



东北大学八十周年校庆学术著作

# 砌体开裂过程 数值试验

王述红 唐春安 著

07  
4  
3  
3



NEUPRESS  
东北大学出版社

中国地质大学（北京）地质工程研究所

# 磁体开磁过程 数值试验

王德 王德 著



中国地质大学（北京）  
地质工程研究所

东北大学八十周年校庆学术著作

# 砌体开裂过程数值试验

王述红 唐春安 著

东北大学出版社

·沈阳·

© 王述红 唐春安 2003

图书在版编目 (CIP) 数据

砌体开裂过程数值试验 / 王述红, 唐春安著. — 沈阳: 东北大学出版社,  
2003.9

ISBN 7-81054-940-5

I. 砌… II. ①王… ②唐… III. ①砌块—损伤 (力学)—理论 ②砌块—  
损伤 (力学)—数值模拟 IV. TU522.07

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2003) 第 063363 号

---

出 版 者: 东北大学出版社

地址: 沈阳市和平区文化路 3 号巷 11 号

邮编: 110004

电话: 024—83687331 (市场部) 83680267 (社务室)

传真: 024—83680180 (市场部) 83680265 (社务室)

E-mail: neuph @ neupress.com

http: //www. neupress. com

印 刷 者: 东北大学印刷厂

发 行 者: 东北大学出版社

幅面尺寸: 170mm×228mm

印 张: 9.5

字 数: 180 千字

出版时间: 2003 年 9 月第 1 版

印刷时间: 2003 年 9 月第 1 次印刷

印 数: 1~1000 册

责任编辑: 王兆元

封面设计: 唐敏智

责任出版: 秦 力

---

定 价: 15.00 元

**本研究课题得到以下资助：**

国家杰出青年科学基金资助研究 (59525408)

辽宁省自然科学基金资助研究 (200210081)

中国博士后科学研究基金资助研究 (2001-14-30)

同济大学混凝土材料研究国家重点实验室资助研究

## 作者简介

王述红博士，男，1969年4月出生于江苏省泰州市，汉族。2000年8月毕业于东北大学结构工程专业，获得工学博士学位。2001~2002年在东北大学材料破坏力学数值实验室做博士后研究工作，现为东北大学副教授，兼中国岩石力学与工程学会东北分会秘书长、辽宁省力学学会理事。近年来，主持基金课题2项，参与了国家杰出青年基金、国家自然科学基金、跨世纪人才基金以及省部级以上横向课题10多项。在《Key Engineering Materials》、《Mechanics of Materials》、《建筑结构学报》、《岩土工程学报》、《岩石力学与工程学报》、《工程力学》等刊物发表相关学术论文40多篇，其中被SCI, EI, ISTP收录25篇，出版《岩石破裂过程数值试验》（科学出版社，2002）、《New Development In Rock Mechanics And Rock Engineering》（NY: Rinton Press, 2002）等著作2部，参与完成的研究成果获省部级一等奖1项（排名第二）、二等奖3项。目前主要从事结构工程健康监测与灾害防治等方面的研究和教学工作。

唐春安教授，男，1958年3月出生于湖南省黔阳县，汉族。1982年毕业于中南工业大学采矿专业，1984年和1998年分别获得东北大学硕士和博士学位。现任东北大学长江学者特聘教授，博士生导师，国务院学科评议组成员，中国科学院力学所非线性力学国家重点实验室特邀研究员，《International Journal of Rock Mechanics and Mining Science》编委，中国岩石力学与工程学会副理事长，国际岩石力学学会中国国家小组成员，岩石破碎专业委员会主任委员，物理实验与数值模拟专业委员会理事。主要从事岩石破裂过程失稳的基础

