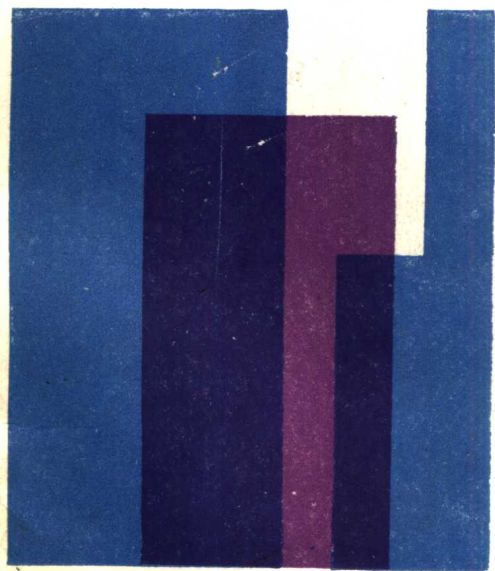


高等学校试用教材

陶瓷工艺实验

祝桂洪 编著



中国建筑工业出版社

高等学校试用教材

陶瓷工艺实验

祝桂洪 编著

中国建筑工业出版社

本书系国家建筑材料工业局组织编写的**陶瓷专业教材**。书中分别介绍了陶瓷工艺性能方面的测试技术和陶瓷材料或制品性能方面的测试技术。按照工艺性能、化学性能、热性能、光学性能、机械性能、电学性能等共有27个实验，每项实验均按实验目的、实验原理、仪器设备、实验步骤、记录与计算、注意事项和思考题等七个方面予以介绍。另外，还介绍了实验方案的设计及数据处理，实验室仪器设备及化学药品的使用与防护。编写时考虑到科学性与先进性的要求，综合与归纳了我国有关高等院校、研究所和陶瓷厂的教学、科研、生产上的实验成果，同时吸取了国外陶瓷文献中有益的内容。

本书为高等学校试用教材，也可作为陶瓷专业科技人员的参考书。

高等学校试用教材
陶瓷工艺实验
祝桂洪 编著

中国建筑工业出版社出版(北京西郊百万庄)
新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售
中国建筑工业出版社印刷厂印刷(北京阜外南礼士路)

开本：787×1092毫米 1/16 印张：12 $\frac{3}{4}$ 字数：310千字

1987年7月第一版 1987年7月第一次印刷

印数：1—5,580册 定价：2.00元

统一书号：15040·5139

前 言

本书系根据国家建筑材料工业局1982年10月在洛阳召开的高等学校无机非金属材料类专业教材编审委员会确定，并于1983年5月在景德镇召开的无机非金属材料专业陶瓷课程教学大纲审定会审定的《陶瓷工艺实验》教学大纲编写而成。本书曾经审稿会审定，由华南工学院刘康时、赵绍棠负责主审。

随着陶瓷材料与科学的迅速发展，陶瓷工艺必然相应地发展着；随着陶瓷材料与陶瓷工艺的迅速发展，陶瓷工艺性能与陶瓷材料理化性能的实验科学与测试技术也必然伴随着快速发展。因为新材料与新工艺的发展是与生产实践与科学实验密切相关的。陶瓷材料与陶瓷工艺性能的实验测试内容与测试方法颇多，要想编写出一本既反映现代国内水平又反映国外水平，同时内容比较全面而崭新的陶瓷工艺实验教材确非易事，加之编者水平有限，书中必定存在不少问题。敬请读者指出，以便订正。

编者

目 录

绪论	1
一、实验方案的设计及数据处理	4
(一) 实验为什么要设计	4
(二) 正交设计实验法	7
(三) 回归分析实验法——直线关系式的建立	14
(四) 数据处理	17
1. 基本概念	17
2. 测量误差	18
3. 求平均值的方法	19
4. 有效数字及计算规则	21
5. 误差计算	22
6. 正态分布	24
二、陶瓷工艺实验	29
实验一 粘土或坯料的可塑性测定	29
实验二 粘土的结合力测定	38
实验三 泥浆流动性、触变性、吸浆速度的测定	41
实验四 真密度的测定	48
实验五 固体粉料的细度和颗粒分布的测定	51
实验六 气孔率、吸水率、体积密度的测定	72
实验七 线收缩率和体收缩率的测定	75
实验八 石膏浆凝结时间的测定	79
实验九 釉的高温熔体粘度的测定	85
实验十 釉的表面张力测定	89
实验十一 釉的熔融温度范围的测定	96
实验十二 坯釉应力的测定	98
实验十三 耐火度的测定	101
实验十四 干燥灵敏性系数的测定	104
实验十五 烧结温度与烧结温度范围的测定	106
实验十六 陶瓷坯料配方实验	109
实验十七 陶瓷釉料配方实验	114
三、陶瓷材料理化性能实验	117
实验十八 白度、光泽度、透光度的测定	117
实验十九 显微硬度的测定	121
实验二十 热稳定性(抗热震性)的测定	125
实验二十一 热膨胀系数的测定	127
实验二十二 化学稳定性的测定	131

