

doi: 10.12068/j.issn.1005-3026.2019.03.020

有限宽度崩落矿岩散体侧压力分布规律

何荣兴, 任凤玉, 谭宝会, 刘 洋
(东北大学 资源与土木工程学院, 辽宁 沈阳 110819)

摘 要: 金属矿山崩落矿岩散体侧压力对支撑围岩和控制岩体移动具有不可忽视的作用. 采用散体颗粒流侧向压力测试实验系统, 以弓长岭铁矿崩落矿石为例, 研究有限宽度散体崩落矿岩侧压力分布规律: 散体静止侧压力随散体埋深的增加呈非线性增加趋势, 并基于量纲和谐原理回归散体侧压力随埋深和角度的变化计算式; 在无散体回填工况下, 散体侧压力随散体放出量的增加而减小, 增加散体放出范围, 可加速散体侧压力下降速度; 在散体回填工况条件下, 以模型中间为界, 随着散体放出, 下部4个测点侧压力值降低, 上部4个测点侧压力值升高. 上盘侧散体侧压力总体受放矿流动的影响不明显, 放矿开始后的突变量也要明显小于下盘侧压力, 即在散体补充条件下, 散体放出对散体侧压力的影响范围在高度和宽度上都是有限的. 该成果对揭示散体承压机理, 开发崩落矿岩散体在矿山工程中的应用具有指导意义.

关 键 词: 崩落; 岩体移动; 散体侧压力; 朗肯土压力; 古典杨森理论

中图分类号: TD 315.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-3026(2019)03-0409-05

Distribution Law of Granular Lateral Pressure in Caved Ore-Rock with Limited Width

HE Rong-xing, REN Feng-yu, TAN Bao-hui, LIU Yang
(School of Resources & Civil Engineering, Shenyang 110819, China. Corresponding author: HE Rong-xing, E-mail: herongxing@mail.neu.edu.cn)

Abstract: The lateral pressure of caved ore-rock in metal mine has a significant effect on supporting the surrounding rock and controlling the rock mass movement. Taken the caved ore in Gongchangling Iron Mine as an example, the distribution law of the granular lateral pressure in the caved ore-rock with the limited width was studied. The experiment results show that the static lateral pressure was nonlinear increase with granular buried depth increase, the formula of granular pressure changed with buried depth and angle was obtained by regression based on the theory of dimensional harmonious principle. In the case of no backfill, the granular lateral pressure decreases with the increase of the discharge amount, the range of drawing increasing can accelerate the decreased speed of granular lateral pressure. The pressure values of the lower four measuring points decrease with the drawing amount, and the pressure values of the upper four measuring points increase. The break variable of lateral pressure at hanging wall is lower than the value at footwall, and the drawing amount has less influence on the lateral pressure of hanging wall. That is to say that the drawing amount has limited influence range on the granular lateral pressure in height and width under the condition of backfill. This achievement has guiding significance for revealing the pressure bearing mechanism and application in the mine engineering of granular.

Key words: caving; rock mass displacement; granular lateral pressure; Rankine earth pressure; classical Janssen theory

金属矿床地下开采是将矿体破碎成散体采出, 形成的采空区部分被崩落的围岩、充填料充

填,岩体与崩落围岩散体相互挤压,崩落矿岩侧压力对支撑围岩和控制岩体移动具有不可忽视的作用.例如,浅孔留矿法大放矿过程中,上盘围岩失去支撑而发生片落,增加矿石二次贫化;另外,我国金属矿山地下开采广泛应用固定移动角来预测地表陷落范围,由于采空区内崩落岩石散体作用于围岩边壁,抑制边壁岩体片落,导致岩体实际移动范围往往要小于预测范围.目前,散体侧压力研究多采用土力学中经典的朗肯土压力、库伦土压力理论、古典杨森理论^[1-6],崩落矿岩散体形状复杂,粒径分布极不均匀,与传统侧压力理论的研究对象差别很大,因此,崩落矿岩散体的侧压力分布规律,以及移动散体侧压力变化规律有待进一步研究.本文根据弓长岭铁矿崩落矿岩粒度组成,制备白云岩颗粒相似散体,利用散体颗粒流侧向压力测试系统在有、无散体补充两种工况条件下开展侧压力实验研究,分析静止状态散体侧压力随角度和深度的变化规律,回归散体主动侧压力关系式;并分析不同放矿条件下的上、下盘散体侧压力变化规律,对揭示散体承压机理,开发崩落矿岩散体在矿山工程中的应用具有指导意义.

