

基于微结构量化分析的软土各向异性特征研究*

尹小涛

(中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室 武汉 430071)

摘要: 软土的破坏受其微观结构控制,微观结构的形成和黏土矿物及沉积环境密切相关,不同尺度下微观结构的表现形式不同。本文采取温州某工程平原区 3.0 m 附近的海相沉积软土,设计了 100 倍 200 μm 、800 倍 50 μm 、2000 倍 20 μm 的 SEM 电镜扫描试验。根据 SEM 试验结果图像对比发现,软土的微观结构分别为 200 μm 对应团块+层状结构、50 μm 网状结构、20 μm 絮片状结构;根据图像灰阶统计平均值、标准差和变异系数分区雷达图对比发现,软土在 $101.25^\circ \sim 146.25^\circ$ 、 $11.25^\circ \sim 56.25^\circ$ 存在两组近于正交的优势微观结构;灰阶统计特征值雷达图和形状因子均揭示了软土的非均匀性和各向异性,团块+层状结构的非均匀性和各向异性 < 网状结构 < 絮片状结构。这些结构形式及其优势方向会极大影响软土在不同尺度下的破坏形式。灰阶统计特征值中变异系数的表现最稳定最优;形状因子相对于灰度统计特征值能更好的表现非均匀性和各向异性;分析不同微观结构时需要设定不同的 SEM 试验视窗尺度。

关键词: 软土;微观结构;各向异性;统计特征值;形状因子

中图分类号: TU411.92

文献标识码: A

文章编号: 1673-0836(2015)增 2-0486-05

Study on Anisotropy of Soft Soil Based on Quantitative Analysis of Microstructure

Yin Xiaotao

(1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, P. R. China)

Abstract: Failure of soft soil is affected by its microstructure, which is closely related to clay mineral and sedimentary environment. Forms of these microstructures under different scale are different. Specimen of marine deposit soft soil with sampling depth being 3.0 m and engineering site being plain, is sampled in Wenzhou. SEM tests are designed with conditions of 100 amplification coefficient & 200 μm width, 800 amplification coefficient & 50 μm width and 2000 amplification coefficient & 20 μm width. According to SEM images compared with each other, it is found that soft soil microstructure under 200 μm , 50 μm and 20 μm scales is successively corresponded to clump adding stratified structure, mesh structure and patchy adding flaky structure. On analysis of radar maps of subarea, statistics of gray value of SEM images and shape factors of these radar maps it is found that there exist two groups of advantage microstructure in the soil, which is orthogonal to each other from 101.25° to 146.25° degree and from 11.25° to 56.25° degree. All these present anisotropy of the soil, the rank of anisotropy is clump adding stratified structure being min, mesh structure being middle and patchy adding flaky structure being max. Forms and advantage direction of the microstructure will greatly affect failure modes of the soil under different scales. The variable coefficient in three statistics characteristics is the best and stable one in process of determining anisotropic direction. The shape factor does good to analyze anisotropy of soft soil, which is better than statistics characteristic of gray value. Microstructure with different size can only be observed under special width in SEM tests.

Key words: soft soil; microstructure; anisotropy; statistics characteristic; shape factor

* 收稿日期: 2015-07-15(修改稿)

作者简介: 尹小涛(1975-) 男, 陕西咸阳人, 博士, 主要从事岩土细观力学实验和数值模拟工作。

E-mail: yxt9406@163.com

基金项目: 国家自然科学基金(50879069, 50679073); 水利部公益性行业科研专项资助(2007SHZ1-200701004)

1 引言

软土是一类具有天然含水量大、压缩性高、承载力低和抗剪强度很低的呈软塑-流塑状态的粘性特殊土, 常见于湖相和海相沉积。通常用肉眼是看不出软土的结构性和各向异性特征的, 这类研究需要借助科学仪器对研究的尺度推向微细观尺度。