实验二十三	抗压、抗折、抗张、抗冲击强度极限的测定	134
实验二十四	铅、镉溶出量的测定	145
实验二十五	高温荷重软化温度的测定	150
实验二十六	比体电阻 (ρ_v) 的测定	154
实验二十七	介电损耗角正切 ($\text{tg}\delta$) 及介电常数 (ϵ) 的测定	158
四、	实验室仪器设备及化学药品使用与防护	162
	(一) 仪器设备防护的重要意义	162
	(二) 仪器设备的侵蚀	162
	(三) 仪器设备的防护	165
	(四) 化学药品的使用防护	169
附录		172
附录一	测温锥	172
附录二	常用陶瓷原料常数表	174
附录三	颗粒沉降分析实验中常用固体颗粒所适用的悬浮介质及分散剂浓度	176
附录四	水的比重和粘度	177
附录五	常用热电偶温度-毫伏对照表	178
附录六	水玻璃的成分 ($\text{Na}_2\text{O}:\text{SiO}_2$) 与密度变化关系	189
附录七	国际单位制 (SI) 的换算	189
附录八	元素和氧化物	192
附录九	无线电专业用陶瓷材料标准	194
主要参考文献		198

绪 论

国内凡设有无机非金属材料类专业的高等院校一般都编有一本具有几项实验到十几项实验不等的陶瓷工艺实验讲义，到目前为止，还没有一本统编的陶瓷工艺实验教材。鉴于此，国家建筑材料工业局1982年10月在洛阳召开的高等学校无机非金属材料类专业教材编审委员会第一次工作会议决定编写一本比较全面的系统的能适应现代要求的陶瓷工艺实验教材。

随着陶瓷材料科学与工程迅速发展，都要求实验科学与测试技术跟上去。与光学显微技术、电子显微技术、 x 射线衍射分析、电子探针、高温物相分析、红外吸收光谱分析、表面分析相比较，陶瓷工艺实验则是属于常规实验和常规分析，但这种常规实验和常规分析是必不可少的最基本的实验方法和分析手段。在做毕业设计（瓷厂设计）时要确定生产什么（产品方案，即具有什么性能的产品）、用什么生产（原料、辅助材料）、怎样生产（生产方法、工艺、设备），即用什么原料配成坯料、釉料（这要做可塑性、结合性、真密度、细度、颗粒度、泥浆性能、坯料配方、釉料配方等工艺性能实验），经过成型、干燥、烧成（这要做收缩率、石膏浆凝固速度、干燥灵敏性指数、气孔率、吸水率、体积密度、烧成温度及烧成温度范围、耐火度、釉的高温粘度、釉熔体的表面张力、釉的熔融温度范围、坯釉应力等工艺性能实验），制成具有所要求理化性能的陶瓷产品（这要做白度、光泽度、透光度、显微硬度、抗压、抗折、抗张、抗冲击强度、高温荷重软化温度、热稳定性、热膨胀系数、化学稳定性、铅镉溶出量、比体电阻 ρ_i 、介电损耗角正切值 $\text{tg}\delta$ 及介电常数 ϵ 等材料或制品理化性能实验）。当然，上述工艺性能实验和材料性能实验不一定每项都要做，例如日用瓷生产，工艺性能实验一般都要求做，材料性能实验中的电性能可以不做，其它光、机、热、化等性能实验按需要选择做，这要根据产品要求而定。

对上述工艺实验和材料实验结果的分析，可以作为调整组分、改变结构、控制性能的依据。工艺因素可以影响组成、影响结构，从而影响性能。在组成、结构、性能、工艺之间，工艺因素的能动性比较大，只要是用传统的陶瓷生产方法制造的无机非金属多晶产品，其组分结构性能均受工艺制约和影响，陶工常说陶瓷生在原料，死在窑上。任何优质原料，合理配方，通过精密计算能生成理想的化合物或固溶体或相组成，如工艺因素（粉碎方法与细度、颗粒组成、混料均匀度、成型方法、干燥制度、烧成温度、气氛、压力等）不合理，还是不能获得预期的结果。

