



普通高等教育“十五”国家级规划教材

Shiyan Yanjiu Fangfa

试验研究方法

主编 刘炯天 樊民强

中国矿业大学出版社

试验研究方法

主 编	刘炯天	樊民强	
副主编	杨小生	周 平	马少健
	王羽玲	吕宪俊	

中国矿业大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

试验研究方法/刘炯天,樊民强主编. —徐州:中国
矿业大学出版社,2006.5
ISBN 7 - 81107 - 336 - 6

I. 试… II. ①刘…②樊… III. 选矿—试验—研
究方法 IV. TD9-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 056977 号

书 名 试验研究方法
主 编 刘炯天 樊民强
责任编辑 褚建萍
责任校对 何晓惠
出版发行 中国矿业大学出版社
(江苏省徐州市中国矿业大学内 邮编 221008)
网 址 <http://www.cumtp.com> E-mail cumtpvip@cumtp.com
排 版 中国矿业大学出版社排版中心
印 刷 江苏徐州新华印刷厂
经 销 新华书店
开 本 787×1092 1/16 印张 33.75 字数 842 千字
版次印次 2006 年 5 月第 1 版 2006 年 5 月第 1 次印刷
定 价 39.50 元

(图书出现印装质量问题,本社负责调换)

序

培养创新型人才是高等教育的重要任务。

理论与实践相结合的教学方法是培养创新型人才的有效途径。在教学过程中创设一种科学研究的情境或目标,在教师的启发诱导和教材内容的指引下,以学生独立自主学习和合作讨论为前提,通过讨论、总结、试验等形式,培养学生创新精神和实践能力。

以实验室试验研究为基础的工科大学实践教学课程,首先要教会学生一项技能,也就是为实现某个研究目的而进行的具体试验步骤和试验方法;同时,要使学生掌握进行试验研究需要遵循的基本准则。在此基础上,开设一些综合性、研究型试验课题,以实际工业生产技术要求或由此抽象出的课题为研究目标,培养学生通过科学研究创造性地解决实际问题的能力。以试验为主的矿物加工工程专业试验研究方法课程,就是一门很好的研究型课程。该课程起源于20世纪50年代初,最初采用前苏联米特洛法诺夫编著的《矿石可选性研究》作为教科书,重点介绍与矿物加工有关的试验仪器、试验设备和单元试验方法。经过几年的教学实践和课程建设,国内有些高校出版了同名教科书,其特点是将数理统计和试验设计作为试验方法加到单元试验方法内容中。此后,随着我国工业和教育管理体制的变革,专业方向和课程内容发生了分化和融合,以《煤炭工艺试验研究方法》为代表的专门教科书适应了当时的需要。

《试验研究方法》由刘炯天、樊民强等一批长期从事试验研究方法教学与科研的中青年教授编写,集中了国内矿物加工工程专业相关课程的最新成果。主要内容包括:试验设计与数据处理、矿物加工试验与测试方法、矿物加工试验研究三个部分。内容涵盖了常见金属矿物、非金属矿物和煤炭的性质分析和分选试验技术。从理论基础、试验技能和综合研究三个层次分别进行了论述,很好地体现了研究型课程的三方面功能。注重综合研究能力的培养是本书区别于以往同类教科书的最大特点。

本书的出版,对培养学生的基本试验技能和科学研究素质必将起到积极的推动作用。

中国工程院院士
中国矿业大学教授



2006年5月

前 言

《试验研究方法》是普通高等教育“十五”国家级规划教材。

高等学校试验研究方法(过去也称之为矿石可选性研究、选煤工艺试验研究方法)课程给每一位学习矿物加工的学生留下了深刻的印象。这不仅仅是因为当时的成就感——亲手从大块矿石中分选出了有用成分,更是因为自己所学专业知识的运用以及系统的试验研究方法的学习。

在大学执教的试验研究方法课程使我们从另外一个角度加深了对这门课程的理解与认识。方法与工艺、研究与创新、设计与工程形成了矿物加工工程专业三位一体的本科知识结构与专业培养体系。课程叫什么名称已不是最重要的,关键是这门课程所承载的历史责任——研究意识的培养以及试验方法的学习。

