

动力扰动对采空区稳定性影响的离散元分析

杨金林, 李夕兵, 周子龙, 陈红江

中南大学资源与安全工程学院, 长沙 410083

中南大学; 深部金属矿产开发与灾害控制湖南省重点实验室, 长沙 410083

摘要 采用离散元程序对地下采空区进行动力扰动数值计算, 通过改变扰动应力波峰值的大小, 考查动力扰动强度的变化对采空区稳定性的影响, 对模型分别静力和动力状态下进行了计算。结果表明, 采空区开挖后, 最大位移量 2.98mm; 施加动载荷后, 最大位移量增至 5.0mm, 增幅与动载荷应力大小呈正比; 围岩位移、最大主应力、最小主应力分布受动载荷影响较大, 围岩应力发生二次分布, 塑形区明显增大。分析结果表明, 邵东采空区基本稳定, 但应加强顶板、底板支护。为了避免采空区在外力扰动下产生灾害, 给出了建议。

关键词 动力扰动; 采空区; 稳定性; 三维离散元; 数值模拟

中图分类号 TB551

文献标识码 A

文章编号 1000-7857(2010)24-0048-05

Stability Analysis of Underground Goaf Influenced by Dynamic Disturbance with Dimensional Distinct Element

YANG Jinlin, LI Xibing, ZHOU Zilong, CHEN Hongjiang

School of Resources and Safety Engineering, Central South University, Changsha 410083, China

Hunan Key Laboratory of Resources Exploitation and Hazard Control for Deep Metal Mines; Central South University, Changsha 410083, China

Abstract By using an dimensional distinct element program, a model for numerical calculations is established for a goaf underground with dynamic disturbance. And then the effect of disturbance intensity on the stability of goaf underground is studied by changing the peak value of the dynamic stress wave, and the static calculation and the dynamic calculation are carried out, respectively. The analytical results demonstrate that the maximum displacement of surrounding rock is 2.98mm after goaf underground is excavated, while the maximum displacement of surrounding rock increases to 5.0mm after the dynamic loading is applied, and the amplitude of the increased displacement is proportional to the magnitude of the dynamic loading, which influences the variation of displacement, maximum principal stress, minimum principal stress distribution for surrounding rock. The second redistribution of stress field of surrounding rock occurs; and the distribution area of plastic zone is expanded significantly. The results show that Shaodong mined-out area is stable, but the support of the top and bottom should be strengthened. Several suggestions to avoid instability and subsidence of mined-out areas induced by blasting vibration are made.

Keywords dynamic disturbance; underground goaf; stability; three-dimensional distinct element; numerical simulation

0 引言

随着地下矿产资源大规模地采掘, 特别是一些矿山只顾目前的经济利益和局部利益, 开采秩序较为混乱, 非法、无规

划的乱采、滥挖在一些国有矿山周边留下了大量的不明采空区。目前, 采空区已经成为影响矿山安全生产最主要的危害源之一, 也是安全生产中的两大隐患之一^[1-2], 因此如何分析

收稿日期: 2010-05-10; 修回日期: 2010-10-25

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973 计划)项目(2010CB732004); 湖南省研究生科研创新项目(CX2009B050)

作者简介: 杨金林, 硕士研究生, 研究方向为岩土工程灾害, 电子信箱: yangjinlin0506@163.com; 李夕兵(通信作者, 中国科协所属学会个人会员登记号: S330730015M), 教授, 研究方向为采矿与岩土工程, 电子信箱: xbl@mail.csu.edu.cn

评价采空区的稳定性,是采矿、地质和岩土工程师亟待解决的问题^[3-4]。地震、爆破等动力作为影响采空区稳定性的主要因素之一,不但对采空区围岩产生损伤和扰动,甚至引起采空区破坏和塌陷^[5-6]。对动荷载如爆破等造成的危害研究主要是现场检测,根据测试结果计算最大震速、安全距离^[7],这种方法虽然能直观地反映动态震动危害,但是对围岩塑性区的变化、动应力场、位移变化及动力失稳机制却无法分析。计算机的发展为数值模拟方法精确计算提供了可能,而数值模拟方法可以系统地分析动力扰动下采空区围岩的动应力场分布规律及动静应力场的叠加作用机制。鉴于离散元程序在非连续介质分析中的优势,以及其能很好地解决被不连续面所切割的岩体非线性动力响应问题,离散元程序已经被用来模拟节理岩体的动静态响应问题^[8-12]。