1 散体侧压力实验原理和实验设备

1.1 侧压力实验原理和实验系统

本次侧压力实验采用散体颗粒流动侧向压力测试系统,该系统由实验装置和监测软件系统两部分构成(图 1). 承装散体容器左右两侧分别由 8 块长 60 cm,高 13 cm 的钢板组成,每块钢板外边缘有 2 个光滑的轴与外框架固定,钢板靠轴杆

和框架支撑,钢板与框架之间连接 CSF-1A 位移传感器,光滑轴杆可使钢板所受的散体侧压力完全传递至传感器,侧压力通过数据线传至监测主机,通过软件实现可视化并进行相关操作. 靠近放矿口一侧设有调整散体容器倾角的支撑杆,装置可以在 50°~90°之间调整,模拟矿体不同倾角,承装散体容器底部有 5 个 3 cm×3 cm 放矿口,从左向右依次编号 1[#]~5[#],可以测量散体放出过程中的侧压力变化.

首先启动硬件调零程序,在确定传感器不受力的情况下,点击对应通道的“置硬件零点”按钮,设定并保存设备零点. 然后打开软件界面,进行软件调零. 侧压力采集可分为人工采集和自动采集:点击工具栏上的“采集”按钮,软件将记录所有测量通道的实测数值,并作为一条采集记录在软件界面显示;数据采集结束后,点击工具栏上的“保存”按钮,设定保存路径,点击“保存”按钮,保存的数据文件可使用 Excel 打开、查看.

1.2 实验散体制备和实验方案

矿山崩落矿岩的粒径分布范围广,实验以弓长岭铁矿崩落矿岩散体为例,其粒径分布见表 1. 按照粗粒土材料压缩实验的研究成果,颗粒粒径要小于仪器直径的 1/5,为满足室内实验要求,采用多种粒径的白云岩按照 1:100 的相似比配制相似散体^[7],粒径小于 0.5 mm 的散体占 10%,粒径为 1~3 mm 的散体占 50%,粒径为 3~6 mm 的散体占 15%,粒径为 8~10 mm 的散体占 20%,粒径大于 10 mm 的散体占 5%,相似散体的自然安息角和孔隙率分别为 23°和 45.5%.

表 1 弓长岭铁矿崩落矿岩块度组成
Table 1 Gradation of caved ore-rock in Gongchangling Iron Mine

序号	岩石块度/mm	配比/%
1	$d \leq 50$	20~25
2	$50 < d \leq 300$	50~60
3	$300 < d \leq 1\,000$	10~24
4	$1\,000 < d$	5~6

将实验设备调整至 90°,分层装填,每装填一层散体,手动采集一次侧压力,得到静止状态下不同高度散体的侧压力分布规律;底部放矿口放出散体,每次放矿在 2 kg 左右,每次放矿后采集侧压力数据,并将散体回填至系统,使系统顶面保持原有平面位置,回填后再次采集数据. 实验结束后,调整倾角至 85°,80°,重复上述实验过程,获得不同倾角条件下的静止和移动散体侧压力分布和变化规律.



图 1 散体颗粒流动侧向压力测试系统
Fig. 1 Test system of granular lateral pressure

2 散体侧压力分布规律分析

2.1 静止散体侧压力分布规律

散体每装填一层随即采集一次侧压力,导致同一组实验中可以获得多个对应某一埋深下的散体侧压力值,文中采用平均值表征该埋深下的侧压力.图 2 为不同埋深和角度条件下的上盘散体侧压力变化曲线,从图中可以看出散体主动侧压力随深度的增加而增加,增加幅度随深度增加而减小,呈非线性关系,相同埋深下的侧压力值随角度的减小而减小.

