主，圆 3 微裂纹有所扩展；从表 6 可知，椭圆 7 和 8 的 CT 数迅速降低，椭圆 9 的 CT 数迅速升高，方差迅速降低，表明当应变到达 2.92×10⁻³时，裂隙中心开始自相似扩展，椭圆 7 和 8 扩展很大，椭圆 9 受压密合很大。从表 7 可知，椭圆 10 的 CT 数迅速降低，椭圆 11 和 12 的 CT 数迅速升高，这表明此阶段裂隙中心中部扩展较大，边缘

表 6 等椭圆分布形态 3 的 CT 数据

Table 6 CT data of equal ellipses allocation of shape 3

扫描层	应变 /10 ⁻³	椭圆 7 (0.60 cm ²)		椭圆 8 (0.60 cm ²)		椭圆 9 (0.60 cm ²)	
		ME7	SD7	ME8	SD8	ME9	SD9
		3	0.00	965.7	248.88	1 401.6	81.97
3	2.92	895.5	199.71	1 291.3	99.43	1 435.5	64.41
3	4.86	901.2	185.49	1 302.2	104.46	1 439.3	63.73
3	6.80	910.8	194.08	1 331.0	99.63	1 429.8	71.11
3	8.75	929.1	193.74	1 348.5	91.18	1 422.4	81.73
3	10.69	959.8	171.11	1 378.4	76.59	1 412.1	78.53
3	12.63	995.6	163.38	1 402.4	62.15	1 412.2	77.49
3	14.58	1 005.6	157.73	1 429.4	57.40	1 361.4	154.74

表 7 等椭圆分布形态 4 的 CT 数据

Table 7 CT data of equal ellipses allocation of shape 4

扫描层	应变 /10 ⁻³	椭圆 10 (0.60 cm ²)		椭圆 11 (0.60 cm ²)		椭圆 12 (0.60 cm ²)	
		ME10	SD10	ME11	SD11	ME12	SD12
		3	0.00	1 070.0	283.84	1 090.5	261.93
3	2.92	1 024.0	276.64	1 139.2	258.70	1 187.3	189.19
3	4.86	1 031.8	270.32	1 157.3	255.72	1 189.6	192.13
3	6.80	1 037.7	271.87	1 156.4	253.52	1 186.3	118.28
3	8.75	1 047.8	263.77	1 166.6	241.78	1 191.6	178.54
3	10.69	1 060.8	246.46	1 191.7	233.48	1 230.2	174.70
3	12.63	1 088.5	231.64	1 223.0	222.51	1 259.6	160.14
3	14.58	1 084.4	228.34	1 231.1	213.63	1 267.5	161.39

区域受压密合较大。

(2) 应变为(2.92~12.63)×10⁻³时的数据分析

从表 2 可知，在应变达到 6.80×10⁻³之前，中心圆的 CT 数一直下降，由 1 180.1 降到 1 177.8，中环 CT 数上升 8.2，外环 CT 数上升 3.3，表明此阶段裂隙中心发生自相似扩展，中环和外环继续被压密。在应变达到 6.80×10⁻³之后，中心圆和中环的 CT 数重新开始上升，外环的 CT 数先下降后上升再下降，表明此阶段裂隙中心再次被压密，中环继续以压密为主，外环微裂纹已开始扩展。从表 3 可知，3 个圆域的 CT 数都上升，方差都下降，表明此阶段裂隙中心及附近区域以压密为主。从表 6 可知，椭圆 7 和 8 的 CT 数一直上升，方差一直下降，椭圆 9 的 CT 数先上升后下降，表明此阶段裂隙中心受压密合较大，椭圆 9 区域先继续被压密，然后微裂纹开始扩展。从表 7 可知，在应变达到 6.80×10⁻³之前，椭圆 10 的 CT 数上升，椭圆 11 和 12 的 CT 数先上升后下降，表明此阶段裂隙中心中部区域开始被压密，边缘区域先压密后开始稍有扩

展, 出现剪切裂纹。在应变达到 6.80×10^{-3} 之后, 3 个椭圆区域的 CT 数都迅速上升, 方差下降, 表明此阶段裂隙中心中部和边缘区域都以压密为主, 而且密合较大。

