

沃尔特·H·杜达
华新水泥厂编译组译

cement data- book

国际水泥工艺资料集

(增订二版)

中国建筑工业出版社

国际水泥工艺资料集

计算方法、公式、图、数表

(增订二版)

沃尔特·H·杜达

华新水泥厂编译组 译

中国建筑工业出版社

本书汇集了各国水泥工业在七十年代发展的生产方法、工艺布置和机械设备等大量资料，其中包括水泥原料预均化和生料均化技术，粉磨工艺技术，回转窑的新发展和悬浮预热器与窑外分解新工艺等。经作者整理，着重于基本原理、计算公式及各种实用数据图表的介绍，内容叙述简要，是一本手册性的国际水泥工艺技术资料专集。

本书可供水泥工业生产、科研、设计人员日常工作参考，亦可供大专院校师生教学参考。

本书由石必孝翻译（其中第二十章为陈景添译），张叔芾整理并译第二版增订的部分章节。全书经蔡秉樵校阅。

* * *

责任编辑：程佛根

Walter H. Duda
CEMENT-DATA-BOOK
International Process Engineering in the Cement Industry
2nd Edition
BAUVERLAG GMBH (West Germany)
Wiesbaden·Berlin
* 1977 *

* * *

国际水泥工艺资料集

计算方法、公式、图、数表

（增订二版）

沃尔特·H·杜达

华新水泥厂编译组 译

*

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：26 字数：631 千字
1981年10月第一版 1981年10月第一次印刷
印数：1—2,300册 定价：3.60元（精）
统一书号：15040·4011

再 版 前 言

本书第一版出版后几个月就售完了。读者对本书提出的一些增补要求，已由世界各地的专家们作了回答，我们对此表示感谢。由于得到这些资料的帮助，才有可能决定扩充为本书的第二版，使它成为国际水泥工业应用较久的一本参考书。

作者和出版者

初 版 前 言

写这本水泥技术资料集的目的是为了对当代国际水泥工业所采用的各种生产方法、布置和机械装备提出多方面的简要说明，特别着重于各种数据和图表。这本专集主要为水泥工程技术人员提供迅速处理问题的基本数据。

对各种生产方法不打算作出评定，因为就国际观点而言，这是不可能的。从特定水泥厂的不同地理、技术和经济条件和不同的生产能力来看，在一个国家里证明是令人满意的一些生产方法和布置，在别的地区却并不一定可取。本书所引述的只限于那些事实上已经无疑地证实了的特性、应用范围或限度。考虑到这本专集的篇幅，删去了那些对将来失却重要性的生产方法，同样地把那些早期发展阶段的生产方法也省略了，免得那些新的研究成果反被忽视。

本书编辑时对来自英语、德语和斯拉夫语的参考文献给以同等重视，也同样注意来自法语和日语的资料。

希望这本水泥技术资料集同时将促进国际间水泥工业方面的经验、数据、计算方法等的交流，并尽量减少语言方面，特别是那些地区性的独特语言的困难。

根据建筑出版公司的建议，这本专集用英、德两种文字并列。这对于懂得水泥工业技术词汇的德语和英语读者都会有所帮助。

德文本的数据、公式和计算例题主要都用公制。英文本则采用美国习用的度量衡制，仅采用在使用公制国家的水泥工业中常用的那些公制单位，其它公制单位就未采用。由于有些国家是把公制与美国惯用的度量衡制同时并用的，因此，把这两种制度互相对照，可能会帮助水泥专家们学会应用一种不习惯的或不太熟悉的度量衡制。

为了在两种文本里保持一致，本书所用的计数分组法一律采用美制，以逗号(,)作为千位的符号^①，用黑点(·)把整数与小数分开。

鉴于当前世界能源危机的形势，对“水泥工业用燃料”这一章作了特别详细的论述。对于水泥工业指望在多种情况下用煤来代替燃料油，以及对煤粉燃烧的应用，都作了充分的讨论。在“发展中的粉磨方法”这一章里，介绍了可能推动能量节约进一步发展的粉磨方法。

沃尔特·H·杜达
于美国宾夕法尼亚州 阿伦市

① 中译本不采用千位符号。——译注

出版者的话

这本数年工作成果的专集，在它出版前即引起了人们异常的兴趣。它的独特之处是作者对参考文献进行了大量有准备的评价，并包罗了许多往往只是局部地区所知道和应用的一些专门技术报告、计算方法和生产方法。这样，它为不同语言的、不同工作地区的水泥专家们互通情报和讨论各个领域的经验，作出了重要贡献。这在一定程度上增加了这本专集的重要性，也有助于读者理解外国同行们的思想方法和工作方法。