一般认为宏观尺度下土尤其是软土的结构特征和各向异性不显著, 但是微观结构的各向异性的微观变形破坏会累积表现在宏观变形破坏中。Baracos^[1]较早就用显微镜和 x 射线研究土的微观结构和各向异性。李榴芬^[2]、王国欣^[3]分别借助 SEM 研究了软土的微结构特征。陈嘉鸥^[4]、王常明^[5]、彭立才^[6]尝试建立量化评价指标体系, 并利用其对软土的微结构分析。李军霞^[7]、孟庆山^[8]、HICHER^[9]、房后国^[10]、孙红^[11]、夏银飞^[12]认识到软土的微结构特征具有一定的各向异性特征, 在一定条件下会加大的改变和影响软土的破坏模式和工程特性。因此需要研究不同尺度下的软土的微结构和各向异性的关系。

本文在软土 SEM 试验结果的基础上, 借用岩石玫瑰花图评价和确认优势结构面的方法, 将圆形分为 16 个等面积统计区域, 通过分析不同区域 SEM 图像的灰度值的统计特性, 目的是考察不同视窗尺度下软土的微结构特征和各向异性的显著性, 同时为不同目的 SEM 试验指明最优试验条件设定标准。

2 软土的 SEM 试验

2.1 软土地层及取样情况简介

取样区软土地层为冲海积沉积地层, 平原区地貌, 层厚较为稳定, 层理发育, 具鳞片状结构, 流塑状。软土具有渗透系数低、排水缓慢、固结时间长, 易触变性, 高压缩性、强度低等特点。取样深度为 3.0 m 附近。样品制备情况见图 1。

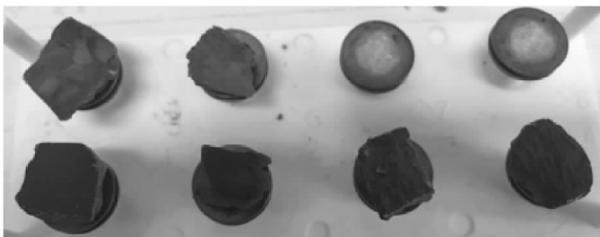


图 1 软土试件

Fig.1 Specimen of soft soil

2.2 SEM 试验情况简介

SEM 试验在中国科学院武汉岩土力学研究所购置的美国 FEI 公司 Quanta250 型环境扫描电子显微镜上进行。先将样品粘在样品架上, 喷金使其导电。测试条件为 30 kV, 由低倍向高倍分别进行 100 倍、800 倍、2 000 倍观察, 3 组对比样试验结果分别见图 2。

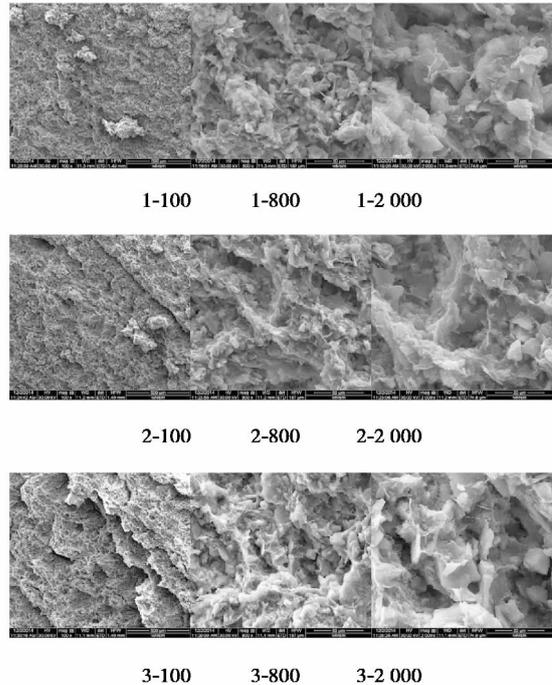


图 2 SEM 试验结果图

Fig.2 Image of soft soil from SEM test results

3 软土的各向异性特征分析

3.1 图像揭示软土微结构及其各向异性特征

从图 2 放大倍数 100 的三个试件的图中可以看出, 软土的层状结构明显, 这是粘土矿物和沉积因素综合作用的结果。2 000 倍的图中絮片状结构明显。800 倍的图中絮片状结构组成的大片和网状结构明显。越是微观的结构揭示的各向异性特征越明显, 微观结构的层次分明, 呈递进和互补关系。不同尺度下的 SEM 试验揭示随着尺度的增加该区软土具有明显的絮片状结构、网状结构和团粒+层状结构, 各向异性特征随着尺度的增加呈递减趋势。