(3) 应变为 $(12.63 \sim 14.58) \times 10^{-3}$ 时的数据分析

此阶段是试件崩裂的阶段。从表 2 可知, 中心圆 CT 数降低 9.05%, 方差升高 1.64%, 表明试件破坏时裂隙中心扩展很小; 从表 3 可知, 圆 2 的 CT 数降低 28.93%, 方差升高 163.04%, 圆 1 和 3 的 CT 数稍有升高, 方差降低, 表明在此阶段裂隙中心和外侧附近区域继续被压密, 而边缘区域裂纹扩展较大; 从表 6 可知, 椭圆 7 与 8 的 CT 数分别升高了 10.04%, 19.25%, 方差分别降低了 34.58%, 76.43%, 椭圆 9 的 CT 数降低 35.97%, 变化幅度较大, 方差升高 99.69%, 表明此时裂隙中心继续被压密, 椭圆 9 区域裂纹扩展较大; 从表 7 可知, 椭圆 10 的 CT 数稍有降低, 椭圆 11 和 12 的 CT 数升高, 表明试件破坏时裂隙中心中部稍有扩展或张开, 边缘区域继续被压密。

5 裂隙扩展规律

通过对 CT 数据的对比分析, 可以清楚地看出该试件预置裂隙的扩展过程, 按照同心圆分析中 CT 数和 CT 方差的变化幅度以及应力 - 应变曲线的形态变化, 将应力 - 应变曲线分为 4 个阶段, 4 个分段各自显示出不同的裂隙扩展规律, 如图 8 所示。

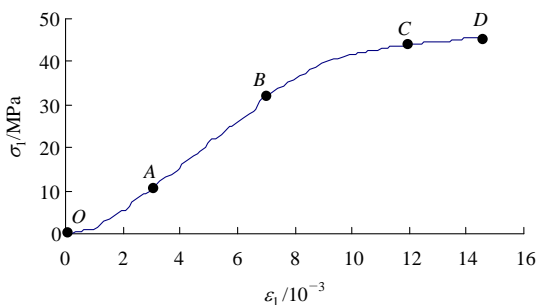


图 8 裂隙扩展的应力 - 应变曲线

Fig.8 Stress-strain curve of crack propagation

(1) OA 段(应变为 $(0 \sim 2.92) \times 10^{-3}$)受围压的影响, 裂隙上缘受压密合很大, 当应变达到 2.92×10^{-3} 时, 裂隙中心自相似扩展波及附近区域, 影响较大。

(2) AB 段(应变为 $(2.92 \sim 6.80) \times 10^{-3}$)裂隙中心以压密为主, 裂隙上缘初始裂纹开始扩展(以自相似扩展为主)。

(3) BC 段(应变为 $(6.80 \sim 12.63) \times 10^{-3}$)裂隙中心

继续以压密为主, 裂隙上缘继续向上扩展翼裂纹, 而且翼裂纹逐渐沿着裂隙周边包裹初始裂纹, 到应变 8.75×10^{-3} 时翼裂纹停止扩展, 再次被压密, 表明裂隙的扩展已基本停止, 而无裂隙区微裂纹开始扩展。

(4) CD 段(应变为 $(12.63 \sim 14.58) \times 10^{-3}$)此段曲线较单轴平缓, 裂隙扩展过程产生的裂纹汇合、贯通、加速扩展并导致试件破坏, 试件破坏时间较长, 劈裂破坏不明显, 更类似于塑性破坏。

6 结论

本文对预置单裂隙陶瓷试件进行了准静态三轴加载的 CT 实时扫描试验, 分析了含裂隙试件的损伤演化过程, 并与单轴压缩单裂隙试件破坏过程^[15]进行对比, 初步得到了三轴压缩载荷作用下试件内单裂隙的扩展和损伤演化规律, 并获得以下结论:

(1) 与单轴压缩试件破坏过程相同的是, 试件(主要对无裂隙区而言)破坏前仍大致经历初始压密、弹性变形、初始微裂纹开始扩展和裂纹加速扩展 4 个阶段。但不同的是, 最后裂纹加速扩展的阶段, 裂纹扩展区域的 CT 数和方差变化幅度较小, 表明宏观裂纹的扩展受围压的作用变得更缓慢一些, 更类似于延性破坏, 脆性破坏不明显, 这一点在应力 - 应变曲线图上也得到了体现。