为了保持这本专集的适当篇幅，仅选用那些对日常工作具有重要性的资料。有些资料并不是经常普遍用到的。如果想要得到更详尽的资料，就必须参考原著。

请读者们为这本专集的增补和改进提出建议，以便再版时加以考虑。意见和建议可寄交出版者或本书作者。

建筑出版有限公司
D6200 威斯巴登
邮政信箱 1460
德意志联邦共和国

目 录

1. 原 料

1-1 石灰质原料	1
1-1-1 石灰石	1
1-1-2 白垩	1
1-1-3 泥灰岩	1
1-2 粘土质原料	2
1-3 校正原料	3
1-4 水泥生料的辅助原料	4
1-4-1 氧化镁	4
1-4-2 碱	4
1-4-3 硫	5
1-4-4 氯化物	6
1-4-5 氟化物	6
1-4-6 磷	6
1-5 波特兰水泥熟料的矿物相	6
1-6 潜在熟料矿物组成	8
1-7 水泥率值	10
1-7-1 水硬率	10
1-7-2 硅氧率	10
1-7-3 铝氧率	10
1-8 石灰公式	11
1-8-1 石灰饱和系数	11
1-8-2 石灰标准值	12
1-9 其它率值	13

2. 生料成分的计算

2-1 混合交叉法	14
2-2 根据水硬率计算	14
2-3 根据石灰饱和系数计算	16
2-4 用石灰饱和系数和 硅氧率计算	17
2-5 熟料吸收煤灰量的计算	20

2-6 四种原料组分的计算	24
2-7 求潜在熟料矿物组成需要 量的生料算法	25
2-8 氧化物含量和潜在矿物组成	28

3. 原料的粗粉碎

3-1 粉碎的机械和方法	30
3-2 粉碎系统概述	30
3-3 破碎比	31
3-4 表面积的产生和所需功率	32
3-5 破碎机规格的选择	33
3-6 颚式破碎机	33
3-7 圆锥式破碎机	41
3-8 旋回式破碎机	41
3-9 西蒙式圆锥破碎机	45
3-10 辊式破碎机	47
3-11 锤式破碎机	49
3-12 反击式破碎机	54
3-13 复合反击式破碎机	59
3-14 反击-锤式破碎机	59
3-15 采石场一次破碎	60

4. 原料的烘干

4-1 逆流烘干机	63
4-2 顺流烘干机	63
4-3 转筒烘干机的选择	64
4-4 水分的类型	64
4-5 传热	64
4-6 温度	65
4-7 压力降	65
4-8 内部装置	66
4-9 扬料	66

4-10 单位热耗	67
4-11 转筒烘干机的热平衡	67
4-12 蒸发速度	67
4-13 转筒烘干机的生产能力	68
4-14 燃料	69
4-15 物料通过转筒烘干机的时间	69
4-16 烘干—粉磨	69
4-16-1 在球磨机内烘干—粉磨	70
4-16-2 在机械空气选粉机内烘干	72
4-16-3 在风扫磨内烘干—粉磨	72
4-16-4 在辊式磨内烘干—粉磨	73
4-16-5 快速烘干机	74
4-16-6 用作烘干—粉磨设备的气落磨	75
4-17 在反击式破碎机内烘干	77
4-18 串联式烘干—粉磨设备	78
4-19 烘干—粉磨机	79
4-20 带烘干仓的中卸式磨机	80
4-21 各种烘干—粉磨系统所需的 动力	82
4-22 烘干和收尘	83

5. 水泥生产和粉磨作业

5-1 磨机临界转速	85
5-2 研磨体的动态休止角	86
5-3 研磨体在磨机横断面上的分布	87
5-4 研磨体在磨机每转中的 冲击次数	87
5-5 研磨体冲击磨内物料的次数	87
5-6 磨机内研磨体的填充率	87
5-7 研磨体总装填量	88
5-8 对装填研磨体的提示	89
5-9 研磨体填充量与熟料负荷	89
5-10 磨机研磨体的装填	90
5-11 钢球直径的公式	91

6. 邦德的粉磨工作指数

6-1 哈特格罗夫易磨性额定值	94
6-2 斯塔克公式	95
6-3 球磨机所需功率	95

6-4 比表面积和粒度（按照 邦德公式）	97
6-5 开路粉磨的换算	98
6-6 球磨机的生产能力	98
6-6-1 按照托瓦洛夫公式	98
6-6-2 按照雅可布公式	99
6-7 各种粉磨系统所需的动力	101

