金属矿地下开采的计算机辅助设计

联邦德国柏林技术大学采矿研究所特许工程师　D. 盖尔施泰因

摘要：在得到布鲁塞尔欧洲共同体赞助的科研项目“坑内金属矿采矿布置的计算机辅助设计”中，伦敦帝国大学（皇家矿山学院）、柏林自由大学（数学地质工作组）、柏林技术大学（采矿研究所）密切合作，研究出了一种新构思，解决金属矿坑内开采的设计及其最佳化。研究工作的目的是建立一个以电子计算机为基础的组合设计系统。借助这套系统，地质学家和采矿工程师能对一个采矿工程进行分析并使之最佳化，内容包括地质、地质统计、岩石力学、采矿方法、设备选择、采矿进度、经济评价和进度计划。

采矿设计的特点是自然科学和技术经济专业协同起作用。专业范围包括地质和地质统计、岩石力学、矿山的技术经济规划、环境保护和采后复垦。

每一设计均需要与工程项目有关的资料。由于设计是放眼未来的，所以这些数据往往不太准确。因此，在采矿工作初期要导出一些数据，例如矿床的几何结构、有用矿物的分布。估算出的数据的可靠性随着采矿进展阶段的深化而增加。

在这些资料的基础上，必须设计出不同方案，对它们进行分析和评价，以便做出究竟实施哪一方案的决定。每一个设计均应有助于为整个工程找到一个最佳方案。一般来说，孤立的局部设计不能得出最佳结果，因此必须致力于全部生产工序的同步设计。

1 以计算机为基础的设计系统的构思

提供有效的计算机模型供设计师使用，帮助他们解决采矿专业的大量问题。模型的使用经常是有成效的。这里涉及的大多数是计算机程序，专门适用于矿山特定条件，仅包括设计过程的一个方面。

但是各设计专业之间存在各种相互作用和依赖性。而在计算机模型中，这些相关性经常被忽略或过分简化，以致于总是只解决单一的设计问题，不考虑其结果对矿山其它专业的影响。

正是这一点违背采矿设计的完整性。因此，不应将各单项设计分开，而要将它们结合起来考虑。

1.1　设计基础

矿床和围岩的尽可能准确和完整的资料是设计的基础。首先解释钻孔和取样的结果，建立矿床模型并算出地质储量，接着选择采矿方法并确定坑内矿的技术和几何参数，这些参数决定采出原矿的质量和数量。为了判断岩石的稳定性和支护费用，要求分析或必要时校正（例如借助岩石力学计算法）井巷布置的几何方式。采矿顺序对于回采作业的设计及矿石质量和数量的规划有密切关系。确定矿井建设进度