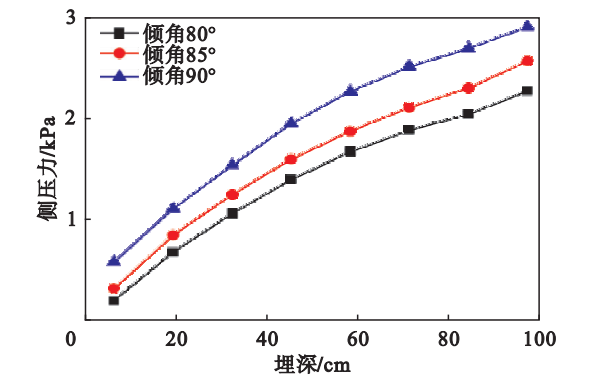


图 2 不同角度下散体侧压力随深度的变化关系
Fig. 2 Variation of granular lateral pressure in hanging wall with depth in different angles

将 80°倾角条件下获得的侧压力数据(装填密度为 1.815 g/cm³)与理论计算结果相比较,如图 3 所示.库伦理论^[2]和极限平衡应力圆^[8]都是以固定的侧压力系数来计算侧压力的,得出的侧压力是 1 条直线,实验测得的侧压力值要小于两种理论的计算值,随着散体埋深增加,侧压力计算值与实验值的差值增大.改进的杨森理论^[7]求得的侧压力也要略大于实验值,但随埋深增加,两者侧压力的变化趋势近似.因此,在实际生产中可采用改进的杨森理论近似估算散体侧压力.

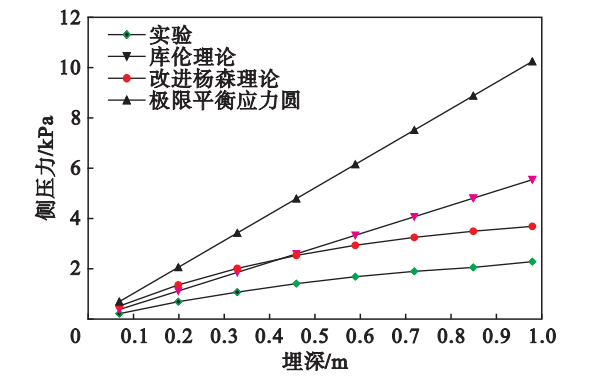


图 3 不同理论求得散体侧压力值与实验值对比
Fig. 3 Comparison of granular lateral pressure values obtained from experiment and different theories

众多研究表明,散体侧压力除与倾角、埋深和容重有关外,还受散体宽度的影响^[9-10].根据量纲和谐原理中的瑞利法,主动侧压力值可以表示为埋深、倾角与容重物理量的指数乘积:

$$p_a = k\theta^a \times \gamma^b \times z^c \times B^d. \quad (1)$$

写出量纲式如下:

$$[p_a] = [\theta]^a [\gamma]^b [z]^c [B]^d. \quad (2)$$

其中: θ 为散体倾角,无量纲; p_a 为散体侧压力,量纲为 ML^{-2} ; z 为散体埋深,量纲为 L ; γ 为散体容重,量纲为 ML^{-3} ; B 为散体宽度,量纲为 L . 将各物理量量纲代入式(2),得到量纲间关系:

$$[M^1][L^{-2}] = ([M^1][L^{-3}])^b ([L]^1)^c ([L]^1)^d. \quad (3)$$

可得 $b = 1, c + d = 1$, 主动侧压力方程可整理为 $p_a = k(\sin\theta)^a \times \gamma z^c B^{1-c}$, 并将方程中 $k(\sin\theta)^a$ 作为由实验所确定同倾角有关的系数,侧压力实验值随埋深、倾角变化回归方程为

不同角度下 k', c 的回归值以及相关性参数如表 2 所示,再对 k', c 进行回归实验,获得侧压力随埋深、倾角变化关系表达式:

$$p_a = (7.017\theta - 381.13) \gamma z^{0.6742(\sin\theta) - 4.828} \cdot B^{1 - 0.6742(\sin\theta) - 4.828}.$$

式中符号含义同上,可根据该式估算不同工况条件下的静止散体侧压力.

$$p_a = k' \times \gamma z^c B^{1-c}.$$

表 2 回归方程中回归参数值和相关性
Table 2 Value of regression parameters and correlation in regression equation

角度/(°)	k'	c	R
80	180.959	0.728	0.989 6
85	213.857	0.679	0.995 1
90	251.129	0.68	0.944 5

