

含孔洞试件破坏过程的红外试验 与数值试验对比分析

刘向峰, 王来贵, 何 峰

(辽宁工程技术大学 力学与工程科学系, 辽宁 阜新 123000)

摘要: 利用红外热像仪对含圆形预制孔洞的混凝土试件单轴、双轴加载变形破坏过程进行了监测, 得到了试件破坏过程的红外热像。从红外热像中可以清楚地看到试件破坏过程中侧面的温度变化情况。另外, 应用 RFPA 程序对试件在载荷作用下裂纹形成、扩展过程进行了数值试验。试件应力状态分析及数值试验结果表明, 在载荷作用下, 试件孔洞边缘出现应力集中现象, 在拉应力集中区首先出现微裂纹, 并且随着继续加载, 微裂纹逐渐扩展、连通、搭接而形成宏观裂纹, 最终导致试件破坏。由红外试验结果与数值试验结果对比可以看到, 试件的微裂纹萌生、扩展区与红外热像中的升温区是相对应的。试件在破坏过程中整体上表现为升温, 但微裂纹越集中的区域升温越明显。试验过程中还发现, 试件的升温速率与加载速率呈正相关趋势。这一试验结果可为利用红外技术对混凝土构件破坏的预测预报提供理论基础。

关键词: 混凝土; 预制孔洞试件; 红外监测试验; 数值试验; 应力集中; 裂纹

中图分类号: TU 755

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2005)增 1 - 5173 - 05

COMPARATIVE ANALYSIS ON INFRARED TEST AND NUMERICAL TEST FOR A HOLE-PREFORMING SPECIMEN'S FAILURE PROCESS

LIU Xiang-feng, WANG Lai-gui, HE Feng

(Department of Mechanics and Engineering Sciences, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China)

Abstract: The thermal infrared imager is used for testing the deformation and failure process of hole-preforming concrete specimens, and thermal infrared images which indicate temperature field changes of testing surface of specimen are obtained. Furthermore, the numerical test is conducted by using a rock failure process analysis computer program (RFPA) to simulate specimen's cracks expansion process as load applying. The results of numerical test and specimen's stress condition analysis approve that as loads applying, in some regions of specimen where close to preforming hole, the stress concentration will take place. In those tension stress concentration regions, microcracks will generate, expand and connect to form macroscopic cracks gradually, which cause the specimen failure ultimately. From thermal infrared images, the temperature of testing surface rises generally. Moreover, it is found that the rate of temperature rising is in some positive correlations with the loading speed. Comparing results of thermal infrared test and numerical test, it reveals that regions where tension stress concentrates and microcracks generates in numerical test are corresponding to regions where temperature rises

收稿日期: 2004 - 10 - 20; **修回日期:** 2004 - 11 - 15

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(59974012, 50374042); 中国科学院武汉岩土力学研究所重点实验室基金项目(Z110304)

作者简介: 刘向峰(1974 -), 男, 博士, 1996 年毕业于辽宁工程技术大学采矿工程专业, 现任讲师, 主要从事岩石动力学及岩石实验力学方面的教学与研究工作。E-mail: lxfeng0001@sina.com。

rapidly. It is a powerful proof to confirm that the generation and expansion of microcracks is one of major reasons to cause the temperature change of specimen during the failure process. This result could be regarded as the failure omen information of similar concrete structure, and could be used for forecasting the failure of concrete or rock structures.

Key words: concrete; hole-preforming concrete specimen; infrared monitoring test; numerical test; stress concentration; crack

1 引言

大量试验已经证实,混凝土、岩石等试件在变形破坏过程中,其红外辐射增强,试件表面温度场会发生明显的变化。文[1~3]首先提出利用红外遥感技术研究岩石的变形破坏过程;文[4]对混凝土试件剪切破坏过程的红外信息进行了研究;文[5~11]分别论述了其在对煤、岩石等试件的红外监测试验中观测到的试件变形破坏过程中红外辐射发生变化的现象。这些研究为红外遥感应用于各类岩石工程失稳破坏的预测预报提供了依据。

