

基于高速 DIC 的构件变形测量及有限元模拟

张亚东¹, 袁廷威²

(1.山东海龙建筑科技有限公司, 山东 济宁 272000; 2.山东科技大学 土木工程与建筑学院, 山东 青岛 266590)

摘要: 通过 DIC 高速摄像机和相应设备建立高速数字图像测量系统。首先通过 DIC 测量系统进行试件的材料试验, 采集试件的材料属性。再将 DIC 测量系统所采集到的试件材料信息数据输入 ABAQUS 软件建立的有限元模型内进行数值模拟, 通过有限元软件对其模拟分析。冲击试验期间, DIC 测量系统进行试件的位移和应变的数据采集。通过模拟与试验进行分析, 从整体性能方面对试验进行评价, 从而对 DIC 高速数字图像测量系统在试验的测量应用前景和存在的问题进行分析和讨论。

关键词: DIC 高速摄像机; ABAQUS 有限元分析; 冲击试验; 数据拟合

Component deformation measurement and finite element simulation based on high-speed DIC

Zhang Yadong¹, Yuan Tingwei²

(1. Shandong Hailong Construction Technology Co., Ltd., Jining 272000, China; 2. College of Civil Engineering and Architecture, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China)

Abstract: A high-speed digital image measurement system is established through DIC high-speed camera and the corresponding supporting equipment. Firstly, the material test of the specimen is carried out through the DIC measurement system, and the material properties of the specimen are collected. Then, the material information of the specimen collected by the DIC measurement system is input into the finite element model established by ABAQUS software for analysis. It is simulated and analyzed with the finite element software. Then the displacement and strain data are collected through the DIC measurement system during the impact test. Through simulation and test analysis, the test is evaluated from the overall performance, so as to analyze and discuss the application prospect and existing problems of DIC high-speed digital image measurement system in the test.

Key words: DIC high-speed camera; ABAQUS finite element analysis; impact test; data-fitting

随着社会的进步和日益严峻的反恐形势, 人们对公共建筑和结构的安全设计提出了更高的要求。自 20 世纪以来, 各国学者加强了结构构件在冲击载荷下的力学分析和试验研究, JONES N^[1]和 JOHNSON W^[2]在材料与结构的冲击方面进行了深入研究, 并为其发展做出了巨大贡献。而高速摄像技术的高速发展为其研究助了一臂之力, 使用此测量方式可对典型的冲击与作用过程进行全过程的测量, 包括空气冲击波动作以及全封闭容器的振动爆

炸。使用 DIC（数字图像相关技术）非接触式应变光学测量系统可测得瞬态位移场、应变场和速度场等，从而进一步分析典型冲击荷载作用下结构的变形破坏现象和机理。



图 1 DIC 非接触式应变光学测量系统

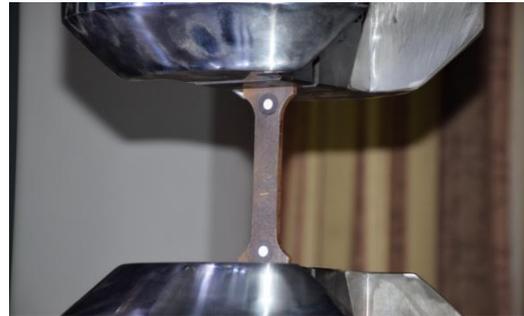


图 2 液压万能材料试验机

世界范围内的诸多专家学者对该技术在不同领域的应用进行了丰富的研究，收获了丰富的科研成果。项大林等^[3]利用冲击荷载试验设备建立了基于数字图像的三维动态 DIC 测试系统，结果显示，等效加载装置与动态三维 DIC 拍摄记录测试分析法的结合可对相关结构进行水下冲击的试验；单宝华等^[4]提出一种基于张正友较准的 DIC 位移算法，利用视觉测量原理计算出结构表面的位移；陈亚军等^[5]阐述了 3D-DIC 在不同种类材料的力学试验中的应用，对比了常用的引伸计试验与有限元软件数值分析的结果；范亚夫等^[6]利用 3D-DIC 的相关技术在霍普金森杆的加载条件下测试铝合金的动态拉伸力学性能；严成增等^[7]将有限元法-离散元法(FDEM)耦合分析方法与数字图像技术进行结合，研制出可表征在现实条件下的非均质性岩石的 FDEM 系统；高翔等^[8]关注于爆炸作用导致的桥梁损伤，采用非线性显式动力学分析软件对 T 型钢筋混凝土梁进行了损伤研究；赵燕茹等^[9]采用 DIC 动态数字图像技术对钢纤维增强水泥基复合材料的三点弯落球冲击试验进行研究，并对试件表面的位移场、应变场进行了研究；代树红等^[10]提出一种通过 DIC 测量岩石 I-II 复合型裂纹尖端位置与应力强度因子的试验观测方式；雷冬等^[11]通过 DIC 系统，研究了花岗岩材料在动荷载作用下的破坏形态与位移场、应变场的关系。