2.2 无回填移动散体主动侧压力变化规律

留矿采矿法采场中的矿石,最后大放矿时被放出并形成空场,因此本研究首先对散体无回填条件下进行了侧压力实验:从 1[#]放矿口放出一定量的散体后关闭,然后依次从 3[#]和 5[#]放出.图 4 为 80°倾角条件下下盘散体侧压力随放出量的变化曲线,1[#]放矿口开始后,底部的 1[#]~3[#]测点侧压力随着散体放出呈平缓的线性下降趋势.当 1[#]放矿口关闭,3[#]放矿口开始放出瞬间,侧压力突然下降,分别下降 19.1%、16.35%、18.5%;随着 3[#]放矿口放出量的增加,三个测点侧压力仍然呈近似线性减小,斜率要略大于 1[#]放矿口放出散体时侧压力的变化斜率.当 5[#]放矿口开始放出瞬间,侧

压力再次出现陡降,分别下降 28.55% ,33.32% ,40.04% ;随着散体放出量增加,侧压力线性降低,降低斜率要高于前两个阶段. 底部放矿口放出散体,上部散体下移递补,最上部由于没有回填随着散体放出而缺失,最上部 8#测点受散体放出影响最为明显,散体侧压力随着放出量的增加而减小,散体开始放出后,散体侧压力迅速呈曲线快速下降,放出量达 20 kg 后,侧压力平缓下降至零. 5#~7#三个测点侧压力在 1#放矿口放矿时有小幅度的上升趋势,当放矿量分别达到 55,30,10 kg 之后,侧压力迅速降低;当放矿量分别为 115,100,90 kg 后,侧压力近似为零. 由此可见,放矿口的改变未导致 5#~8#测点侧压力波动;4#测点侧压力在 1#放矿口放矿过程中与 1#~3#测点侧压力具有类似变化规律,随着 3#和 5#放矿口开始放矿,其又呈现出与 5#~6#测点侧压力的变化规律,处于过渡状态.

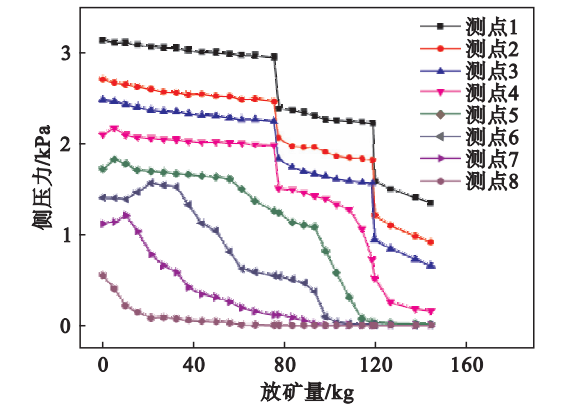


图 4 倾角 80°条件下下盘侧散体侧压力随放矿口和放出量的变化曲线
Fig. 4 Variation of footwall granular lateral pressure with drawing quantity and drawing point changing when dip angle is 80 degree

由图 5 可见,上盘侧压力随放矿口位置和放矿量的变化规律与下盘侧压力类似,但变化量明显小于下盘对应高度的侧压力. 上盘各测点侧压力随放矿量增加的变化曲线更加平滑,放矿口位置的改变引起的突变量也比下盘小.

综上所述,在无散体补充条件下,散体侧压力不仅与放出量有关,而且还与放出范围有关. 散体侧压力随放出量的增加而减小,增加散体放出范围,可加速散体侧压力下降速度;放出量对有放矿口一侧侧压力影响程度要高于无放矿口一侧,在同一盘侧,散体深度越深、距离放矿口越近,侧压力受放出量的影响程度越小,受放出范围的影响

程度越大. 对于采幅较窄的留矿法,出矿口间隔 6 m 左右,大放矿时会大幅度降低散体对上盘围岩的支撑作用,所以当围岩不稳固时,应在回采过程中采用适当的支护措施来支撑上盘围岩,避免在放矿过程中上盘围岩冒落,增加矿石的贫化.

