

新型干法水泥工艺生产 — 计算手册 —

王君伟 ◎ 编著

XINXING GANFA SHUINI
GONGYI SHENGCHAN
JISUAN SHOUCHE



化学工业出版社

新型干法水泥工艺生产计算手册

王君伟 编著



化学工业出版社

· 北京 ·

图书在版编目 (CIP) 数据

新型干法水泥工艺生产计算手册/王君伟编著. —北京:
化学工业出版社, 2013. 3

ISBN 978-7-122-15280-0

I. ①新… II. ①王… III. ①水泥-干法-生产工艺-
技术手册 IV. ①TQ172.6-62

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 211122 号

责任编辑: 常 青
责任校对: 周梦华

文字编辑: 冯国庆
装帧设计: 韩 飞

出版发行: 化学工业出版社 (北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)

印 刷: 北京永鑫印刷有限责任公司

装 订: 三河市万龙印装有限公司

787mm×1092mm 1/16 印张 13½ 字数 321 千字 2013 年 5 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询: 010-64518888 (传真: 010-64519686) 售后服务: 010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书, 如有缺损质量问题, 本社销售中心负责调换。

定 价: 50.00 元

版权所有 违者必究

前 言

随着社会的发展，提升了知识和技能的内涵。对水泥生产岗位技术工人的职业技能要求，除应掌握本岗位的生产操作、故障处理外，也要求具有一定的计算能力。在以往的新型干法水泥技术书籍中，侧重于基本知识、生产机理和操作技能方面论述的较多，介绍计算内容的偏少。为此，本书以大量实用的计算公式，展现在读者面前，期望成为一本专题介绍水泥工艺生产计算的参考书。本书根据笔者在水泥企业工作多年的实践经验，结合我国现行的水泥行业职业技能标准所要求掌握的生产工艺计算内容，较为详细地介绍一些计算方法和常用计算公式等。

本书是以计算公式为主题，编写宗旨是“源于生产，服务于企业”，力求在内容上体现以下特点。

第一，紧贴生产工艺。本书主要介绍水泥生产工艺上所需控制参数的计算公式。对不同部门，如设计、研究以及水泥行业其他工种，如检验、计划、统计、设备、电气等所需计算内容不包括在内。

第二，简明实用。本书以水泥企业中的“中、高级技术工人和技师”为主要读者群，只列公式，不介绍推导，在公式中还给出参数值，以便读者在取得生产数据后直接套用计算。同时为便于读者参照应用，给出了计算示例。

第三，数据可靠性。作为手册不仅要提供计算公式，还需要有计算所需的一些常用技术数据，要求可查性、可靠性高，否则影响计算结果。因此，本书在计算常用数据上持慎重态度，反复核对，力求准确无误。

第四，先进性。随着新国标、新规范的制定和实施，书中所有公式符号都采用新标准，同时增添新的技术指标计算与工程体系接轨。

第五，多学科性。书中计算公式除以水泥专业为主外，还融入煤炭、化工、建筑等学科与水泥生产工艺有关的计算式，使内容更充实。

虽然笔者在收录计算公式和常用数据时，力求准确可靠，期望达到“即查即用”的效果，但由于掌握资料不足，取材未尽完美，疏漏和不妥之处恳请读者指出。

本书在编写过程中，得到陕西声威建材有限公司杨新社高工、陕西声威铜川分公司王军龙主任等提供生产资料，在此深表谢意。本书的编写还参考了近年来的水泥、水泥技术、水泥工程、新世纪水泥导报、中国水泥等期刊，在此一并表示感谢！

王君伟
2012年12月



目 录



常用代码符号说明	1
第一章 水泥熟料质量式	3
第一节 水泥熟料矿物组成	3
一、硅酸盐水泥熟料	3
二、铝酸盐水泥和硫铝酸盐水泥熟料	4
第二节 水泥熟料率值	5
一、硅酸盐水泥熟料	5
二、铝酸盐水泥和硫铝酸盐水泥熟料	6
第三节 硅酸盐水泥熟料化学成分	7
一、用矿物组成计算	7
二、用率值计算	7
第二章 原燃材料特性及评价	10
第一节 生料、熟料特性指标	10
一、生料易烧性	10
二、熟料液相量	11
三、熟料窑皮指数	11
四、硫碱比	11
五、物料相对易磨性系数	12
第二节 碱含量	13
第三节 燃料煤	14
一、煤的发热量	14
二、商品煤的验收	18
第四节 混合材质量评价	22
一、质量系数	22
二、碱度	22
三、强度活性指数	22
四、28d 抗压强度比	23
第五节 石膏	23
一、天然石膏品位计算	23
二、工业副石膏中硬石膏成分计算	24
三、二水石膏等级计算	24
附表 2-1 水泥原料矿石化学成分和水泥组分材料一般要求	24