由于陶瓷的含义和功能发生变化，即使普通瓷，人们对材质、器型和装饰的要求也越来越高，需要测试的工艺性能、材料或制品性能也越来越多，因此，新的实验项目、新的实验方法和新的仪器设备也不断增加。微量到ppm级的铅镉溶出量，五十年代的陶瓷工艺学及其实验课甚至日用瓷标准中均没有此项测定。直到1953年Walsh建立原子吸收分析技术时原子化源是火焰，到七十年代末八十年代初又研究用电热原子化器和电感耦合等

离子体原子化器取代火焰，电热原子化法克服了火焰法中雾化系统较低的雾化率，能使测定的样品完全参加原子化，避免了原子浓度在火焰气体中的大量稀释，提高了分析灵敏度；电感耦合等离子体原子化器，能提供更高的温度，从而使许多元素的原子化效率得到提高，才大大增加了多元素同时测定的可能性。固体粉料颗粒分布的测定由原始的筛析法、光学显微镜计数法到电子显微镜计数法，由重力沉降法到离心沉降法，这不仅加快沉降速度，缩短沉降时间，而且扩大了测定范围。现在又发展了一种光透过法即光浊度法，由各种粒径的颗粒所引起的光密度变化，可以计算平均粒径、粒径分布及相对含量。测定粒径分布的方法还有电磁波散乱法、惯性力法、流动法、浸渍热法等。其它实验项目也都出现了许多新的实验方法和仪器设备。

陶瓷有普通陶瓷、高温陶瓷、电子陶瓷、铁电压电陶瓷、磁性陶瓷、氧化物陶瓷、碳化物陶瓷、硼化物陶瓷，等等。要编写一本适用于上述各种陶瓷的工艺实验课的陶瓷工艺实验教材是困难的，也是不必要的。但是凡用传统陶瓷生产方法制成的陶瓷，无论是粘土制品还是根本不用粘土的纯氧化物制品，都有许多共性的工艺实验或材料理化性能实验要做，例如可塑性、泥浆流动性、触变性、吸浆速度、真密度、固体粉料的细度和颗粒分布、气孔率、吸水率、体积密度、线收缩体收缩率、釉的熔融温度范围、白度、光泽度、透光度、热稳定性（抗热震性）、线膨胀系数、烧成温度与烧成温度范围等11个实验（或20项实验）是各种陶瓷共同适用的实验，至于高温陶瓷的高温蠕变、压电陶瓷的压电系数等特殊实验则不属于本教材范围。本实验教材主要适用于《陶瓷工艺原理》和《普通陶瓷》的工艺实验课。

本书共有27个实验，有的实验如白度、光泽度、透光度的测定由三项实验组成，这样则共有40项实验，其中工艺性能实验17个或24项，材料或制品性能实验10个或16项。属于原料、坯料、釉料的工艺实验有可塑性、结合性、真比重、细度和粒度、泥浆性能、坯料配方、釉料配方等七个；属于成型干燥烧成的工艺实验有收缩率、石膏浆凝固速度、干燥灵敏指数、气孔率、吸水率、体积密度、烧成温度及烧成温度范围、耐火度、釉的高温粘度、釉熔体的表面张力、釉的熔融温度范围、坯釉应力等10个；属于陶瓷材料或制品的光学性能有白度、光泽度、透光度；机械性能有显微硬度、抗压、抗折、抗张、抗冲击强度、高温荷重软化温度；热性能有热稳定性（抗热震性）、热膨胀系数；化学性能有化学稳定性、铅镉溶出量；电性能有比体电阻 ρ_v 、介电损耗角正切值 $\text{tg}\delta$ 和介电常数 ϵ 等10个。此外，还在实验开始之前介绍了实验方案的设计及数据处理，在实验后面则介绍了实验室仪器设备及化学药品的使用与防护。各院校可根据本校的情况选择。

