

王君伟 编著

水泥生产工艺

——误区与解惑

一线经验·答疑解惑·有理有据·方便理解

第1章 原燃材料 / 第2章 操作参数 / 第3章 工艺技术 / 第4章 使用要求

SHUINI SHENGCHAN GONGYI
WUQU YU JIEHUO



化学工业出版社

水泥生产工艺

——误区与解惑

王君伟 编著



化学工业出版社

· 北京 ·

这是一本为生产一线读者编写的属于“公众理解”的、能拨开心灵迷雾的、有指导意义的基础读物。通过收集水泥工作者的真知灼见,展示一线人员的创新才智,解读水泥生产工艺中常见的“错误概念、习惯操作”等误区,寻求用新思维来思考和应对生产中出现的工艺难题。书中从反面提出“议题”,从正面介绍“解惑”的一些思路,“有理有据”进一步表述。

本书从“标准、规范、专家论述和操作者实践体验”中梳理出部分“认识误区”,共列出议题 40 个,小题目 100 个。为便于读者研究、使用和查阅,书中附有与生产工艺相关的技术要求、规范和生产企业使用情况等资料。

本书可供新型干法企业基层生产者和水泥用户阅读参考,也可作为水泥工艺专业的课外读物。

图书在版编目(CIP)数据

水泥生产工艺——误区与解惑/王君伟编著.—北京:
化学工业出版社,2015.2
ISBN 978-7-122-22548-1

I. ①水… II. ①王… III. ①水泥-生产工艺
IV. ①TQ172.6

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 293410 号

责任编辑:仇志刚
责任校对:吴静

装帧设计:刘丽华



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 装:北京云浩印刷有限责任公司
710mm×1000mm 1/16 印张 18 字数 368 千字 2015 年 3 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:78.00 元

版权所有 违者必究

前言

F O R E W O R D

在全球气候问题、生存问题和可持续发展中能源、资源短缺日益严重，以及环保要求越来越严格的背景下，现代水泥企业要生存、要发展，除产品产量、质量要满足在市场经济下用户需求和企业要有效益外，必须向清洁产业转变。20世纪以来，以具有高效、优质、低耗、大型化、自动化为特征和低污染、低排放，并能协同处置废弃物的新型干法水泥生产技术，成为水泥工业发展的主流。这些“新工艺、新技术”，必然带来许多“新机理、新概念、新要求、新标准”，需要人们重新去认识。凡事均有两面性，问题和作用共存，为使问题向作用方向转化，在新生产工艺面前，要求水泥工作者，除继承前人实践积累的科学知识外，还必须在提高认识基础上，接受新思路，用科学基本道理进行解惑，用在道理上讲得通，在实践中验证好的生产实际措施，解决生产中遇到的新问题，传播有效的、先进的理念。

为增长人们对新事物的认识，采用“培训”和“科学普及”的方式。以往的“科普”书籍是针对学科中的基本知识进行普及式传播，而对生产中出现的负面现象的专题归纳论述较少，而当前现场操作人员渴望得到高层次的、从获得传统“一般知识”过渡到“公众理解科学”的科普职业知识。以便通过更新理解，指导实践，避免重蹈覆辙；也希望通过掌握科学知识，激发“大脑”，成为具有预见性操作的高层次操作员。

本书分四章进行编写：第一章原燃材料，侧重于物料的选择，用低、劣质物料时，采取“系统适应型”措施；第二章操作参数，侧重于操作参数的认识，提倡“调整参数实现最佳化”；第三章工艺技术，侧重于工艺技术的理解，实施“合适的对应性工艺措施”；第四章使用要求，侧重于物料的合理使用，贯彻“先验收、检验或试验，后使用原则”。

