

# 基于放矿下临界散体柱理论的地表塌陷范围预测

刘 洋, 任凤玉, 何荣兴, 曹建立

(东北大学 资源与土木工程学院, 辽宁 沈阳 110819)

**摘 要:** 临界散体柱理论是通过散体侧压力来确定临界散体柱的高度,从而预测地表塌陷范围. 以往散体侧压力的测试未考虑井下放矿对散体侧压力的影响,导致预测不准确. 因此利用散体侧压力测试系统对流动散体侧压力进行了实验. 通过对比散体侧压力的变化曲线,得出放矿过程对散体侧压力的影响. 结果表明: 下部放矿,仅对放矿口区域附近的散体侧压力产生影响,且影响范围较小,随着散体的沉实,散体侧压力将会进一步增大. 同时结合古典杨森理论和临界散体柱理论,推导出在放矿情况下临界散体柱高度的计算方法;结合陷落角与采深的关系,为预测地表塌陷范围提供相关参考.

**关 键 词:** 临界散体柱理论;散体侧压力;地表塌陷范围;实验研究;临界散体柱高度;放矿

**中图分类号:** TD 853.391+2      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1005-3026(2018)03-0416-05

## Prediction of Surface Subsidence Range Based on the Critical Medium Column's Theory Under Ore Drawing

LIU Yang, REN Feng-yu, HE Rong-xing, CAO Jian-li

(School of Resources & Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China. Corresponding author: HE Rong-xing, E-mail: herongxing@mail.neu.edu.cn)

**Abstract:** The critical medium column's theory is used to determine critical medium column's height using lateral pressure and predict surface subsidence range. Past lateral pressure tests usually lead to inaccurate forecasts without considering the influence of ore drawing on lateral pressure. So an experimental test on lateral pressure of bulk-solid medium was performed to measure the lateral pressure under ore drawing, and the effects of releasing bulk-solid medium on lateral pressure were got through the comparisons among the different heights. The result shows that the lateral pressure is effected at the vicinity of drawing hole under ore drawing, and the effects' range is little by releasing bulk-solid and lateral pressure increases with the consolidation of bulk-solid medium. Combined the critical medium column's theory and the classical Janssen theory, the calculation of the critical medium column's height under the effect of ore drawing was obtained. Then considered the relationship between mining height and the disturbed angle, reference for prediction of surface subsidence range was provided.

**Key words:** critical medium column's theory; lateral pressure; surface subsidence range; experimental study; critical medium column's height; ore drawing

金属矿床地下开采中,合理确定地表塌陷范围,对于优化总图布置、保障生产安全、降低生产成本等意义重大<sup>[1-3]</sup>. 目前,地表塌陷范围预测最广泛的方法是棱柱体理论与弧板体理论<sup>[4-5]</sup>. 棱柱体理论是采用固定错动角的方式预测塌陷范围,地表塌陷范围随采深增加而扩大,导致理论圈

定的范围要远大于矿山实际的塌陷范围. 为了弥补棱柱体理论的不足,弧板体理论指出在开采达到一定采深后,陷落体变为弧面滑落,使得地表陷落范围不再随采深的增加而扩大. 由于该理论没有给出具体的计算方法,限制了它在现场的应用. 任凤玉教授等提出临界散体柱理论<sup>[6]</sup>,即塌陷坑

内散体存在一个临界高度,临界高度内的岩体不发生移动,在临界高度之上以固定错动角的方式预测塌陷范围. 理论研究主要考虑了散体侧向支撑的作用,缩小了预测值和实际值的差距,解决了深部开采中预测塌陷范围的难题,并在弓长岭井下矿和西石门铁矿的应用中取得了成功. 由于临界散体柱的高度是根据静止状态下散体侧压力推导出来的,没有考虑到井下放矿对散体侧压力的影响,同时也未能给出预测塌陷范围的具体算式.

本文在临界散体柱理论的研究基础上,开展放矿情况下散体侧压力实验,讨论了在放矿条件下不同高度散体侧压力的变化趋势,同时结合临界散体柱理论提出了在放矿条件下临界散体柱高度的计算公式. 结合陷落角与采深的关系式,提出地表塌陷范围的预测方法.