实验所用的试样，有的可用试片，如收缩率、气孔率、吸水率、体积密度、坯釉应力、线膨胀系数、抗压、抗折、抗张、抗冲击强度、比体电阻、介电损失角正切值和介电常数等；有的则必须用成品，如热稳定性和铅镉溶出量的测定。板状或棒状试样与杯、盘、碗试样，其抗热震性是不一样的。瓷板、瓷棒形状简单，厚薄、粗细均匀，只有一个收缩中心；杯、盘、碗形状复杂，厚薄不均匀，收缩中心多。因此，瓷板、瓷棒与杯、盘、碗、受热产生的热应力不同，引起龟裂的可能性不一样。在同一测试条件下，同一坯料釉料的瓷板、瓷棒可能不裂，而杯、盘、碗则可能炸裂。

实验过程控制在预定的条件之下，确保实验的优质、高效和安全，这是仪器设备防护的目的与任务。仪器设备也会受到“细菌”侵蚀患“病”，这里“细菌”是指水分、霉

菌、工业大气、工作介质等侵蚀性物质。测试仪器受到侵蚀后则不能正确反映实验参数的真实情况，甚至导致实验事故的发生。所以仪器防护工作是每项实验的重要组成部分，必须予以重视。

在实验方案的设计及数据处理这一部分中引入了数理统计知识，近代物理化学及应用科学的发展为概率论及数理统计在自然科学方面的应用开辟了广阔的园地。例如分子物理学中研究分子运动所遵循的规律异常复杂，故不能用古典方法（例如方程准确求解法）去处理，只有用概率论的方法才能得到解决。随着工业生产的标准化与专业化，概率论数理统计又被广泛地应用于产品的质量的控制，并且经验证明，利用统计方法是能够有效地提高产品质量和降低成本的。陶瓷产品的质量首先与原料和工艺有关，然而即使设法控制原料和工艺不变，产品质量仍然有波动，这可归结为许多不可控制的因素，如原料中的杂质、机器设备运转的偶然不协调、操作工人的疲劳以及燃料、气候变化等所造成的偶然现象。当然现象的偶然性往往伴随着必然性一同出现，偶然性是必然性的表现形式，是必然性的补充。陶瓷生产上的许多工艺性能和理化性能之间，虽然有必然联系，但无法利用“因果关系”加以严格控制或准确预测，也无法用一些简单的物理定律加以概括，更无法建立函数关系，把工艺性能之间、理化性能之间、工艺和理化性能之间的性能参数在函数关系中固定下来。例如粘土的可塑性与结合性；塑性泥料的含水率与收缩率；瓷胎透光度与机械强度之间有相关关系，但并无函数关系，因为在上述相关关系之外尚有其它影响因素干扰着，而这许多工艺性能、理化性能之间的互相影响又是随机现象，所以只能从大量观测中综合分析，归纳出一些“大量现象”的规律来。

在做陶瓷工艺实验时，一般是由老师预先编写好实验讲义，学生照着实验步骤进行实验操作，得出实验数据，通过简单计算即可完成实验，写出实验报告，这是老师扶着学生走的办法。应当强调独立思考，在实验之前学生应写好实验预习报告，设计实验方案，因为每一项实验可以有不同的实验方法，而每一种实验方法也可以有不同的实验步骤，而得出的实验数据也可以有不同的分析处理。在处理数据时可以从中发现问题的，提出问题，这样有利于提高学生分析问题和解决问题的能力，并把教学与科研结合起来。

本教材主要讲授实验方案的设计，实验数据的处理，以及基本的比较系统的陶瓷配料、烧制、性能等工艺实验，注意培养学生掌握实验原理，训练学生熟悉操作技能，处理实验数据，分析实验结果和编写实验报告，着重培养学生从事科学研究的能力。

一、实验方案的设计及数据处理

(一) 实验为什么要设计

在陶瓷生产、科研和教学中，对陶瓷工艺及制品性能方面要做许多实验。实验方案设计得好，实验次数不多，就能得到满意的结果；实验方案设计不好，实验次数既多，结果还不一定满意。实验次数多得不合理，必然浪费大量的人力物力，有时由于实验时间拖长，实验条件改变，也会使实验失败。因此，如何合理地设计实验方案是很值得研究的一个问题。

【例 1】设有三个日用细瓷配方 A 、 B 、 C ，拿到瓷厂去进行生产考验，以比较鉴别其质量优劣。

一种方法是把三个配方分到三个瓷厂去进行试制生产，结果是配方 A 的质量高，配方 B 次之，配方 C 最差，那么能否下结论说配方 A 的质量最高呢？仔细考虑一下就会发现，三个配方分到三个瓷厂去试验，三个瓷厂的工艺包括烧成制度是不同的，那么配方 A 的质量高不一定说明配方 A 最好，因为这里配方好坏与工艺因素混在一起，给如何下结论带来了困难。因此这种设计方案是不好的。