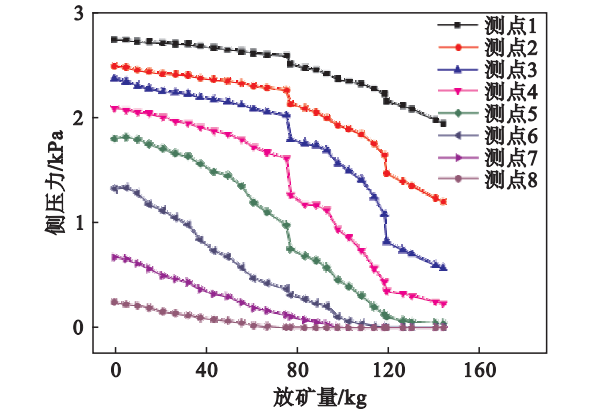


图 5 倾角 80°条件下上盘侧散体侧压力随放矿口和放出量的变化曲线
Fig. 5 Variation of hangingwall granular lateral pressure with drawing quantity and drawing point changing when dip angle is 80 degree

2.3 有回填的移动散体主动侧压力变化规律

在崩落法中,覆盖岩层会随着放矿而补充,为此,在散体回填条件下进行侧压力实验. 首先从 1#放矿口进行放矿,放出矿石回填至系统,采集各测点侧压力,之后重新装填系统,再分别对其他放矿口放矿进行重复实验. 图 6~图 7 为 1#放矿口放矿过程中上下盘散体侧压力变化规律.

下盘侧压力基本以模型中间高度为界,下部 4 个测点侧压力值随着散体放出大幅度降低,随着散体持续放出侧压力值有一个缓慢持续降低的过程,最后近似趋于稳定;上部 4 个测点侧压力随着散体的放出大幅升高,之后趋于缓慢波动直至稳定.

上盘侧散体侧压力总体受放矿流动的影响不明显,放矿开始后的突变量也要明显小于下盘侧压力. 其他放矿口放矿时各测点侧压力的变化规律与之类似,篇幅有限不再一一列出. 所以,在有散体补充条件下,散体放出对散体侧压力的影响范围是有限的,包括在高度方向上和在宽度方向上,对应工程实践中的出矿来说,无底柱进路出矿不会影响本分段散体侧压力的变化,通过回填散体来保持覆盖层高度,可以保持侧压力对塌陷坑边壁作用,从而抑制塌陷范围.

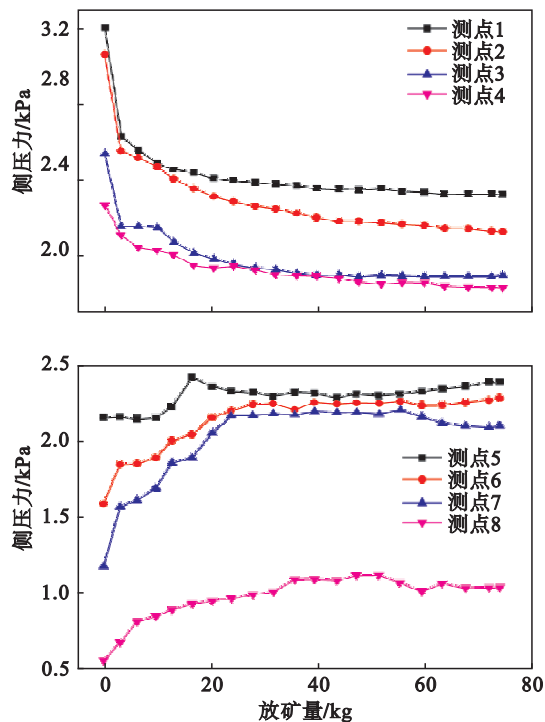


图6 倾角80°条件下下盘侧散体侧压力随1#放矿口放出量改变的变化曲线

Fig. 6 Variation of footwall granular lateral pressure with drawing quantity of 1# drawing point changing when dip angle is 80 degree