附表 2-2 按工业分析划分煤的级别	26
附表 2-3 商品煤质量评定标准中的允许差	26
第三章 配料组分计算	27
第一节 生料配料	27
一、生料配料计算基本数学模式	27
二、配料计算中通用算式	42
第二节 入磨物料配比的调整	45
一、人工调整配比的计算法	45
二、人工调整配料经验法	47
第三节 物料组分配比表达式	51
一、内掺物料组分表达式	51
二、外掺物料组分表达式	52
三、水泥中掺兑废渣比例	52
四、入水泥磨物料组分配比	53
第四章 检测数理计算	56
第一节 数理统计参数	56
一、平均值	56
二、误差	58
三、极差	60
四、偏差	60
五、变异系数	60
六、中位数	61
第二节 数据处理	62
一、有效数字	62
二、数据处理	64
三、质量检验数据验收	70
四、插值法	73
第三节 回归方程	74
一、一元线性回归方程	74
二、二元线性回归方程	77
第四节 班组核算	79
一、产品产量指标	79
二、质量指标	79
三、劳动指标	80
四、材料、能源消耗指标	80
五、节约价值	80
第五章 热工技术测定	81
第一节 热平衡计算	81
一、状态参数	81

二、气体技术参数	87
三、工艺热平衡	94
四、热工技术指标	98
五、燃料燃烧计算	101
第二节 生产技术测试计算	104
一、台时产量	104
二、入磨物料平均粒径	105
三、入磨物料平均水分	106
四、入磨物料平均温度	106
五、球料比	106
六、磨内物料流速	107
七、研磨体填充系数	108
八、生产中窑炉的燃料比	108
九、系统技术测定的分析指标	109
第三节 工艺主要消耗指标计算	111
一、料耗	111
二、热耗	111
三、煤耗	112
四、研磨体消耗	113
第四节 能量平衡计算	113
一、用能设备能量平衡方程	114
二、企业能量平衡方程	114
三、水泥企业单位产品能耗指标计算	114
附表 5-1 烧成系统热工标定测定内容及测点分布	116
附表 5-2 粉磨系统技术测定内容及测点分布	116
附表 5-3 能效测试(全厂热平衡)内容及测点分布	118
附表 5-4 能平测试内容及测点分布	118
附表 5-5 水泥企业单位产品能耗统计范围	119
附表 5-6 水泥单位产品能源消耗限额(GB 16780—2007)	119
附表 5-7 不同规模生产线能耗水平	120
附表 5-8 各种能源标准煤折算系数及耗能工质能源等价值	121
附表 5-9 水泥企业能耗对标指标定义统计范围和计算式	122
附表 5-10 部分水泥设备产能理论计算式	125
第六章 粉磨工艺参数计算	128
第一节 管(球)磨机	128
一、磨机有效容积	128
二、生产能力	128
三、配球参数	132
四、磨机单位工艺技术指标	142
五、主机用电负荷	143

六、隔仓板开孔率	144
第二节 选粉工艺	144
一、循环负荷	144
二、选粉效率	144
第三节 辊式磨	145
一、生产能力	145
二、物料循环次数	146
三、停留时间	147
四、通风量	148
第四节 辊压机	150
一、通过能力	151
二、循环负荷	151
三、创造精粉量	152
第五节 物料烘干	153
一、湿物料中水分表示法	153
二、烘干参数	154
第六节 水泥冷却	155
一、磨内喷水	155
二、水泥冷却器	159
第七章 预分解窑煅烧及废气排放	161
第一节 窑系统生产能力	161
一、预热预分解窑系统生产能力估算式	161
二、区域环境条件对窑系统产量的影响	162
三、单位产量技术指标	163
第二节 回转窑	164
一、窑的规格尺寸	164
二、窑内燃烧带、烧成带长度	165
三、窑发热能力及燃烧带热力强度	166
四、窑内物料停留时间	167
五、窑内物料平均负荷率	169
六、窑安全运转周期和窑衬使用周期	169
七、入窑物料表观分解率	170
第三节 分解炉	170
一、分解炉发热能力	170
二、分解炉容积热力强度	170
三、分解炉单位容积产量	171
四、分解炉有效容积系数	171
第四节 熟料冷却机	171
一、冷却机热效率	171
二、冷却效率	172