7. 磨机研磨体资料

7-1 钢球数据（美国通用单位）	102
7-2 钢球的化学成分	102
7-3 合金锻钢球的硬度	103
7-4 粉磨与金属消耗	103
7-4-1 机械化学反应	103
7-5 研磨体的磨耗率	104
7-6 用镍—硬钢材研磨体粉磨	105
7-7 铬—钼钢研磨体的线性磨耗率 （研磨每小时的磨耗微米数）	106
7-7-1 单位磨耗率	106
7-7-2 研磨体单位磨耗率的降低	106
7-7-3 开路水泥磨用高耐磨钢研 磨体的磨耗率	106
7-7-4 煤磨用非合金钢研磨体的单位 磨耗率	107
7-7-5 水泥磨用耐磨钢研磨体的单位 磨耗率	107
7-7-6 舒尔曼引用的研磨体和 衬板的磨耗率	107
7-7-7 苏联水泥工业磨机研磨体和 衬板的磨耗率	107
7-7-8 瑞典水泥工业磨机研磨体的 磨耗率	108
7-7-9 磨机直径与衬板磨耗的关系	108

8. 磨机传动装置

8-1 磨机中心传动的改进	110
8-1-1 两级行星齿轮的中心传动	110
8-1-2 对称式齿轮中心传动装置	113
8-2 齿轮圈传动装置的改进	114
8-2-1 磨机电动机容量的选定	115
8-3 无齿轮球磨机传动装置	115

9. 磨机筒体的最佳尺寸

- 9-1 磨机筒体的厚度120
- 9-2 磨机筒体的标准120
- 9-3 磨头121
- 9-4 磨机轴承121
- 9-5 管磨机轴承的冷却122
- 9-6 磨机衬板的表面形状122
 - 9-6-1 磨机分级衬板123
- 9-7 磨机衬板的紧固125
- 9-8 磨机隔仓板125
- 9-9 磨机隔仓板的有效面积127
- 9-10 挡料圈128
- 9-11 物料在管磨中的停留时间128
- 9-12 新安装管磨机的起动129

10. 熟料的粉磨

- 10-1 瓦格纳和布莱恩比表面积数131
- 10-2 助磨剂131
- 10-3 研磨体上的物料包层133
- 10-4 化学成分和潜在矿物组成
对易磨性的影响133
- 10-5 水分对粉磨过程的影响135
- 10-6 粉磨中产生的热量136
- 10-7 粉磨水泥的冷却方法137
 - 10-7-1 磨机通风137
 - 10-7-2 磨机筒体的水冷却137
 - 10-7-3 向磨内喷水137
 - 10-7-4 说明水泥磨内喷水冷却效果
的实例138
 - 10-7-5 水泥在机械空气选粉机内
冷却143
 - 10-7-6 水泥在富勒水泥冷却器
内冷却145
 - 10-7-7 富勒水泥冷却器的规格145

11. 磨机单位容积和所需动力

- 11-1 管磨的长径比和所需动力147
- 11-2 磨机直径和所需传动马
力148

- 11-3 管磨的投资费用148
- 11-4 粉磨设备的技术数据149
- 11-5 管磨尺寸152
- 11-6 苏联和东德制造的水泥磨的
技术数据152

12. 闭路粉磨

- 12-1 磨机能力的比较155
- 12-2 粉磨车间的建筑空间156
- 12-3 开路和闭路粉磨设备的调
查156
- 12-4 用小型研磨体进行细粉
磨157

13. 辊式磨

- 13-1 莱歇辊式磨159
- 13-2 滚球磨——彼得斯磨162
- 13-3 碗环式雷蒙磨163
- 13-4 MPS型辊碗磨164
- 13-5 伯力鸠斯辊式磨166
- 13-6 气体管道的调节装置167

14. 发展中的粉磨方法

- 14-1 行星式球磨机169
- 14-2 用爆炸电火花进行粉磨171

15. 空气选粉机

- 15-1 一般空气选粉机的尺寸比
例174
- 15-2 空气选粉机的尺寸175
- 15-3 空气选粉机所需的单位功
率176
- 15-4 辅助风叶可调速的空气选
粉机176
- 15-5 可调速选粉机的尺寸和能
力177
- 15-6 循环负荷和水泥细度178
 - 15-6-1 TSU型(伯力鸠斯)涡旋
选粉机178