第二种方法是把三个配方放在同一个瓷厂用同一种工艺进行试制生产，并尽可能使工艺因素稳定，这样配方就不会和工艺因素的作用混在一起了。如结果是配方 A 最好，那就可以下结论了。

至于三个瓷厂都对三个配方进行试验，结果是三个瓷厂得出的结论各不相同，这又如何比较鉴别呢？这是不同的配方和不同的工艺是否互相适应的问题，这种情况在陶瓷工艺实验和生产上是存在的，如要进一步做实验，那就要把三个瓷厂的工艺进行对比试验，从中找出工艺因素与原料配方之间是否适应的原因来。

在实验中经常遇到的另一个问题是多因素问题，先看下面的简单例子。

【例 2】某瓷厂想提高滚压成型的质量和产量，对滚压工艺中三个主要因素各分三个位级（水平）进行实验，列因素水平表如下：

水 平	因 素		
	A (泥料含水率)	B (主轴转速)	C (转 速 比)
1	A_1	B_1	C_1
2	A_2	B_2	C_2
3	A_3	B_3	C_3

对于这样的实验，许多瓷厂采用下面的方法：首先固定 A 和 B ，变化 C ，即

$$A_1 B_1 \left\{ \begin{array}{c} C_1 \\ \boxed{C_2} \\ C_3 \end{array} \right. \quad (\text{质量好产量高的用} \boxed{} \text{表示)}$$

试验结果是 C_2 最好，于是固定 A_1 和 C_2 ，变化 B ，即

$$A_1 C_2 \left\{ \begin{array}{c} B_1 \\ B_2 \\ \boxed{B_3} \end{array} \right.$$

试验结果是 B_3 最好，于是再固定 $B_3 C_2$ ，变化 A ，即

$$B_3 C_2 \left\{ \begin{array}{c} A_1 \\ \boxed{A_2} \\ A_3 \end{array} \right.$$

试验结果是 A_2 最好，于是下结论说 $A_2 B_3 C_2$ 最好，即采用 A_2 水平的泥料含水率， B_3 水平的主轴转速和 C_2 水平的转速比，这样的滚压工艺产量高，质量好。这种方法叫简单比较法，一般也能得到一定的效果。但这种方法有缺点，当因素间相互影响较大时， $A_2 B_3 C_2$ 就不一定是最好的，用这种方法做试验，同样的试验次数，提供的信息不够丰富。另外，用这种方法做实验，如不做重复试验则给不出误差的估计。

如何保持简单比较法的优点（试验次数较少），克服它的缺点呢？试验设计提供了许多方法。在因素较多时，既要考虑试验次数少，又要得出全面的结论，这就需要科学的方法进行合理的安排。

【例 3】 某瓷厂想提高球磨机的球磨效率，进行正交设计，试验如下。

1. 现状调查

	低中档时期	高档时期
球料水比	4.5:3:3	5.5:3:3
时间要求	8~10小时	15~20小时
细度要求(过300目筛下表示法)	95~96%	97~98%
投料要求: 长石粉120目, 粘土料为原矿质, 粘土料磨球大、中、小球比例为生产自然形成的比例。		

2. 主攻目标

- (1) 选择球料水的最佳配比。
- (2) 细度达到98%所需的最恰当时间。

球:料:水 = 4.5:2.5:2.5 (水平1)

球:料:水 = 5:3:3 (水平2)

3. 程序设计

- (1) 因素位级(水平)表

水 平	因 素			
	时 间(小时)	球 (吨)	料 (吨)	水 (吨)
1	8	4.5	2.5	2.5
2	10	5	3	3
3	12			
4	15			

(2) 正交表型式的选择 $L_8(4^1 \times 2^1)$

水 平 试验号	因 素	1	2	3	4	5
1		1	1	2	2	1
2		3	2	2	1	1
3		2	2	2	2	2
4		4	1	2	1	2
5		1	2	1	1	2
6		3	1	1	2	2
7		2	1	1	1	1
8		4	2	1	2	1