1 离散元程序动力计算步骤

应用离散元程序对采空区进行动静计算,包括静力、动力计算。模型首先在自重作用下达达到平衡,完成静力分析后,再对模型施加动载进行动力分析,分析步骤:① 确定计算区域,选择动力模式,并对模型进行设置,如网格划分、定义构造行为,物质参数,边界条件,初始化条件;② 通过计算,获得初始平衡状态,即采空区开挖前的原始应力状态;③ 通过采空区开挖计算分析,得到开挖后的静力计算结果;④ 检查静力计算结果,若满意,对模型进行动力计算;⑤ 施加动荷载,进行动力计算分析,得到动力计算结果。

2 计算模型和参数选取

2.1 计算模型

邵东石膏矿地表标高+240m左右,开采标高范围为+188m~+50m。本次区域选择+140m水平标高为11#和12#相邻采空区对其动静应力场、位移场、塑性区进行分析。区域尺寸为50m×96m×80m(长×宽×高)(图1)。采空区尺寸为50m×

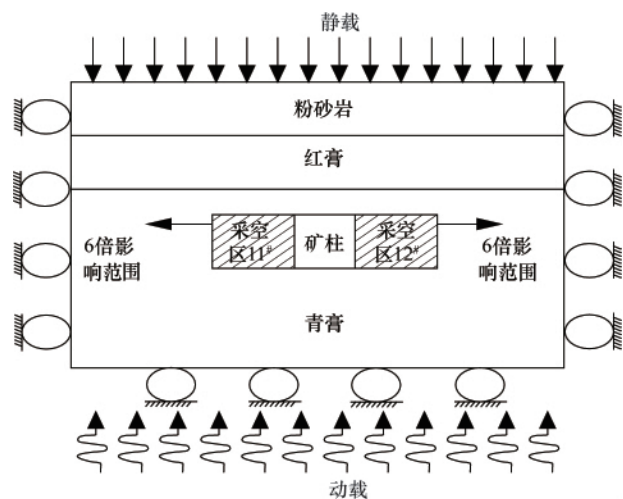


图1 动静组合计算模型

Fig. 1 Calculation model of static and dynamic combination

10m×10m,矿柱尺寸为50m×6m×10m。模型底板距离地面100m。静力计算过程,模型左右、前后边界和底部边界采用固定边界位移,动力计算边界采用黏性边界条件^[13-14]。

通过对现场的节理调查,主要有2条比较发育的节理,贯通率为100%,其产状如表1。

表1 计算模型中节理参数

Table 1 Joint parameters used in the model

节理	倾角/(°)	倾向/(°)
J ₁	34.5	45
J ₂	65	290

对岩体采用Mohr-Coulomb强度准则作为屈服准则,对于岩体节理,采用Coulomb滑动准则。

邵东石膏矿体埋藏相对较浅,构造应力不明显,本次计算仅按自重应力计算,其垂直应力和水平应力分别为

$$\begin{cases} \sigma_v = \gamma H \\ \sigma_h = \lambda \gamma H \\ \lambda = \mu / (1 - \mu) \end{cases} \quad (1)$$

其中,H为采空区底板距离地表高度,单位m,λ为侧压力系数,μ为泊松比,σ为地应力。

2.2 岩体物理力学参数

邵东石膏矿主要有3种岩石,从上到下依次为粉砂岩、红膏、青膏。由室内试验确定岩体物理力学参数如表2所示。

表2 邵东石膏矿岩体物理力学参数

Table 2 Physico-mechanical parameters of the rocks in Shaodong gypsum mine

指标	青膏	红膏	粉砂岩
密度/(kg·m ⁻³)	2700	2550	2450
抗压强度/MPa	56.4	18.5	13.3
抗拉强度/MPa	2.19	1.94	0.94
凝聚力/MPa	3.9	3	3.4
内摩擦角/(°)	43	39	39
弹模量/GPa	57.8	14.6	5.2
μ	0.394	0.26	0.12