基于此,《试验研究方法》教材力图从内容上做到以下三点:

(1) 形成较完整的试验设计与数据处理的知识体系。这部分内容主要包括了试验设计方法、试验数据处理、方差分析、回归分析等。在编写风格上,强调概率论与数理统计知识的运用,减少理论分析,强调实际运用。

(2) 较系统地介绍了矿物加工试验技术。作为实践环节的重要方面,本教材从工艺矿物学开始到矿物材料的制备与加工,较系统地介绍了主要的矿物加工试验方法与设备。通过单元试验的学习,不仅加深了对矿物加工方法的认识,而且为矿物加工试验提供了直接帮助。在编写体例上,它不从程序与步骤去介绍,更强调试验的原理与方法。还介绍了一些新的试验方法与设备,希望帮助读者在更广泛更新颖的层面上去获取矿物加工学的知识。

(3) 形成较完善的矿物加工工艺研究体系。从采制样到各类矿物分选,本教材展现出一个具有显著矿物加工特色的研究体系。它继承了矿石可选性试验研究体系,并就主要的矿石类型分别进行了介绍。在内容编写上,追求各种矿石性质的描述以及具体矿石类型工艺研究试验体系的完整。基于这种原因,我们在每一章都花较大篇幅,介绍矿石组成与性质、加工与分选方法、试验方案制定等,我们希望这成为本教材的又一特色。

以上三点内容介绍,同时也是本教材的特色介绍,可在本教材的三个篇章中分别得到体现与展示。

本教材可作为矿物加工工程本科生、研究生的教材,也可作为矿物加工科研与工程技术人员的参考资料。对于非矿物加工工程专业的学生以及工作人员来讲,试验设计与数据处理的内容可直接作为教材与教学参考书选用。

本教材由一批长期从事试验研究方法教学与科研的中青年教师编写。其中第一、二十一章由刘炯天编写,第二、十章由马少健编写,第三、二十三章由闽凡飞编写,第六章由杨小

生编写,第四、五章由樊民强、李志红编写,第七章由沈笑君、李明明编写,第八、九章由吕宪俊编写,第十一、十五章由王羽玲编写,第十二章由袁致涛编写,第十三章由李志红编写,第十四章由周平编写,第十六章由印万忠编写,第十七章由曹亦俊编写,第十八、二十二章由李艳军编写,第十九章由戈保梁编写,第二十章由李冬莲编写。附录及参考文献由王羽玲收集整理。全书由刘炯天、樊民强担任主编,由杨小生、周平、马少健、王羽玲、吕宪俊担任副主编。

由于编者水平的局限,本书疏漏与错误在所难免,欢迎广大读者批评与指正。

编 者

2006.3

目 录

第一篇 试验设计与数据处理

第一章 试验设计方法	3
第一节 试验设计的原则与要求.....	3
第二节 单因素试验设计.....	5
第三节 多因素逐项试验设计.....	7
第四节 析因试验设计.....	9
第五节 分割试验设计	10
第六节 正交试验设计	12
第七节 均匀试验设计	17
第八节 单纯形优化试验设计	19
第九节 试验设计方法的综合应用	21
第二章 误差分析与试验结果表示	23
第一节 误差与精度	23
第二节 有效数字与修约规则	27
第三节 随机误差的数据处理	29
第四节 系统误差的发现和消除	34
第五节 粗大误差的判别	37
第六节 误差合成与分配	40
第七节 试验数据和结果的表示方法	42
第三章 方差分析	46
第一节 试验数据分析方法	46
第二节 方差分析的基本方法	47
第三节 单因素试验的方差分析	51
第四节 析因试验的方差分析	52
第五节 分割试验的方差分析	56
第六节 正交试验的方差分析	57
第七节 Excel 在方差分析中的应用	71