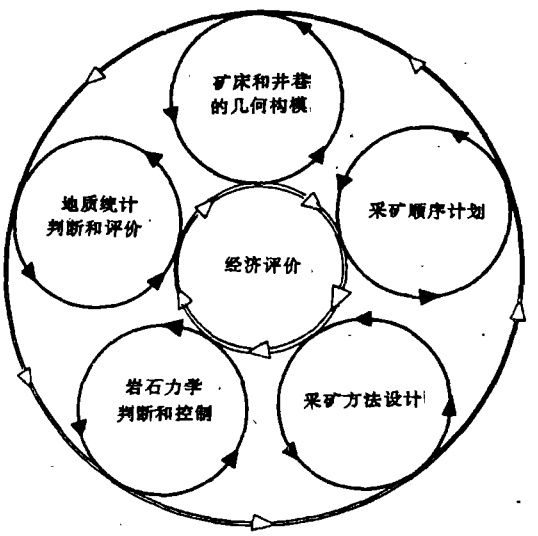


图 1　以计算机为基础的坑内金属矿设计概念中模型的相互作用

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

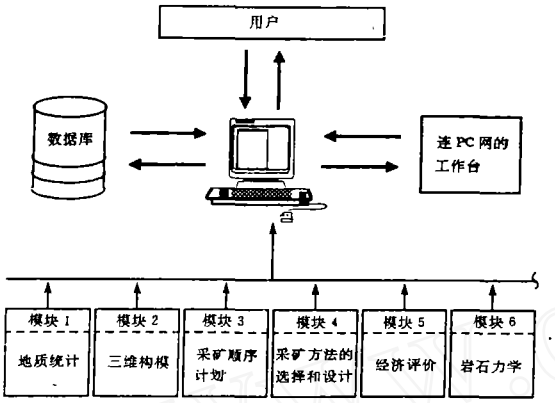


图 2　配有设计模块的以计算机为基础的工作站

时，必须在满足技术经济约束条件的前提下考虑矿石的质量参数。衡量不同设计方案质量的标准是它的经济效益。因此设计模型示意图（图 1）的中心是经济评价，以便根据成本和纯利参数对设计方案做出评价。

1.2　模块结构

研制出了一种大有希望的以计算机为基础的工作站，用于克服普通计算机模型的缺点。工作站配有一个由彼此交互的计算机模型组成的构模系统（图 2）。

各个模块相互兼容，所获成果不必再经中间处理就可互相交换。程序模块之间的联络通过共用数据库进行。

各个模型不必按系统预定的顺序起动，而可由用户根据具体情况决定何时启用某一模块。这套系统汇集了解决各种设计问题的辅助手段，是设计工程师的电子工具箱。利用图示的程序系统和单个的设计模块工作，不是僵化地进行，而要灵活并互相配合。因此，不是在计算机的监督下，而是在它的帮助下解决问题。

1.3　设计技术和方法

解决提出的综合性问题，要求采用不同的技术和方法。为了用合适的结构处理问题，可以采用运筹学方法。这里涉及到的是自动运行、部分最佳化的模型。使用这样的模型时，操作者在开始计算时就确定目标标准和约束条件，以控制计算运行。遇到具有纯线性相关性的问题时（例如混矿问题，如果在制定生产和回采顺序计划时必须解决这些问题），可以采用线性规划方法，算出最佳建设顺序。

如果不能用运筹学方法，可以采用试凑法。操作者通过反复输入数据控制程序运行。要建立一个设计方案并对中间结果进行计算。设计工程师的任务是解释所获结果并逐步使输出解法最佳化。这个过程要一直进行，直到获得满意结果。多数情况下要求采用普通计算程序，因为普通计算程序使用比较简便，可以在短时间内设计出方案并对它们予以评价。

多数情况下只有把运筹学技术与交互求解方法结合起来才能获得满意结果。因此，在以计算机为基础的工作站，不仅要有普通计算-评价程序，还要有综合性的最佳化模型供使用。工作站的其它构成部分是绘图设计技术和项目单引动的程序运行。

2 以计算机为基础的工作站的构成

在得到布鲁塞尔欧洲共同体赞助的科研项目“坑内金属矿采矿布置的计算机辅助设计”（计算机原材料研究程序，代号 MA1M-0026-D）中，伦敦帝国大学（皇家矿山学院）、柏林自由大学（数学地质工作组）、柏林技术大学（采矿研究所）共同合作，研究一种以计算机为基础的工作站，用于解决金属矿坑内开采的设计及其最佳化问题。根据矿山提出的任务和要求，工作站的构成可以差别很大。目前，研究工作集中在下述几个方面：

- 建立矿床和井巷的几何模型
- 建立地质统计模型
- 选择采矿方法和规模
- 生产和回采顺序计划
- 岩石力学评价

上述几个方面也仅仅是整个采矿设计中的部分内容。科研项目的目的不是建立包容所有领域内问题的系统，而是要证明，把解决不同任务的计算机模型综合起来，可以形成统一的总体设计并对采矿设计过程给以有效的帮助。

2.1　几何模型

在图示的设计系统中，需要处理的绝大部分数据和信息具有几何和空间特性。每一采矿

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

设计的先决条件是矿床的几何模型。在几何模型的基础上能设计出井巷及其开拓采准要素。这些几何数据不仅为绘制图形服务，也是下面所有设计步骤的输入值。例如，关于未来运输距离、巷道断面、曲率半径的数据对于选择采矿设备必不可少。

通常，几何数据以剖面图和平面图的形式供后面的设计步骤使用。这件事费时又费力。如果矿床的数据有改进或巷道掘进有变化而需要做一些修改，常常只有通过新图才能做到。将二维图转为三维模型是很困难的，由于复杂的几何关系，只有在空间思维方面训练有素的设计工程师才能成功。

