

基于双 CCD 相机的三轴试验三维成像测量技术

赵红华¹, 于绅坤¹, 常艳¹, 郭长宝²

(1. 大连理工大学 工业装备与结构分析国家重点实验室, 辽宁 大连 116023;

2. 中国地质科学院 地质力学研究所, 北京 100081)

摘 要: 提出了一种基于双 CCD 相机的三轴试验三维成像测量技术, 在三轴试验仪前后面分别放置一台 CCD 相机, 利用具有黑白方格的橡皮膜代替传统的橡皮膜。在试验过程中对试样进行图像采集, 能够捕捉试样全表面的变形。提取和跟踪图像中黑白方格的角点并对试样的边界进行识别, 基于三轴试样的水平截面在变形前后均保持水平圆形平面的假设, 对前后表面分别采集到的图像进行拼接处理, 初步实现了三轴试验过程中试样变形的三维测量, 与有限元软件 ANSYS 相结合, 能够绘制试样表面的三维变形云图, 并将这种技术应用到了硅藻土的三轴试验研究中, 取得了较好的测量效果。

关 键 词: 三轴试验; 数字图像; 三维测量; 角点提取; 边界识别; 双 CCD 相机

中图分类号: TU 411

文献标志码: A

文章编号: 1005-3026(2015)05-0728-05

3D Image Measurement of Triaxial Testing Using Two CCD Cameras

ZHAO Hong-hua¹, YU Shen-kun¹, CHANG Yan¹, GUO Chang-bao²

(1. State Key Laboratory Analysis for Industrial Equipment, Dalian University of Technology, Dalian 116023, China; 2. Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081, China. Corresponding author: GUO Chang-bao, E-mail: guochangbao@163.com)

Abstract: A three-dimensional digital image measurement technique by using two CCD cameras placed at the front and back of the triaxial testing machine, respectively, was proposed. A plastic membrane with white and black grids was used to replace the traditional plastic membrane. The images of the specimen obtained during the triaxial testing were able to capture the deformation of the whole specimen surface. By extracting and tracking the corner points of white and black grids, and detecting the edge of the specimen, the front and back images were stitched together and three-dimensional deformation measurement of the soil specimen was realized based on the assumption that the horizontal cross section of the soil specimen will keep horizontal circular plane before and after deformation. By combining with the numerical analysis with ANSYS finite element software, 3D surface strain contour can be obtained. This technique was applied to triaxial testing of diatomite and it achieved very good measurement effects.

Key words: triaxial test; digital image; three dimensional measurement; corner point extraction; edge detection; two CCD camera

随着岩土工程破坏问题变得越来越复杂, 三维变形测量技术在岩土力学测试中得到了日益重视和快速发展. Singh 采用一个基于主动三角系统的 CCD 相机和图像识别算法(方法)对无纹理特征的砂岩岩层进行测量^[1]. Yuan 等基于立体粒子图像测速技术开发了三维土体变形系统^[2].

Uchida 等探讨了在实验室单元试验中采用高空间分辨率的分布式光纤进行三维变形测量^[3]. Peth 等用微型 CT 和数字图像相关研究了机械和水力应力作用下的三维变形^[4]. 三维变形测量技术也在三轴试验中得到了应用. Bhandari 等开发了一个由三个相机组成的三轴试样变形的三维图

像测量系统^[5]. 邵龙潭等基于单个 CMOS 相机和特制的压力室实现了三轴试样的全表面变形测量^[6].

本文提出了一种基于双相机的三轴试验的三维成像和测量技术,采用简便可行的方法,实现了土体变形的三维测量和重构,并展示了这种方法在硅藻土三轴压缩试验中的应用.

1 三轴试验设备的改造

为了利用数字图像采集技术,首先对三轴仪的有关设备进行了改造. 实验室内常用三轴仪的围压室(通常是圆柱形的,如图 1 左图),圆柱形的压力室在利用数字相机对三轴试样进行拍摄的过程中会产生光路的畸变. 将 4 块 20 mm 厚的有机玻璃板拼接成一个无底无盖长方体,接缝处用高强胶结剂粘结,然后两端 20 mm 处削成了圆筒形. 改造后的压力室实物图如图 1 右图所示,其详细构造如图 2 所示. 改造后的压力室适用于 $39.1 \text{ mm} \times 80 \text{ mm}$ ($D \times H$) 的试样. 为了采集三轴试样丰富的信息,采用印有黑白方格子的橡皮膜代替传统的橡皮膜,方格的大小为 $7 \text{ mm} \times 7 \text{ mm}$. 在后处理过程中,对黑白方格的角点进行提取,每一个角点能提供关于试样变形的局部信息. 改造后的橡皮膜如图 3 所示.