第四章 回归分析	76
第一节 一元线性回归	76
第二节 可线性化曲线的线性回归	79
第三节 一元多项式回归	81
第四节 多元线性回归	83
第五节 逐步回归	86
第六节 非线性回归	91
第五章 优化方法简介	94
第一节 非线性方程的数值解	94
第二节 单变量优化的黄金分割法	96
第三节 线性规划	99
第六章 相似原理与应用	105
第一节 物理量、量纲与量纲分析	105
第二节 相似性与相似模拟	107
第三节 相似理论	109
第四节 相似准则 π 项的导出方法	111

第二篇 矿物加工试验技术

第七章 试验规模与组织	119
第一节 试验分类与性质	119
第二节 实验室试验	120
第三节 半工业试验	124
第四节 工业试验	125
第五节 试验组织	127
第八章 样品采集与制备	128
第一节 样品代表性	128
第二节 样品采集	137
第三节 样品制备	146
第九章 工艺矿物学	152
第一节 矿石的物质组成分析	152
第二节 元素的赋存状态分析	157
第三节 矿石的结构构造	160
第四节 显微镜下矿物含量的测定	162
第五节 矿物嵌布粒度的测定	166

第六节 矿物单体解离度测定	170
第十章 颗粒粒度分析与磨矿试验	172
第一节 颗粒尺度表征	172
第二节 粒度分析	176
第三节 磨矿试验	193
第十一章 矿物密度与重选试验	197
第一节 密度的表示方法	197
第二节 密度的测定	199
第三节 密度组成分析与浮沉分析	210
第四节 重选试验	214
第十二章 矿物磁电性与磁电分选试验	228
第一节 矿物的磁性与电性	228
第二节 磁性与电性测定	229
第三节 磁选试验	234
第四节 电选试验	242
第十三章 矿物表面性质与浮选试验	246
第一节 矿物表面性质与测定	246
第二节 纯矿物浮选试验	251
第三节 浮选试验设备与操作	253
第四节 浮选条件试验	255
第五节 浮选流程试验	261
第六节 微泡浮选与选择性絮凝试验	267
第七节 电化学浮选试验	269
第十四章 矿物的化学提纯与分离试验	272
第一节 焙烧试验	272
第二节 化学浸出试验	277
第三节 生物浸出试验	283
第四节 浸出液的处理	290
第五节 混汞试验	299
第十五章 矿浆性质与固液分离试验	301
第一节 矿浆性质测定	301
第二节 煤炭泥化试验	305
第三节 矿浆沉降特性与沉降试验	309

第四节	矿浆过滤特性与过滤试验	316
第五节	过滤离心脱水试验	321
第六节	沉降离心脱水试验	327
第十六章	矿物材料制备与加工试验	330
第一节	粉体材料加工试验	330
第二节	矿物材料提纯试验	335
第三节	矿物材料表面改性试验	339
第四节	典型矿物材料的制备与加工试验	344

第三篇 矿物加工工艺研究

第十七章	矿物加工试验体系概述(矿石可选性试验)	355
第一节	矿石可选性试验研究的意义和任务	355
第二节	矿石可选性试验研究计划的制定	356
第三节	可选性试验研究的主要步骤	357
第十八章	黑色金属矿选矿研究	360
第一节	铁矿石类型及特点	360
第二节	铁矿石选矿工艺研究	363
第三节	其他黑色金属矿选矿工艺研究	377
第十九章	有色金属矿的选矿工艺研究	381
第一节	含铜多金属硫化矿的选矿工艺研究	381
第二节	铅锌矿的选矿工艺研究	394
第三节	典型有色金属氧化矿的选矿工艺研究	396
第四节	含锡石多金属矿的选矿工艺研究	399
第五节	锑、砷、铋、汞硫化矿的选矿工艺研究	404
第六节	含金硫化矿及钽铌锂铍矿的选矿工艺研究	406
第二十章	非金属矿加工工艺研究	411
第一节	磷矿选矿工艺研究	411
第二节	高岭土加工工艺研究	420
第三节	石墨选矿工艺研究	424
第二十一章	煤炭分选工艺研究	428
第一节	煤炭种类及分选原理	428
第二节	煤炭组成与可选性研究	435
第三节	选煤工艺研究	442