15-6-2 旋风式(洪堡-韦达)选粉机	179	18-1-2 煤的分析	214
15-6-3 鼓风机设在外部的选粉机	181	18-1-3 热值	214
15-7 选粉机能力和水泥细度	183	18-1-4 热值与热耗	215
15-8 空气选粉机的公式	183	18-1-5 热化学反应与气体容积	215
15-8-1 第一种闭路系统	184	18-1-6 煤的着火温度	216
15-8-2 第二种闭路系统	185	18-1-7 燃烧时间	217
15-8-3 成品中细粉百分率的确定	186	18-1-8 煤粉火焰的传热	217
15-8-4 双选粉机的第二种闭路系统	186	18-1-9 燃烧气体	218
15-9 选粉机气流量	187	18-1-10 煤粉的制备	218
16. 闭路湿法粉磨		18-1-11 煤的烘干	219
16-1 DSM筛性能举例	190	18-1-12 煤的粉磨	219
16-2 用DSM筛的粉磨流程图	191	18-1-13 煤磨的操作方式	220
16-3 DSM筛的操作	191	18-1-13-1 直接烧窑的煤磨	220
16-4 水泥料浆	192	18-1-13-2 中心磨煤设备或煤粉仓烧窑系统	221
16-a.原料的预均化		18-2 液体燃料——燃料油	223
17. 生料的气力均化		18-2-1 粘度	223
17-1 富勒充气混合系统	199	18-2-2 比重	224
17-2 伯力鸠斯均化系统	201	18-2-3 热值	226
17-3 条带搅拌法	201	18-2-4 火焰温度	227
17-4 盖塞搅拌法	202	18-2-5 燃料油的制备	228
17-5 莫勒均化法	202	18-2-6 燃料油的燃烧	229
17-5-1 切变流均化法	202	18-2-7 燃料油的雾化	231
17-5-2 用上层小库进行均化	202	18-2-8 煤与燃料油的比较	231
17-5-3 在锥形室搅拌库内的通过式均化法	203	18-3 气体燃料——天然气	232
17-6 IBAU中心室搅拌系统	204	18-3-1 热值	233
17-7 彼得斯混合室搅拌库均化法	206	18-3-2 火焰温度	234
17-7-1 彼得斯均化室搅拌库均化法	208	18-3-3 燃烧气体的容积	234
18. 水泥工业用燃料		18-3-4 天然气的燃烧	235
18-1 固体燃料——煤	213	18-3-5 煤、燃料油和天然气的燃烧气体容积	238
18-1-1 挥发物	213	19. 回 转 窑	
18-1-2 煤的分析	214	19-1 回转窑的类型	240
18-1-3 热值	214	19-1-1 回转窑的填充率	241
18-1-4 热值与热耗	215	19-1-2 回转窑的斜度	241
18-1-5 热化学反应与气体容积	215	19-1-3 回转窑斜度的标示法	242
18-1-6 煤的着火温度	216	19-1-4 回转窑的转速	243
18-1-7 燃烧时间	217	19-1-5 物料在回转窑内的通过	243
18-1-8 煤粉火焰的传热	217	19-1-6 回转窑需用功率的计算	244
18-1-9 燃烧气体	218	19-1-7 回转窑的热膨胀	248
18-1-10 煤粉的制备	218	19-1-8 回转窑各带	249
18-1-11 煤的烘干	219		
18-1-12 煤的粉磨	219		
18-1-13 煤磨的操作方式	220		
18-1-13-1 直接烧窑的煤磨	220		
18-1-13-2 中心磨煤设备或煤粉仓烧窑系统	221		

19-1-9 回转窑的挡风密封装置	249	19-7 回转窑废气的冷却	277
19-1-10 回转窑轮带的相对运动	252	19-8 立波尔窑	279
19-1-11 自动调节的支承托轮	253		
19-2 回转窑的燃烧	253	20. 生料悬浮预热器与预分解炉	
19-2-1 燃烧喷管的布置	253	20-1 第一个旋风预热器专利	282
19-2-2 煤粉喷管	254	20-2 洪堡型旋风预热器	282
19-2-3 燃料油燃烧喷管	256	20-2-1 颗粒大小与分离作用	283
19-2-3-1 油压雾化器(喷孔固定, 出油量受可变油压控 制)	256	20-2-2 颗粒大小与加热时间	283
19-2-3-2 另一型式油压雾化器(喷 孔可变而油压不变)	256	20-2-3 旋风预热器的尺寸	284
19-2-3-3 回油燃烧喷管	257	20-2-4 旋风预热器内的热交换	284
19-2-3-4 皮拉德双管道燃烧喷 管	257	20-2-5 气体和物料温度	285
19-2-3-5 超声波燃烧喷管	257	20-2-6 窑的单位容积生产能力——分 解率	285
19-2-4 天然气燃烧喷管	258	20-3 苏联的旋风预热器	286
19-3 回转窑喂入物料的制备方 法	259	20-4 单位热耗和电耗	286
19-3-1 干法与湿法的比较	259	20-5 热平衡	287
19-3-2 回转窑的生产能力	261	20-6 预热器旁路系统	288
19-3-2-1 湿法长回转窑	262	20-6-1 水泥和混凝土集料中的碱	288
19-3-2-2 苏联湿法长回转窑的数 据	263	20-6-2 烧成过程中的碱, 碱循环	288
19-4 料浆脱水方法	265	20-6-3 碱的挥发	289
19-4-1 料浆的化学脱水法——料浆稀 释剂	266	20-6-4 碱旁路的计算	289
19-4-2 料浆的机械脱水法	267	20-6-5 旁路装置的设计型式	291
19-4-2-1 链条装置	267	20-7 两级和五级旋风预热器	292
19-4-3 湿法回转窑内其它热交换装 置	269	20-8 各种预热器系统	293
19-4-3-1 料浆预热器	269	20-8-1 伯力鸠斯公司的多波尔预热 器	293
19-4-3-2 料浆烘干机	271	20-8-2 比勒-米亚格生料预热器	294
19-4-4 湿法回转窑的外部热交换 器	272	20-8-3 ZAB生料悬浮预热器	295
19-5 干法长回转窑	273	20-8-4 克虏伯逆流悬浮预热器	297
19-5-1 陶瓷热交换器	273	20-8-5 捷克普雷洛夫逆流悬浮预热 器	298
19-5-2 陶瓷扬料器	274	20-9 带预分解炉的悬浮预热 器	300
19-5-3 单级悬浮预热器	274	20-9-1 石川岛播磨公司的SF悬浮 预热器	300
19-5-4 干法长回转窑的规格和生产 能力	274	20-9-2 MFC悬浮预热器	305
19-6 回转窑筒体的冷却	276	20-9-3 RSP悬浮预热器	306
		20-9-4 伯力鸠斯预分解法	307
		20-9-5 史密斯预分解法	309
		20-9-6 洪堡-韦达-派洛克朗预分解 炉	315