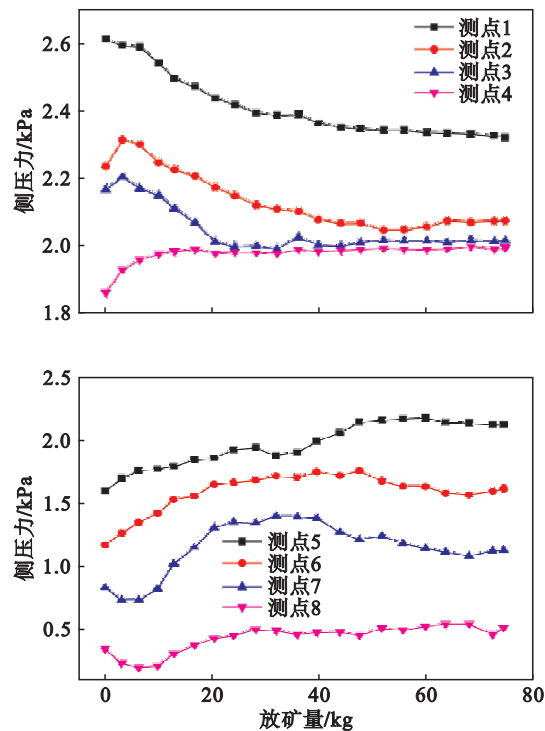


图7 倾角80°条件下上盘侧散体侧压力随1#放矿口放出量改变的变化曲线图

Fig. 7 Variation of hangingwall granular lateral pressure with drawing quantity of 1# drawing point changing when dip angle is 80 degree

3 结 论

- 1) 散体静止侧压力随散体埋深增加呈非线性增加趋势,与库伦、改进古典杨森和极限平衡应力圆理论计算值相比,改进的古典杨森计算的侧压力值和变化趋势最接近实验值;
- 2) 在无散体补充条件下,散体侧压力随放出量的增加而减小,增加散体放出范围,可加速散体侧压力下降速度;放出量对有放矿口一侧侧压力影响程度要高于无放矿口侧,在同一盘侧,散体埋深越深、距离放矿口越近,侧压力受放出量的影响越小,受放出范围的影响越大;
- 3) 在有散体补充条件下,散体放出对散体侧压力的影响范围是有限的,包括在高度方向上和宽度方向上,所以在工程上补充散体高度来支撑上下盘围岩稳固性.

参考文献:

[1] Lambe T W, Whitman R V. Soil mechanics [M]. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1969.

[2] Reimbert M, Reimbert A. Pressure and over pressure vertical and horizontal silos [C]// International Conference on Design of Silos for Strength and Flow. London: Powder Advisory Cent London, 1980.

[3] Brauer K, Pfitzner M, Krimer D O. Granular elasticity: stress distributions in silos and under point loads [J]. *Physical Review E*, 2006, 74(6): 11-14.

[4] Yang S C, Hsiau S S. The simulation and experimental study of granular materials discharged from a silo with the placement of inserts [J]. *Powder Technology*, 2001, 120(3): 244-255.

[5] Brown R L, Richards J C. Kinematics of the flow of dry powders and bulk solids [J]. *Rheologica Acta*, 1965, 4(3): 153-165.

[6] Walker D M. An approximate theory for pressure and arching in hoppers [J]. *Chemical Engineering Science*, 1966, 21: 976-997.

[7] 戴兴国, 古德生, 吴爱祥. 散体矿岩静压分析与计算 [J]. 中南大学学报(自然科学版), 1995, 26(5): 584-588. (Dai Xing-guo, Gu De-sheng, Wu Ai-xiang. Analysis and computation of static pressure in loose ore and stuff [J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 1995, 26(5): 584-588.)

[8] 陈喜山. 古典杨森散体压力理论的拓展及采矿工程中的应用 [J]. 岩土工程学报, 2010, 32(2): 315-319. (Chen Xi-shan. Extension of classical Janssen loose mass pressure theory and its application in mining engineering [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2010, 32(2): 315-319.)

[9] 王闫超, 晏鄂川, 陆文博, 等. 无黏性有限土体主动土压力解析解 [J]. 岩土力学, 2016, 37(9): 2513-2520. (Wang Yan-chao, Yan E-chuan, Lu Wen-bo, et al. Analytical solution of active earth pressure for limited cohesionless soils [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2016, 37(9): 2513-2520.)

[10] 杨明辉, 戴夏斌, 赵明华, 等. 墙后有限宽度无黏性土主动土压力试验研究 [J]. 岩土工程学报, 2016, 38(1): 132-137. (Yang Ming-hui, Dai Xia-bin, Zhao Ming-hua, et al. Experimental study on active earth pressure of cohesionless soil with limited width behind retaining wall [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2016, 38(1): 132-137.)