三、单位篦床面积产量	172
四、单位熟料冷却风量	172
第五节 窑废气排放	172
一、水泥企业 CO ₂ 生成量和排放量	173
二、水泥窑 SO ₂ 排放量测算	177
三、水泥窑炉 NO _x 排放量测算	178
四、粉尘排放浓度和量	178
五、SO ₂ 、NO _x 排放浓度单位换算	181
附表 7-1 水泥工业清洁生产对污染物产生指标要求	182
附表 7-2 水泥生产 CO ₂ 排放量计算项目	182
附表 7-3 水泥窑主要污染物的排放控制可行技术	183
附表 7-4 水泥中重金属含量限值（《水泥窑协同处置工业废物设计规范》 GB 50634—2010	184
附录 计算常用资料	185
附录一 料堆体体积计算式	185
附录二 常用物料堆积密度和休止角（堆积角）	186
附录三 部分水泥熟料矿物相对分子质量	186
附录四 气体的基本常数	187
附录五 烟气的物理参数	187
附录六 水在不同温度下的汽化热	188
附录七 不同温差与不同风速下筒体散热系数	188
附录八 部分气体及干空气比热容	190
附录九 燃料燃烧产物平均比热容	190
附录十 部分气体和部分物料的平均比热容	191
附录十一 烟气组分、空气及灰的热焓	194
附录十二 球磨机研磨体计算用表	195
附录十三 用于生产水泥的组分材料要求	201
参考文献	205

常用代码符号说明

为减少在计算公式中因常用符号说明占用篇幅，将业内惯用代码、符号、缩写以及本书中单位指标注脚代码列于表 1~表 5 中。

表 1 水泥主要化学成分

名称	氧化钙	二氧化硅	三氧化铝	三氧化铁	氧化镁	烧失量
化学组成	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	LOSS
缩写	C	S	A	F	M	LOI
名称	氧化钠	氧化钾	碱含量	钠当量	氧化钛	氧化亚锰
化学组成	Na ₂ O	K ₂ O	Na ₂ O + K ₂ O	①	TiO ₂	MnO
缩写	N	K	K ₂ O	Na ₂ O _{eq}	T	Mn
名称	氧化亚铁	氟化钙	五氧化二磷	三氧化硫	氟离子	氯离子
化学组成	FeO	CaF ₂	P ₂ O ₅	SO ₃	F ⁻	Cl ⁻
缩写		F	P	S		

① 钠当量 $Na_2O_{eq} = Na_2O + 0.658K_2O$ 。

表 2 水泥熟料主要矿物组成

矿物组成	硅酸三钙	硅酸二钙	铝酸三钙	铁铝酸四钙	
化学组成	3CaO · SiO ₂	2CaO · SiO ₂	3CaO · Al ₂ O ₃	4CaO · Al ₂ O ₃ · Fe ₂ O ₃	
缩写	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF	
矿物组成	铁酸二钙	铝酸一钙	二铝酸一钙	硅铝酸二钙	
化学组成	2CaO · Fe ₂ O ₃	CaO · Al ₂ O ₃	CaO · 2Al ₂ O ₃	2CaO · Al ₂ O ₃ · SiO ₂	
缩写	C ₂ F	CA	CA ₂	C ₂ AS	
矿物组成	硫铝酸钙	氟铝酸钙	游离石灰	游离二氧化硅	
化学组成	4CaO · 3Al ₂ O ₃ · SO ₃	11CaO · 7Al ₂ O ₃ · CaF ₂	f-CaO	f-SiO ₂	
缩写	C ₄ A ₃ · SO ₃	C ₁₁ A ₇ · CaF ₂			
矿物组成	游离氧化镁	钛酸钙	无水石膏		
化学组成	f-MgO	CaO · TiO ₂	CaSO ₄		
缩写	f-MgO	CT	C · SO ₃		
水泥熟料	硅酸盐水泥	铝酸盐水泥	铁铝酸盐	硫铝酸盐	氟铝酸盐
矿物组成	C ₃ S, C ₂ S, C ₃ A, C ₄ AF	CA, CA ₂ , C ₁₂ A ₇	C ₄ A ₃ S, C ₄ AF, C ₂ S	C ₄ A ₃ S, C ₂ S, C ₄ AF	C ₁₁ A ₇ · CaF ₂ , C ₃ S, C ₂ S, C ₄ AF 或 C ₂ F
水泥熟料	硫铝酸钡钙水泥		硫铝酸钡钙水泥		
矿物组成	Ca _{1.5} Sr _{2.5} A ₃ · SO ₃ , C ₃ S, C ₂ S, C ₃ A, C ₄ AF		Ca _{2.75} Ba _{1.25} A ₃ · SO ₃ , C ₃ S, C ₂ S, C ₃ A, C ₄ AF		