20-9-7 川崎重工业公司KSV预分解 炉317	22-5-4 彼得斯“g”式冷却机344
	22-6 立筒冷却机345
21. 熟料冷却	23. 窑 衬
21-1 熟料冷却的速度321	23-1 机械强度347
21-2 水泥的安定性与熟料冷 却321	23-2 耐火度348
21-3 熟料的冷却与抗化学侵蚀 性322	23-3 抵抗温度变化的性能(抗热震 性)348
21-4 熟料的冷却与易磨性322	23-4 抵抗化学侵蚀的性能348
	23-5 经受热膨胀或保持体积稳定的 性能349
22. 熟料冷却机	23-6 导热性350
22-1 单筒冷却机324	23-7 耐磨性351
22-2 多筒冷却机——初期的设 计325	23-8 孔隙率352
22-3 多筒冷却机——新的设 计326	23-9 回转窑内耐火窑衬的镶砌 方法353
22-3-1 冷却机的容积与窑的生产能 力327	23-9-1 回转窑镶砌窑衬例子354
22-3-2 回转窑的直径与多筒冷却机的 关系328	24. 收 尘
22-3-3 多筒冷却机的扬料装置328	24-1 粉尘的种类356
22-3-4 多筒冷却机的热平衡329	24-2 与收尘有关的空气量参考数 据357
22-3-5 多筒冷却机的传动及所需功 率329	24-3 水泥工业排出的空气和气体 中的粉尘含量——用于收尘工 作的近似值359
22-3-6 多筒冷却机的水冷却331	24-4 水泥工业粉尘粒径分布的数 据360
22-3-7 洪堡-韦达多筒冷却机332	24-5 大气污染标准361
22-4 篦式冷却机332	24-6 收尘器的类型364
22-4-1 富勒篦式冷却机332	24-6-1 重力沉降室365
22-4-2 富勒复式冷却机333	24-6-2 旋风收尘器365
22-4-3 两路热空气环流336	24-6-3 复式或多管旋风收尘器366
22-4-4 富勒冷却机的规格标号337	24-6-4 织物过滤器367
22-4-5 富勒冷却机的热平衡337	24-6-5 玻璃纤维袋收尘器369
22-4-6 冷却效率337	24-6-6 砂粒层过滤器370
22-5 其它篦式冷却机337	24-6-7 电收尘器372
22-5-1 伯力坞斯雷柯普冷却机339	参考文献375
22-5-2 史密斯福莱克斯篦式冷却 机341	作者索引384
22-5-3 篦式阶梯型冷却机(克劳底斯 彼得斯)344	主题索引387

1. 原 料

天然的矿物以及工业的产物都可用来生产水泥。用作水泥原料的是那些含有水泥主要组分氧化钙、氧化硅、氧化铝和氧化铁的无机化合物。这些组分很少能在一种原料中按照需要的比例存在。因此，通常必须选用一种氧化钙含量较高的石灰质原料，与一种氧化钙含量较低。而氧化硅、氧化铝和氧化铁含量较高的粘土质原料的配料。这两种主要原料通常是石灰石和粘土或石灰石和泥灰岩。