### 1 理论分析

将散体连续化处理后,在极限平衡状态下,古典杨森理论的垂直压力分布的表达式为<sup>[7]</sup>

$$p = \frac{\gamma S_a}{fC_a} [1 - e^{-\frac{fKC_a}{S_a}z}]. \tag{1}$$

式中: $\gamma$  为充填散体的重度,  $N \cdot m^{-3}$ ;  $S$  是类料仓水平投影面积,  $m^2$ ;  $f$  为散体与侧壁的摩擦系数,  $f = \tan\phi$ ,  $\phi$  为散体与侧壁的摩擦角;  $C$  是类料仓水平投影周长,  $m$ ;  $z$  为散体的垂深,  $m$ ;  $K$  为充填散体的侧压力系数,  $K = \frac{1 - \sin\theta}{1 + \sin\theta}$ ,  $\theta$  为散粒体之间的内摩擦角;  $p$  是类料仓边壁所受平均侧压力,  $Pa$ .

依据临界散体柱理论,当塌陷坑内散体柱达到临界高度时,可以提供足够大的侧压力,以控制岩石片落. 并根据矿山实际情况和数值模拟,得到控制塌陷坑侧壁片落的侧压力. 静止状态下的临界散体柱高度的计算公式如下:

$$H_0 = H - \frac{S_a \ln \frac{\gamma S_a}{\gamma S_a - p_a f C_a}}{f K C_a}. \tag{2}$$

式中: $H$  为塌陷坑的深度,  $m$ ;  $S_a$  是塌陷坑水平投影面积,  $m^2$ ;  $C_a$  是塌陷坑水平投影周长,  $m$ ;  $H_0$  为临界散体柱的高度,  $m$ ;  $p_a$  是控制塌陷坑侧壁片落所需的最小侧压力,  $Pa$ .

由于式(1)中侧压力没有考虑井下放矿对散体侧压力的影响,导致得出的临界散体柱高度不准确. 因此,设计了散体侧压力实验,采用散体颗粒流动侧向压力测试系统测试散体移动过程中的侧压力,通过对放矿情况下散体侧压力变化趋势

的分析,得出散体侧压力的分布规律. 然后推导出临界散体柱高度的计算公式,最后依据陷落角与采深的关系推导出地表塌陷范围的预测方法.

### 2 实验设备和原理

#### 2.1 实验系统与实验原理

本次实验采用吉林省金力试验技术有限公司和东北大学共同设计的散体颗粒流动侧向压力测试系统进行数据采集(见图1). 测试系统由放矿设备和数据采集软件组成. 采用1:100的相似比设计放矿设备,放矿设备由8块长60 cm,高13 cm,前后两侧间距30 cm的钢板组成(见图2). 每块钢板中心安装传感器,并连接至计算机,用以测量钢板所受的轴向压应力. 靠近放矿口一侧安装支撑杆,可以借此调整实验设备倾角,在设备最下端开设1#~5#放矿口,放矿口尺寸为3 cm×3 cm.

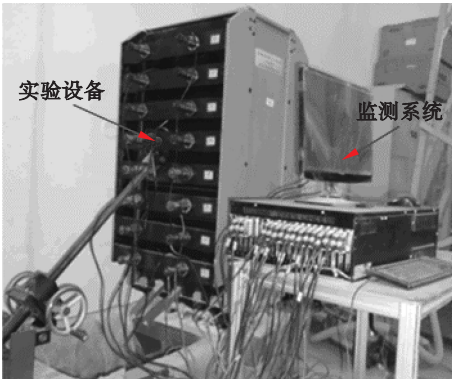


图1 散体颗粒流动侧向压力实验设备  
Fig. 1 Granular lateral pressure experimental equipment

在散体释放和装填的过程中,由于两侧钢板限制和散体移动,散体侧压力发生变化,传感器内的应力片受到散体侧压力的作用产生变形并改变电流信号,数据传输装置将信号传递给数据收集软件,软件接收传感器的电流信号并计算显示出散体侧压力的数值.