注：游离氧化镁又称方镁石，钛酸钙又称钙钛石。

表 3 熟料率值、系数

硅酸盐水泥	率值	石灰饱和系数	硅酸率	铝氧率	石灰饱和率
	代码	KH	SM	IM	LSF
铝酸盐水泥	系数	碱度系数			
	代码	A_m			
硫铝酸盐水泥	系数	碱度系数	铝硫比	铝硅比	硫铝比
	代码	C_m	P_s	A_s	P_m

表 4 煤质基准符号

基准	术语	空气干燥基		收到基		干燥基		干燥无灰基	
	符号	ad		ar		d		daf	
工业分析	名称	水分	灰分	挥发分	固定碳	发热量	高位	低位	弹筒
	符号	M	A	V	FC	Q	gr	net	b
元素分析	名称	氮	氢	氧	碳	硫	全(硫、水)		
	符号	N	H	O	C	S	t——注脚		

表 5 单位指标注脚代码

名称	千克标准煤, kg _{标煤}	吨原料, t _{原料}	吨生料, t _{生料}	吨熟料, t _{熟料}
代码	kgce	t _y	t _s	t _{sh}
名称	吨水泥, t _{水泥}		吨燃料, t _{燃料}	吨废渣, t _{废渣}
代码	t _{an}		t _r	t _z

第一章

水泥熟料质量式

水泥是主要建筑材料之一，其质量优劣与建筑物、构筑物的使用质量密切相关，也关系到人们的“住”和“行”。水泥质量主要取决于水泥熟料质量，优质熟料应有与用户要求的使用性能相匹配的合适的化学成分和矿物组成，且岩相结构优良。

水泥熟料的矿物组成与水泥的物理化学性能、水泥品种相关，所以本书将水泥熟料的矿物组成计算公式作为开篇章。一方面考虑我国生产的水泥品种比例和节能要求，所以，重点介绍硅酸盐水泥熟料和硫铝酸盐水泥熟料；另一方面顾及水泥企业有的产品面向国际市场 and 外资企业，所以在介绍率值计算式中也包括国外采用的石灰饱和率 LSF、石灰标准值 KST 和水硬率 HM。

第一节 水泥熟料矿物组成

水泥熟料是一种由多种矿物组成的细小人造岩石，其组成、含量和结构形态可通过岩相分析、X 射线和红外光谱等分析法测定。水泥熟料矿物组成计算式是在假定反应完全平衡和假设形成纯熟料矿物的条件下所得到的数据。实际上熟料矿物组成的成分比较复杂，大部分以固溶体形式存在，而且在生产条件下，冷却状况差异对矿物组成和数量影响很大，造成测定值与计算的矿物组成值存在偏差。尽管如此，用化学成分计算的矿物组成来粗略估计熟料性能，还是具有一定准确性。因此用化学分析方法计算其潜在的熟料矿物组成，在水泥工业，尤其是工矿企业依然得到广泛应用。

一、硅酸盐水泥熟料

硅酸盐水泥熟料矿物组成计算式见表 1-1。

表 1-1 硅酸盐水泥熟料矿物组成计算式 单位：%（质量分数）

用已知熟料化学成分计算矿物组成		
矿物组成/%	IM ≥ 0.64	IM < 0.64
C ₃ S	$C_3S = 4.07(CaO - f-CaO) - 7.60SiO_2 - 6.72Al_2O_3 - 1.43Fe_2O_3 - 2.86SO_3$	$C_3S = 4.07CaO - 7.60SiO_2 - 4.47Al_2O_3 - 2.86Fe_2O_3 - 2.86SO_3$