总体上，作者连接了科研、生产和应用；展示了生产实践、科研数据；诠释了企业生产实际和解读；演绎了水泥工作者的智慧和创新。写法上，本书从正、反两方面编写。反面写常见的“认识误区”。正面则介绍“解惑”的一些技巧思路。总之，以科研实验为基础、生产实践为借鉴、相关文献为依据，进行有理有据的解读，并用具体事例加以说明和表述。

本书从标准、规范、专家论述和操作者实践体会中梳理出部分“认识误区”，旨在为基层读者提供一本属于“公众理解”的、能拨开心灵迷雾的、有指导意义的

科普书，并期望起“抛砖引玉”的作用，能为将来深层次探讨、扩展时参照。实践表明，“误区”是动态的、是可破解的，也会有新的“误区”等待我们去认识、去转换。

由于作者认知有限，不尽周全，书中有疏漏和不妥之处，恳请读者提出批评和建议。在编写过程中除参考同行和前辈的文献资料外，还得到陕西秦岭水泥股份公司和立新总工、陕西声威建材集团杨新社高工、资深专家谢克平先生等指导，也得到《水泥》、《水泥技术》、《水泥工程》、《新世纪水泥导报》等专业期刊的支持和帮助，在此通表感谢！笔者还要感谢李薇、隋建平、张小芬、郑丽珠、李志龙、李志、兰建成、王莉薇、丁玲玲、杨林、王芳、任建新、周其峰、赵桂珍等对书稿完成给予的帮助。

编者
2014. 8

目录

C O N T E N T S

第一章 原燃材料

一、原料化学成分认知上欠缺	1
1. 重视主要成分作用, 忽视次要成分的影响	1
2. 重视化学成分, 忽视原料的矿物形态	10
3. 重视品位, 忽视成分的均质稳定性	12
二、原料选择上误区	13
4. 原料品位越高越好	13
5. 在原料选择时忽视“基础性研究”工作	15
三、燃料煤选择上误区	16
6. 使用低品位燃料上认识误区	17
7. 选择可燃性废物时, 忽视有害元素的影响	23
四、石膏选用上误区	24
8. 重视石膏中 SO_3 含量, 忽视石膏的溶解性能	25
9. 使用工业副产石膏, 忽略预处理工序	25
10. 未注意水泥中石膏品种对“相容性”的影响	27
五、混合材料选择上误区	30
11. 过分强调混合材料的化学活性	30
12. 生产复合水泥时, 不重视利用“性能互补”优势	33
13. 不重视混合材料中的有害元素	38
六、工业废渣选择上误区	39
14. 忽视冶金渣中混杂的铁质	40
15. 忽视选择的工业废渣种类要与企业条件相符	41
七、助磨剂选择上误区	42
16. 不进行试验盲目选择助磨剂	43

17. 企业掺加助磨剂的目的不明确	44
18. 未根据所需粉磨的物料性能选择助磨剂	45
八、研磨体材质选择上误区	47
19. 关注价格, 忽视材质	47
20. 材质越硬越好	51
九、耐火材料选择上误区	53
21. 选择耐火材料时, 未充分考虑预分解窑热工状况	53
22. 未根据入窑物料性能选择耐火材料	62
23. 不重视金属部件材质的选择	63
十、水泥熟料选用上误区	64
24. 质量上, 重视熟料强度忽视熟料其他性能	64
25. 品种上, 未按所生产水泥品种选购熟料	66



第二章 操作参数

一、树立科学操作的理念不足	70
26. 缺乏要让系统能在稳定状态下运行的理解	70
27. 自变量调节时忽视相互之间合理配合	77
28. 忽视操作在稳定产品质量中的作用	81
二、出磨物料细度操作控制上失误	84
29. 产品细度越细越好	84
30. 压细度, 提水泥强度	88
31. 压煤粉细度, 提燃烧速率	92
三、出磨物料水分操作控制值上的误区	93
32. 缺乏为下一工序正常运行考虑	93
33. 担心压低煤粉出磨水分会不安全	94
四、窑系统操作中不正确的习惯	95
34. 采取大风操作	95
35. 忽视窑炉用煤的合理比例	97
36. 片面追求高喂料量	98
37. 把调节窑速作为控制窑内温度的手段	99
五、游离石灰控制指标认知上的欠缺	103
38. 熟料游离石灰控制越低越好	103