(2) 与单轴加载裂隙扩展中的裂纹基本类型相同, 都是沿裂尖扩展的翼裂纹与沿裂隙面扩展的自相似扩展裂纹。裂隙边缘附近的圆域, 受裂隙扩展的影响较大, 有时伴随裂隙的扩展裂纹得到延伸, 有时又被压密阻止了裂隙的扩展。与单轴加载裂隙扩展状况不同的是, 该试件内预置裂隙的扩展受到了围压的较大影响。在试件加载的初期, 主要以压密为主, 随后, 由于受到围压的作用, 翼裂纹的扩展受阻, 裂隙的自相似扩展更大, 扩展长度甚至可以达到预置裂隙半径的 1 倍以上, 而单轴只有 3/5 左右。而且, 翼裂纹扩展的起始位置与单轴情况完全不同, 是从自相似扩展后的边缘开始, 导致裂隙上、下缘扩展产生的翼裂纹距离裂隙上、下缘更远一些。同时, 围压的作用导致翼裂纹的扩展表现得更艰难, 时断时续, 不如单轴压缩时表现得那么剧烈。

(3) 翼裂纹的扩展期明显较单轴短, 扩展停止的很早。试件破坏前翼裂纹的扩展长度有限, 约为预置裂隙半径长度的 1 倍, 破坏时, 延伸长度明显较单轴小。围压的作用导致翼裂纹的扩展期较单轴压缩试件试验明显缩短, 扩展表现得更艰难, 当应

变达到 8.75×10^{-3} 时翼裂纹停止扩展, 再次被压缩, 表明裂隙的扩展已基本停止, 而无裂隙区微裂纹开始扩展。而单轴压缩情况下, 预置裂隙直到试件破坏前才停止扩展。试件破坏前, 裂纹扩展区域的 CT 数和方差变化幅度较小, 劈裂纹还没有延伸到试件端部, 试件就破坏了。但是, 在单轴压缩情况下, 试件破坏前, 裂纹扩展区域的 CT 数和方差变化幅度极大。

(4) 弹性段, 翼裂纹的扩展还较为明显, 但进入塑性段后不久, 翼裂纹基本停止扩展, 无裂隙区微裂纹非常活跃, 以至于图像上的黑白度极不均匀, 形成大面积损伤区。而单轴压缩情况下, 图像上的黑白度变化不大, 无裂隙区受到的损伤较小。

(5) 劈裂纹根本不能延伸到试件端部, 试件就破坏, 而且劈裂路径极其弯曲, 受到微裂纹的扩展区影响极大, 主宰自己路径的能力极差, 并且非裂隙区域的劈裂破坏也不明显。但是, 在单轴压缩情况下, 劈裂纹能够延伸到试件端部, 而且劈裂路径基本为直线。

(6) 对于三维裂隙, 在单轴与三轴压缩荷载作用下, 裂隙的扩展规律是不同的, 这有其内在的力学机制。由于裂隙向最大主应力方向扩展的运动学原因, 假设最小主应力 σ_3 垂直于预置裂隙的水平直径, σ_2 沿着直径方向作用, 在这种情况下, 翼裂纹将主要沿着垂直于 σ_3 的方向扩展。三维裂隙的侧向或接触区域滑移才会引起翼裂纹的扩展、张开和进一步延伸。当然, 裂隙的接触面摩擦也提供了翼裂纹张开的阻力。翼裂纹的增长将受到 σ_3 的阻止, 延伸越长受到的阻力越大, 这就是围压的作用导致翼裂纹的扩展长度较单轴压缩试验缩短的原因。由于材料对 III 型裂隙扩展的阻力大于 I 型裂隙, 侧向受剪的裂隙周边部分断裂较难发生, 翼裂纹的扩展要求材料首先要发生 III 型裂隙扩展, 这也就是三轴状态下自相似扩展较单轴大的原因。

(7) 文中所得裂隙扩展状况、自相似裂纹的扩展长度、翼裂纹的扩展长度等, 对于三维脆弹性岩体断裂损伤演化方程推导具有一定的参考价值。

(8) 陶瓷材料物理力学性质受到材料配比、加工过程、烧制温度等影响较大, 并不是所有陶瓷材料都可以作为类岩石材料。虽然本次试验使用的材料是精选后与岩石较为接近的陶瓷材料, 但与真实的岩体仍有一定差距, 因此在这一方面值得继续深入研究。