有了先进的以计算机为基础的绘图系统，在人机对话中既可以二维交互也可以三维交互，绘制矿床和井巷并将其作为模型存储起来。在这样一种模型中，用标准体与普通几何的结合给空间目标定义。用户能用一个结构箱（内有标准组件）组成复杂的图形，例如多分支井巷网。用户也有可能将一次定义的、由许多标准要素合成的组件存储入组件库并随时将它们调出。

这一设计过程要求交互工作，因为不能通过单独一个指令序列利用计算机产生个别设计步骤 。用户自己控制设计过程，计算机仅仅是用于建立模型的适当辅助手段。

因为有一系列专用绘图系统可供地质和采矿人员使用，决定将一种市售系统纳入设计系统并接到合适的接口上。目前采用的是加拿大温哥华吕恩克斯地质系统公司（Lynx-Geosystem）的 LYNX 系统。

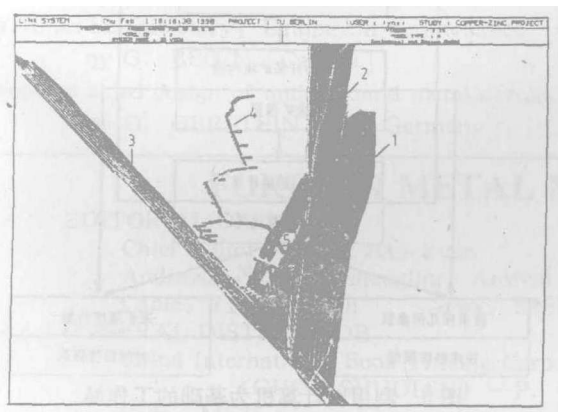


图 3　借助计算机建立的矿床和井巷的东北视向的三维模型

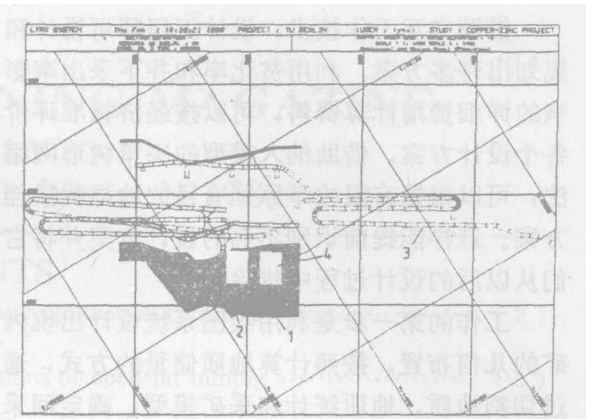


图 4　借助计算机建立的矿床和井巷的平面图

借助这个系统，可以利用 Maus 或数字转换器，通过交互输入或输入坐标、倾角、曲率半径、断面，给单个的因素定义并逐步建立矿体的地质模型和井巷的采矿模型（图 3）。

由于井巷和矿床在计算机内是三维存储的，因此可以产生任意的剖面图。用户的唯一任务是给接口磁道定义。建立剖面图由计算机承担（图 4）。

2.2　地质统计模型

根据建立的矿体模型，在下一个工作步骤中要评价地质统计并解释取样和分析的结果。所采用的方法能建立一个大小可变的三维块段模型。模型所依据的数据结构能使块段模型的大小局部适应取样密度，因而与对矿床的了解程度相适应。尽管同大小有规律的普通块段模型有区别，仍然可以采用地质统计的标准方法（反距插值法和通用克里格法）评估品位并建立矿体的地质统计块段模型。

通过地质模型与地质统计块段模型的结合，可以算出地质储量，供随后的设计工作使用。

2.3　采矿方法构成要素的确定和设计

利用纳入总系统的设计模块确定采矿方法的技术和几何参数，以便根据经济标准来试验和评价采、运、充填设备的不同匹配方式。目的是在考虑采出原矿的质量和数量的基础上，将巷道布置和采矿的几何参数同技术设备匹配得最理想，使生产成本降到最低。