4. 试验结果

水 平 试验号	因 素	时 间 (小时)	球 (吨)	料 (吨)	水 (吨)	细 度 (%)
1		1(8小时)	1(4.5)	2(3)	2(3)	96.5
2		3(12小时)	2(5)	2(3)	1(2.5)	98.1
3		2(10小时)	2(5)	2(3)	2(3)	98.12
4		4(15小时)	1(4.5)	2(3)	1(2.5)	98.57
5		1(8小时)	2(5)	1(2.5)	1(2.5)	97.73
6		3(12小时)	1(4.5)	1(2.5)	2(3)	99.38
7		2(10小时)	1(4.5)	1(2.5)	1(2.5)	99.04
8		4(15小时)	2(5)	1(2.5)	2(3)	99.47

5. 数据处理

	球	料	水
I(水平1细度之和)	393.49	395.62	393.44
II(水平2细度之和)	393.42	391.29	393.47
R(I、II的极差)	0.07	4.33	0.03

6. 结果

最佳位级(水平)	球	料	水	时间
	1	1	2	

最佳配比

4.5 2.5 3

细度达到98%所需最恰当时间

12小时

从上面三个例子我们明白了实验设计是数理统计的一门重要分枝，其主要内容是讨论实验的合理安排以及实验后的数据分析处理。

(二) 正交设计实验法

1. 正交拉丁方

先看下面例题。

【例 4】 生产某种日用细瓷，用四种主要原料进行配制：高岭土（ A ），长石（ B ），石英（ C ），粘土（ D ）。每种原料均取三个水平，要求通过实验得出一个最佳的配方，使质量又好成本又低。

如每个因素各个水平的所有组合都做实验，要做 $3^4 = 81$ 次，这样实验次数太多。能否作一部分试验，又能得出较好的结果呢？

先考虑 A 、 B 两个因素，全部组合要做九次试验，安排如下：

$A \backslash B$	B_1	B_2	B_3
A_1	A_1B_1	A_1B_2	A_1B_3
A_2	A_2B_1	A_2B_2	A_2B_3
A_3	A_3B_1	A_3B_2	A_3B_3

如果同时还要考虑因素 C ，而试验次数又不增加，应如何安排？

上面二因素三水平互相各碰一次，这样反映情况比较全面。三因素三水平，要反映的情况比较全面，必须任二个因素间的不同水平各碰一次，采用如下安排：

$C \backslash B$	B_1	B_2	B_3
A_1	$A_1B_1C_1$	$A_1B_2C_2$	$A_1B_3C_3$
A_2	$A_2B_1C_2$	$A_2B_2C_3$	$A_2B_3C_1$
A_3	$A_3B_1C_3$	$A_3B_2C_1$	$A_3B_3C_2$

这样的安排很均衡， A 的每个水平和 B 、 C 的三个水平各碰一次， B 的每个水平和 A 、 C 的三个水平也各碰一次， C 的每个水平和 A 、 B 的三个水平也各碰一次。可以设想虽然做了九次实验（全部要做 $3^3 = 27$ 次），还是可以反映比较全面的情况的。上面的实验设计表可以简化为：

<i>C</i> \ <i>B</i>	1	2	3
<i>A</i>			
1	1	2	3
2	2	3	1
3	3	1	2

上表右下角

1	2	3
2	3	1
3	1	2

的排列，在每一行每一列中，1、2、3正好各出现一次，具有这样性质的方块称为拉丁方（由于排列这种方块常用拉丁字母，故名）。

上面只考虑了三因素三水平，如果还要考虑因素*D*则四因素三水平能否保持上述的要求而实验次数不增加呢？根据方才上面加*C*的经验，*D*的三个水平必须构成拉丁方，这样和*A*、*B*才能均衡。用粗黑体字1、2、3表示*D*的三个水平，实验安排如下：

<i>CD</i> \ <i>B</i>	1	2	3
<i>A</i>			
1	11	22	33
2	22	33	11
3	33	11	22

从上表可看到，*A*、*B*、*C*之间很均衡，*A*、*B*、*D*之间也很均衡，但*C*、*D*之间就不均衡了。*C*的1水平只和*D*的1水平相碰，和*D*的2、3一次也没有碰上，*C*的2水平和3水平也有类似情况，这样的安排是不好的。如实验结果发现*C*的1水平最好，同时也可认为是*D*的1水平最好。*C*和*D*的作用混杂在一起了。因此需要改进设计，即*D*的三个水平既要排成拉丁方，又要使*C*、*D*的拉丁方不能一样，两个拉丁方之间要搭配均匀，按此原则改成如下设计：