在离散元程序计算中,岩体变形参数不是直接输入弹性模量E和μ,而是用体积模量K和剪切模量G代替,两者之间有如下关系:

$$G = \frac{E}{2(1+\mu)} \quad (2)$$

$$K = \frac{E}{3(1-2\mu)} \quad (3)$$

对于节理法向刚度和剪切刚度用下式估算^[12]

$$K_n = \frac{E_m \cdot E_r}{s(E_r - E_m)} \quad (4)$$

$$K_s = \frac{G_m \cdot G_r}{s(G_r - G_m)} \quad (5)$$

其中, K_n, K_s 分别为节理法向和切向刚度, GPa/m ; E_m, E_r 分别为介质的弹性模量和岩石材料的弹性模量, GPa/m ; G_m, G_r 分别为介质岩体的剪切模量和岩石材料的剪切模量, GPa/m ; s 为岩体节理的平均间距, m ; 考虑填充体对节理强度的弱化效应, 由式(4)、式(5)可得节理的力学特性如表 3 所示。

表 3 节理力学特性

Table 3 Mechanical properties of rock joints

力学特性	闭合节理	有填充节理
法向刚度 $K_n/(\text{GPa} \cdot \text{m}^{-1})$	7.2	4.97
剪切刚度 $K_s/(\text{GPa} \cdot \text{m}^{-1})$	2.63	1.09
黏聚力/MPa	1.05	5
摩擦角/ $^\circ$	30	13
抗拉强度/MPa	1.5	0.16

2.3 计算方案

为了确定采空区在动力扰动下围岩应力、位移、塑性区的变化规律, 采用离散元程序对采空区开挖和动载作用下的稳定性进行系统的模拟分析, 分析结果有利于对采空区变形和塌陷进行预测。模拟方案分为: 自重应力场下采空区开挖计算; 采空区动载荷作用下动力计算。

2.4 动力荷载的确定

为研究采空区开挖后, 外界的动力扰动对采空区围岩的影响, 在模型底部施加一应力波分布荷载。应力波延时取为 0.01s , 在离散元程序中计算时间取为 0.2s 。为了分析动载大小对采空区的影响, 在计算中分别取扰动应力波的峰值 $p_{\max 1} = 5\text{MPa}$ 作为第一动力扰动, 见图 2; $p_{\max 2} = 10\text{MPa}$ 作为第二动力扰动。

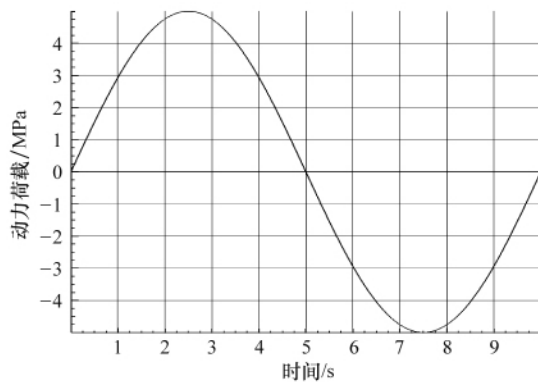


图 2 应力波时程曲线

Fig. 2 Time-history curve of stress wave

2.5 震动频率和阻尼系数的选取

在动力计算中采用 Rayleigh 阻尼需要确定 2 个参数: 临界阻尼比 ξ_{cr} 和岩体振动中心频率 f , 本模拟分析中, 通过试算, 临界阻尼比确定为 0.005 , 岩体振动中心频率用下式进行

估算^[14]:

$$f = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{kl}{m} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