对混凝土、煤、岩石等脆性材料破坏过程中产生红外升温现象的机理及其影响因素,目前,还处于研究和探讨阶段,所做的研究也多为定性的^[12]。试验研究结果表明,试件在应力集中处微裂纹萌生、扩展的速度最快,其红外升温现象也最为明显^[13]。煤(岩)、混凝土等为非均质材料,试验过程中试件的应力分布情况受试件内部材料缺陷控制,而这些缺陷的形状与分布很难预先得知,这增加了对试验结果深入分析的难度。针对这种情况,本文对预制孔洞试件在单轴、双轴加载条件下的破坏过程进行了红外监测试验,另外,应用 RFPA 程序对试件的破坏过程进行数值模拟,将红外试验结果与试件裂纹扩展的数值试验结果进行比较,对试件的红外温度变化规律作进一步的研究,并对红外升温机理进行探讨。由于含孔洞岩石试件的加工难度较大,本文选用混凝土作为试验材料。

2 含孔洞混凝土试件红外监测试验

2.1 试件的制作

利用 C25 和 C35 混凝土制备预设圆形孔洞的立方体试件各 6 块,试件尺寸为 150 mm×150 mm×150 mm,圆形孔洞开设在试件中央,并贯穿试件,圆形孔洞的直径为 20 mm。试件用标准模具制作,经

振动台充分振动,放在恒温水槽中养护 28 d。其基本物理力学性质如表 1 所示。

表 1 混凝土基本物理力学性质

Table 1 Physical and mechanical parameters of concrete

标号	密度 /(g·cm ⁻³)	抗压强度 /MPa	最大粒径 /mm	弹性模量 /(10 ⁴ MPa)	泊松比
C25	2.217	23.2	5	1.362	0.198
C35	2.305	32.1	5	1.473	0.207

2.2 测量仪器

用 IR913 型非制冷焦平面红外热像仪记录试验过程中试件的红外热像,同时,以 180×180 的分辨率记录测量面上各点的温度值。监测利用的波长范围 8~14 μm,温度分辨率 0.02 °C。利用动态电阻应变仪测量加载过程中试件的纵向应变,荷载传感器测量轴向载荷。

2.3 试验方法

试件在 200 t 岩石压力机下进行,沿垂直试件孔洞轴向施加单轴载荷,将所有试件分成两组,一组直接进行单轴压缩试验,一组进行双轴加载试验。每间隔 0.2 MPa 存储一次红外图像,在试件临近破坏时加密存储次数。为减小环境温度对试验的影响,每块试件在 3 min 内完成试验。

2.4 测试结果

图 1 为试件在双轴(横向与纵向加载比为 1/2)加载情况下破坏过程中不同应力水平(试件承受的最大纵向载荷时的应力水平定为 1)时的红外热像图。从图 1 中可以看出:试件在应力水平小于 0.4 以前,其温度场变化很小;此后,随着载荷的增加,在孔洞边缘的顶部和底部出现较为明显的温度变化区域,试验过程中,其最高温升超过 0.4 °C。试件最终在这 2 个区域形成宏观裂纹,导致试件破坏。与这 2 个区域相比较,试件的其他部位温度变化一直较小。图 2 给出了在孔洞边缘底部与左侧各选一测点随加载过程的温度变化的对比。