和应用基础性理论研究,研究领域涉及地下工程和边坡稳定性、地表沉陷、岩层移动、岩爆、地震机制等。研究开发的具有国家版权局知识产权的岩石破裂过程分析 RFPA 系统,被国际同行称为是“极具前景的数值模拟新方法”。先后主持国家教委跨世纪人才基金、国家杰出青年基金、国家自然科学基金和部委级研究课题 15 项,并与英国、加拿大、澳大利亚、瑞典、中国香港等国家和地区的有关研究机构和专家开展多项合作。近年来,在《Engineering Geology》、《Pure and Applied Geophysics》、《Engineering Fracture Mechanics》、《Key Engineering Materials》、《International Journal of Rock Mechanics and Mining Science》、《地震学报》、《地球物理学报》、《岩石力学与工程学报》、《工程地质学报》、《岩土工程学报》、《力学学报》、《力学与实践》等多种学术刊物和会议上发表各类学术论文 150 多篇(其中 SCI 收录 26 篇, EI 收录 50 多篇,国内外引用达 150 余次),出版《岩石破裂过程中的灾变》、《Rock Failure Instability and Associated Earthquake Mechanisms》、《混凝土损伤与断裂数值试验》等学术专著 5 部。研究成果获得省部级一等奖 3 次、二等奖 6 次,主持完成的“岩石破裂失稳过程及其岩爆数值试验研究”被六位同行院士鉴定为国际领先。曾荣获第四届中国青年科技奖、辽宁省青年五四奖章、首届沈阳市青年科学家奖。分别于 1994 年和 1995 年获得“国家教委跨世纪优秀人才计划”和“国家杰出青年科学基金”的资助,首批入选“国家百千万人才工程计划”。

## 序

砌体结构是土木工程中广为应用的一种承重结构。由于砌体的非均质性和各向异性，进行砌体结构基本理论研究存在许多困难，亦相当不完善。因而进一步研究砌体结构的受力性质和破坏机理，通过物理和数学模式，建立精确而完整的砌体结构理论，是世界上有关学者十分关注的课题。

本书作者从砌体材料的非均匀性、非线性入手，运用微观力学原理，建立由细观基元性质反映宏观力学行为的砌体开裂理论与分析方法，推演砌体材料在开裂过程中的声发射率与不均匀性及其损伤演化之间的关系。用自行研制开发的复合材料破坏过程分析系统 MFPA (Material Failure Process Analysis)，对砌体在基本受力状态下（包括温度作用）的开裂过程进行了较为系统的数值模拟分析。作者的研究成果大大提升了我国砌体结构数值模拟分析的水平，本著作对促进砌体结构理论和设计方法的发展具有重要的指导意义。

相信，本书的付梓，必将为砌体结构研究领域增添新的芬芳，定将受到读者的欢迎。我期待着本书在庆祝东北大学成立八十周年之际问世。

施楚贤

二〇〇三年六月于岳麓书院

# 前 言

砌体是土木工程中应用极为广泛的工程材料, 其应力应变关系是砌体结构内力分析、强度计算及数值分析的基础。砌体材料的力学性质及其开裂过程的研究对于砌体结构也是非常重要的。有关砌体力学特性的数学模型大多基于对砌体的宏观层次认识, 其主要特点是把具有多相、非均匀性质的材料理想化为均质、连续体, 并进行研究, 尽管这种简化在一定程度上满足了工程实践的需要, 但却难以用这种方法研究砌体在外载荷或温度应力作用下裂缝的萌生、开展及贯通而导致的由细观层次到宏观层次的损伤与开裂过程。目前, 国际上已开始注意到从细观尺度出发, 研究砌体宏观损伤与开裂过程的许多优点, 尤其是现代计算机技术的发展, 为从细观层次研究宏观层次的力学问题开辟了广阔的空间。为此, 本书从研究砌体的细观结构入手, 应用弹性损伤理论, 描述细观单元的本构关系, 建立砌体的细观数值模型, 以此为基础, 进行砌体损伤开裂过程的数值模拟研究。

全书共分 6 章。第 1 章回顾了砌体损伤和开裂过程的经典力学方法、力学模型和研究尺度问题, 总结了研究现状。第 2 章建立了细观数值模型的力学基础, 通过对不同组成相的单元赋以满足随机分布的力学参数, 即可在数值上对砌体这一典型非均匀体进行表征。第 3 章给出了砌体细观单元的弹性损伤本构关系, 引入最大拉应变准则和摩尔-库仑准则作为损伤的阈值条件, 介绍砌体开裂过程数值模拟工具 MFPA<sup>2D</sup> (Material Failure Process Analysis in 2 Dismensions), 并通过一个简单的算例, 证明数值模型的合理性和有效性。第 4 章研究砌体在常规受压 (包括轴压、局压等载荷) 作用下, 开裂过程的数值模拟。第 5 章研究砌体剪切开裂过程的数值

模拟, 给出开裂过程中的应力、声发射等的分布, 证明常见剪切体构件的开裂主要是由于细观层次的拉伸破裂引起的。第 6 章研究温度应力作用下, 砌体开裂过程的数值模拟, 给出温度升高时, 砌体开裂过程及其应力分布、声发射分布等, 从细观层次上, 初步探讨了温度应力对砌体开裂过程的影响。作为砌体开裂过程数值分析系统的继续, 探讨了利用该系统判定损伤、裂纹可能出现在结构的哪些部位等, 以证明该试验研究是一种有效且省时、省力的科学方法。