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

借助交互工作技术，设计工程师可设计和规划出许多方案。利用贫化率和井下采出率影响的详细费用计算资料，可以按经济标准评价各个设计方案。借助纳入模型的决策树形网络法，可以根据有限枚举原则有目的地寻找最佳方案。这样能提前识别不利的设计方案并将它们从以后的设计过程中排除。

工作的第一步是利用绘图系统设计出坑内矿的几何布置。按照计算地质储量的方式，通过切割地质、地质统计和采矿模型，确定回采矿块的体积、吨位、品位。与采矿模型的逻辑连接为设计模块提供了关于运距、巷道断面、曲率半径等的信息。假如一种巷道布置对于获得一定的采矿能力不利，可以从技术设计返回到井巷构模，另选一种巷道掘进法。

2.4 生产和采矿顺序计划

根据贫化率、回采率、生产能力和费用的相互作用来确定回采顺序和生产计划。以取自采矿模型的矿块和工艺设计的技术经济参数为基础，可以确定待采矿块的开采顺序。这一设计步骤也可以反向进行，即先给出回采顺序计划，再求开采矿块的矿量和质量。用于确定技术和几何参数的程序现在可用来检验是否能获得预期的质量和数量。

借助“回采顺序”设计模块，能编制坑内矿各采区的产量计划，最好地满足对采出原矿质量成分的要求。模型的基础是计算机和用户之间的交互作用。操作者的任务是开发附有各道工序的回采顺序方案并将其输入计算机。计算机根据一道工序的输入值直接计算由此得出的结果，这样设计工程师可以立即根据每一输入值评价设计步骤，必要时予以修正。对这种方法进行扩展，可以把线性规划方法包括进去，用于确定最佳回采顺序。目标标准是除实现经济最佳化外，还要把金属含量偏离选矿额定指标的范围缩到最小。

2.5 岩石力学

设计模块“岩石力学”担负的任务是估算井下建筑的强度和支护费用。为了解决这一问题，有许多计算方法可供使用。利用现有程序和模型存在一个问题，即它们的完整性不够。为克服这一缺点，引入了一个建立在科学基础上的系统。借助这一辅助手段，设计工程师可以在人机对话中选择并采用最适合他提出的问题的岩石力学模型。进行岩石力学研究的先决条件是井巷形状和大小的几何描述，因此要与几何构模和采矿方法的设计密切配合。

2.6 硬件

程序系统的开发是在属于 UNIX 操作系统的工作站进行的。计算机配有图形显示屏和字母数字终端。可以连接 PC 作为接口，用于传输给 MS-DOS 操作系统处理的数据。由于各参与研究单位的计算机构思可以相互比较，保证了兼容性的完整并提供了交换程序和数据的可能性。

3 研究工作进展现状

建立以计算机为基础的工作站的第一阶段已经结束。设计模块已作为样品制出并接到了图示系统上，形成了完整的设计构思。

为了验证理论设想的正确性并测试该系统的功能，研究工作集中到进行一项实例研究。为达到试验目的，提供了一个多金属矿床的数据

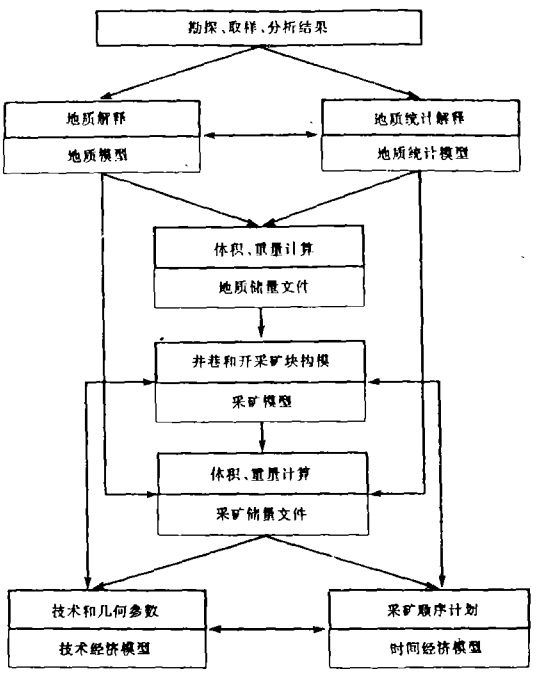


图 5 利用以计算机为基础的工作站进行矿山设计的主要过程

（下转第 66 页）

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

板连接处，以及在排矿格子板上都发生过挂球和卡球现象。排矿格子板的孔隙尺寸由于有缩口而实际上没有变化、平均为17mm。

№181 MMC-7000×2300型自磨机球荷的最初重量为40t并由∅125和∅60mm钢球组成。由于生产能力不足和小直径的钢球积存于磨机内，以后只采用∅125mm的钢球。外国选矿厂的实践也证实了相同的规律。