第二十二章 生产检查与流程考查..... 453

 第一节 生产检查与分析..... 453

 第二节 流程考查方案的制定..... 458

 第三节 流程计算与分析..... 462

第二十三章 单机生产检查..... 465

 第一节 重选设备单机生产检查..... 465

 第二节 浮选设备单机生产检查..... 469

 第三节 磁选设备单机生产检查..... 473

 第四节 单机生产检查实例分析..... 475

附 录

附录 1 常用正交表 487

附录 2 均匀设计表 497

附录 3 标准正态分布积分表 503

附录 4 t 分布表 504

附录 5 F 分布表 506

附录 6 χ^2 分布..... 509

附录 7 相关系数 R_a 表 511

附录 8 常见矿物表 512

参考文献..... 523

第一篇

试验设计与数据处理

第一章 试验设计方法

试验设计是对试验进行安排与布局的过程。试验设计方法是指以概率论与数理统计为理论基础,为获得可靠试验结果和有用信息,科学地安排试验的方法或途径。无论是从事一项具体试验,还是系统的科学研究,都必须进行试验设计与规划。特别是对已经具有专业知识与一定科研能力的人来说,搞好试验研究必须学会试验设计。

人们对试验设计的认识与了解,应该从以下通常关心的三个试验问题开始。

第一,试验全面性问题。按照通常的思维方式,试验的全面准确是以所有试验条件搭配为前提的,但这样又不得不面临试验工作量大的问题。如把所有的条件搭配做一遍试验,三因素三水平需要 27 次,七因素二水平需要 128 次,五因素五水平需要 3 125 次。也就是说,当试验条件考虑得稍多一点时,采用所有条件搭配的试验方案显然不可行。这时,全面准确的试验安排是难以实现的。

第二,试验可靠性问题。我们已习惯了就试验的具体条件单独进行试验,忽略条件之间的相互影响与存在,即忽略了试验交互作用。交互作用指因素之间共同对试验结果产生的影响,这种作用有时甚至超过试验因素本身。忽略了交互作用,必然使得试验结果的可靠性大大降低。

第三,试验精度问题。面对试验的诸多条件,不仅要进行试验条件的取舍,更要清楚其主次。突出主要条件去安排试验就会提高试验精度。再者,在不同的试验阶段,如一般的条件探索,或具体试验条件的优化,采取不同试验设计方法对试验精度有直接影响。

综合以上三点,试验设计就是解决如何实现多、快、好、省地做试验的问题。

英国费歇尔(R. A. Fisher)在 1925 年出版的《研究工作中的统计方法》中提出了“试验设计”的术语,在 1935 年出版的《试验设计》中首次系统地介绍了试验设计的原理和方法。虽然“试验设计”出现的历史不长,但发展迅速,早已渗透到生产与科学研究各个领域。矿物加工的工艺、设备与药剂的相关研究,都广泛采用多种试验设计的原理与方法。

试验设计方法很多,主要试验设计方法有:单因素试验设计、多因素逐项试验设计、析因试验设计、分割试验设计、正交试验设计、均匀试验设计、单纯形优化试验设计。

试验设计一般包括试验设计与数据分析两部分。不同的试验设计对应特定的数据分析方法。如正交试验设计一般需采用方差分析与直观分析相配合,获取最佳工艺条件。本章仅指出试验设计方法对应的数据分析方法,具体数据分析方法将在后续章节介绍。

第一节 试验设计的原则与要求

一、试验设计的要素

试验设计的要素包括试验条件与试验指标。在进行试验设计之前,首先要选取试验指标与试验条件。

(一) 试验指标

它是衡量试验效果的代表性数据。试验指标可以是单一指标(如综合评价指标),也可以是多个指标。选择试验指标时需考虑其代表性,要充分体现试验的目的与目标,同时试验指标应具有惟一性与可比性。