3.2 图像分区统计揭示的各向异性特征

人裸眼的分辨率大约在几十个灰阶, 而一般的灰度图像的灰阶在 256。为了更细致的分析软土 SEM 试验结果, 特将 1 024×942 的 SEM 试验图像中心半径 471 像素的圆分为 16 等份分区统计各片区的灰阶统计特征值, 统计分区图见图 3。

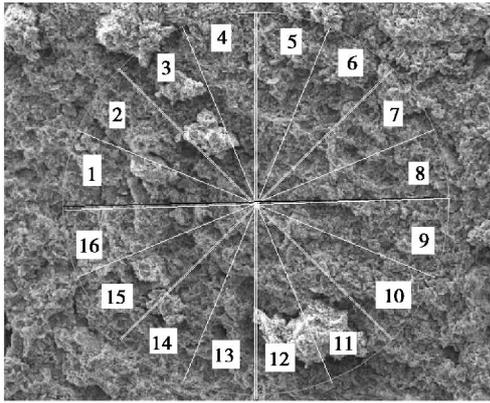


图 3 统计分区图

Fig.3 Subarea for image statistic

3.2.1 相同土样不同试验条件

根据图 3 对 16 个同面积区域的灰度值进行了统计分析,发现各区域最大最小值均比较稳定,平均值、标准差、变异系数差异明显,后续分析主要针对后 3 个统计特征值进行,雷达图见图 4。

从图 4 可知,1#试件在 2 000 倍时灰阶平均值的优势方向在 7 和 15 区域,与水平面夹角约 33.75°;1#试件标准差和变异系数揭示 100 倍时数据离散性最大的区域在 3 和 11 区域,差异最大的方向为 123.75°,与前者垂直。综合说明 1#软土试件具有明显的各向异性特征,性质差异最大的方向在 123.75°。