39. 分析熟料游离石灰高的原因不全面	104
六、不重视控制入机物料的粒度	106
40. 不考虑破磨系统工序之间经济粒度的控制	107
41. 不重视循环回料对辊压机入磨粒度的调整	107
七、辊式磨操作参数控制上误识	108
42. 不重视稳定料层厚度	108
43. 拉紧力越高越好	109
44. 不重视调节通风	110
八、辊压机操作参数控制上误识	111
45. 未根据入磨物料特性确定辊缝	111
46. 辊压越高越好	112
九、对漏风危害性认识不足	113
47. 对漏风产生的危害性认识不足	113
48. 操作上制造“人为漏风”	116
十、自动控制上误识	117
49. 忽视自动化控制功能	117
50. 中控操作员忽视与现场巡检、质量检验、仪表工之间合作	118

第二章 工艺技术

一、忽视工艺技术在“稳定”中的作为	120
51. 生产技术要为实现“稳定”创造条件的认识不足	120
52. 评价物料“均质稳定性”指标中的不足	123
53. 有了均化设施，就等于能符合“均质”要求	125
二、忽视在制定参数指标前的技术探索	126
54. 不重视寻求优化的工艺参数	127
55. 石膏掺量上不追求最佳化	129
56. 不重视筛余曲线的指导作用	135
三、生产条件变动，忽视应对措施	137
57. 设置预粉磨后未及时调整工艺参数	137
58. 原料品质变动，应对策略欠缺	140
59. 使用高硫煤，缺乏应对措施	142
四、对生产指标参数的关联性认识不足	144

60. 控制破碎粒度缺乏考虑破磨一体性	144
61. 不重视圈流磨工艺参数之间的协调	145
62. 提定额值, 忽视关联性、先进性、优化性	147
五、提高球磨机粉磨效率上认识误区	149
63. 研磨体装载量越多越好	149
64. 不重视研磨体级配	152
六、熟料煅烧系统的认识误区	153
65. 入窑物料分解率越高越好	153
66. 窑炉燃料比掌控上的模糊认识	155
七、不重视控制物料含水率	156
67. 不重视管控进厂物料含水率	156
68. 入磨物料含水率越低越好	159
八、细度指标制定中针对性差	162
69. 照搬照套, 千篇一律	162
70. 指标只有上限或只有下限	167
九、工业试验上的认识误区	168
71. 忽视小磨试验和大磨试验的条件差距	168
72. 不重视生产性试验研究	169
十、工业废渣和尾矿利用的技术上不足	171
73. 对工业废渣磨细的技术支撑力度不够	171
74. 使用化学工业副产品, 忽视对有害成分的去除技术	173
75. 未依据固体废渣、污泥和生活垃圾的特点采取预处理技术	175



第四章 使用要求

一、进厂货物马虎验收	181
76. 对进厂货物不认真验收	181
77. 对验收后发现问题处理不当	185
二、耐火材料砌筑工序上欠缺	186
78. 对砌筑过程监理、查验工作不重视	187
79. 耐火浇注料施工中的误区	192
80. 耐火材料砌筑后贯彻烘烤制度不力	195
三、对用户技术服务工作不重视	198