其中, l 为节理长度, 本文取 96m ; k 为节理刚度, 取 7.2GPa ; m 为模型范围内岩体质量, kg 。

2.6 外震动载荷施加

在离散元程序中, 瞬时载荷是以应力脉冲、速度脉冲或位移脉冲的形式施加的, 不同的类型影响模型边界条件。如果用速度脉冲或位移脉冲加载, 程序将不允许将模型边界条件设为无反射边界^[14]。外力动载荷施加于采空区的底板, 沿底部轴负方向传播, 采用应力脉冲施加。

3 模拟结果分析

3.1 应力和位移分析

图 3、图 4 分别为开挖空区后和施加动载后主应力分布图, 可以看出, 采空区开挖后主应力发生重新分布, 顶板和底板处出现拉应力集中, 矿柱底出现压应力, 最大拉应力为 2.38MPa , 大于青膏的抗拉强度 2.19MPa , 顶板和底板处发生拉伸破坏, 这与现场观测一致。施加动载后, 采空区 11# 底板拉应力明显, 12# 底板处应力集中已经不明显, 但是左下方围

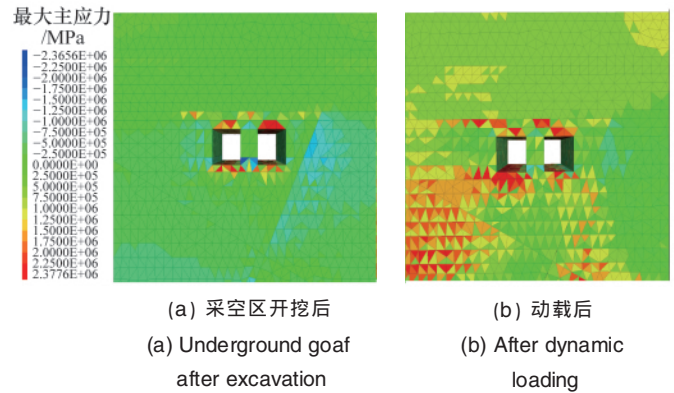


图 3 最大主应力分布

Fig. 3 Distribution of maximum principal stresses

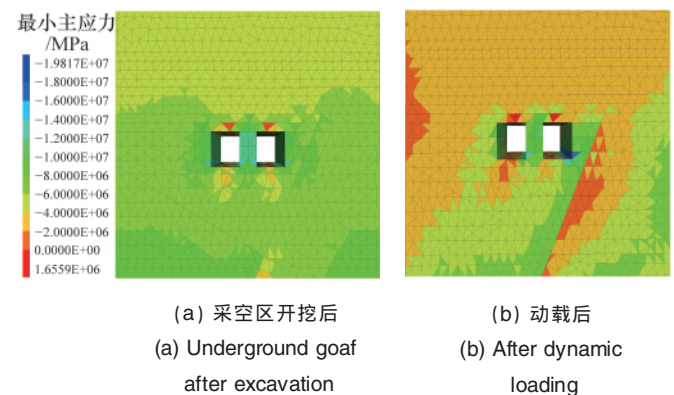


图 4 最小主应力分布

Fig. 4 Distribution of minimum principal stresses

岩由于受节理影响产生较大拉应力集中,且最大拉应力仍大于岩体的抗拉强度,应采取有效的支护措施,预防采空区顶板失稳塌陷和底板底鼓。由图 4、图 5 可以看出,最大主应力、最小主应力发生二次分布。

图 5 为采空区开挖后和动力扰动后位移分布图,采空区上边界出现最大位移。开挖后由于受节理的影响呈现 V 字型分布,动力作用后呈现 U 型分布。开挖后围岩最大位移约为 2.98mm,出现在空区顶板,同时底板和 12# 空区右下方也出现

了较大位移,节理出现滑移。动载作用后,最大位移仍然发生在底板围岩处,最大位移相对静力计算结果(5.0mm)略有增大。动载一作用后,最大位移为 5.0mm,动载二作用后,最大位移达 5.47mm,增幅与动载应力大小呈正比。动载一作用后,位移较大的区域范围主要集中在采空区上方;动载二作用后,位移和动载一作用后相似,但顶板处的范围较动载一较大。图 5 表明,动载不仅增大了围岩位移,而且改变了位移的分布范围。