本书用数值模拟方法对无筋砌体构件的损伤与开裂过程进行数值试验, 与实验结果的比较贯穿全书, 不仅通用性强、方便灵活、具有可重复性, 而且通过数值试验, 可以得到许多在常规实验室试验中难以观测到的重要信息 (如复杂应力场的演化规律、声发射分布规律等)。

本书可供土木工程、工程力学、材料科学与工程等领域的教学和科研人员参考。本书介绍的数值模拟软件 MFPA 也可供相关专业研究人员进行研究和辅助学习时使用。

本书得到了东北大学八十周年校庆学术著作出版基金的资助, 这里谨致谢意。

作 者

2003 年 5 月

# 目 录

## 序

## 前 言

|                               |           |
|-------------------------------|-----------|
| <b>1 绪 论</b> .....            | <b>1</b>  |
| 1.1 砌体裂缝及其开裂过程 .....          | 1         |
| 1.2 砌体开裂理论研究现状 .....          | 4         |
| 1.3 砌体开裂过程的细观研究尺度与模型 .....    | 10        |
| 1.4 本书的研究工作 .....             | 16        |
| <b>2 砌体力学特性与数值模型</b> .....    | <b>19</b> |
| 2.1 引 言 .....                 | 19        |
| 2.2 砌体力学特性 .....              | 20        |
| 2.3 砌体宏观开裂的细观描述 .....         | 25        |
| 2.4 细观数值模型 .....              | 31        |
| 2.5 应力分析 .....                | 33        |
| 2.6 数值分析过程 .....              | 36        |
| <b>3 砌体开裂过程分析系统</b> .....     | <b>38</b> |
| 3.1 引 言 .....                 | 38        |
| 3.2 砌体材料的基本特征——非均匀性 .....     | 41        |
| 3.3 砌体组成的统计理论描述 .....         | 42        |
| 3.4 砌体本构关系的细观统计损伤模型 .....     | 44        |
| 3.5 砌体开裂过程分析系统 .....          | 49        |
| 3.6 MFPA 主要功能 .....           | 57        |
| 3.7 抗折开裂过程及其声发射特性的数值试验 .....  | 61        |
| <b>4 砌体构件受压开裂过程数值模拟</b> ..... | <b>69</b> |
| 4.1 引 言 .....                 | 69        |
| 4.2 块体受压开裂数值试验 .....          | 69        |

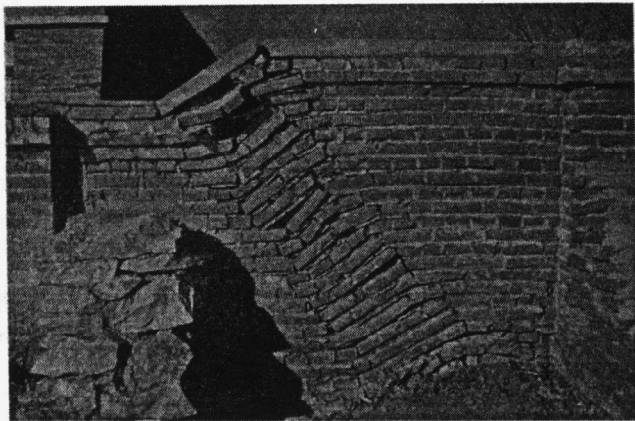
---

|                                |            |
|--------------------------------|------------|
| 4.3 轴压下开裂过程数值模拟·····           | 72         |
| 4.4 局部荷载作用下开裂过程数值模拟·····       | 78         |
| <b>5 砌体剪切数值分析·····</b>         | <b>85</b>  |
| 5.1 引 言·····                   | 85         |
| 5.2 单面受剪数值模拟·····              | 88         |
| 5.3 双面受剪数值模拟·····              | 94         |
| 5.4 砌体墙剪切数值试验·····             | 98         |
| <b>6 温度应力下砌体开裂过程数值模拟 ·····</b> | <b>103</b> |
| 6.1 温度裂缝成因 ·····               | 103        |
| 6.2 温度场确定 ·····                | 107        |
| 6.3 数值分析方法及其参数讨论 ·····         | 110        |
| 6.4 数值模拟 ·····                 | 112        |
| 6.5 模拟结果 ·····                 | 114        |
| <b>参考文献·····</b>               | <b>126</b> |