试验是在不同的装球率条件下进行的。装球率对MMC-7000×2300型自磨机生产能力影响的分析表明，当每台磨机的装球量为48t时，系列的生产能力按矿石计为193.5t/h（№181磨机为100.8t/h，№183磨机为92.7t/h）。在装球率为10～15%（相当于重量35～53t）时不排砾石的自磨机的生产能力提高30～90%。全自磨和排出砾石的系列生产能力为162.9t/h。

试验证明，原矿粒度对自磨过程有重大影响。随+75mm粒级含量的减少，磨机的生产能力增加。原矿中+75mm粒级的最大含量不应超过40%。

磨机磨矿介质的充填率是确定圆筒型磨机操作工艺指标的主要参数之一。

众所周知，半自磨机的钢球和粗粒矿石的总充填率不应超过磨机筒体容积的30～35%。在英古列茨选矿厂的试验中取得了相同的结果，并表明在磨机总充填率（钢球+矿石）为30～35%时半自磨的效率最高。

在分级机溢流中－0.05mm粒级含量为50.1%时，半自磨机的单位生产能力为0.605t/(m³·h)。MMC-7000×2300型自磨机在自磨制度下工作时的单位生产能力，在－0.05mm粒级含量为62%时为0.58t/（m³·h）。

Ⅰ段联合磨矿和自磨1t原矿的单位能耗分别为15.7kW和16.5kW。磨1t矿石的∅125mm钢球的单耗为1.1kg。往MMC-7000×2300型自磨机内添加钢球有助于降低单位能耗和提高按原矿及－0.071mm粒级计的单位生产能力。

Ⅱ段和Ⅲ段磨矿采用МШЦ-4000×7500型球磨机。采用具有抛物线轨迹的钢球作磨矿介质。在试验期间磨机的充填率占筒体容积的32～35%，此时，电动机所需功率为1650～1700kW。Ⅱ和Ⅲ段磨矿按－0.05mm计的磨矿粒度分别为86.1%和95.3%，单位生产能力分别为0.73和0.1t/（m³·h），1t原矿的磨矿介质单耗分别为0.61kg和0.41kg。

МШР-4000×7500型球磨机在砾磨制度下工作所需功率为1200～1250kW。

根据№18系列试验结果，精矿铁品位为62.8%，比以前进行的联合磨矿流程试验高0.3%。三段自磨流程的铁品位为63.5%。

联合磨矿流程和三段自磨流程的尾矿铁品位分别为14.7%和14.52%。采用联合磨矿流程，系列的生产能力提高30.6t/h。

试验表明，联合磨矿流程由于从流程中取消了用胶带机往MMC-7000×2300型和МРГ-4000×7500型磨机运送砾石和碎砾石而提高了整个工艺流程工作的可靠性。

译自苏联《Горный журнал》，
1990，№6，35～36

万起译　殷俊良校

（上接第92页）

供研究。该矿床是一个大型硫化矿体，含金、银、铜、锌、铅。金属成分的大幅度波动以及矿体的几何尺寸要求在地质和地质统计方面作详尽解释，仔细设计和确定采矿方法、采矿技术、采矿顺序。按设计系统目前的开发水平，可以进行这样一项设计，其主要过程示于图5。

组合设计系统的样机表明，把采矿设计中提出的问题合并到以计算机为基础的工作站去解决，这一设想大有前途。首批试验证明，这种构思是可以实施和值得采用的，同时有可能进一步发展并具有灵活性。

参考文献（略）

译自联邦德国《Erzmetall》，
1990，№4，162～167

傅庆瑜译　胡际平校

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net