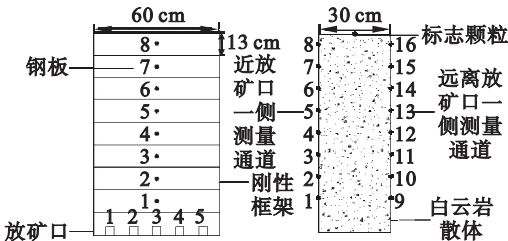


图2 实验装置及测点位置示意图  
Fig. 2 Diagram of experimental facility and measuring point position

2.2 实验过程

出于对散体流动性和放矿口出矿便利的考虑,实验用的散体材料是粒径为 3~5 mm 的白云岩.考虑井下放矿的情况,采取 1#~5#放矿口均匀放矿.将传感器、数据传输装置和电脑依次相连接,并将数据采集软件安装在电脑上.实验前,对压阻式压力传感器和侧向压力测试系统进行清零和校准工作,并将实验设备倾角调整至 90°.先将放矿口堵住,再向模型装填散体颗粒,直至装满模型为止,装填的总质量为 382.32 kg.装填完成后,将标志颗粒放置在表面中心位置,记录装填完成后的初始值.依次打开 1#~5#放矿口,单口单次放矿质量为 1 kg 左右,放完后回填进系统,并采集各通道散体侧压力,直至标志颗粒放出为止.

3 实验结果与分析

根据各通道初始值,可以得出静止时不同深度的散体侧压力数值,深度较小时,散体侧压力值增长速率较快,随着高度的增加,散体侧压力值增长速率逐渐减小,最终趋于稳定值.随着高度的增加,散体逐渐被压实,颗粒间摩擦系数逐步增大,

导致侧压力值增长系数逐渐减小<sup>[7-8]</sup>.

根据散体侧压力随放矿质量的变化关系绘制出图 3,近放矿口一侧,CH1~CH2 在散体放出回填过程中所测的数值呈直线增长;CH3~CH4 测得的散体侧压力数值先是缓慢下降,随着散体继续放出,侧压力缓慢升高;CH5 侧压力随着散体的放出稳定增大;CH6~CH8 侧压力缓慢波动,整体变化质量很小;远离放矿口一侧,CH9~CH10 侧压力随散体放出而减小,放出质量至 70 kg 左右时,侧压力开始稳定波动;CH11~CH12 侧压力随散体的放出,变化复杂,可分为 3~4 个阶段:在放出质量为 0~10 kg 过程中,侧压力降低至最低值,继续放出,CH12 通道侧压力值开始反弹,在放出质量为 70 kg 左右时,侧压力达到峰值,随散体继续放出,侧压力又开始缓慢下降,至放出质量达 120 kg 左右,侧压力重新开始缓慢波动,总体呈上升趋势.而 CH11 侧压力在放出质量为 10~120 kg过程中稳定波动,散体继续放出侧压力缓慢波动,总体呈上升趋势;CH13~CH15 侧压力随散体放出变化规律一致,放出质量在 0~45 kg 过程中,散体侧压力增加,继续放出,散体侧压力缓慢波动,总体呈基本不变的趋势.