<i>CD</i> \ <i>B</i>	1	2	3
<i>A</i>			
1	11	22	33
2	23	31	12
3	32	13	21

这样D的三个水平组成的是拉丁方，它和A、B之间搭配是均匀的，D、C之间搭配也是均匀的，D的每一个水平和C的1、2、3各碰一次，同样C的每个水平和D的1、2、3也各碰一次，达到设计的要求。

如将C和D两个拉丁方叠在一起：

<table style="border-collapse: collapse; text-align: center;"> <tr><td>1</td><td>2</td><td>3</td></tr> <tr><td>2</td><td>3</td><td>1</td></tr> <tr><td>3</td><td>1</td><td>2</td></tr> </table>	1	2	3	2	3	1	3	1	2	⇒	<table style="border-collapse: collapse; text-align: center;"> <tr><td>11</td><td>22</td><td>33</td></tr> <tr><td>23</td><td>31</td><td>12</td></tr> <tr><td>32</td><td>13</td><td>21</td></tr> </table>	11	22	33	23	31	12	32	13	21	⇐	<table style="border-collapse: collapse; text-align: center;"> <tr><td>1</td><td>2</td><td>3</td></tr> <tr><td>3</td><td>1</td><td>2</td></tr> <tr><td>2</td><td>3</td><td>1</td></tr> </table>	1	2	3	3	1	2	2	3	1
1	2	3																													
2	3	1																													
3	1	2																													
11	22	33																													
23	31	12																													
32	13	21																													
1	2	3																													
3	1	2																													
2	3	1																													

则会发现C的1、2、3与D的1、2、3各碰一次，既无重复又无遗漏，具有这种性质的两个拉丁方称为正交拉丁方。例如下面三个拉丁方就是两两正交的：

<table style="border-collapse: collapse; text-align: center;"> <tr><td>1</td><td>2</td><td>3</td><td>4</td></tr> <tr><td>2</td><td>1</td><td>4</td><td>3</td></tr> <tr><td>3</td><td>4</td><td>1</td><td>2</td></tr> <tr><td>4</td><td>3</td><td>2</td><td>1</td></tr> </table>	1	2	3	4	2	1	4	3	3	4	1	2	4	3	2	1	<table style="border-collapse: collapse; text-align: center;"> <tr><td>1</td><td>2</td><td>3</td><td>4</td></tr> <tr><td>3</td><td>4</td><td>1</td><td>2</td></tr> <tr><td>4</td><td>3</td><td>2</td><td>1</td></tr> <tr><td>2</td><td>1</td><td>4</td><td>3</td></tr> </table>	1	2	3	4	3	4	1	2	4	3	2	1	2	1	4	3	<table style="border-collapse: collapse; text-align: center;"> <tr><td>1</td><td>2</td><td>3</td><td>4</td></tr> <tr><td>4</td><td>3</td><td>2</td><td>1</td></tr> <tr><td>2</td><td>1</td><td>4</td><td>3</td></tr> <tr><td>3</td><td>4</td><td>1</td><td>2</td></tr> </table>	1	2	3	4	4	3	2	1	2	1	4	3	3	4	1	2
1	2	3	4																																															
2	1	4	3																																															
3	4	1	2																																															
4	3	2	1																																															
1	2	3	4																																															
3	4	1	2																																															
4	3	2	1																																															
2	1	4	3																																															
1	2	3	4																																															
4	3	2	1																																															
2	1	4	3																																															
3	4	1	2																																															

正交拉丁方设计由于互相搭配均匀，在分析数据时可以把每个因素的作用分得很清楚，不会混杂，并且可以方便地找到最优工艺条件。正交拉丁方设计可以大大减少实验次数。例4实验全部要做 $3^4 = 81$ 次，而用正交拉丁方设计只做九次。对于因素更多水平更多的实验，减少的实验次数就更惊人。例如8因素7水平的实验，全部组合要做 $7^8 = 5764801$ 次，用正交拉丁方只需49次。因此，当多因素时，用正交拉丁方来安排实验是比较好的，它既能减少实验次数，又能达到因素间的均衡，同时提供分析实验的信息比较丰富，还能给出实验误差的估计。