81. 忽视外部用户对售后服务的满意度	198
82. 轻视向内部用户提供多方位服务	201
四、工艺设备使用误区	202
83. 破磨环节设备使用上的误区	202
84. 煅烧环节工艺设备使用上的误区	203
五、原燃材料在堆存、保管方式上欠妥	206
85. 在运、卸、保管中忽视材料的储存性能	206
86. 忽视煤储存中的自燃性倾向	208
87. 忽视耐火材料的特点对储存和保管的要求	210
六、水泥性能忽略应对现代混凝土新要求	211
88. 忽视商品混凝土对“坍落度经时损失”的要求	212
89. 忽视混凝土结构对水泥耐久性的要求	213
90. 不全面重视混凝土对出厂水泥质量稳定性要求	219
七、使用水泥上的误区	221
91. 选用水泥品种未考虑使用的环境条件	221
92. 使用过期、受潮的水泥	225
93. 不同品种水泥混用	227
八、水泥与混凝土外加剂相容性的特点认识不足	228
94. 对相容性的双向性缺乏认识	228
95. 水泥组分和工艺参数对相容性的影响认识不足	230
九、节能观点上的某些误解	236
96. 误认为节能是“不用”或“限制”能源	236
97. 没把“节能”作为生产技术的核心指标	237
十、对水泥工业的大气污染和减排上的误区	239
98. 低估了水泥工业协同处置社会废弃物的作用	240
99. 混淆先进生产线与落后生产线的环境形象	243
100. 减排未从源头抓起	248

➤➤➤➤➤➤➤➤➤➤

附录 (规范性、资料性)

附录一 水泥标准目次(节选)	251
附录二 水泥工业常用的原材料	254
附录三 不同行业对矿石质量要求简介	259

附录四	“不合格品”的判定规则·····	263
附录五	各类水泥系列的技术特性及使用注意点·····	268
附录六	水泥行业常用活性混合材料的特性·····	271
附录七	使用部门对进场(厂)水泥的检查、控制与验收·····	271
附录八	水泥熟料矿物物理性能试验值·····	274



参考文献

第一章



原燃材料

在已定的工艺流程和机组条件下，企业通过选择和控制原燃材料配比来组织生产。原燃材料选择是否得当，对工厂生产情况影响很大。现代化选材原则是：重视使用性、工艺性、经济性和环境协调性。现代选材观点是：按价值工程选材，即追求高“性价比”，以最低成本来获取产品所必需的功能，使企业生产成本低，产品技术指标高。

为保证水泥厂长期正常生产，除要考虑原燃材料质量成分外，还要关注原材料性能对产量、消耗、设备运转率的影响和制造成本，能给生产带来常态下稳定和运转正常的良性效果；以及消纳工业废渣、废料、废物，减轻对天然资源需求的压力，更好地为优化社会环境服务；此外，还要有全局观念，顾及其他行业对该矿石技术质量要求，让有效资源更好地发挥其品质、储量效益，避免产生公共资源的浪费。不同工业部门对原材料质量要求见附录三。

一、原料化学成分认知上欠缺

水泥工业生产常用原材料选择基本原则见表 1-1，其成分要求见附录二。生产操作者和管理人员对所使用的物料化学成分含量是很关注的，但在“看什么”和“怎么看”细节上存在某些认识上的不足之处，有待克服，以提高对产品质量的控制效果。