# 1 绪 论

## 1.1 砌体裂缝及其开裂过程

砌体是一种有悠久历史的建筑材料，具有很强的生命力，目前我国建筑工程中砌体结构应用范围是最广的结构形式之一，建筑物中 90% 以上的墙体采用砌体材料，其中大多数为砖砌体。根据我国国情，在相当长的时期内砌体结构还将得到继续应用和发展。但在长期使用过程中发现，许多砌体结构由于地下开挖、外界荷载等出现了严重的损害。图 1.1 为我国某地区地表沉陷诱发的砌体墙开裂。



1.1 我国某地区地表沉陷诱发砌体墙开裂 (于广明, 2000)

引起砌体裂缝的因素很多，既有地基、温度、干缩的因素，也有设计上的疏忽、施工质量差、材料不合格及缺乏经验等原因。根据工程实践和统计资

料, 这类裂缝几乎占全部可遇裂缝的 80% 以上。而最为常见的裂缝有两大类(苑振芳、刘斌, 2000), 一是温度裂缝, 二是干燥收缩裂缝, 简称干缩裂缝, 还有由温度和干缩共同作用而产生的裂缝。

### (1) 温度裂缝

温度的变化会引起材料的热胀、冷缩, 当约束条件下温度变形引起的温度应力足够大时, 砌体墙就会产生温度裂缝。最常见的裂缝出现在混凝土平屋盖房屋顶层两端的墙体上, 如在门窗洞边的正八字斜裂缝, 平屋顶下或屋顶圈梁下沿砖(块)灰缝的水平裂缝, 以及水平包角裂缝(包括女儿墙)。导致平屋顶温度裂缝的原因, 是顶板的温度比其下的墙体高得多, 而混凝土顶板的线胀系数又比砖砌体大得多, 故顶板和墙体间的变形差, 在墙体中产生很大的拉力和剪力。温度裂缝是造成墙体早期裂缝的主要原因。这些裂缝一般经过一个冬夏之后才逐渐稳定, 不再继续发展, 裂缝的宽度随温度变化而略有变化。

### (2) 干缩裂缝

烧结黏土砖, 包括其他材料的烧结制品, 其干缩变形很小, 且变形完成比较快。只要不使用新出窑的砖, 一般不需考虑砌体本身的干缩变形引起的附加应力。但这类砌体在潮湿情况下会产生较大的湿胀, 而且这种湿胀是不可逆的变形。对于砌块、灰砂砖、粉煤灰砖等砌体, 随着含水量的降低, 材料会产生较大的干缩变形。如混凝土砌块的干缩率为 $0.3 \sim 0.45\text{mm/m}$ , 它相当于  $25 \sim 40^\circ\text{C}$  的温度变形, 可见干缩变形的影响很大。轻骨料的干缩变形更大。干缩变形引起的裂缝在建筑上分布广、数量多, 裂缝的程度也比较严重。

### (3) 温度、干缩及其他裂缝

对于烧结类块材的砌体, 最常见的为温度裂缝, 而对非烧结类块体, 如砌块、灰砂砖、粉煤灰砖等砌体, 也同时存在温度和干缩共同作用下的裂缝, 其在建筑物墙体上的分布一般可为这两种裂缝的组合, 或因具体条件不同而呈现出不同的裂缝现象, 而其裂缝的后果往往较单一因素更严重。另外设计上的疏忽、无针对性防裂措施、材料质量不合格、施工质量差、违反设计施工规程、砌体强度达不到设计要求, 以及缺乏经验等都是造成墙体裂缝的重要原因。

从国内外已有的试验资料(施楚贤, 1988)可知: 砌体是典型的非均匀材料, 其中含有微裂缝, 甚至有宏观的缺陷如裂纹、夹碴、气泡、孔穴、偏折等。砌体结构的强度、变形和破坏的性能都与裂缝的扩展有关。砌体结构破坏是由对象体系中潜在的各种缺陷引起的, 其破坏过程实际上就是微裂纹萌生、扩展、贯通, 直到宏观裂纹产生导致砌体结构失稳破裂的过程。