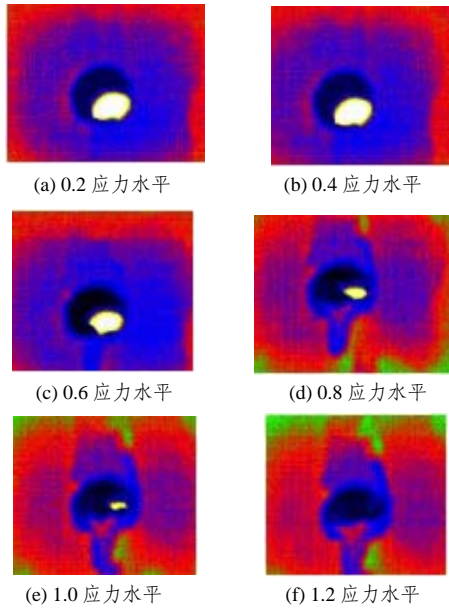


图1 试件变形破坏过程中的红外热像

Fig.1 Infrared images of specimen failure process

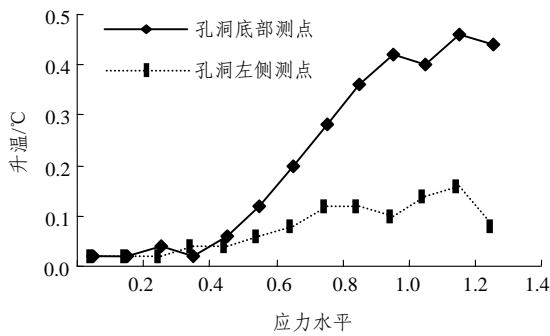


图2 孔洞边缘不同点的温度变化

Fig.2 Temperatures of different locations closed go hole

3 试件应力状态分析

如图3所示的含圆形孔洞的试件,若不考虑混凝土材料的非均质性,并简化为平面问题,则其在水平荷载 σ_h 和垂直荷载 σ_v 的作用下的应力状态,可根据弹性力学中圆孔对应力分布影响的理论进行求解,得到

$$\left. \begin{aligned} \sigma_r &= \frac{\sigma_v + \sigma_h}{2} \left(1 - \frac{a^2}{r^2} \right) + \frac{\sigma_v - \sigma_h}{2} \left(1 + \frac{3a^4}{r^4} - \frac{4a^2}{r^2} \right) \cos 2\theta \\ \sigma_\theta &= \frac{\sigma_v + \sigma_h}{2} \left(1 + \frac{a^2}{r^2} \right) - \frac{\sigma_v - \sigma_h}{2} \left(1 + \frac{3a^4}{r^4} \right) \cos 2\theta \\ \tau_{r\theta} &= -\frac{\sigma_v - \sigma_h}{2} \left(1 - \frac{3a^4}{r^4} + \frac{2a^2}{r^2} \right) \sin 2\theta \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

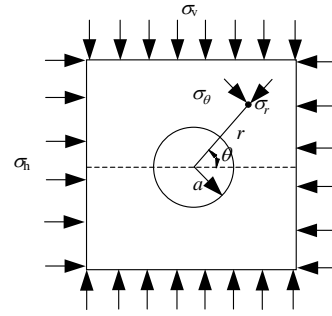


图3 含圆孔试件受力图

Fig.3 Load applying on the hole-preforming specimen

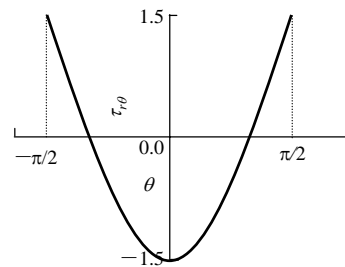
当水平荷载 σ_h 、垂直荷载 σ_v 以及圆形孔洞半径 a 一定时,试件的应力状态 σ_r , σ_θ , $\tau_{r\theta}$ 只是极坐标 (r, θ) 的函数。令 $K = \sigma_h / \sigma_v$,称为侧压系数。仅考虑侧压系数为 $K = 1/2$ 的情况,试件的应力状态为

$$\left. \begin{aligned} \sigma_r &= \frac{3\sigma_v}{4} \left(1 - \frac{a^2}{r^2} \right) + \frac{3\sigma_v}{4} \left(1 + \frac{3a^4}{r^4} - \frac{4a^2}{r^2} \right) \cos 2\theta \\ \sigma_\theta &= \frac{3\sigma_v}{4} \left(1 + \frac{a^2}{r^2} \right) - \frac{3\sigma_v}{4} \left(1 + \frac{3a^4}{r^4} \right) \cos 2\theta \\ \tau_{r\theta} &= -\frac{3\sigma_v}{4} \left(1 - \frac{3a^4}{r^4} + \frac{2a^2}{r^2} \right) \sin 2\theta \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