2. 正交表

用正交拉丁方安排实验，通常是排成表格的形式，如例4设计，编上试验号①、②……⑨，填在原来的设计里：

CD \ B	1	2	3
A			
1	¹ 1 ①	² 2 ②	³ 3 ③
2	² 3 ④	³ 1 ⑤	¹ 2 ⑥
3	³ 2 ⑦	¹ 3 ⑧	² 1 ⑨

立成表格则成为

水平 \ 因素	A	B	C	D
①	1	1	1	1
②	1	2	2	2
③	1	3	3	3
④	2	1	2	3
⑤	2	2	3	1
⑥	2	3	1	2
⑦	3	1	3	2
⑧	3	2	1	3
⑨	3	3	2	1

这个表A、B、C、D任二因素之间，三个水平1、2、3之间正好各碰一次，搭配很均匀，具有这种性质的表称为正交表。

正交拉丁方一定要实验次数等于正整数的平方，而正交表只要任两因素之间具有搭配均匀的性质即可，所以正交表是正交拉丁方的自然推广。

正交表记号： $L_8(2^7)$ ， $L_8(4^5)$ ， $L_9(3^4)$ 等等。符号L代表正交表；L下面的数字8，6，9等表示试验次数；括号内指数的数字7，5，4表示最多安排因素的个数；括号内

下面的数字2，4，3等表示因素的水平数。例如 $L_8(2^7)$ 表示做8个实验，7个因素，每个因素取2个水平。

如何使用正交表：

(1) 根据实验的目的，确定实验要考察的因素。如对事物变化规律了解不多，则因素可多取；如对其规律已有相当了解，可以准确判断主要因素，则因素可少取。

(2) 确定每个因素变化的水平，每个因素的水平数可以相等，也可以不等，重要的因素的水平数可多取一些。

(3) 估计试验条件，一次能做多少实验，一次做不完，可分几次做。

通过下列例子说明怎样选用L表。

【例5】 考察影响日用瓷某产品质量的四个主要因素，每个因素选二个水平。

水平 \ 因素	A (细度)	B (含水率)	C (温度)	D (温度)
1	99%	22%	70°C	1370°C
2	96%	24%	60°C	1340°C

选用 $L_8(2^4)$ 比较合适，实验安排列成下表

水平 \ 因素	A	B	C	D
1	1	1	1	1
2	1	1	2	2
3	1	2	1	2
4	1	2	2	1
5	2	1	1	2
6	2	1	2	1
7	2	2	1	1
8	2	2	2	2

这个正交表满足了下列两个特点：

(1) 每个因素中出现不同水平的次数相同，例如A因素中水平1出现四次，水平2也出现四次，其余B, C, D因素中出现水平1, 2均各为四次。

(2) 每两因素中各种水平数字对出现相同的成对次数，例如A因素和B因素中出现数字对(1,1)、(1,2)、(2,1)、(2,2)各两次，其余因素中每两因素出现水平数字对均各相同。

正交表中这两个特点恰好是均衡分散性和整齐可比性这两条正交性原理的体现。所以，利用正交表安排实验时实验点安排得比较均匀而有代表性，从而能用较少的实验得出正确的结果。

【例6】某瓷厂用正交设计试验法指导生产实例一则如下。

1. 试验课题：

用正交试验寻找球磨机内球、料、水的最佳配比。

2. 试验目的：

提高球磨机的研磨效率，挖掘设备潜力，节约电能，降低消耗，降低成本。

3. 试图通过试验掌握下列数据：

- (1) 球磨机内球料水的最佳配比。
- (2) 坯料细度与球磨时间的关系。
- (3) 坯料每研磨一台所损耗的球石量。

4. 试验考核指标：

- (1) 坯料细度根据厂部技术标准指标达到97%。
- (2) 车间生产实际要求的指标为98%。
- (以上均为过300目筛，筛下表示法)

5. 试验前的准备：

(1) 球石量的大中小球比例按生产过程中自然形成的比例，球是用同坯料做的瓷球。

- (2) 长石粉细度120目。
- (3) 粘土为原矿粉状和块状，质软。
- (4) 球磨机转速按大生产情况运转(19~21转/分)。
- (5) 球磨机的实际容量以坯料计为3吨。

6. 程序设计：

- (1) 因素位级表

位 级 \ 因 素	球 石 量	投 料 量	加 水 量	球 磨 时 间
1	4.5	3	2.5	从每台次运转起累计到时间的 5, 8, 10, 12, 14, 15小时抽测细度
2	5	2.5	3	

- (2) 正交表选用 $L_8(2^7)$