尽管诸多学者应用 DIC 高速数字图像测量系统进行了结构冲击试验的探索，但关于 DIC 高速数字图像测量系统在材料试验和冲击试验中应用说明与分析并不完善。本文通过多次使用 DIC 高速数字图像测量系统对材料试验和冲击试验进行实时数据采集，并使用有限元软件进行模拟分析拟合对比，对 DIC 高速数字图像测量系统在试验的测量应用前景和存在的问题进行了分析和讨论。

1 材料试验

通过如图 1 所示的 DIC 高速数字图像测量系统以及如图 2 所示的液压万能材料试验机对冲击试验所用的试件（图 3）进行材料试验。



图3 试件

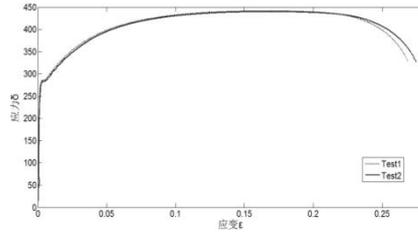


图4 试件的应力-应变曲线

在进行材料试验过程中，首先将需要进行材料试验的试件两端进行 DIC 系统识别点的张贴，张贴位置为试件的两端，识别点的圆心距根部约 30 mm，面积为 100mm²，张贴之后便可通过液压万能试验机对试件进行材料试验，同时，DIC 系统在识别点上执行数据收集。通过进行多组材料试验，每组试验对材料分别进行多次张拉，通过多次所得的数据结果进行计算分析，最终得到的试验数据见表 1。

表 1 第一组试件由 DIC 高速摄像机测得的数据

组别	第 n 秒 /(s)	位移差 /(mm)	两标记点 间距/(mm)	应变/ 10 ⁻⁶	施加拉 力/(N)	应力 /(MPa)	弹性模 量/(MPa)	拉伸速度 /(mm·min ⁻¹)
第一组	24	0.045 0	97.934 3	460	9 849.1	98.490 7	214 308	1
	28	0.064 2	97.934 3	655	13 003.0	130.026 0	198 485	1
	32	0.071 0	97.934 3	725	16 116.0	161.162 0	222 297	1
	34	0.074 1	97.934 3	756	17 627.0	176.272 0	233 106	1
	36	0.101 6	97.934 3	1 037	19 098.0	190.981 0	184 082	1
第二组	12	0.025 1	97.943 1	256	4 878.2	48.782 1	190 295	1
	16	0.036 4	97.943 1	372	7 905.0	79.049 9	212 671	1
	18	0.048 7	97.943 1	498	9 491.4	94.913 6	190 698	1
	21	0.057 6	97.943 1	588	11 916.0	119.161 0	202 691	1
	24	0.061 2	97.943 1	625	14 364.0	143.639 0	229 746	1
第三组	20	0.036 9	97.951 2	377	8 417.2	84.172 1	223 433	1
	24	0.053 0	97.951 2	541	11 662.0	116.624 0	215 430	1
	28	0.072 3	97.951 2	738	14 951.0	149.506 0	202 589	1
	32	0.091 1	97.951 2	93	18 256.0	182.558 0	196 244	1
	35	0.104 8	97.951 2	107	20 680.0	206.797 0	193 351	1

如图 4 所示，根据数据分析可以得出，试件的应力-应变曲线在拉伸速度为 1 mm/min 时，测出试件拥有 220 GPa 的弹性模量，285 MPa 的屈服应力以及 435 MPa 的抗拉强度。