续表

矿物组成/%	IM≥0.64	IM<0.64
C ₂ S	$C_2S = 8.60SiO_2 + 5.07Al_2O_3 + 1.07Fe_2O_3 + 2.15SO_3 - 3.07CaO$	$C_2S = 8.60SiO_2 + 3.38Al_2O_3 + 2.15Fe_2O_3 + 2.15SO_3 - 3.07CaO$
C ₃ A	$C_3A = 2.65Al_2O_3 - 1.69Fe_2O_3 = 2.65Fe_2O_3 (IM - 0.64)$	
C ₄ AF	$C_4AF = 3.04Fe_2O_3$	$C_4AF = 4.77Al_2O_3$
C ₂ F		$C_2F = 1.70(Fe_2O_3 - 1.57Al_2O_3) = 1.70Fe_2O_3 - 2.67Al_2O_3$
CaSO ₄	$CaSO_4 = 1.70SO_3$	$CaSO_4 = 1.70SO_3$

用已知熟料化学成分和率值计算矿物组成

C ₃ S	$C_3S = 3.80 SiO_2 (3KH - 2)$	$C_3S = 3.80SiO_2 (3KH - 2)$
C ₂ S	$C_2S = 8.61SiO_2 (1 - KH)$	$C_2S = 8.61SiO_2 (1 - KH)$
C ₃ A	$C_3A = 2.65(Al_2O_3 - 0.64Fe_2O_3) = 2.65Fe_2O_3 (IM - 0.64)$	
C ₄ AF	$C_4AF = 3.04Fe_2O_3$	$C_4AF = 4.77Al_2O_3$
C ₂ F		$C_2F = 1.70(Fe_2O_3 - 1.57 Al_2O_3) = 1.70Fe_2O_3 (1 - 1.57IM)$
CaSO ₄	$CaSO_4 = 1.70SO_3$	$CaSO_4 = 1.70SO_3$

二、铝酸盐水泥和硫铝酸盐水泥熟料

铝酸盐水泥、硫铝酸盐水泥熟料矿物组成计算式见表 1-2。

表 1-2 铝酸盐水泥和硫铝酸盐水泥熟料矿物组成计算式

单位：%（质量分数）

铝酸盐水泥熟料		硫铝酸盐水泥熟料	
矿物组成	计算式	矿物组成	计算式
CA	$CA = 1.55(2A_m - 1) \times (Al_2O_3 - 1.70 SiO_2 - 2.53MgO)$	C ₄ A ₃ ·SO ₃	$C_4A_3 \cdot SO_3 = 1.99 Al_2O_3$
CA ₂	$CA_2 = 2.55(1 - A_m) \times (Al_2O_3 - 1.70 SiO_2 - 2.53MgO)$	C ₂ S	$C_2S = 2.87 SiO_2$
C ₂ AS	$C_2AS = 4.57SiO_2$	C ₄ AF	$C_4AF = 3.04Fe_2O_3$
CT	$CT = 1.70TiO_2$	CT	$CT = 1.70TiO_2$
C ₂ F	$C_2F = 1.70Fe_2O_3$	CaSO ₄	$CaSO_4 = 1.70SO_3$
M	$M = 3.53MgO$	f-SO ₃	$f-SO_3 = SO_3 - 0.13C_4A_3 \cdot SO_3$
		f-CaO _A	$f-CaO_A = CaO - 1.87SiO_2 - 1.40Fe_2O_3 - 0.7TiO_2 - 0.73(Al_2O_3 - 0.64Fe_2O_3)$
		f-CaO _B	$f-CaO_B = f-CaO_A - 0.7f-SO_3$

注：A_m为铝酸盐水泥熟料碱度系数，见表 1-4。

在硫铝酸盐水泥熟料中，f-CaO_A指除了形成熟料矿物所需 CaO 外剩下的 f-CaO；f-CaO_B则指 f-CaO_A与 CaSO₄结合后所剩的 f-CaO。