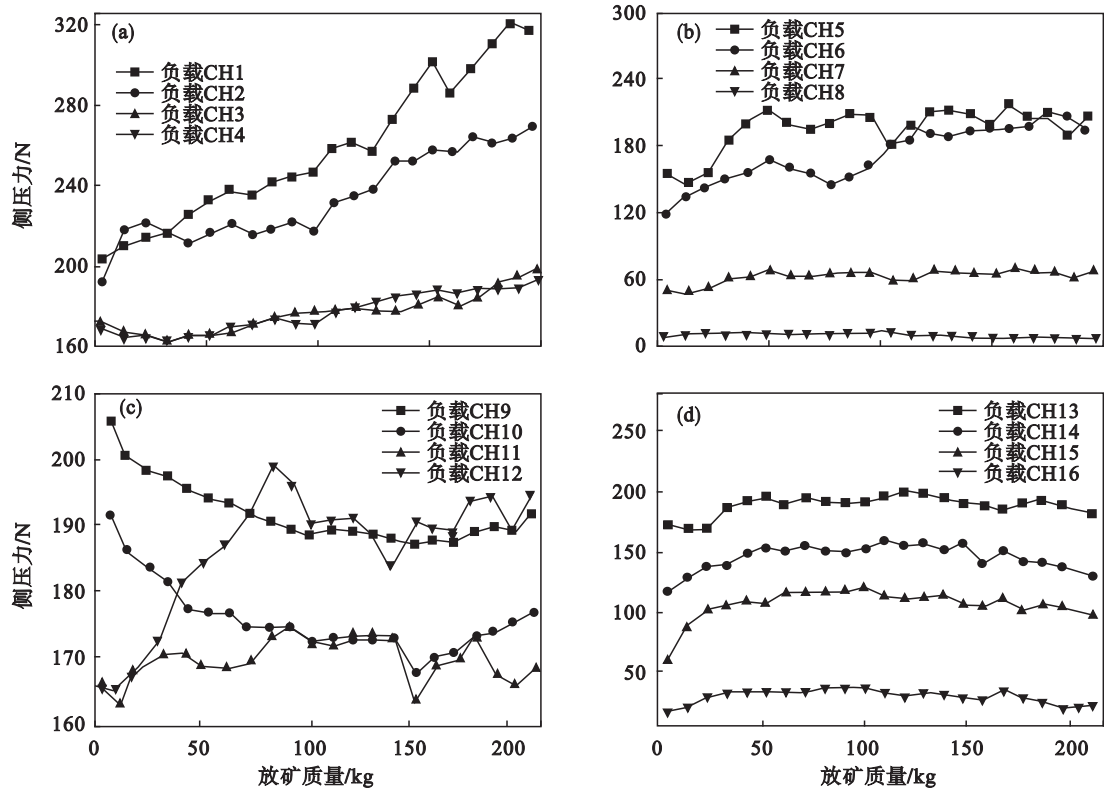


图 3 散体侧压力与放矿质量关系图  
Fig. 3 Relationship between lateral pressure and ore drawing mass  
(a)—负载 CH1~CH4 关系图; (b)—负载 CH5~CH8 关系图;  
(c)—负载 CH9~CH12 关系图; (d)—负载 CH13~CH16 关系图.

在放矿过程中,散体保持连续下移.散体由近向远发生松动,松动体内散体较之前更为松散,散体与侧壁摩擦系数变小,从而导致 CH1 ~ CH2 所测的散体侧压力值逐渐增大;在松动体以上散体缓慢移动并沉实,使得摩擦系数变大,随着散体层面的升高,摩擦系数又逐渐变小,造成了 CH3 ~ CH4 所测的散体侧压力值先减小后增大的现象;最终散体的移动迹线几乎与侧壁平行,平行流动的散体一直保持对边壁的侧压力,使得离放矿口较远的 CH5 ~ CH8 所测的散体侧压力值缓慢增加;在背离放矿口一侧,CH9 ~ CH10 距离松散体较近,受到上部散体的挤压而导致摩擦系数变大,使得所测散体侧压力值逐步减小;在 CH13 ~ CH15 通道处,散体的移动迹线几乎与侧壁平行,附近散体移动较少,因此所测得的散体侧压力值

基本不变.通过分析可以得出,下部放矿只在初期对近放矿口区域附近的散体侧压力产生影响,且影响范围较小,随着散体的沉实,散体侧压力将会进一步增大.

根据实验结果,可知只有 CH9 和 CH10 通道的散体侧压力受到井下放矿的影响,侧压力值变小.为了得到放矿情况下临界散体柱高度的计算公式,将 CH9 和 CH10 通道所测的散体侧压力数值进行数据拟合.当放矿质量超过 155 kg 时,CH9 ~ CH10 通道所测的散体侧压力均有上升的趋势,是由于随着放矿和回填次数的增多,下部散体逐渐沉实,所产生的侧压力逐步增大.本文出于对安全和矿山情况的考虑,采用放矿质量小于 155 kg 的数据进行拟合(见图 4).