2 有限元分析

使用功能强大的工程模拟有限元软件 ABAQUS 进行数值模拟。此软件包含 2 个分析模拟模块，分别为 ABAQUS/Standard 与 ABAQUS/Explicit，两大模块均拥有丰富的材料与单元库，例如静态应力/位移模拟、动态模拟、黏弹性/黏塑性的响应模拟、瞬态温度/位移耦合模拟与海洋工程的模拟分析等。基于本试验类型为冲击试验，所以此试验中的所有模

拟均使用 ABAQUS/Explicit 显式求解器。为克服有限元应力间的不连续现象，使得模拟出的数据结果更加准确且不增加多余的运算流程，需首先进行 MESH 网络的敏感性分析，随后再通过 ABAQUS 软件进行数值模拟的验证。待相关数值模型确定后，对参数执行一系列后续分析。在数值模拟中经过网格分析与对比使用了 R3D4 单元和 C3D8R 单元进行冲击试验的有限元模拟。

3 试验验证

3.1 试验仪器

由于已做上述数值模拟，将试验装置设置成与数值模拟完全相同的加载/约束模式。在进行 ABAQUS 软件模拟时使用材料试验中 DIC 系统所测得的试验数据。当试件受到横向落锤冲击时，窄高梁产生平面外的屈曲行为。通过数值模拟对于试件的垮塌过程进行分析，得到如图 5 所示的数值模拟变形云图。重点研究试件发生屈曲后的各个方向的位移和应变情况，与下一部分通过真实试验所得的数据进行拟合对比和分析。

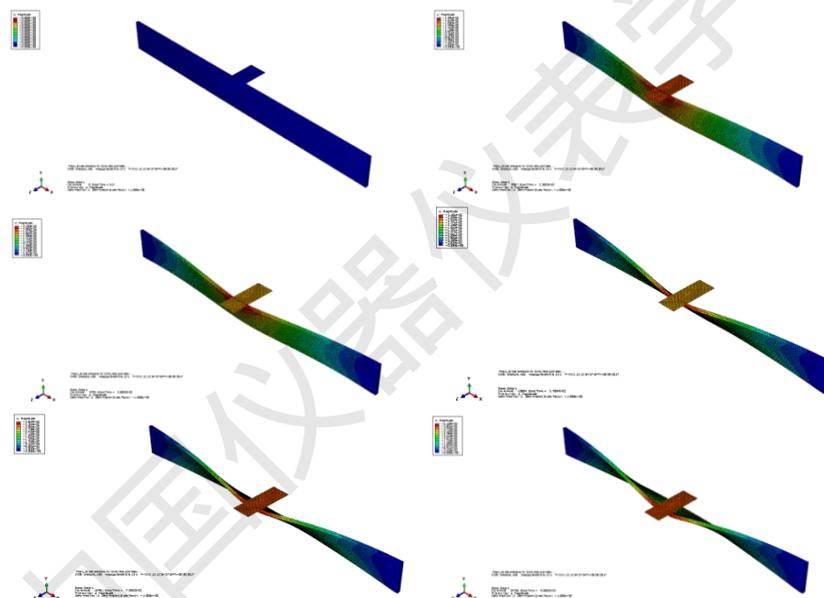
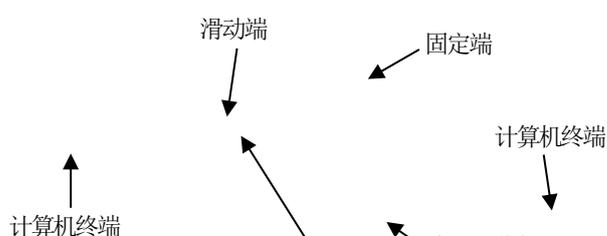


图 5 试件变形云图（间隔时间为 80 ms）

本试验基于山东省土木工程防灾减灾重点实验室建立的落锤系统，该系统与实验室相连，反应壁高 12 m，最大冲击速度 15 m/s，满足低速冲击试验的要求。落锤最大质量 250 kg。通过电磁铁和锤头的配合实现对落锤的控制，落锤通过自由落体以撞击试件引起侧向冲击。此冲击试验中所使用落锤系统的锤头是通过高强碳钢设计加工制成，其锤头形状有多种可替换的样式，便于试验。此试验使用“半圆头形”锤头，由于其设计刚度足够大，默认在整个试验中锤头不发生任何变形，被视为刚体。