1-1 石灰质原料

1-1-1 石灰石

碳酸钙 (CaCO_3) 在自然界分布很广。所有地质岩层的碳酸钙都可用于生产波特兰水泥。最纯级的石灰石为方解石和文石。方解石属六方形晶系，其比重为2.7；文石属斜方晶系，其比重为2.95。一种粗粒状的方解石的变种就是大理石。用大理石来制造水泥是不合算的。

碳酸钙最普通的形态是与大理石最相似的石灰石和白垩。石灰石为显著的细粒晶体结构。石灰石的硬度决定于它的地质年代。通常，地质岩层越老，石灰石越硬。石灰石的硬度在莫氏硬度标的1.8和3.0之间，它的比重为2.6~2.8。只有石灰石的最纯品种是白色的。石灰石通常含有粘土物质或铁化合物等混合物，这些化合物影响其颜色。

1-1-2 白垩

是地质时代白垩纪形成的沉积岩，在地质上它是相当年轻的。与石灰石相反，白垩具有软泥状的特性；这种性质使白垩特别适合于作为湿法生产水泥的原料。由于开采白垩不需要爆破，而且破碎工序也可省掉，因此，采用这种原料能大大降低水泥生产成本。在某些沉积岩中，白垩的碳酸钙含量达98~99%，只含有少量的 SiO_2 、 Al_2O_3 和 MgCO_3 等混合物。

在水泥生料中的石灰质原料总量通常达76~80%。因此，这种原料的化学和物理性质，对于选择水泥的生产方法和生产机械的类型，具有决定性的影响。

1-1-3 泥灰岩

含有二氧化硅、粘土物质和氧化铁等混合物的石灰石称为泥灰岩。泥灰岩是一种向粘土过渡的物质。由于泥灰岩分布很广，故

表 1-1-3-1

	CaCO_3 含量(%)
高级石灰石	96~100
泥灰质石灰石	90~96
泥灰石或石灰质泥灰岩	75~90
泥灰岩	40~75
粘土质泥灰岩	10~40
泥灰质粘土	4~10
粘土	0~4

常用作生产水泥的原料。

在地质上，泥灰岩是由碳酸钙和粘土物质同时沉积所形成的沉积岩。泥灰岩的硬度低于石灰石；它的粘土物质含量愈高，其硬度愈低。有时泥灰岩还含有沥青成分。泥灰岩的颜色决定于粘土物质，从黄色到灰黑色。泥灰岩是生产水泥的一种极好原料，因为它含有的石灰和粘土组分已呈均化状态。化学成分与波特兰水泥的生料成分相同的石灰质泥灰岩可用来生产所谓天然水泥；但这种石灰质泥灰岩的矿床是不常见的。

按照水泥原料中石灰和粘土组分的含量多少，列出如下的分类表（表1-1-3-1）。

用于生产波特兰水泥的各种石灰石和泥灰岩所含的化学成分，列于表1-1-3-2。

表 1-1-3-2

成 分	1	2	3	4	5	6	7
	石 灰 石	石 灰 石	石 灰 石	石 灰 石	泥 灰 岩	泥 灰 岩	泥 灰 岩
SiO ₂	3.76	6.75	4.91	4.74	27.98	33.20	21.32
Al ₂ O ₃	1.10	0.71	1.28	2.00	10.87	8.22	4.14
Fe ₂ O ₃	0.66	1.47	0.66	0.36	3.08	4.90	1.64
CaO	52.46	49.80	51.55	51.30	30.12	27.30	39.32
MgO	1.23	1.48	0.63	0.30	1.95	1.02	0.75
K ₂ O	0.18	微 量	微 量	0.16	0.20	0.12	0.06
Na ₂ O	0.22	微 量	微 量	0.28	0.33	0.18	0.08
SO ₃	0.01	1.10	0.21	—	0.70	0.37	—
烧 失 量	40.38	39.65	40.76	40.86	24.68	24.59	32.62
总 和	100.00	99.96	100.00	100.00	99.91	99.90	99.93

1-2 粘 土 质 原 料

生产水泥的另一种重要原料是粘土。粘土是由含碱元素和碱土元素的硅酸铝以及它们的化学转化产物（主要是长石和云母）经风化后形成的。

粘土的主要组分是由含水硅酸铝形成的。粘土划分为下列矿类^[6]：

高岭土类：

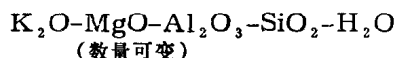
高岭土（石）	$\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$
地开石	$\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$
珍珠陶土	$\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$
多水高岭土	$\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$

蒙脱石类（微晶高岭土类）：

蒙脱石	$\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 4\text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O} + n\text{H}_2\text{O}$
贝得石（Beidellite）	$\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$
绿脱石（Nontronite）	$(\text{Al}, \text{Fe})_2\text{O}_3 \cdot 3\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$
皂石	$2\text{MgO} \cdot 3\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$