在孔壁($r = a$)处有

$$\left. \begin{aligned} \sigma_r &= \tau_{r\theta} = 0 \\ \sigma_\theta &= 3\sigma_v \left(\frac{1}{2} - \cos 2\theta \right) \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

其切向应力分布特征如图4所示,在 $\theta = -\frac{\pi}{2}$, $\frac{\pi}{2}$ 时,表现为最大拉应力,在 $\theta = 0, \pi$ 时,表现为最大压应力,其值均为 $1.5\sigma_v$ 。

图4 $r = a$ 时切向应力随极角的变化Fig.4 Variation of tangential stress with θ

4 试件裂纹扩展的数值试验

混凝土是典型的非均匀材料,其强度、变形、破坏的性能都与裂纹的扩展有关。混凝土及其组成的构件的破坏形态为脆性破坏,破坏时变形很小,裂纹尖端几乎不产生塑性区。当构件内某些点出现很小的拉应力集中,这些点就破裂。随着载荷的增加,裂纹会不断扩展,形成宏观破裂面,最终导致构件的破坏。

为了寻求试件破坏过程所表现出的红外热信息与试件裂纹扩展的相关性,利用脆性材料破坏过程分析工具 **RFPA**^{2D} 对试件的裂纹扩展过程进行了数值模拟^[14]。模拟过程中材料参数均采用试件的实测值,并采用与红外监测试验一致的加载方式。得到含孔洞试件裂纹扩展过程如图 5 所示,这一结果与试验过程中试件的实际破坏形态基本一致。

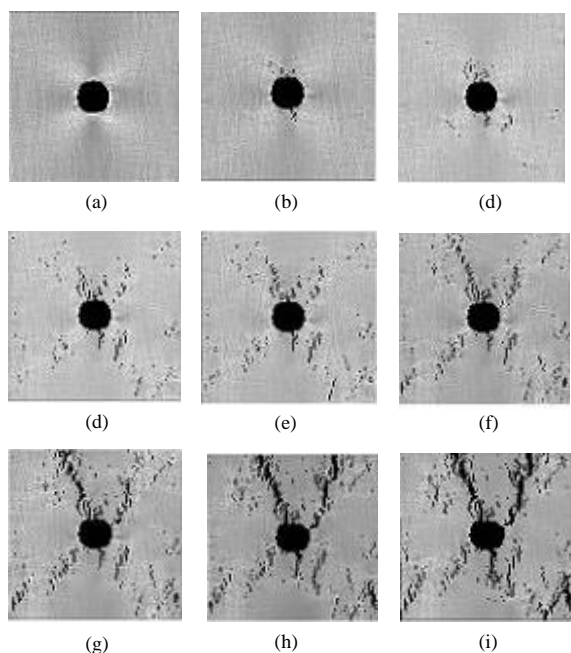


图 5 试件裂纹扩展过程 **RFPA** 数值试验结果

Fig.5 Results of cracks expansion numerical test

5 结果分析

式(3)和图 4 所示的为含圆形孔洞试件的应力分布情况的弹性解,虽不能完全替代混凝土试件的实际应力状态,但它对于确定混凝土试件孔洞周围应力集中趋势有着重要的意义。由式(3)和图 4 可知,孔洞的上、下顶受到的拉应力最大,相应地,孔洞的左、右帮承受最大的压应力。混凝土材料的抗拉强度较其抗压强度要低得多,因此,试件首先在孔

洞边缘的顶部和底部的某些区域出现拉应力集中,并产生微裂纹区。开始时,微裂纹的数目较少,裂纹张开度也较小,随着载荷的增加,微裂纹区内的裂纹数量增加,最终形成肉眼可见的真正裂纹。由图 5 所示的试件裂纹扩展过程的数值模拟结果,可以证实试件正是从这 2 个区域分别向上和向下形成宏观裂纹而导致试件破坏。