由于砌体结构的开裂过程与其中含有的微裂纹有关, 因此砌体结构是一种对拉应力特别敏感的脆性材料。尽管如此, 砌体结构并不像典型的脆性材料

——玻璃——那么脆，其中的裂纹具有稳定扩展阶段，但又具有脆性材料的一些特征，所以将其称为准脆性材料（Quasi-Brittle Material）。因此，砌体等准脆性材料在开裂前的微裂隙进一步增长、扩展、逐渐并集、聚合，形成一定尺度的宏观裂纹，导致结构的强度、刚度下降，以致最终发生破坏等所表现的力学行为，是我们进行砌体开裂过程研究更关心的问题。砌体及其组成的承重结构在破坏时变形很微小，裂缝尖端几乎不产生塑性区，具有突发性，其破坏形态称为脆性破坏。由于岩石、混凝土等准脆性材料本身的非均匀性，使得其开裂过程更加复杂（唐春安、王述红、傅宇方，2003；唐春安、朱万成，2003）。

由于砌体是由单块块材用砂浆铺垫后黏结而成的整体，其受压工作性能与单块块材有着显著的差别。砌体结构的破坏过程实质上就是裂缝萌生、扩展和失稳的过程。据此，将砌体结构的破坏过程分为三个阶段（施楚贤，1988）。这里以砖砌体从开始加载轴心受压破坏过程为例来说明。

第一阶段：从开始加载到个别砖块上出现裂缝。

在此阶段，当轴向压力  $N < N_{cr}$ （ $N_{cr}$  为裂缝出现时的压力，大约为极限荷载的 50% ~ 70%）时，砌体尚无肉眼可见的裂缝；在压力作用下，砌体内砖和砂浆所受的应力十分复杂。在此阶段末，砌体的个别砖块上出现第一批裂缝（如图 1.2（a））。若此时载荷不继续增加，裂缝也不会扩展。

第二阶段：继续增加载荷，裂缝不断扩展并产生新的裂缝。

单块砖上的个别裂缝彼此连接并与竖向灰缝连成上下贯通若干批砖的垂直裂缝，并逐渐将砌体分裂成一个个单独的半砖小柱，使砌体全截面的整体工作受到破坏（如图 1.2（b））。这时压力相当于破坏载荷（极限载荷）的 80% ~ 90%。此时，即使停止加载，裂缝亦将继续缓慢扩展，砌体已接近破坏。

第三阶段：载荷再略微增加，裂缝迅速加长加宽。

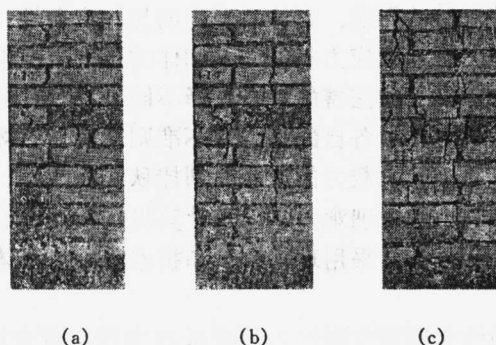


图 1.2 砌体受压试验破坏过程（施楚贤，1988）

被裂缝分成的半砖小柱会侧向凸出,砌体发生明显的横向变形而处于松散状态,最后终因被压碎或失稳而破坏(如图1.2(c))。

从上面试验还可以看出,无筋砌体抗压强度远远小于块体的抗压强度,即单块砌块抗压强度在砌体中不能得到充分发挥。其主要原因是砌块在砌体中过早开裂,而且是在远小于单块砌块抗压强度的压应力下就出现了裂缝。图1.3利用数值分析 MFPA 系统对 10 皮砖砌体构件进行了初步分析,给出了开裂过程的数值模拟结果(王述红、唐春安、吴献,2002)。

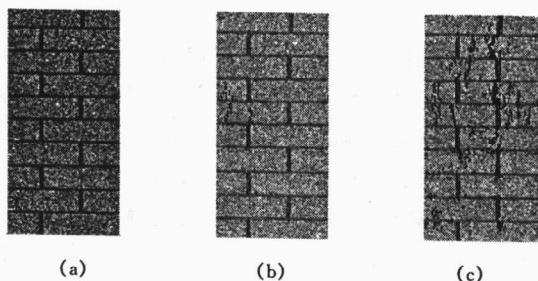


图 1.3 无筋砌体构件受压开裂过程  
(MFPA<sup>2D</sup>数值试验结果)