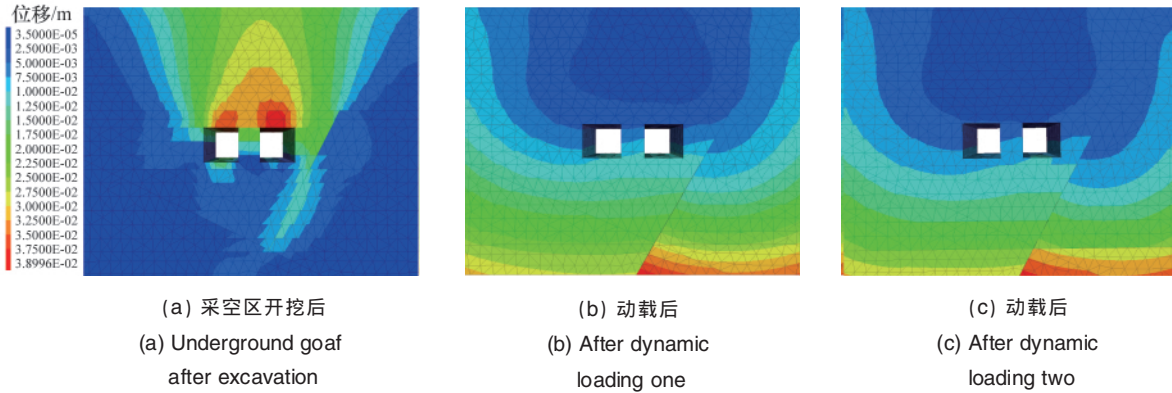


图 5 位移分布

Fig. 5 Distribution of displacements

3.2 塑性区分析

图 6 为采空区开挖后,两次动载后的塑性区分布图。由图可知,顶板和底板处发生拉伸破坏,局部发生剪切破坏。以拉伸破坏为主,集中在采空区顶板和底板附近。采空区受动

载荷作用后,塑性区分布范围比静力计算结果大,且动载二作用后比动载一作用后,塑性区范围明显增大。说明塑性区分布面积与动载荷大小呈正比。从而得出采空区在静力作用下的安全顶板厚度并不能保证采空区是安全的。

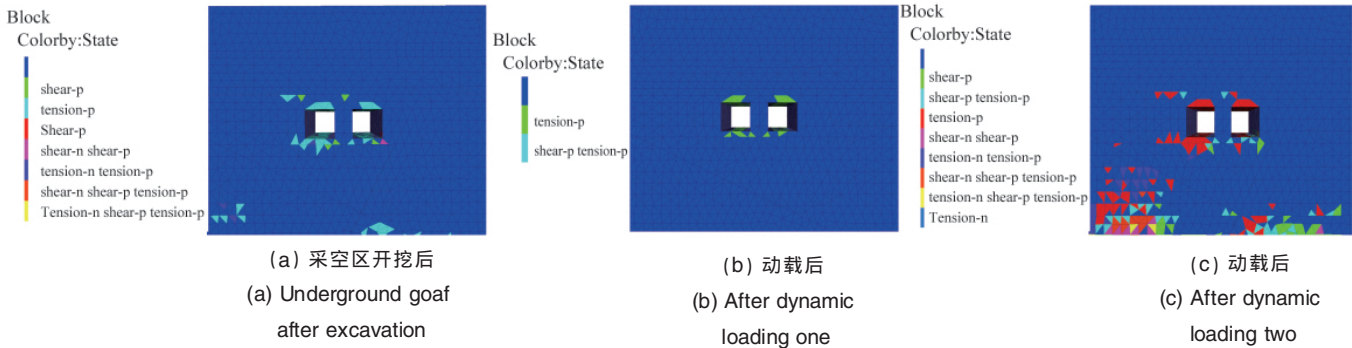


图 6 塑性区分布

Fig. 6 Distribution of plastic zones

4 结论

1) 开挖采空区后,围岩应力重分布并产生应力集中现象;在外力扰动作用下,围岩应力场、位移场发生二次分布;空区围岩处位移量增大,增幅与扰动应力的振幅呈正比;外力扰动不仅增加了围岩的位移量,而且改变了位移的分布形式,呈现 U 型分布;围岩应力集中区,节理滑移区受动力扰动的影响比较明显,在动力扰动下,岩体也容易失稳破坏,分析结果表明,采空区在外力扰动作用下失稳塌陷的概率增加。