由试件裂纹扩展的特性与红外热像图可知,试件的升温与裂纹的产生与扩展有密切的相关性,这一结果与文[13]中的结果一致。

从图 1 所示的试件破坏的红外热像图及图 2 所示试件不同测点温度的变化可以发现,在试件的应力水平较低时,其红外温度场的变化并不明显。这是因为当应力水平较低时,试件的拉应力集中程度也较低,并且只是在一些孤立的点出现裂纹扩展。这些点的开裂缓和了应力集中并恢复了平衡,微裂纹损伤释放的能量也较少,此时,认为混凝土材料为准弹性的,因而,其升温效应不明显。此后,随着继续加载,裂纹扩展强度增加,升温现象在红外热像图片中明显地显现。在试验中发现,试件升温的幅值与加载速率呈正相关趋势,加载速率越大,升温的幅值越大,反之亦然。而关于加载速率与升温之间的定量关系,还有待进一步的研究。

从图 2 中可以看到,孔洞底部测点的温升最大值比孔洞左侧测点的温升最大值高 0.3℃,这一现象可以从试件的应力状态与混凝土材料的破坏特性得到很好的解释。如前所述,试件的升温与裂纹的萌生和扩展相关。含圆形孔洞试件孔缘的上部和下部有较大的拉应力集中,孔缘的左、右两侧为压应力集中区,而混凝土材料的抗拉强度较其抗压强度低得多,所以,其裂纹的萌生与扩展主要是由拉应力引起。由图 5 所示的试件裂纹扩展的数值试验结果可知,试件裂纹主要在孔洞的顶部和底部,即拉应力区萌生和扩展,而在压应力区萌生的裂纹很少,因而,孔洞的左、右侧的温升较孔洞的顶部和底部要低。

6 结 论

本文对含孔洞混凝土试件破坏过程进行了红外监测,并结合弹性应力分析和 **RFPA** 数值模拟的方法对试验结果进行了分析,可得到以下的几点结论:

(1) 混凝土试件在变形破坏过程中,试件红外

辐射强度会增加, 导致其温度场发生变化。

(2) 混凝土试件破坏的红外升温与混凝土的破坏特性及构件的应力状态有关; 由应力分析结果、数值试验结果与试件破坏过程的红外热像对比分析可知, 试件中微裂纹的萌生与扩展多集中在拉应力区, 其红外升温现象十分明显, 因而可以确定, 裂纹的萌生与扩展是使其红外温度变化的一个重要影响因素。

(3) 试件的升温幅值与裂纹的扩展强度和加载速率呈正相关趋势, 它们之间的定量关系还有待进一步的研究。

致谢 感谢东北大学 CRISR 中心为本文数值试验提供的软件支持。

参考文献(References):