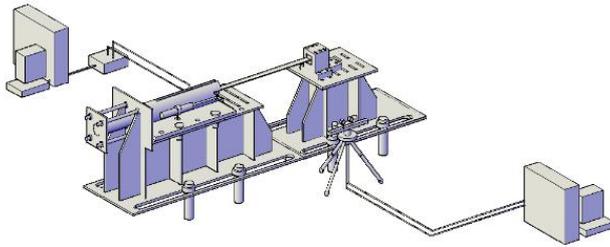


图6 设备组装

图7 试验设备

如图6、图7所示，通过地锚系统组装冲击试验的固定装置，装置位于落锤系统的正下方。左侧固定装置为滑动端（需要时也可设置为固定端），右侧为固定端，落锤的冲击点为试件的中点。在进行冲击试验时，通过 DIC 高速摄像机进行拍摄，对试验中的位移场和应变场进行实时采集，使之与之前的有限元软件模拟所得数据进行拟合。

在整个冲击试验过程中，冲击头（锤头）与试件接触时产生的瞬态冲击力使试件发生侧向与平面外变形。整个过程可准确模拟构件（结构）受冲击荷载至垮塌过程中的真实效应。在试验进行时，位移传感器、荷载传感器、加速度传感器与 DIC 高速摄像机经数据采集系统对整个试件（结构）试验过程中的位移变化、载荷变化、加速度变化与试件构型演变过程进行实时采集记录。所采集的数据为评价试件（结构）的抗塌陷性与建立准确的机械模型提供了有力的数据支撑。

通过遥控落锤自由落体高度的不同，使试验时的冲击头（锤头）与试件接触瞬间的冲击速度不同，进而使得冲击头的冲击能量不同，最终使得试件受到冲击后的轴向位移和垮塌行为不同。

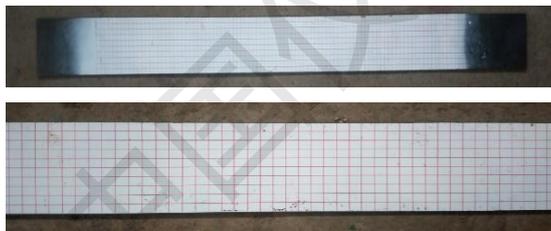


图8 划分网格后的试件



图9 试验后的试件（冲击速度 4.5 m/s）

3.2 试验试件

进行冲击试验的钢板有效长度 1000 mm，宽度 100 mm，厚度 3 mm，由 Q235 钢材料制成。相关材料属性使用 DIC 系统所测数据，即弹性模量为 220 GPa，屈服应力为 285 MPa，抗拉强度为 435 MPa。如图 8 所示，由于 DIC 系统需要借助识别点来进行数据的实时采集，所以在试验之前需要将试件进行网格划分。

图 9 所示为进行冲击试验之后的试件，可以通过肉眼明显地看出试件受冲击后在平面外方向产生位移，其具体变化过程已经通过 DIC 系统实时采集。由图 9 可知，落锤冲击头的冲击速度为 4.5 m/s 时，试件产生平面外弯曲的塑性变形，塑性变形较大。

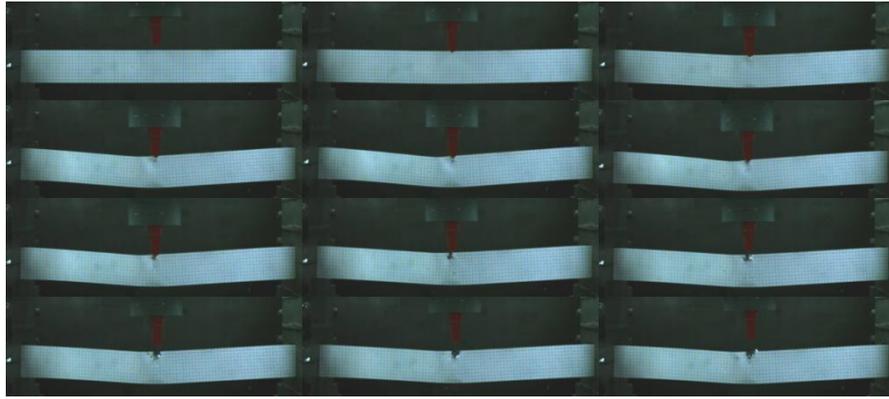


图 10 试验过程中 Photron SAT1.1 型高速摄像机所拍摄的试件受冲击时的照片(时间间隔 40 ms)