2) 静力开挖后,围岩的破坏有拉伸破坏、剪切破坏,以拉

伸破坏为主;动载作用下,塑性区相对开挖后范围较大,出现了多种破坏形式的组合,破坏范围与外力扰动的振幅呈正比。

3) 为了避免采空区在外力扰动作用下失稳塌陷,造成损失,建议采取措施:① 加强顶板、底板的支护,对出现的塑性区应加强支护;② 加强地压监测工作。由专职地压监测人员采用各种地压监测手段对重大危险源点以及人员经常出入的地段定期监测,并定期进行稳定性分析及冒落预报工作;③ 对不稳定的地段树立安全警示牌,以引起进入人员的注意;④ 对稳定性差的地段采取措施,以保证作业人员的安全。

参考文献 (References)

- [1] 古德生, 李夕兵. 现代金属矿床开采科学技术 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 2006.
Gu Desheng, Li Xibing. Modern mining science and technology for metal mineral resources[M]. Beijing: China Metallurgical Industry Press, 2006.
- [2] 国家安全生产监督管理总局. 国家安全生产科技发展规划——非煤矿山领域研究报告 (2004—2010)[R]. 北京: 国家安全生产监督管理总局, 国家煤矿安全监察局, 2003.
State Administration of Work Safety. State technological development programming of work safety: Non-coal mine domain research bulletin (2004—2010) [R]. Beijing: State Administration of Work Safety, State Administration of Coal Mine Safety, 2003.
- [3] 陈炎光, 陆士良. 中国煤矿巷道围岩控制 [M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 1994.
Chen Yanguang, Lu Shiliang. China coal mine tunnel surrounding rock control[M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 1994.
- [4] 钱鸣高, 刘听成. 矿山压力及其控制[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1992.
Qian Minggao, Liu Tingcheng. Rock pressure and its control[M]. Beijing: Coal Industry Press, 1992.
- [5] Singh P K. Blast vibration damage to underground coal mines from adjacent open-pit blasting [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2002(39): 959-973.
- [6] 言志信, 吴德伦, 王漪, 等. 地震效应及安全研究 [J]. *岩土力学*, 2002, 23(2): 201-203.
Yan Zhixin, Wu Delun, Wang Yi, et al. *Rock and Soil Mechanics*, 2002, 23(2): 202-203.
- [7] 闫长斌, 徐国元, 李夕兵. 爆破震动对采空区稳定性影响的 FLAC3D 分析[J]. *岩石力学与工程学报*, 2005, 24(16): 2894-2899.
Yan Changbin, Xu Guoyuan, Li Xibing. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2005, 24(16): 2894-2899.
- [8] Cundall P A. Formulation of a three-dimensional distinct element model—part I: A scheme to detect and represent contacts in a system composed of many polyhedral blocks [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science and Geomechanics Abstracts*, 1988, 25(3): 107-116.
- [9] Hart R, Cundall P A, Lemos J. Formulation of a three-dimensional distinct element model—part II. Mechanical calculation formation and interaction of a system composed of many polyhedral blocks [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 1998, 25(3): 117-125.
- [10] Josef H. The dynamics of explosion and its use[M]. New York: Elsevier Scientific Publishing Company, 1979.
- [11] Chen S G, Zhao J, Zhou Y X. UDEC modeling of a field explosion test [J]. *International Journal of Blasting and Fragmentation*, 2000(4): 149-163.
- [12] Cundall P A. A computer model for simulating progressive large-scale movements in blocky rock systems [C]//Proceedings of the International Symposium Rock Fracture. Nancy: ISRM, 1971.
- [13] 夏祥, 李俊如, 李海波, 等. 爆破荷载作用下岩体振动特征的数值模拟[J]. *岩土力学*, 2005, 26(1): 50-56.
Xia Xiang, Li Junru, Li Haibo, et al. *Rock and Soil Mechanics*, 2005, 26(1): 50-56.
- [14] Itasca Consulting Group Inc. Three-dimensional distinct element code: Optional features[M]. Minneapolis: Itasca Consulting Group Inc, 2003.