- [1] 耿乃光, 崔承禹, 邓明德. 岩石破裂试验中的遥感观测与遥感混凝土力学的开端[J]. 地震学报, 1992, 14(增): 645 - 652.(Geng Naiguang, Cui Chengyu, Deng Mingde. Remote monitor in rock fracture experiment and the beginning of Remote sensing concrete mechanics[J]. Acta Seismologica Sinica, 1992, 14(Supp.): 645 - 652.(in Chinese))
- [2] 崔承禹, 邓明德, 耿乃光. 在不同压力下岩石光谱辐射特性的研究[J]. 科学通报, 1993, 38(6): 538 - 541.(Cui Chengyu, Deng Mingde, Geng Naiguang. Study on spectrum radiation characteristic of rock under different pressure[J]. Chinese Science Bulletin, 1993, 38(6): 538 - 541.(in Chinese))
- [3] 耿乃光, 邓明德, 崔承禹, 等. 遥感技术用于固体力学试验研究的新成果[J]. 力学进展, 1997, 27(2): 185 - 192.(Geng Naiguang, Deng mingde, Cui Chengyu, et al. The new results of experimental study of solid mechanics by using the remote sensing technology[J]. Advances in Mechanics, 1997, 27(2): 185 - 192.(in Chinese))
- [4] 冯东梅, 刘向峰, 姚再兴. 混凝土试件在剪切变形破坏过程中的红外信息研究[J]. 混凝土, 2002, (7): 8 - 9.(Feng Dongmei, Liu Xiangfeng, Yao Zaixing. Study on deformation and failure process infrared information of concrete samples in shearing testing[J]. Concrete, 2002, (7): 8 - 9.(in Chinese))
- [5] 王来贵, 刘向峰, 姚再兴. 煤(岩)试件单向受压变形破坏过程的红外信息研究[J]. 中国学术期刊文摘, 2000, 11(6): 1 418 - 1 419. (Wang Laigui, Liu Xiangfeng, Yao Zaixing. The study on infrared information of coal(rock) specimen under simple test[J]. Chinese Science Abstracts, 2000, 11(6): 1 418 - 1 419.(in Chinese))
- [6] 吴立新. 遥感岩石力学及其新近进展与未来发展[J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 20(2): 139 - 146.(Wu Lixin. Remote sensing rock mechanics and its recent achievements and future development[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2001, 20(2): 139 - 146.(in Chinese))
- [7] 吴立新, 王金庄. 煤岩受压屈服的热红外辐射温度前兆研究[J]. 中国矿业, 1997, 6(6): 42 - 48.(Wu Lixin, Wang Jinzhuang. Study on thermal infrared radiation temperature omen in coal-measure rock yielding under ground pressure[J]. China Mining Magazine, 1997, 6(6): 42 - 48.(in Chinese))
- [8] 吴立新, 王金庄. 煤岩受压红外热象与辐射温度特征试验[J]. 中国科学(D 辑), 1998, 28(1): 41 - 46.(Wu Lixin, Wang Jinzhuang. The infrared images and radiation temperature characteristic experiment of rock and coal under pressure[J]. Science in China(Series D), 1998, 28(1): 41 - 46.(in Chinese))
- [9] 董玉芬, 王来贵, 刘向峰, 等. 岩石变形过程中红外辐射的试验研究[J]. 岩土力学, 2001, 22(2): 134 - 137.(Dong Yufen, Wang Laigui, Liu Xiangfeng, et al. The experimental research of the infrared radiation in the process of rock deformation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2001, 22(2): 134 - 137.(in Chinese))
- [10] 董玉芬, 杜洪贵, 任伟杰, 等. 煤岩的红外信息随应力变化的试验研究[J]. 辽宁工程技术大学学报, 2001, 20(4): 495 - 496.(Dong Yufeng, Du Honggui, Ren Weijie, et al. Experimental research on infrared information varying with stress[J]. Journal of Liaoning Technical University, 2001, 20(4): 495 - 496.(in Chinese))
- [11] 董玉芬, 于波, 郝凤山, 等. 煤变形破裂过程中红外信息的试验研究[J]. 试验力学, 2002, 17(2): 206 - 211.(Dong Yufen, Yu Bo, Hao fengshan, et al. An experimental research on the infrared radiation in coal rupture[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2002, 17(2): 206 - 211.(in Chinese))
- [12] 刘善军, 吴立新, 吴育华, 等. 受载岩石红外辐射的影响因素及机理分析[J]. 矿山测量, 2003, (3): 67 - 68.(Liu Shanjun, Wu Lixin, Wu Yuhua, et al. Analysis of affection factors of infrared radiation coming from loaded rocks[J]. Mine Surveying, 2003, (3): 67 - 68.(in Chinese))
- [13] 刘向峰. 煤(岩)试件变形破坏过程红外信息研究[硕士学位论文][D]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2001.(Liu Xiangfeng. The study on the infrared information of coal(rock) specimen in deformation and failure process[M. S. Thesis][D]. Fuxin: Liaoning Technical University, 2001.(in Chinese))
- [14] 唐春安, 朱万成. 混凝土损伤与断裂——数值试验[M]. 北京: 科学出版社, 2003.(Tang Chun'an, Zhu Wancheng. The Damage and Fracture of Concrete—Numerical Simulation[M]. Beijing: Science Press, 2003.(in Chinese))