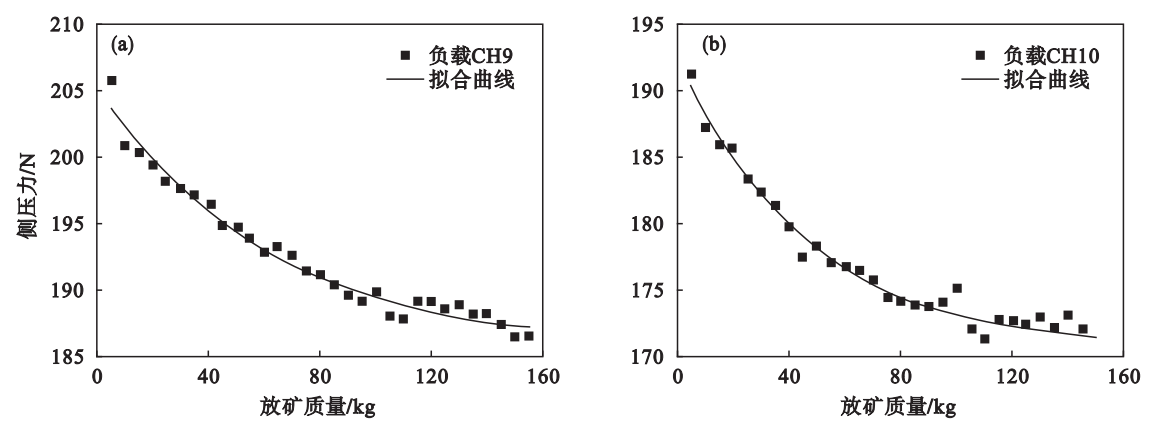


图 4 数据拟合图  
Fig. 4 Drawing of data fitting  
(a)—负载 CH9 拟合曲线图; (b)—负载 CH10 拟合曲线图.

对 2 个通道所测的散体侧压力值进行数值拟合,得到的计算公式分别为

$$\frac{F_1}{S} = \frac{\gamma S_a}{fC_a} \left[ 1 - e^{-\frac{fKC_a}{S_a}z} \right] \cdot [0.92 + 0.097 \cdot (0.98409)^m], \quad (3)$$

$$\frac{F_2}{S} = \frac{\gamma S_a}{fC_a} \left[ 1 - e^{-\frac{fKC_a}{S_a}z} \right] \cdot [0.89 + 0.114 \cdot (0.97852)^m]. \quad (4)$$

式中:  $F_1$  是 CH9 所测散体侧压力, kN;  $F_2$  是 CH10 所测散体侧压力, kN;  $m$  是放矿质量, kg;  $S$  是传感器上传感片的面积,  $m^2$ . 将 CH10 所测散体侧压力数值减去原来静止压力所得到的数据作为自变量, CH9 所测散体侧压力数值减去原来静止压力所得到的数据作为因变量,进行线性拟合,得出关系图如图 5 所示.

得出的拟合算式为

$$y = 0.84556 \cdot x - 8 \cdot e^{-4}. \quad (5)$$

式中:  $y$  是 CH9 所测散体侧压力的变化值, kN;  $x$  是 CH10 所测散体侧压力的变化值, kN.

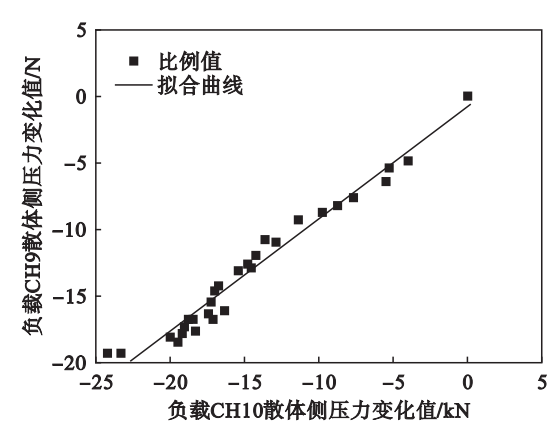


图 5 不同高度散体侧压力变化对比图  
Fig. 5 Comparison of different heights' lateral pressure

通过式(5)可知,CH10 所测的散体侧压力的变化率要远大于 CH9 所测数值的变化率.为了简



化式(2)和保障矿山安全,以 CH10 所测的散体侧压力的变化趋势为依据,推导在放矿情况下临界散体柱高度的计算公式.根据式(4),临界散体柱高度处的散体侧压力函数是一个减函数,存在最大值和最小值.从安全角度考虑,取散体侧压力最小值作为推导值,临界散体柱高度处的散体侧压力函数简化为

$$p=0.928\cdot\frac{\gamma S_a}{fC_a}[1-e^{-\frac{fKC_a}{S_a}z}].\tag{6}$$

结合临界散体柱的实际物理意义,可以推导出临界散体柱高度的具体计算公式为

$$H_0=H-\frac{S_a\cdot\ln(1-\frac{0.928\gamma S_a}{p_a\cdot fC_a})}{fKC_a}.\tag{7}$$

从式(7)可知,临界散体柱高度主要决定于

$$r=\frac{(H\cot\alpha+H\cot\beta-H_0\cot\alpha)\cdot[HfKC_a-S_a\cdot\ln(1-\frac{0.928\gamma S_a}{p_a\cdot fC_a})]}{H_0fKC_a}.\tag{9}$$

式中  $r$  为塌陷范围半径, m.