## 1.2 砌体开裂理论研究现状

从古典的材料力学强度理论开始,到今天仍处于发展阶段的断裂损伤等破坏理论,是固体力学中的一个十分重要的学科分支。砌体的破坏准则是判别砌体是否破坏的依据。在单轴应力状态下,一般用砌体轴心抗压强度或抗剪强度来表示。由于砂浆灰缝的影响,砌体表现出明显的方向性,沿不同的方向具有不同的强度。显然,在复杂应力状态下,砌体的强度破坏准则将更加复杂。但到目前为止,尚未建立比较完善的能够解释不同破坏现象的砌体强度理论,研究者借助于试验结果提出了各自的强度破坏准则或变形破坏准则,用于砌体结构受力性能的分析 and 极限承载力的计算(刘桂秋、施楚贤、刘一彪等,2000)。随着断裂力学、损伤力学、细观力学以及计算机技术的发展,国内外不少研究人员在大量实验的基础上,采用现代理论和技术手段对砌体等脆性材料的开裂机理进行研究。

经典的断裂力学主要研究裂纹尖端附近应力场、应变场和能量释放率等,以建立宏观裂纹起裂、裂纹的稳定扩展和失稳扩展判据。脆性断裂是由于缝端应力高度集中导致裂缝快速失稳引起的。1920 年 Griffith 在研究玻璃等脆性材

料时提出了断裂理论。经后来的修正和发展, 20 世纪 50 年代形成了适用于高强度钢材的线弹性断裂力学。由于线弹性断裂力学只适用于裂纹尖端是处于小范围屈服状态, 针对裂纹尖端的大范围屈服问题, 人们又提出了弹塑性断裂力学。弹塑性断裂力学尤其适用于韧性较好的金属材料。由此可见, 经典的断裂力学理论都是在研究金属材料断裂的基础上发展起来的。

线弹性断裂力学出现后, 不少学者采用断裂力学的概念研究混凝土的破坏机理和宏观裂缝的稳定性。Neville (1981) 最先把 Griffith 理论应用于混凝土, 他认为试件尺寸对于强度的影响与混凝土中随机分布的裂纹有关。1961 年 Kaplan 首先将断裂力学的概念引用到混凝土中, 并进行了混凝土的断裂韧度试验。此后, 国内外更多的工作是进行各种断裂模式 (包括拉裂模式、剪切模式和撕裂模式) 的实验研究以及断裂韧度的测试, 并积累了大量的测试资料, 提出了一系列应力强度因子的计算方法和经验断裂判据。在此基础上, 人们开始研究裂纹的存在对于断裂过程的影响。虽然这种研究仍然基于线弹性力学的基本假设 (例如均匀各向同性等), 并且所能考虑的裂纹数目和形态都非常有限, 但是这些基础研究使我们对于这类断裂物理现象有了较为清晰的认识。同时, 线弹性断裂力学在结构工程及其设计上也有成功的应用 (于晓中、居襄, 1983; 郭少华, 1993)。

当耗散现象起主要作用时, 如受地震作用的结构, 能量准则比经典应力准则能更好和更真实地分析其破坏机理, 断裂力学已广泛应用于金属的脆性破坏, 从 Kaplan (1961) 将断裂力学应用于混凝土以来, 它已变成重要的研究领域之一, 虽然对混凝土已提出了一些断裂模型, 但直到最近才有一些研究人员探索将断裂力学应用于砌体结构。砖块呈脆性, 受压下的砌体结构砖呈现 I 形裂纹 (拉伸裂纹), 即产生脆性破坏, 而脆性破坏是一种耗散机制, 特别是在地震区, 耗散机制在地震中起着主要作用。断裂力学应用于砌体对于许多研究人员来说, 可能是更有兴趣和更有用的。

砌体材料与金属在力学性质上的差异, 使得应用经典断裂力学研究砌体材料所得到的结果往往与实际差异很大。这种差异主要表现在以下几个方面。

① 经典的断裂力学 (包括弹塑性断裂力学) 研究处于均匀和各向同性体中的单个裂纹的断裂特性, 而实际上砌体结构表现出突出的非均匀性和非连续性, 并且往往其中存在无数的多个裂纹, 裂纹扩展会出现分支或者相互交叉。这样一来, 线弹性断裂力学的某些概念就不再适用了。

② 线弹性断裂力学判据  $K_I = \sigma \sqrt{\pi a} = K_{IC}$  仅能作为裂纹开始失稳扩展的判据, 而且认为裂纹一经开裂就立即失稳扩展, 但是扩展过程的状态及其扩展路径如何, 现有的断裂理论都无法对此作出有效的描述。因此说, 线弹性断裂