第二节 水泥熟料率值

熟料率值是熟料中各种氧化物含量的相互比例，也是质量控制和配料计算的主要指标。

一、硅酸盐水泥熟料

硅酸盐水泥熟料率值计算式见表 1-3。

表 1-3 硅酸盐水泥熟料率值计算式

率值	计算式	
石灰饱和系数	定义：石灰饱和系数(饱和比)表示熟料中 SiO ₂ 被 CaO 饱和成 C ₃ S 的程度	
	用熟料化学成分计算	
	IM ≥ 0.64	IM < 0.64
	$KH = \frac{CaO - (1.65Al_2O_3 + 0.35Fe_2O_3 + 0.70SO_3)}{2.80SiO_2}$	$KH = \frac{CaO - (1.10Al_2O_3 + 0.70Fe_2O_3 + 0.70SO_3)}{2.80SiO_2}$
	$KH^- = \frac{CaO - f - CaO - (1.65Al_2O_3 + 0.35Fe_2O_3 + 0.70SO_3)}{2.80(SiO_2 - f - SiO_2)}$	
	$KH = \frac{CaO - 1.65(Al_2O_3 + TiO_2 + P_2O_5) - 0.35(Fe_2O_3 + MgO) - 0.70SO_3}{2.8S}$	注：使用工业废渣和低质原燃料时
	用熟料矿物组成计算	
$KH = \frac{C_3S + 0.8838C_2S}{C_3S + 1.3256C_2S}$		
硅酸率	定义：硅酸率表示熟料中二氧化硅含量与氧化铝、氧化铁之和的质量比	
	用熟料化学成分计算	
	一般算式	氧化镁含量大于 1.5% 时
	$SM = \frac{SiO_2}{Al_2O_3 + Fe_2O_3}$	$SM = \frac{SiO_2}{Al_2O_3 + Fe_2O_3 + (MgO - 1.5)}$
	$SM = \frac{SiO_2}{Al_2O_3 + TiO_2 + P_2O_5 + Fe_2O_3 + Mn_2O_3}$	注：使用工业废渣时
用熟料矿物组成计算		
$SM = \frac{C_3S + 1.3254C_2S}{1.4341C_3A + 2.0464C_4AF}$		
铝氧率	定义：铝氧率是表示熟料中氧化铝和氧化铁含量的质量比	
	用熟料化学成分计算	
	一般算式	氧化镁含量大于 1.5% 时
	$IM = \frac{Al_2O_3}{Fe_2O_3}$	$IM = \frac{Al_2O_3}{Fe_2O_3 + (MgO - 1.5)}$
	用熟料矿物组成计算	
$IM = \frac{1.1501C_3A}{C_4AF} + 0.6383$		

率值	计算式	
石灰饱和度	定义:表示熟料中 CaO 含量与全部酸性组分需要结合的 CaO 比值,石灰饱和率 LSF 是英国标准规范中使用的一种率值系数	
	用熟料化学成分计算	
	一般算式	不同氧化镁含量下
	$LSF = \frac{100CaO - 0.70SO_3}{2.8SiO_2 + 1.18Al_2O_3 + 0.65Fe_2O_3}$	当 $MgO \leq 2\%$ 时 $LSF = \frac{100(CaO + 0.75MgO) - 0.7SO_3}{2.8SiO_2 + 1.18Al_2O_3 + 0.65Fe_2O_3}$ 当 $MgO > 2\%$ 时 $LSF = \frac{100(CaO + 1.50MgO) - 0.7SO_3}{2.8SiO_2 + 1.18Al_2O_3 + 0.65Fe_2O_3}$
石灰标准值	定义:石灰标准值 KST 是指硅酸盐水泥熟料中酸性氧化物形成 C_3S 、 C_3A 和 C_4AF 时,石灰的极限含量。石灰标准值有三种算式:KST I、KST II 和 KST III。KST I 已被 KST II 修正,下面介绍 KST II 和 KST III	
	用熟料化学成分计算	
	KST II	KST III
	$KST II = \frac{100CaO}{2.8SiO_2 + 1.18Al_2O_3 + 0.65Fe_2O_3}$	当 $MgO \leq 2.0\%$ 时 $KST III = \frac{100(CaO + 0.75MgO)}{2.8SiO_2 + 1.18Al_2O_3 + 0.65Fe_2O_3}$ 当 $MgO > 2.0\%$ 时 $KST III = \frac{100(CaO + 1.5MgO)}{2.8SiO_2 + 1.18Al_2O_3 + 0.65Fe_2O_3}$
水硬率	定义:水硬率 HM 是国外使用的率值系数之一,表示熟料中 CaO 与酸性氧化物的比值。一般 HM 为 1.7~2.3,低于 1.7 时,水泥强度较低,大于 2.3 时,安定性不良	
	用熟料化学成分计算	
	$HM = \frac{CaO}{SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3}$	