4 结 论

1) 提出测试不同高度散体侧压力的实验方案,开发了测试系统,设计了实验设备.在不断放出和充填散体的过程中测试不同高度的散体侧压力数值.

2) 实验结果表明:下部放矿,仅对放矿口区域附近的散体侧压力产生影响,且影响范围较小,随着散体的沉实,散体侧压力将会进一步增大.

3) 通过对产生影响的区域进行数据拟合,并结合临界散体柱理论的实际意义,得出放矿情况下临界散体柱高度的计算方法.同时将陷落角与采深的关系式相结合,为预测地表塌陷范围提供了参考.

参考文献:

[ 1 ] Lupo J F. Progressive failure of hanging wall and footwall Kiirunavaara mine, Sweden [ J ]. *International Journal of Rock Mechanical Mine Sciences*,1997,34(3/4):684.  
[ 2 ] Yang F, Ma F. Simulation on range of surface subsidence in worked-out section by discrete element method [ J ]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*,2005,15 (sup1):128-131.  
[ 3 ] 解世俊.金属矿床地下开采[M].北京:冶金工业出版社,1986:42-46.

围岩自身强度和充填散体的物理性质.其中,  $p_a$  可以使用 FLAC3D 有限元模拟软件获得<sup>[9]</sup>或根据现场实际测出.通过式(7)和矿山现场应用,可以准确地确定出临界散体柱的高度.根据实验结果得出随着充填工作的进行,散体侧压力会有不同程度的上升,可以保证在井下放矿不会对地表塌陷区产生影响.

陷落角与采深的关系式<sup>[10]</sup>为

$$\beta=\arctan(\frac{H}{H_0(\cot\alpha+\cot\beta_0)-H\cdot\cot\alpha})\tag{8}$$

式中:  $\beta$  是陷落角, °;  $\alpha$  是矿体倾角, °;  $\beta_0$  是岩体错动角, °.

因此可以得出放矿情况下临界散体柱预测地表塌陷范围的计算式为

(Xie Shi-jun. Metal deposit mining under ground [ M ]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1986: 42-46. )  
[ 4 ] Cruden D M. Rock slope movement in the Canadian cordillera[ J ]. *Canadian Geotechnical Journal*,1985,22(4): 528-540.  
[ 5 ] Cruden D M, Hu X Q. Hazardous modes of rock slope movement in the Canadian rockies [ J ]. *Environmental & Engineering Geoscience*,1996,2(4):507-516.  
[ 6 ] 李海英,任凤玉,陈晓云,等.深部开采陷落范围的预测与控制方法[ J ].东北大学学报(自然科学版),2012,33 (11):1624-1627.  
(Li Hai-ying, Ren Feng-yu, Chen Xiao-yun, et al. The method for predicting and controlling the range of surface subsidence during deep ore-body mining [ J ]. *Journal of Northeastern University ( Natural Science )*, 2012, 33 ( 11 ): 1624-1627. )  
[ 7 ] Brown R L, Richards J C. Kinematics of the flow of dry powders and bulk solids[ J ]. *Rheologica Acta*,1965,4(3): 153-165.  
[ 8 ] Stepanoff A J. Gravity flow of bulk solids and transportation of solids in suspension[ M ]. Hoboken: Wiley, 1969.  
[ 9 ] Yasitli N E. Numerical modeling of surface settlements at the transition zone excavated by new Austrian tunneling method and umbrella arch method in weak rock[ J ]. *Arabian Journal of Geosciences*,2013,6(7):2699-2708.  
[ 10 ] 王燕.弓长岭铁矿东南区露天井下协同开采技术研究[ D ].沈阳:东北大学,2013.  
(Wang Yan. Technologies for coordinated mining of open-pit and underground mining at southeastern of Gongchangling iron mine[ D ]. Shenyang: Northeastern University, 2013. )