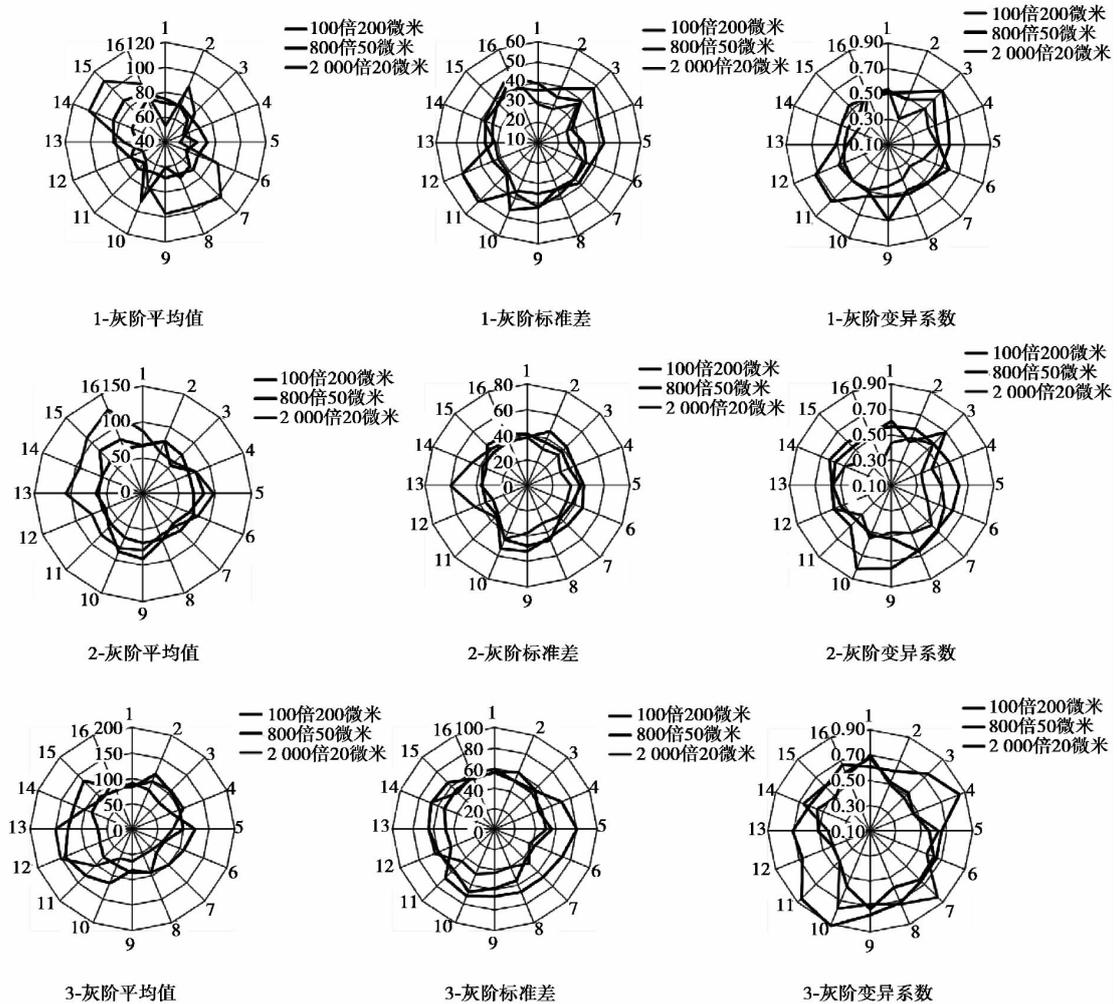


图 4 软土不同试验条件下的分区灰阶统计特征值雷达图

Fig.4 Radar map of statistical characteristics of each subarea for the same specimen under different test condition

2#试件在 2 000 倍时灰阶平均值的优势方向在 8 和 16 区域,与水平面夹角约 11.25°;2#试件标准差揭示 2 000 倍时数据离散性最大的区域在 13 区域,差异最大的方向为 258.75°。2#试件变异系数揭示 100 倍时数据离散性最大的区域在 2 和 10 区域,性质差异最大的方向在 146.25°。数据较乱,

可综合认定为 146.25°。

3#试件在 2 000 倍时灰阶平均值的优势方向在 12 区域,与水平面夹角约 281.25°;3#试件标准差揭示 100 倍时数据离散性最大的区域在 5 区域,差异最大的方向为 78.75°。3#试件变异系数揭示 100 倍时数据离散性最大的区域在 4 区域,性质差