含碱粘土类：

粘土云母包括伊利石



高岭土类矿物有不同的 SiO_2 含量以及不同的晶体结构和光学特征。高岭土这个名称指的是纯高岭土矿物。在结构上，粘土是细粒的，它的颗粒直径通常在2微米以下。

粘土矿物的比表面积(米²/克)是^[7]：

高岭土	约 15
多水高岭土	约 43
伊利石	约 100
蒙脱石	约 800

其比重(克/厘米³)为[8]：

高岭土	2.60~2.68
多水高岭土	2.0~2.20
伊利石	2.76~3.00

粘土的熔点在1150°C到1785°C之间(塞格示温熔锥第1号到第35号，或相当的示温熔锥)。

粘土的化学成分可能从接近纯粘土的成分变化到含有相当大量的化学混合物如氢氧化铁、硫化铁、砂、碳酸钙等。氢氧化铁是粘土中的着色剂，有机物质也会使粘土具有不同的颜色。没有杂质的粘土为白色。水泥中的碱主要来自生料的粘土质组分。

表1-2-1列举用于生产波特兰水泥的各种粘土的化学成分。

粘土的化学成分

表 1-2-1

成 分(%)	粘 土 1	粘 土 2	粘 土 3	粘 土 4
烧 失 量	7.19	8.67	10.40	6.40
SiO_2	67.29	62.56	52.30	60.10
Al_2O_3	8.97	15.77	24.70	18.00
Fe_2O_3	4.28	4.47	6.10	8.20
CaO	7.27	4.80	4.40	0.80
MgO	1.97	1.38	0.10	0.20
SO_3	0.32	—	1.10	3.80
K_2O	1.20	2.35	0.80	2.50
Na_2O	1.51			
总 和	100.00	100.00	99.90	100.00

1-3 校正原料

如果水泥生料中必需的主要化学成分没有达到要求的数量，就要使用校正原料作为掺加料。例如，为了补足 SiO_2 含量，就要掺加砂、二氧化硅含量高的粘土、硅藻土等作为校正原料；为补充氧化铁的不足，就要掺加黄铁矿矿渣、铁矿石等校正原料。

表1-3-1是一些校正原料所含的化学成分。

校正原料的化学成分

表 1-3-1

成 分(%)	硅 藻 土	铝 土 矿	黄铁矿矿渣	铁 矿 石	高炉飞灰	烟 道 灰	砂
烧失量	6.2	15~20	—	5~12	5~15	0.2~4.0	0.2
SiO ₂	77.0	16~22	6.6~25.0	20~25	11~22	26~36	99.2
Al ₂ O ₃	} 9.6	44~58	2~16	3~9	5~14	6.5~9.5	—
Fe ₂ O ₃		10~16	62~87	45~60	54~69	5~8	0.5
CaO	0.3	2~4	0.7~0.9	0.5~2.5	1~9	42~50	—
MgO	0.9	0.2~1.0	0.2~2	1.5~7	0.5~2.5	3~4	—
SO ₃	—	—	0.8~8	0.3~0.6	0.2~2.5	2.5~3	—
Na ₂ O	} 1.5	—	—	—	—	0.8~3.5	—
K ₂ O		—	—	—	—	—	—

1-4 水泥生料的辅助原料

这里讨论的这些组分，它们在水泥中的数量是由标准规范或者凭生产经验所限定的。

1-4-1 氯化镁

这一组分与主要熟料相化合的最大量为2%（以重量计）；超过这个数量，它在熟料中就以游离 MgO（方镁石）出现。方镁石与水反应成为 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ ： $\text{MgO} + \text{H}_2\text{O} = \text{Mg}(\text{OH})_2$ ，但是，当其它硬化反应已经完成时，这一反应还在缓慢进行。由于 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 比 MgO 占有较大的体积，并在方镁石颗粒所在的同一地点形成，因此它能使硬化了的水泥凝固体分裂开来，导致膨胀性破裂（氧化镁膨胀），参见21-2节。

MgO 在石灰石中主要以白云石（ $\text{CaCO}_3 \cdot \text{MgCO}_3$ ）的形式出现。

高炉矿渣有时也含有大量 MgO，当选择这样的矿渣代替粘土作为生料的粘土质原料时，必须注意保持熟料的 MgO 含量在允许范围以内（见例2-5和表2-5）。

1-4-2 碱

K₂O 和 Na₂O 来源于粘土和泥灰岩这样的原料。在这类原料中这些化合物以长石、云母和伊利石的分散细颗粒存在。在使用煤作为燃料时，则有少量的这些化合物来源于煤灰^[139, 245, 78]。在中欧，K₂O 含量相当于 Na₂O 含量的 1 倍。在其它地区，例如美国，Na₂O 含量占优势。（见表1-1-3-2和1-2-1）。在回转窑内煅烧过程中，部分碱在烧成带气化，引起所谓的碱循环（见1-4-3，20-6-1，20-6-2和20-6-3各节）。