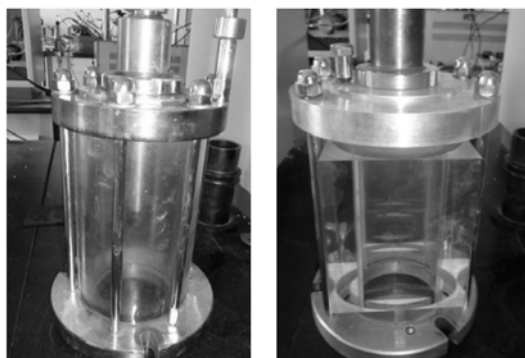


图 1 原始压力室和改造后的压力室

Fig. 1 The original and modified pressure chamber

试验中采用两台数字相机同时对三轴试样进行图像采集的工作. 数字相机采用大恒图像的 DH-HV3103UC 型号的 CCD 摄像头,像素为 1280×1024 . 三轴试验前,两台相机分别放在三轴试验机的前后方,两台相机分别固定在三角架上进行高度调节、对准和调焦. 前后相机分别用两台计算机进行图像的采集和储存工作,并确保前后两台相机采集图像同时进行. 试验过程中,调整相机,使镜头垂直于方型压力室的表面,并使镜头

距离试样的前后距离相等. 经过调整,每台相机均能保证拍到三轴试样的前半部分和后半部分,并不会对彼此的拍摄效果造成影响.

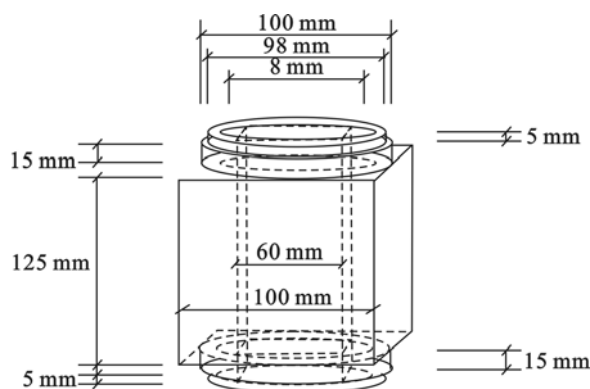


图 2 改造后的方形三轴压力室

Fig. 2 The details of modified cubical triaxial testing chamber

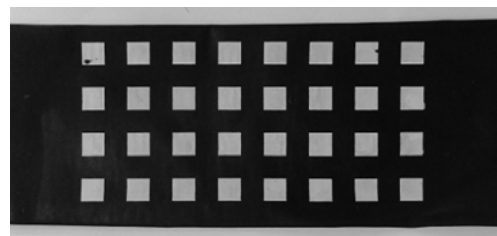


图 3 三轴试验用改进的黑白方格橡皮膜

Fig. 3 Membrane with black and white grids for triaxial testing

2 标记点的提取和试样三维变形的测量

2.1 角点的提取

为了对试样进行三维变形测量,首先对采集到的三轴试样的数字图像进行角点的提取工作. 在角点提取过程中,采用 Harris 角点提取的方法^[7]. 在 Harris 方法中采用一个高斯窗或者矩形窗模板在图像上移动,由模板窗口取得原生图像衍生出的 2×2 的局部结构矩阵. 对该模板矩阵取特征值,建立度量函数,根据度量函数是否大于 0 即可判断该点是否角点. 图 4 给出提取三轴试样表面黑白方格橡皮膜角点的图像. 其中十字标记为根据提取后的像素坐标绘制的角点,这种角点提取的方法可达到 0.1 个像素的精度. 角点的提取只限于分布在试样正面中间的 11 行 \times 6 列的角点,总计 66 个.

为了对变形的三轴试样进行三维重构,建立如图 5 所示的三维世界坐标系 ($OXYZ$). 坐标中心选择在试样上端的中心, Z 轴方向设为沿试样的中心向下.