3.3 高速摄像机照片

图 10 是在冲击试验进行时的试件 Photron SAT1.1 型高速摄像机提取照片。试验过程已经通过 Photron SAT1.1 型高速摄像机进行抓取，设置其拍照速率为 1/2000 SEC，按照在整个撞击过程中所拍摄的照片内每 15 张选取 1 张的频率进行选取，最终在试验的整个过程中选取图 10 所示的 12 张照片即可完整描述冲击过程。

通过 DIC 系统测得试件的网格根据“并型变形叠加法”计算试件跨中位移的变形情况以及试件的平面外变形状况。“并型变形叠加法”通常是在初始状态条件下，忽略试件的不同位置在受到冲击时互相扰动与影响的关系。计算公式见式 (1)，通过针对距离冲击作用点不同位置的细小单元观测点进行独立的动力学计算分析，提取各测点单次冲击所测得的塑性变形实施线性叠加，得出最终各测点的总变形值。

$$U_s(n, m) = \sum_{i=1}^n [u(i, m) - u_t(i, m)] = \sum_{i=1}^n u_s(i, m) \quad (1)$$

式中： $u(i, m)$ ， $u_t(i, m)$ ， $u_s(i, m)$ 分别表示在*i*位置处的第*m*个点发生冲击运动时的总变形量、弹性变形、塑性变形； $U_s(n, m)$ 表示第*m*个点在位置为*n*处冲击后的总塑性变形值。

通常来说，“并型变形叠加法”可独立单独、同时地进行不同位置的运算操作，所以此方法可极大地提高运算效率（为避免得出较大的误差，此方法只适合进行小变形的累积计算）。

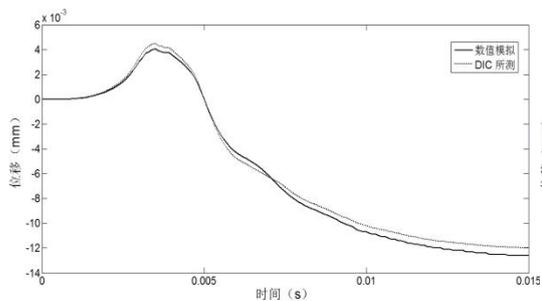


图 11 Y 方向位移-时间曲线

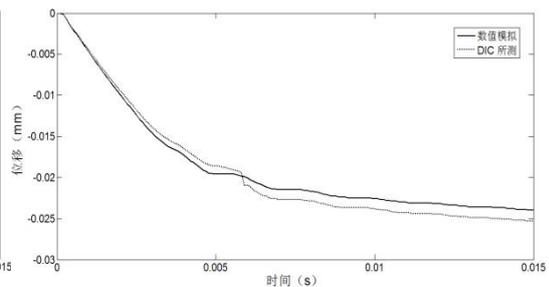


图 12 Z 方向位移-时间曲线

4 讨论

通过第 2 部分的数值模拟分析和汇总可以得出通过 ABAQUS 模拟输出的位移-时间图像, 又通过第 3 部分的具体真实试验的数据处理和分析可以得出 DIC 真实测量的位移变化, 即可将其进行比较分析。在材料性能与初始条件完全相同的情况下, 可得如图 11 和图 12 所示的 Y 方向和 Z 方向的试件位移随时间的变化拟合曲线。

通过 DIC 系统与数值模拟的方法对落锤集中冲击下钢片的瞬态动力响应进行分析对比拟合, 并根据试件的位移等变化, 得到钢片的响应机理, 发现 DIC 高速摄像系统可极好地完成所需测量。

5 结束语

通过 DIC 系统进行了试件的材料试验, 得到相应数据, 对其数据进行有限元模拟分析, 将模拟所得的数据与 DIC 系统在实际冲击过程中的测得数据进行比较, 并进行数据拟合分析, 发现通过 DIC 系统测试获得的位移与 ABAQUS 的数值模拟非常一致。也就是说, 在普通测试中, 可以通过液压万能材料试验机与 DIC 高速摄像机配合进行试件的材料试验, 并且在冲击试验中很好地完成所需瞬态位移场、应变场的测量, 以此为基础可以分析典型爆炸与冲击作用下材料的变形破坏现象和相关机理。