在有些地区如美国、丹麦和德国北部的某些混凝土集料中，发现含有对碱敏感的组分，例如蛋白石（水化二氧化硅），与水泥中的碱反应，在某种不利条件下可以引起膨胀现象（碱膨胀）。经验告诉我们，在使用含碱量低的水泥时，可以防止碱膨胀；在这种情况下，碱的总含量计算成 Na₂O（%按重量计算， $\text{Na}_2\text{O} + 0.659\% \text{K}_2\text{O}$ ）不应超过 0.6%。参照其它国家的实施规范^[14]，德国也规定 Na₂O 的当量限度为 0.6%，但只适用于波特兰水泥。实践经验表明，对于高炉矿渣水泥允许的碱含量可以高一些；因而，掺有至少 50% 矿渣的低活性碱含量的水泥（NA 水泥）。其含碱量可达 0.9%，而且，对于掺有至少

65%矿渣的水泥, 含碱总量的最大限度可达2%^[7b]。

在需要NA水泥的情况下, 如由现有原料烧成的熟料, 其含碱量超过了允许的极限, 就必须使部分窑废气在进入预热器以前通过旁路, 以除去部分挥发性的碱。详细说明见20-6-1至20-6-4各节。

这里应该提到的是, 美国联邦标准 SS-C-192b、美国州有公路专家协会 (AASHTO) 的标准以及美国材料试验学会 (ASTM) 的标准对波特兰水泥都规定可供选择的碱限量为0.6% (算成 Na_2O)。这就是说, 用户必须提出他要求含碱量低于这个限度, 否则, 就对含碱量不加限制。这个含碱量的限度表明当水泥用于集料会起有害反应的混凝土中时, 对水泥的含碱量就可作此限定。由于低碱水泥与高碱水泥很难区别, 美国的许多地区在通常实践中对所有的水泥一律执行低碱标准。参见[7d、7e、7f]。

1-4-3 硫

几乎在所有的 水泥原料中, 硫总是以 硫化物 (黄铁矿 和白铁矿, FeS_2) 的状态出现。对德国的90多个 石灰石矿床的调查表明, 总含硫量 (硫化物和硫酸物) 最大的为0.16%S, 并对67个粘土矿床的调查表明平均含硫量为0.22%S。燃料的含硫量变动范围很大, 从天然气中的零到重油中的3.5%左右; 西德鲁尔煤田的煤的平均含硫量为1.1%S。对德国的21台预热器窑的调查表明, 熟料中来自生料的硫量变动于0.5~11克 SO_3 /公斤熟料 (3.4~75喱/磅) 的范围内; 而在使用含硫很高的燃料油时, 熟料中来自燃料的硫量最高达6克 SO_3 /公斤熟料 (40喱/磅) ^[7a, 139]。

由于燃烧的结果, 生料和燃料中的硫在烧成带气化成 SO_2 , 它在窑气中与碱和氧结合, 生成气化的硫酸碱, 并在温度较低的窑尾及在预热器中凝结在生料颗粒上, 除了一小部分被窑灰带走之外, 硫酸碱与喂入窑内的生料一起回到烧成带内, 由于它的挥发性能低而与熟料一起出窑。

如果 SO_2 含量不足以与所有的碱相结合, 就会使中等挥发程度的碳酸碱或高度挥发的氯化碱开始循环 (见1-4-4节)。只要碳酸碱没有为熟料相结合 (见1-5节), 它们又会在烧成带气化。

在预热器中, 剩余的 SO_2 可以与 CaCO_3 反应成为 CaSO_4 , 回到窑内, 然后在烧成带重新分解, 这样就增加了窑气中的 SO_2 循环, 但是, 有一部分将在熟料中以未分解的 CaSO_4 出现。

在生料中的碱与生料中所含的硫相结合后还有剩余时, 允许使用高硫燃料而不致于造成随窑废气逸出大量 SO_2 。被熟料结合的硫酸碱对水泥的早期强度有利。但另一方面, 较高的硫含量会导致 SO_2 随窑废气的逸出量增加, 使悬浮预热器发生阻塞, 并会形成窑皮结圈。

为了控制凝结时间, 水泥需要极少量的硫酸钙, 主要以石膏的形式加入熟料中。另一方面, 为了防止“硫酸盐膨胀”, 水泥中允许的 SO_3 最大含量, 根据各种不同水泥的标准, 限定在2.5~4%之间; 在水泥标准规范严格规定的最低限度内, 不可能有过分增加硫酸碱的余地。