异最大的方向在 101.25°。数据较乱,可综合认定为 101.25°。

综上该区软土在 101.25~146.25°存在优势微观结构,在垂直于其的方向也存在薄弱微观结构,角度约 11.25~56.25°。

3.2.2 相同试验条件不同土样

试验条件相同,试件不一样时,根据上述分区结果统计绘制了不同灰阶统计特征值的雷达图(平均值、标准差和变异系数),见图 5。

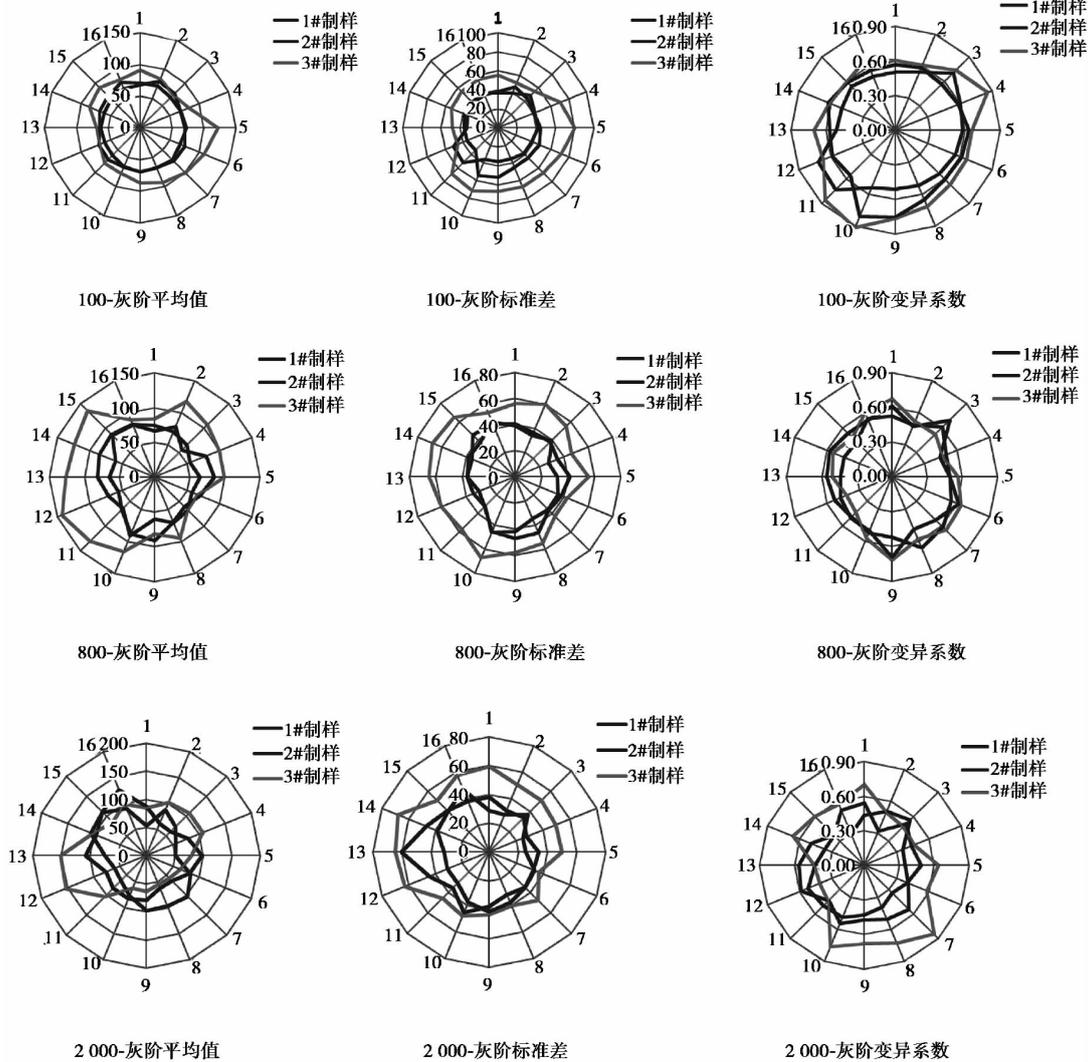


图 5 软土不同试件的分区灰阶统计特征值雷达图

Fig.5 Radar map of statistical characteristics of each subarea of different specimen under the same test condition

从图 4 可知,在 100 倍时,3#试件灰阶平均值和标准差揭示的优势方向在 5 区域,与水平面夹角约 78.75°;变异系数揭示 3#试件数据离散性最大的区域在 4 区域,差异最大的方向为 101.25°。

800 倍时,灰阶平均值揭示的 3#试件的优势方向在 12 区域,与水平面夹角约 281.25°;3#试件标准差揭示数据离散性最大的区域在 14 区域,差异最大的方向为 236.25°。3#试件变异系数揭示数据离散性最大的区域在 9 区域,性质差异最大的方向在 11.25°。可综合认定为 101.25°。

2 000 倍时,灰阶平均值揭示 3#试件优势方向

在 12 区域,与水平面夹角约 281.25°;3#试件标准差揭示的数据离散性最大的区域在 14 区域,差异最大的方向为 236.25°。3#试件变异系数揭示数据离散性最大的区域在 7 区域,性质差异最大的方向在 33.75°。可综合认定为 101.25~123.75°。

综上该区软土在 101.25~123.75°存在优势微观结构,在垂直于其的方向也存在薄弱微观结构,角度约 11.25~33.75°。

3.2.3 形状因子揭示的非均匀性及特征值敏感程度

数学形态学中描述物体外形似圆程度的形状

因子定义(shape factor ,简称 SF) :

$$SF(X) = \frac{U(X)}{2\sqrt{\pi A(X)}} \quad (1)$$

式中: $U(X)$ 表示周长, $A(X)$ 表示其面积。如果几何形状为圆形, 则形状因子 SF 的值为 1; 如果 X 的几何形状与圆的偏离程度越大, 则形状因子 SF 的值越大。借此实现对岩土材料所包含的各种物性特征不规则几何形状的量化描述。