试验指标有定性指标和定量指标之分。定性指标是指由人的感官直接评定的指标,如油的香味程度、室内光线的强弱等;定量指标是指能用某种仪器或工具准确测量的指标,如质量、矿物品位等。通常,定性指标要尽量定量化并用数量表示,使试验指标有一定可比性。

(二) 试验条件

它包括因素和水平。因素是指影响试验指标的要素或原因,亦称因子,常用 A、B、C 等表示。因素可进一步分为:可控因素、标示因素、区组因素、误差因素。水平是指因素所处的具体状态与条件,又称位级,常用 1、2、3 等表示。

1. 可控因素

它是指可预先设定、直接影响试验指标而欲考查的试验条件,如时间、温度、压力等。可控因素可根据试验要求做出最佳因素选择。

2. 标示因素

它是指试验环境与状况等无法选择或改变的试验条件,如员工素质、仪器质量等。对于标示因素,试验目的不是考查其最佳水平,而是了解它与可控因素之间的交互影响。

3. 区组因素

它是指可能存在显著影响,但只是用来划分区组(不需考查)以提高试验精度的试验条件。如进行设备的岗位工技能比赛,考核的是操作人员的操作技术水平,但由于需在不同设备上进行,因而设备便成为区组因素。

4. 误差因素

它是指除上述因素外,无法人为控制、随机波动的对指标有影响的其他所有试验条件。误差因素来自于试验人员、试验设备、试验环境等,它不可避免也不可以选择,但可以通过试验过程进行控制,也可通过数据分析加以剔除。

二、试验设计的原则

试验设计原则又称费歇尔三原则,分别是重复试验原则、随机化试验原则和局部控制试验原则。

(一) 重复试验原则

在完全相同条件下多次进行试验以减小试验误差的原则称为重复试验原则。重复试验的目的是提高试验精度。在进行数据分析时,需通过重复试验估计试验误差,这是方差分析的必要条件。

(二) 随机化试验原则

将条件搭配按随机化排序进行试验以减小试验误差的原则称为随机化试验原则。随机化试验是避免系统误差与欲考查因素效应混杂的有效措施;有利于消除系统误差,正确估计试验误差。随机安排试验的方法有:① 抽签法,即把所有试验统一编号后,抽签确定试验顺序;② 查随机置换表,即把所有试验统一编号后,查随机置换表确定试验顺序。

(三) 局部控制试验原则

局部控制试验是按某一条件将试验分组进行,又称分组试验。分组单元称为区组,在区

组内试验条件比较一致或相似,区组之间的试验差异较大,这种试验安排的作用在于提高试验精度。这种将待比较的试验条件设置在差异较小的区组内以减小试验误差的原则,称为局部控制试验原则。显然,局部控制试验本身就是一种试验设计方法,它进一步分为:完全区组的局部控制试验与均衡不完全区组的局部控制试验。

1. 完全区组的局部控制试验

所谓完全,是指在每个区组中,每个因素的所有水平都出现。“完全”包含全面与均衡双重含义,它便于试验安排与数据分析。

2. 均衡不完全区组的局部控制试验

它是指所有试验条件不能在同一区组出现,但在不同区组出现的次数相等。区组内的“不完全”通过整个试验的条件“均衡”分布来弥补。

在进行试验的局部控制时,首先选择完全区组的局部控制试验。在没有条件进行完全区组的局部控制试验时,可采用均衡不完全区组的局部控制试验。

三、试验设计的要求

(一) 目的性

一般来说,应当选择对因素效应最敏感或较敏感的参数作为试验指标。为充分有效地利用试验所得到的数据和信息,多选择综合评价参数作为试验指标。

(二) 全面性

在确定欲考查因素时,不能遗漏有显著影响的因素,特别是主要影响因素。非显著性影响因素本身可不放在欲考查之列,但当它们与其他因素的交互效应显著时,也必须加以考虑,这样才能全面了解各因素的影响。