参考文献:

- [1] JONES N.Structural impact[M].Cambridge: Cambridge University Press,1989:408-415.
- [2] JOHNSON W.Impact strength of material[M].New York: Edward,1972:271-278.
- [3] 项大林, 荣吉利, 何轩, 等.基于三维数字图像相关方法的水下冲击载荷作用下铝板动力学响应研究[J].兵工学报, 2014, 35(8): 1210-1217.
- [4] XIANG Da-lin,RONG Ji-li,HE Xuan,et al.Dynamics analysis of Al plate subjected to underwater impulsive loads based on 3D DIC[J].Acta Armamentarii, 2014, 35(8): 1210-1217.(in Chinese)
- [5] 单宝华, 霍晓洋, 刘洋.张正友标定法在 DIC 位移测量中的应用[J].实验室研究与探索, 2016, 35 (2): 8-12,21.
- [6] SHAN Bao-hua, HUO Xiao-yang, LIU Yang.Application of Zhang's calibration algorithm in teaching experiment of DIC displacement measurement[J].Research and Exploration in Laboratory,2016,35(2): 8-12,21. (in Chinese)
- [7] 陈亚军, 孙胜洁, 季春明.三维数字图像相关技术(3D-DIC)在材料形变研究中的应用进展[J].航空材料学报,2017,37(4): 90-100.
- [8] CHEN Ya-jun,SUN Sheng-jie,JI Chun-ming.Development and application of 3D digital image correlation (3D-DIC) in deformation measurement of materials[J].Journal of Aeronautical Materials,2017,37(4): 90-100. (in Chinese)
- [9] 范亚夫, 魏延鹏, 薛跃军, 等.数字图像相关测试技术在霍普金森杆加载实验中的应用

- [J].实验力学, 2015, 30(5): 590-598.
- [10] FAN Ya-fu,WEI Yan-peng, XUE Yue-jun,et al.On the application of digital image correlation testing technology in Hopkinson bar loading[J].Journal of Experimental Mechanics,2015,30(5): 590-598 . (in Chinese)
- [11] 严成增, 郑宏, 孙冠华, 等.基于数字图像技术的岩土材料有限元-离散元分析[J].岩土力学, 2014, 35(8): 2408-2414.
- [12] YAN Cheng-zeng,ZHENG Hong,SUN Guan-hua,et al.FDEM of geomaterials based on digital image technology[J].Rock and Soil Mechanics,2014,35(8): 2408-2414. (in Chinese)
- [13] 高翔, 梁栋, 陈璐.简支 T 梁在爆炸冲击下的损伤研究[J].青岛理工大学学报, 2016, 37(5): 26-31.
- [14] GAO Xiang, LIANG Dong, CHEN Lu.Analysis of simply supported t beam damage under explosion load[J].Journal of Qingdao University of Technology,2016,37(5): 26-31. (in Chinese)
- [15] 赵燕茹, 郝松, 王磊, 等.基于数字图像相关的钢纤维增强水泥基复合材料的冲击损伤特性[J].复合材料学报, 2018, 35(5): 1325-1331.
- [16] ZHAO Yan-ru,HAO Song,WANG Lei,et al.Impact damage characteristics of steel fiber reinforced cement matrix composites based on digital image correlation[J].Acta Materiae Compositae Sinica, 2018, 35(5) 1325-1331. (in Chinese)
- [17] 代树红, 马胜利, 潘一山.数字图像相关法测定岩石I-II复合型裂纹应力强度因子[J].岩土工程学报,2013,35(7):1362-1368.
- [18] DAI Shu-hong,MA Sheng-li,PAN Yi-shan.Evaluation of mixed-mode I-IIstress intensity factors of rock utilizing digital image correlation method[J].Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2013, 35(7): 1362-1368. (in Chinese)
- [19] 雷冬, 乔丕忠, 李昂, 等.岩石动力破坏的高速数字图像相关研究[J].煤炭学报, 2011,36(S2):274-277.
- [20] LEI Dong,QIAO Pi-zhong,LI Ang.High-speed digital image correlation studies for dynamic damage of rock[J].Journal of China Coal Society, 2011, 36(S2): 274-277. (in Chinese)