二、铝酸盐水泥和硫铝酸盐水泥熟料

铝酸盐水泥、硫铝酸盐水泥熟料率值计算式见表 1-4。

表 1-4 铝酸盐水泥和硫铝酸盐水泥熟料率值计算式

铝酸盐水泥熟料		硫铝酸盐水泥熟料	
率值	计算式	率值	计算式
碱度系数	定义: A_m 表示熟料中形成 CA 和 CA_2 的 CaO 量与熟料中铝酸钙全部为 CA 时,所需 CaO 的比值	碱度系数	定义: C_m 表示熟料中 SiO_2 、 Al_2O_3 和 Fe_2O_3 被 CaO 饱和成 C_2S 、 $C_4A_3 \cdot SO_3$ 和 C_4AF 的程度
	$A_m = \frac{CaO - 1.87SiO_2 - 0.7(Fe_2O_3 + TiO_2)}{0.55(Al_2O_3 - 1.70SiO_2 - 2.53MgO)}$		$C_m = \frac{CaO - 0.70(Fe_2O_3 + TiO_2 + SO_3)}{1.87SiO_2 + 0.55Al_2O_3}$
铝硅比	定义: A_s 反映了 $C_4A_3 \cdot SO_3$ 与 β - C_2S 之间的关系	铝硅比	定义: P_s 表示熟料中 CaO、 Al_2O_3 和 SO_3 形成 $C_4A_3 \cdot SO_3$ 矿物时, SO_3 和 Al_2O_3 之间的比例关系
	$A_s = \frac{Al_2O_3}{SiO_2}$		$P_s = \frac{Al_2O_3 - 0.64Fe_2O_3}{SO_3}$

第三节 硅酸盐水泥熟料化学成分

硅酸盐水泥熟料的主要化学成分是氧化钙、二氧化硅、氧化铝、氧化铁，可用熟料的矿物组成和率值来计算。

一、用矿物组成计算

用矿物组成计算式见表 1-5。

表 1-5 用矿物组成计算式 单位：%（质量分数）

成分	IM ≥ 0.64	IM < 0.64
CaO	$\text{CaO} = 0.7369\text{C}_3\text{S} + 0.6512\text{C}_2\text{S} + 0.6227\text{C}_3\text{A} + 0.4616\text{C}_4\text{AF} + 0.4119\text{CaSO}_4$	$\text{CaO} = 0.7369\text{C}_3\text{S} + 0.6512\text{C}_2\text{S} + 0.4616\text{C}_4\text{AF} + 0.4126\text{C}_2\text{F} + 0.4119\text{CaSO}_4$
SiO ₂	$\text{SiO}_2 = 0.2631\text{C}_3\text{S} + 0.3488\text{C}_2\text{S}$	$\text{SiO}_2 = 0.2631\text{C}_3\text{S} + 0.3488\text{C}_2\text{S}$
Al ₂ O ₃	$\text{Al}_2\text{O}_3 = 0.3773\text{C}_3\text{A} + 0.2098\text{C}_4\text{AF}$	$\text{Al}_2\text{O}_3 = 0.3773 + 0.2098\text{C}_4\text{AF}$
Fe ₂ O ₃	$\text{Fe}_2\text{O}_3 = 0.3286\text{C}_4\text{AF}$	$\text{Fe}_2\text{O}_3 = 0.3286\text{C}_4\text{AF} + 0.5874\text{C}_2\text{F}$
SO ₃	$\text{SO}_3 = 0.5881\text{CaSO}_4$	$\text{SO}_3 = 0.5881\text{CaSO}_4$

二、用率值计算

用熟料率值计算式见表 1-6。

表 1-6 用熟料率值计算式 单位：%（质量分数）

成分	一般式	掺矿化剂
Σ	$\Sigma = \text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{CaO} = 0.97 \sim 0.98$	$\Sigma \approx 0.95$
CaO	$\text{CaO} = \frac{[2.8\text{KH}(\text{IM}+1)\text{SM} + 1.65\text{IM} + 0.35]\Sigma}{(2.8\text{KH}+1)(\text{IM}+1)\text{SM} + 2.65\text{IM} + 1.35}$	$\text{CaO} = \frac{[2.8\text{KH}(\text{IM}+1)\text{SM} + 0.55\text{IM} + 1.05]\Sigma}{(2.8\text{KH}+1)(\text{IM}+1)\text{SM} + 1.55\text{IM} + 2.05} + 2.87\text{CaF}_2 + 0.75\text{SO}_3$
SiO ₂	$\text{SiO}_2 = \frac{\text{SM}(\text{IM}+1)\Sigma}{(2.8\text{KH}+1)(\text{IM}+1)\text{SM} + 2.65\text{IM} + 1.35}$	$\text{SiO}_2 = (\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3)\text{SM}$
Al ₂ O ₃	$\text{Al}_2\text{O}_3 = \frac{\text{IM} \times \Sigma}{(2.8\text{KH}+1)(\text{IM}+1)\text{SM} + 2.65\text{IM} + 1.35}$	$\text{Al}_2\text{O}_3 = \text{IM} \times \text{Fe}_2\text{O}_3$
Fe ₂ O ₃	$\text{Fe}_2\text{O}_3 = \frac{\Sigma}{(2.8\text{KH}+1)(\text{IM}+1)\text{SM} + 2.65\text{IM} + 1.35}$	$\text{Fe}_2\text{O}_3 = \frac{\Sigma - 2.87\text{CaF}_2 - 0.70\text{SO}_3}{(2.8\text{KH}+1)(\text{IM}+1)\text{SM} + 1.55\text{IM} + 2.05}$