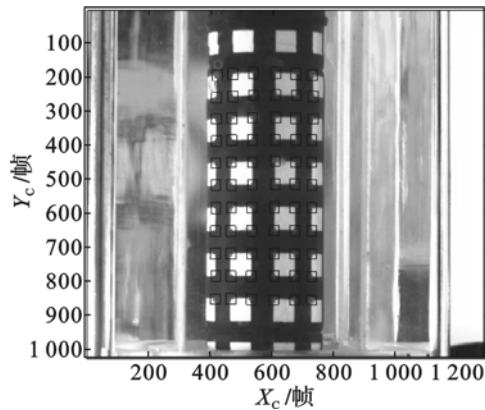


图4 Harris 方法提取的三轴试样的角点

Fig. 4 Extracted corner points of specimen with Harris method

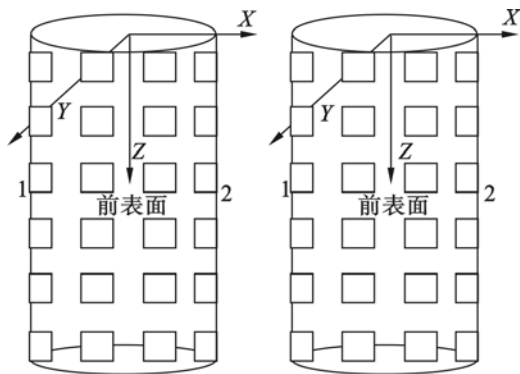


图5 三轴试样的三维坐标系统 $OXYZ$ (左) 和基于像平面的三维坐标 $O'X'Y'Z'$ (右)

Fig. 5 World coordinate system of specimen (left) and coordinate system of specimen based on image plane (right)

建立与三轴试样的三维世界坐标 ($OXYZ$) 平行的图像坐标系 ($O'X'Y'Z'$, 像素为坐标单位), 图像成像平面为 $X'Z'$ 平面, X' 轴和 Z' 轴与相机的成像面重合. 对于前后两个方向采集的三轴试验时试样变形的图像, 可以看作是试样的前表面和后表面分别在 $X'Z'$ 平面的投影, 则提取的前后表面的角点在 $X'Z'$ 平面的分布如图 6 所示. 图 6 是试样安装后, 尚未进行三轴试验时所提取的角点的分布. 由于分别从前后两个方向采集图像, 试样后表面的图像的 X' 轴方向和前表面的 X' 轴方向是相反的. 在进行三维重构时需要对其 X' 轴的坐标进行相应的处理 (X' 坐标取负). 图 7 则给出了试样加载变形时前、后表面提取的角点分布.

2.2 边界检测

经过角点提取和建立坐标系统之后, 已知空间中每一点在相空间中投影的 $X'Z'$ 坐标, 进一步需要寻找每一个标志点的 Y' 坐标. 假设试样的水平截面在变形前后均保持水平圆形截面 (在不

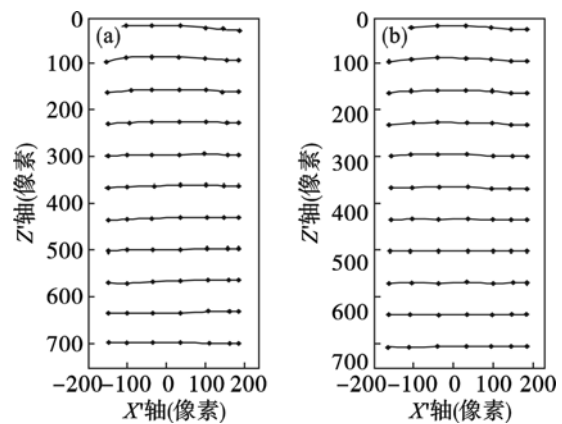


图6 三轴试样初始状态角点的提取

Fig. 6 Corner point extraction of triaxial specimen at initial state

(a)—前表面; (b)—后表面.