(三) 可比性

在试验中,除欲考查因素外,其他条件应基本上保持一致,这样得到的试验结果才可以直接看做是被考查因素的效应,不同因素之间才有可比性。反之,如果除欲考查的因素之外,其他条件也同时发生变化,这时就不能肯定地说,试验指标的变化一定是由欲考查因素的效应引起的,也就意味着欲考查因素效应同其他因素效应“混杂”了。由于这种效应混杂会干扰试验结果的分析,因此在安排试验时应设法避免。在出现因素效应混杂时,应注意采用区组试验设计。

(四) 重复试验

采用重复试验是为了方便估计试验误差以及因素之间的交互效应。重复试验本身还有利于减少试验误差,提高统计检验的灵敏度。

(五) 选择合适的数据分析方法

其目的是为了充分利用试验中所得到的数据与信息,获取正确的结论。每种试验设计都有相对应的数据分析方法,选择并正确进行数据分析是试验设计不可或缺的部分。

第二节 单因素试验设计

单因素试验是指只有一个因素(或仅考查一个因素)对试验指标构成影响的试验。单因素试验设计要求对试验水平进行布局与优化,是一种水平试验设计。

单因素试验设计方法可分两类;同时试验设计和序贯试验设计。同时试验设计就是一

次给出全部试验水平,一次完成全部试验并得到最佳试验结果,如穷举试验设计。序贯试验设计要求分批进行试验,后批试验需根据前批试验结果进一步优化后序贯进行,直到获取最佳试验结果,如平分试验设计、黄金分割试验设计。

一、试验范围与试验精度

(一) 试验范围

试验范围指试验水平的范围。试验设计时需预先确定试验范围,一般采用两种方法:

① 经验估计。可凭经验估计试验范围,并在试验过程中作调整。② 预先试验。要求在较大范围内进行探索,通过试验逐步缩小范围。

(二) 试验间隔与试验精度

试验间隔是指试验水平的间距,试验精度是指试验结果逼近最佳水平的程度。显然,试验间隔与试验精度是一对矛盾,试验间隔越大,试验精度越低。在保证试验精度的条件下,试验水平变化而引起的试验结果变动必须显著地超过试验误差。

(三) 试验顺序

在确定试验顺序时,往往习惯于按照试验水平高低依次做试验。这样,随着试验的进行,有些因素会发生缓慢变化甚至影响试验结果。因此,正确的做法是采用随机化方法来确定试验顺序。在试验工作量较少或者试验准确度要求较低时,也可以采用按水平高低或者选取中间试验点的方法来进行试验排序。

需强调指出,以上不仅对单因素试验设计,而且对所有试验设计方法都适用。

二、单因素试验设计

(一) 平分试验设计

平分试验设计就是平分试验范围,把其中间点作为新试验点,然后不断缩小试验范围直到找到最佳条件。当试验结果呈单向变化时,也就是说最佳试验点只可能在试验中间点的一侧时,可采用平分试验设计。该方法简便易行,但要注意其单向性特征。

(二) 穷举试验设计与均分试验设计

穷举试验设计是将所有可能的试验点在一批试验中全部进行试验。均分试验设计是根据试验精度要求,均分整个试验范围以获得所有试验点。显然,均分试验设计不仅充分体现了穷举试验设计的思想,而且也明确了具体试验设计方法。

如试验起始点为 a , 终点为 b , 试验点的间隔区间为 L , 则均分试验设计的试验点数 n 为

$$n = \frac{b-a}{L} + 1 \quad (1-1)$$

该试验设计的特点是对所试验的范围进行“普查”,试验点数量较多,宜用于对目标函数性质没有掌握或很少掌握的情况。

(三) 黄金分割试验设计

黄金分割试验设计就是在预定试验范围内采用 0.618 黄金分割原理安排新试验点,直到找到最佳试验结果为止,因而又称 0.618 试验设计。黄金分割就是在特定范围内寻求黄金分割点(k)及其对称点($1-k$)。在 0~1 的试验范围内,黄金分割点(k)为 0.618,其对称点($1-k$)为 0.382。

黄金分割试验设计涉及两个层面,一是已知试验范围内的黄金分割点的寻求,二是新试验范围的确定与进一步寻优。如图 1-1 所示,首先在试验范围(a, b)内,按照 0.618 黄金分