表 1 雷达图的形状因子统计表

Table 1 Shape factor of each radar map

灰阶统计特征值	试件	100 倍	800 倍	2 000 倍
		200 μm	50 μm	20 μm
平均值	1#制样	1.02	1.08	1.17
	2#制样	1.02	1.13	1.12
	3#制样	1.19	1.11	1.12
标准差	1#制样	1.08	1.08	1.11
	2#制样	1.06	1.06	1.09
	3#制样	1.06	1.05	1.08
变异系数	1#制样	1.06	1.09	1.13
	2#制样	1.05	1.10	1.15
	3#制样	1.06	1.09	1.15

根据灰度平均值雷达图计算得到的形状因子随着放大倍数的增加整体呈现增加趋势, 但是 2#、3#样品在 800 倍时数据分别表现为最大和最小, 3#样品在 100 倍时数据最大。标准差的分析结果相对于平均值异常表现在 3#样品在 800 倍时数据最小。这些破坏了数据的整体规律。而利用变异系数分析放大倍数增加软土的各向异性和非均匀性呈现单增趋势, 不同倍数所得结果也比较接近, 说明数据的离散性较小。因此, 可以认为形状因子相对于灰度统计特征值能更好的表现非均匀性和各向异性; 3 个统计特征值中变异系数的表现最稳定, 也最优; 团块+层状结构的非均匀性和各向异性<网状结构<絮片状结构, 三种结构类型是同类软土在不同尺度下的表现, 这些结构形式及其优势方向会极大影响软土在不同尺度下的破坏形式。

4 结 论

软土 SEM 试验揭示不同尺度下, 其不同微结构均表现出各向异性, 根据图像灰阶分区统计特征值和形状因子分析所得结论如下:

(1) 软土在 100~2 000 倍放大系数、20~200 μm 尺度下, 由大到小不同尺度对应的微观结构依次为团块+层状结构、网状结构、絮片状结构, 团块+层状

结构的非均匀性和各向异性<网状结构<絮片状结构。

(2) 软土在 101.25°~146.25°、11.25°~56.25° 存在两组近于正交的优势微观结构。

(3) 3 种结构类型是同类软土在不同尺度下的表现, 这些结构形式及其优势方向会极大影响软土在不同尺度下的破坏形式。

(4) 灰阶统计特征值中变异系数的表现最稳定, 也最优; 形状因子相对于灰度统计特征值能更好的表现非均匀性和各向异性; 3 种微观结构存在的尺度不一样, 即分析不同微观结构时需要设定不同的视窗尺度。

参考文献(References)

[1] Baracos A. Compositional and structural anisotropy of Winnipeg soils — a study based on scanning microscopy and X-ray diffraction analyses [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1977, 14 (2): 125-137.

[2] 李榴芬. 珠江三角洲软土微结构的扫描电镜研究[J]. 中山大学学报(自然科学版), 2001, 40(4): 102-105.

[3] 王国欣, 黄宏伟, 肖树芳. 软土微结构特征的试验研究[J]. 水利学报, 2005, 36(2): 190-196.

[4] 陈嘉鸣, 叶斌, 郭素杰, 等. 珠江三角洲软土 SEM 微结构定量研究[J]. 电子显微学报, 2001, 20(1): 72-75.

[5] 王常明, 肖树芳. 海积软土微结构量化分析指标体系及应用[J]. 长春科技大学学报, 1999, 29(增): 144-147.

[6] 彭立才, 蒋明镜, 朱合华, 等. 珠海地区软土微观结构类型及定量分析研究[J]. 水利学报, 2007(增): 687-690.

[7] 李军霞, 王常明, 张先伟. 不同排水条件下软土蠕变特性与微观孔隙变化[J]. 岩土力学, 2010, 31(11): 3493-3498.

[8] 孟庆山, 杨超, 许孝祖, 等. 动力排水固结前后软土微观结构分析[J]. 岩土力学, 2008, 29(7): 1756-1763.

[9] Hicher P Y, Wahyudi H, Tessier D. Microstructural analysis of inherent and induced anisotropy in clay [J]. Mechanics of Cohesive Frictional Materials, 2000, (5): 341-371.

[10] 房后国, 刘娉慧, 肖树芳, 等. 海积软土排水固结机理分析[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2005, Vol. (2): 207-212.

[11] 孙红, 赵锡宏. 软土的各向异性损伤对剪切带形成的影响[J]. 力学季刊, 2001, 22(3): 307-316.

[12] 夏银飞. 软粘土的结构性及模型研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2007.