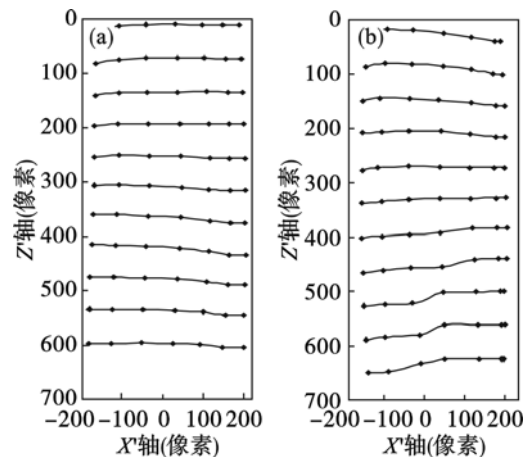


图7 三轴试样变形状态角点的提取

Fig. 7 Corner points extraction of specimen during triaxial compression test.

(a)—前表面; (b)—后表面.

发生大的剪切变形条件下, 这一假设是合理的). 为了寻找 Y' 坐标, 已知变形前同一行上的角点是分布在同一个圆周上的, 圆平面垂直于 Z' 轴且以与 Z' 轴的交点为圆心. 则需要确定圆周的直径, 根据点在圆周上的坐标满足 ($X'^2 + Y'^2 = R^2$), 则可以确定每一个点的 Y' 坐标. 采用边缘检测的方法由采集的图像确定直径. 在 Matlab 软件中有多种边缘检测的方法, 如 Roberts 算子, Sobel 算子, Prewitt 算子, LoG 算子等^[8]. 在三轴试验获得的图像中, 由于包裹试样的橡皮膜颜色比较深, 试样的边缘会比外围的图像颜色深, 灰度值相应地比较低. 图像的灰度值会发生明显的变化, 因此采用了 Prewitt 算子进行边缘检测. 在进行边缘检测之前, 对采集的三轴试验图像先进行高斯平滑滤波处理. 三轴试验的试样边界提取的效果如图 8 所

示. 根据提取出的边界, 可确定试样某一位置半径 R 的大小. 由此可计算出任一角点 Y' 坐标的值. 这样获得了提取的角点在三维坐标系 ($O'X'Y'Z'$) 中完整的空间坐标. 对于角点在三维坐标系 $O'X'Y'Z'$ 的坐标向三维坐标系 $OXYZ$ 的转换工作通过线性转换进行, 试样初始直径为 39.1 mm, 对应的像素长度为 376 个像素, 转换比例因子为 9.616. 试样竖向的转换因子取相同的值. 经过这一转换工作, 即可得到角点的真实空间坐标.



图8 三轴试样边界的提取

Fig. 8 Boundary extraction of triaxial specimen

2.3 试样前后表面变形的拼接

提取的角点主要分布在试样的中间, 位于边界上的角点由于曲率大, 图像采集发生的畸变比较大, 角点的提取不够准确, 没有进行提取角点的工作, 由边界提取的图像进行补点完成. 边界采用 Prewitt 算子的方法进行检测, 能够较好地识别出试样的边界. 在识别出相应的边界后, 将同一行上的中间角点的水平连线与边界线相交的点作为边界上的角点. 由试样前表面采集的图像完成右边界补点的工作, 由试样后表面采集的图像完成左边界补点的工作, 这样实现了试样表面角点的完整提取, 试样前后表面共 14 行 \times 11 列的角点, 总计 154 个.

2.4 试样的变形和三维重构分析

首先利用得到的角点像素坐标可以获得试样整体的平均轴向应变, 见式 (1)^[9]:

$$\varepsilon_a = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m \frac{(z_{nj}^0 - z_{lj}^0) - (z_{nj}^t - z_{lj}^t)}{(z_{nj}^0 - z_{lj}^0)}. \quad (1)$$

其中: m, n 分别表示 X, Z 方向的角点行和列数, 如图 4 中所示, $m=6, n=11$; z^0 和 z^t 分别代表初始状态和变形状态的角点 Z 轴坐标.

试样径向应变的计算可以通过边界识别得到 (对三轴试样左右两边的外围边界进行测量求得). 任一时刻试样的平均径向应变为

$$\varepsilon_r = \frac{\frac{1}{k} \sum_{i=1}^k R_i - R_0}{R_0}. \quad (2)$$

其中: R_i 为沿三轴试样进行 $(k-1)$ 段分割时分割

点 i 处的半径大小. 如果按照上述的角点进行分割, 则 $k=m$.