参考文献(References):

[1] BRACE W F, BOMBOLAKIS E G. Note on brittle crack growth in

- compression[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1963, 68(6): 3 709 - 3 717.
- [2] BOBET A, EINSTEIN H H. Fracture coalescence in rock-type material under uniaxial and biaxial compression[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 1998, 35(7): 836 - 888.
- [3] ADAMS M, SINES G. Crack extension from flaws in a brittle material subjected to compression[J]. *Tectonophysics*, 1978, 49(1): 97 - 118.
- [4] GERMANOVICH L N, SALGANIK R L, DYSKIN A V, et al. Mechanisms of brittle fracture of rock with pre-existing cracks in compression[J]. *Pure and Applied Geophysics*, 1994, 143(1 - 3): 117 - 149.
- [5] DYSKIN A V, GERMANOVICH L N. A model of crack growth in microcracked rock[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts*, 1993, 30(7): 813 - 820.
- [6] WONG R H C, LAWA C M, CHAU K T, et al. Crack propagation from 3D surface fractures in PMMA and marble specimens under uniaxial compression[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2004, 41(3): 37 - 42.
- [7] WONG R H C, LIN P, TANG C A. Experimental and numerical study of splitting failure of brittle solids containing single pore under uniaxial compression[J]. *Mechanics of Materials*, 2006, 38(1/2): 142 - 159.
- [8] WONG R H C, CHAU K T. The coalescence of frictional cracks and the shear zone formation in brittle solids under compressive stresses[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 1997, 34(3/4): 335 - 380.
- [9] 杨更社, 谢定义, 张长庆, 等. 岩石损伤特性的 CT 识别[J]. *岩石力学与工程学报*, 1996, 15(1): 48 - 54. (YANG Gengshe, XIE Dingyi, ZHANG Changqing, et al. CT identification of rock damage properties[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 1996, 15(1): 48 - 54. (in Chinese))
- [10] GE X R, REN J X, PU Y B, et al. Real-in-time CT test of the rock meso-damage propagation law[J]. *Science in China(Series E)*, 2001, 44(3): 328 - 336.
- [11] 杨更社, 刘慧. 基于 CT 图像处理技术的岩石损伤特性研究[J]. *煤炭学报*, 2007, 30(5): 463 - 468. (YANG Gengshe, LIU Hui. Study of the rock damage characteristics based on the technique of CT image processing[J]. *Journal of China Coal Society*, 2007, 30(5): 463 - 468. (in Chinese))
- [12] 任建喜, 惠兴田. 裂隙岩石单轴压缩损伤扩展微观机制 CT 分析初探[J]. *岩土力学*, 2005, 26(增 1): 48 - 52. (REN Jianxi, HUI Xingtian. Primary study of meso-damage propagation mechanism of cracked-sandstone using computerized tomography under uniaxial compression[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2005, 26(Supp.1): 48 - 52. (in Chinese))
- [13] 戴永浩, 陈卫忠, 王者超, 等. 非饱和板岩裂隙扩展机制 CT 试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2006, 25(12): 2 537 - 2 545. (DAI Yonghao, CHEN Weizhong, WANG Zhechao, et al. Study of crack propagation of unsaturated slate by tests[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2006, 25(12): 2 537 - 2 545. (in Chinese))
- [14] 李术才, 李树忱, 朱维申, 等. 裂隙水对节理岩体裂隙扩展影响的 CT 实时扫描实验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2004, 23(21): 3 584 - 3 590. (LI Shucai, LI Shuchen, ZHU Weishen, et al. CT real-time testing study of effect of water on crack growth in fractured rock mass[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2004, 23(21): 3 584 - 3 590. (in Chinese))
- [15] 李术才, 李廷春, 王刚, 等. 单轴压缩作用下内置裂隙扩展的 CT 扫描试验[J]. *岩石力学与工程学报*, 2007, 26(3): 484 - 492. (LI Shucai, LI Tingchun, WANG Gang, et al. CT real-time scanning tests on rock specimens with artificial initial crack under uniaxial condition[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2007, 26(3): 484 - 492. (in Chinese))