不同系列水泥熟料矿物组成、率值范围见表 1-7～表 1-10。

表 1-7 不同系列水泥熟料的矿物组成和率值控制范围

表 1-7 (1) 硅酸盐水泥熟料系列

熟料品种	矿物组成/%				率值控制范围		
	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF	KH	SH	IM
硅酸盐	30~65	35~60	7~9	9~11	0.88~0.93	2.40~2.80	1.40~1.90
道路水	—	0	2~5	16~22	0.94~0.98	1.60~1.80	0.80~0.90

续表

熟料品种	矿物组成/%				率值控制范围		
	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF	KH	SH	IM
快硬水泥	55~60	15~20	5~9	12~55	0.93~0.97	1.90~2.10	1.20~1.40
抗硫酸水泥	40~46	24~30	2~4	15~18	0.84~0.88	1.90~2.10	0.90~1.00
低热微膨胀水泥	约 50	20~25	5~7	15~17	0.92~0.96	1.80~2.00	1.00~1.40
明矾石膨胀水泥	>55	15~20	7~9	<14	0.93~0.97	1.90~2.10	1.20~1.40
中热和低热水泥	50~55	20~30	1~5	15~19	0.85~0.91	2.00~2.20	0.70~1.00
白水泥	55~60	25~30	12~13	<13	0.87~0.96	3.50~5.0	>12

表 1-7 (2) 铝酸盐、硫铝酸盐水泥熟料系列 单位: % (质量分数)

熟料品种	C ₃ A	CA ₂	C ₂ AS	C ₄ A · SO ₃	C ₂ S	C ₄ AF
铝酸盐	40~45	15~30	20~36			
硫铝酸盐				55~75	15~30	3~6
铁铝酸盐				45~65	15~35	10~25

表 1-8 不同系列水泥熟料化学成分范围 单位: % (质量分数)

熟料品种	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	FeO	F ⁻	SO ₃
硅酸盐	21~24	4~7	2~4	63~67			
铝酸盐	5~15	40~60	~10	30~40	2~4		
硫铝酸盐	7~14	20~36	1.5~7	42~50	0.5~1.5		7~14
铁铝酸盐	6~12	25~35	5~10	43~46			5~12
氟铝酸盐	5~8	36~39	1.0~1.5	49~52	1.5~2.0	2~3	
型砂	16~17.5	12.5~14	1.5~3.0	60~63	0.5~1.0	0.9~1.4	0.6~2.5

表 1-9 不同硫铝酸盐水泥熟料系列的率值控制范围

单位: % (质量分数)

项目	一般范围	低碱度	自应力	快硬	高强熟料粉
碱度系数 C _m	0.95~0.98	0.94±0.02	0.96±0.02	0.88±0.02	1.02±0.02
铝硫比 Al ₂ O ₃ /SO ₃		3.30±0.30	3.30±0.30	3.60±0.30	3.90±0.03
铝硅比 Al ₂ O ₃ /SiO ₂		3~4	2.5~3.5	4~6	5~8

注: 数据来源——李乃珍, 谢敬坦. 特种水泥与特种混凝土 [M]. 北京: 中国建材工业出版社, 2011, (1).

表 1-10 我国部分特种水泥熟料的矿物组成特点

水泥品种	矿物组成及特点	主要性能	
快硬 高强	硅酸盐系列	高 C ₃ S, 高比表面积	凝结正常, 高早强
	硫铝酸盐	C ₄ A ₃ · SO ₃ , β-C ₂ S	凝结正常, 超高早强
	铁铝酸盐	C ₄ A ₃ · SO ₃ , C ₄ AF, β-C ₂ S	凝结正常, 超高早强
	氟铝酸盐	C ₁₁ A ₇ · CaF ₂ , C ₄ A ₃ · SO ₃ , β-C ₂ S	凝结正常, 超高早强