通过得到的每个角点的 X', Y', Z' 坐标, 以角点作为有限元理论中的节点, 并对单元和节点编号. 借助 ANSYS 有限元软件, 通过输入变形前后试样表面的空间坐标, 建立三轴试样的三维变形网格, 实现了三轴试验中试样变形的三维重构. 分析中采用了 ANSYS 中的 41 号壳体单元. 在试样的模型建立之后, 通过将位移作为约束条件, 加载到模型上, 可以得到试样表面的变形情况.

图 9 给出了某一硅藻土试样在三轴试验过程中不同轴向应变时刻的位移矢量场. 由于加载是从下向上进行, 所以试样运动向量的方向向上, 并指向试样外. 在较大应变时, 剪切带已经完全形成, 所以局部试样位移向量的方向是一致的. 如图 9b 中的右下角区域的土体位移向量. 图 10 则给出了某一硅藻土试样三轴试验的总位移云图. 可观察到图 10a 中整体位移的发展是不均匀的, 图 10b 是大位移时产生的应变场的分布, 剪切带完全产生后, 右下区域土体的位移比上部的位移要大很多. 图 11 展示了三轴试样不同应变时刻的轴向应变场. 剪切带形成前, 试样局部应变是不均匀的, 整体上应变均匀分布的区域较多, 剪切带形成后, 试样的轴向应变场以剪切带为中心分布, 剪切带内部应变值大, 两侧应变值小.

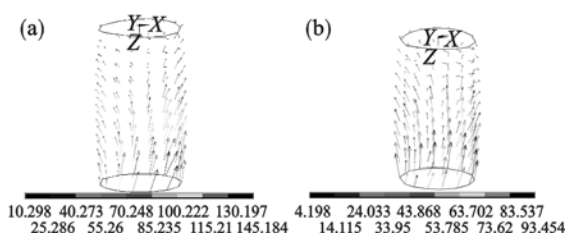


图9 某一硅藻土试样三轴试验的位移矢量图

Fig. 9 Displacement vectors for a diatomite specimen during triaxial test

(a) $\varepsilon_a = 10.8\%$; (b) $\varepsilon_a = 17.5\%$.

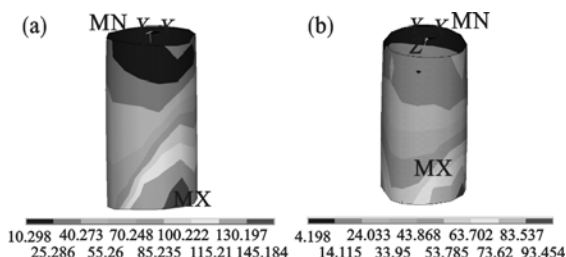


图10 某一硅藻土试样三轴试验的总位移云图

Fig. 10 Displacement nephogram for a diatomite specimen during triaxial test

(a) $\varepsilon_a = 10.8\%$; (b) $\varepsilon_a = 17.5\%$.

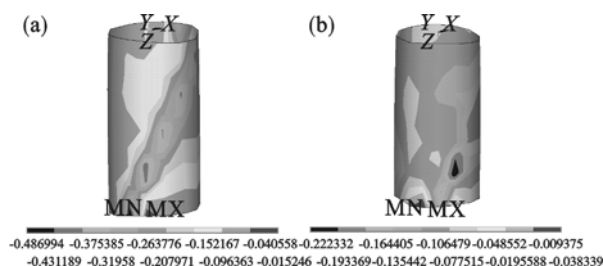


图 11 某一硅藻土试样三轴试验的轴向应变云图
Fig. 11 Axial strain nephogram for a diatomite specimen during triaxial test

(a) — $\varepsilon_a = 10.8\%$; (b) — $\varepsilon_a = 17.5\%$.

3 结 论

1) 本文提出了一项基于双相机的三轴试验三维成像测量技术,该技术基于角点提取和边界识别的原理,采用在三轴试样前后表面分别设置一台 CCD 相机进行拍照的方法,并对传统压力室进行改造,采用方形的压力室,消除了圆柱形压力室造成的畸变的影响。

2) 基于试样变形后水平方向的试样截面仍然保持平面的假设,得出了三轴试验表面标志点的三维空间坐标,实现了对三轴试样变形过程中的三维重构和应变的测量。

3) 结合 ANSYS 软件,根据从图像测量得到的试样的三维变形数据,能够重构三轴试样的变形网格,最终计算和绘制三轴试样的全表面变形场和应变云图。

参考文献:

- [1] Singh R, Chapman D P, Atkinson K B. Machine vision for dimensional measurements in mines [J]. *Geotechnical and Geological Engineering*, 1997, 15: 185 – 203.
- [2] Yuan B X, Liu J Y, Chen W W, et al. Development of a robust stereo-PIV system for 3-D soil deformation measurement [J]. *Journal of Testing and Evaluation*, 2012, 40(2): 256 – 264.
- [3] Uchida S, Levenberg E, Klar A. On-specimen strain measurement with fiber optic distributed sensing [J]. *Measurement*, 2015, 60: 104 – 113.
- [4] Peth S, Nellesen J, Fischer G, et al. Non-invasive 3D analysis of local soil deformation under mechanical and hydraulic stresses by μ CT and digital image correlation [J]. *Soil & Tillage Research*, 2010, 111: 3 – 18.
- [5] Bhandari A R, Powrie W, Harkness R M. A digital image-based deformation measurement system for triaxial tests [J]. *Geotechnical Testing Journal*, 2012, 35(2): 1 – 6.
- [6] 邵龙潭, 刘潇, 郭晓霞, 等. 土工三轴试验试样全表面变形测量的实现 [J]. *岩土工程学报*, 2012, 34(3): 409 – 415. (Shao Long-tan, Liu Xiao, Guo Xiao-xia, et al. Whole surface deformation measurement of triaxial soil specimen based on digital image processing [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2012, 34(3): 409 – 415.)
- [7] Harris C, Stephens M. A combined corner and edge detector [C] // *Alvey Vision Conference of Plessey Research Roke Manor*. London, 1988: 147 – 151.
- [8] Shirivakshan G T, Chandrasekar C. A comparison of various edge detection techniques used in image processing [J]. *International Journal of Computer Science Issues*, 2012, 9(5): 269 – 276.
- [9] 邵龙潭. 土力学研究与探索 [M]. 北京: 科学出版社, 2011. (Shao Long-tan. Research and exploration of soil mechanics [M]. Beijing: Science Press, 2011.)

(上接第 727 页)

- [5] Nolde J E, Spears D. A preliminary assessment of in place coalbed methane resources in the Virginia portion of the central Appalachian Basin [J]. *International Journal of Coal Geology*, 1998, 38(1/2): 115 – 136.
- [6] Cai Y D, Liu D M, Yao Y B, et al. Geological controls on prediction of coal bed methane of No. 3 coal seam in Southern Qinshui Basin, North China [J]. *International Journal of Coal Geology*, 2011, 88(2/3): 101 – 112.
- [7] Yao Y B, Liu D M, Tang D Z, et al. Preliminary evaluation of the coal bed methane production potential and its geological controls in the Weibei coalfield, Southeastern Ordos Basin, China [J]. *International Journal of Coal Geology*, 2009, 78(1): 1 – 15.
- [8] 李纪森, 陈英. 应用密度测井值计算煤层含气量 [J]. *测井专刊*, 1996(4): 70 – 73. (Li Ji-sen, Chen Ying. To calculate the coal seam gas content use the density logging value [J]. *Logging*, 1996(4): 70 –

73.)

- [9] 潘和平, 黄智辉. 煤层含气量测井解释方法探讨 [J]. *煤田地质与勘探*, 1998, 26(2): 58 – 60. (Pan He-ping, Huang Zhi-hui. Discussion on the log interpretation method of coalbed gas content [J]. *Coal Geology & Exploration*, 1998, 26(2): 58 – 60.)
- [10] 王盼盼, 秦勇, 高弟. 观音山勘探区煤层含气量灰色关联预测 [J]. *煤田地质与勘探*, 2012, 40(4): 34 – 38. (Wang Pan-pan, Qin Yong, Gao Di. Grey relational prediction of coalbed methane content in Guanyinshan exploration district [J]. *Coal Geology & Exploration*, 2012, 40(4): 34 – 38.)
- [11] 赵丽娟, 秦勇, 林玉成. 煤层含气量与埋深关系异常及其地质控制因素 [J]. *煤炭学报*, 2010, 35(7): 1165 – 1169. (Zhao Li-juan, Qin Yong, Lin Yu-cheng. Abnormal relation and its geological controls of coalbed methane content to buried depth of coal seams [J]. *Journal of China Coal Society*, 2010, 35(7): 1165 – 1169.)