(责任编辑 岳臣)

本期推理小游戏答案

将 12 个样品编号为 1~12。

第一次, 先将 1~4 号放在左边, 5~8 号放在右边。

1. 如果右重则次品在 1~8 号。第二次将 2~4 号拿掉, 将 6~8 号从右边移到左边, 把 9~11 号放在右边。即 1, 6, 7, 8 在左边, 5, 9, 10, 11 在右边。

(1) 这时如果右重则次品在没有被触动的 1, 5 号。如果是 1 号, 则它比正品轻; 如果是 5 号, 则它比正品重。第三次将 1 号放在天平左边, 2 号放在右边。

如果右重则 1 号是次品且比正品轻;

如果天平平衡则 5 号是次品且比正品重;

这次不可能左重。

(2) 这时如果天平平衡则次品在被拿掉的 2~4 号, 且比正品轻。

第三次将 2 号放在天平左边, 3 号放在右边。

如果右重则 2 号是次品且比正品轻;

如果天平平衡则 4 号是次品且比正品轻;

如果左重则 3 号是次品且比正品轻。

(3) 如果左重则次品在拿到左边的 6~8 号, 且比正品重。第三次将 6 号放在天平左边, 7 号放在右边。

如果右重则 7 号是次品且比正品重;

如果天平平衡则 8 号是次品且比正品重;

如果左重则 6 号是次品且比正品重。

2. 如果天平平衡, 则次品在 9~12 号。第二次将 1~3 号放在左边, 9~11 号放在右边。

(1) 如果右重则次品在 9~11 号且次品比正品重。第三次将 9 号放在天平左边, 10 号放在右边。

如果右重则 10 号是次品且比正品重;

如果天平平衡则 11 号是次品且比正品重;

如果左重则 9 号是次品且比正品重。

(2) 如果天平平衡则次品为 12 号。第三次将 1 号放在天平左边,

12 号放在右边。

如果右重则 12 号是次品且比正品重;

如果左重则 12 号是次品且比正品轻;

这次不可能平衡。

(3) 如果左重则次品在 9~11 号且次品比正品轻。第三次将 9 号放在天平左边, 10 号放在右边。

如果右重则 9 号是次品且比正品轻;

如果天平平衡则 11 号是次品且比正品轻;

如果左重则 10 号是次品且比正品轻。

3. 如果左重则次品在 1~8 号。第二次将 2~4 号拿掉, 将 6~8 号从右边移到左边, 把 9~11 号放在右边。即 1, 6, 7, 8 在左边, 5, 9, 10, 11 在右边。

(1) 这时如果左重则次品在没有被触动的 1, 5 号。如果是 1 号, 则它比正品重; 如果是 5 号, 则它比正品轻。第三次将 1 号放在天平左边, 2 号放在右边。

如果左重则 1 号是次品且比正品重;

如果天平平衡则 5 号是次品且比正品轻;

这次不可能右重。

(2) 这时如果天平平衡则次品在被拿掉的 2~4 号, 且比正品重。

第三次将 2 号放在天平左边, 3 号放在右边。

如果右重则 3 号是次品且比正品重;

如果天平平衡则 4 号是次品且比正品重;

如果左重则 2 号是次品且比正品重。

(3) 如果右重则次品在拿到左边的 6~8 号, 且比正品轻。第三次将 6 号放在天平左边, 7 号放在右边。

如果右重则 6 号是次品且比正品轻;

如果天平平衡则 8 号是次品且比正品轻;

如果左重则 7 号是次品且比正品轻。

检验完毕。