1. 重视主要成分作用，忽视次要成分的影响

化学成分按其含量高低或作用重要性大小分为主要成分、次要成分和微量元素。欧洲水泥工业提出按原材料化学成分含量（质量分数）来界定：化学成分



表 1-1 原材料选择基本原则

物料名称	选择基本原则
原料	①满足生料化学成分配料要求,有害杂质少;②质量稳定、均齐;③挥发物含量在要求范围内;④物理性能(易破性、易磨性、易烧性)好;⑤运输方便、储量满足要求;⑥易均化、调和和混合
混合材料	①严格按照水泥标准中规定的混合材料种类选择;②选择活性高的、无害的混合材料;③选择来源稳定,运输距离近的混合材料;④有可能将某些低活性或原始状态属于无活性的材料,加以活化和功能化;⑤生产特种水泥可选择一些有特殊性能的混合材料;⑥复合水泥中所掺混合材料的选择应具有优势互补性能
燃料	一、常规燃料:①单位质量燃料燃烧放出热量要满足生产工艺要求;②燃烧产物应为气体,以便热量传递和排除;③除考虑燃料的发热量、挥发分、成分稳定外,还要考虑燃料的着火点、煤灰熔点、燃烧过程易于控制等;④蕴藏丰富,来源可靠,且价格便宜;⑤便于储存,堆放后性质不会发生重大变化。 二、替代燃料:①代替部分常规燃料后,能产生经济效益,这些废料所节省的燃料费用,足以支付废料的收集、分类、加工、储运的成本;②必须适应水泥窑的工艺流程需要(如可燃物热值、水分含量、燃点和有害成分碱、硫、氯的含量等),能与现有工艺流程很好配合;③符合环保原则,必须确保符合无害排放和对水泥、熟料产品无害
助磨剂	①品质指标应符合标准规定;②选择无毒、无刺激性气味的产品;③优先选择无沉淀、黏度相对较小的液体产品;④根据要求助磨效果,选择助磨剂种类;⑤“性价比”高;⑥选择可靠的生产厂家,提供完整的使用资料,并具有良好的售前、售中、售后技术服务
工业废渣	一、作为替代燃料时:①这些废料必须有足够的发热量(通常在 16720kJ/kg 以上)代替常规燃料后能产生经济节能效益;②所使用的可燃废料必须适应水泥窑生产;③品质上必须确保生产过程环节的环保和对产品无害原则;④选择供给来源稳定的厂家。 二、作为替代原料时:①这些废渣成分经配料后在熟料允许范围内;②易烧性、易磨性好,含有害杂质少,对产品质量和水泥生产过程无不利影响;③满足其他性能特殊要求;④利用废物比传统原料更经济;⑤选择数量、品质供应稳定厂家
耐火材料	一、通常情况下:①材质具有较长的使用寿命;②耐高温和较好的保温效果;③较简单的砌筑方式和较快的砌筑速度;④拆除原有耐火材料时间短且方便;⑤通用性好,市场上易于购到或厂家之间容易调剂;⑥性价比高;⑦要选择来源稳定,产品质量可靠的生产厂家。 二、回转窑生产线上:①窑型和窑内热负荷、热应力、机械应力分布状况;②所用原燃材料性质;③耐碱、挂窑皮性能好;④要为实现“无铬化”环保要求和节能要求等,选用新型环保、节能、抗碱的耐火材料

$>5\%$ 称为主要元素,含量 $0.01\% \sim 5\%$ 称为辅助元素,含量 $\leq 0.01\%$ 称为微量元素。主要成分含量当然重要,而次要(辅助)成分和微量元素含量虽然少,但它们对熟料的煅烧操作和熟料产质量的影响不可轻视。

(1) 主要成分含量必须重视

原料中主要成分是影响水泥熟料矿物组成情况的关键,进而影响水泥性能。主要和有害成分的含量,不仅表示该原料品位的高低,还可作为决定该原料是否可以使用和如何与其他原料进行搭配,制备出合格生料的依据。此外,人们还可根据原料的化学成分进行以下工作:如作为制订开采计划、矿石搭配方案、确定原料采购和签署验收质量合同技术条款,以及作为质检部门生产上提出配料方案、调整配料

操作和质量检验分析的技术基础，所以必须重视。

(2) 次要成分的作用

按原料次要成分的性质大致分为挥发性组分（碱、硫、氯等）、无机物成分 [$fSiO_2$ （游离二氧化硅）、 MgO 、 $fCaO$ （游离氧化钙）等] 和有机成分（使用可燃废弃物时）。它们在熟料的煅烧操作和熟料质量中的作用如下。

① 评价原料成分的纯度 业界通常利用次要成分、杂质含量或有害成分含量来表示或评价该原料纯度，并采取一些措施，减弱次要成分对水泥、熟料质量不利的影 响。

② 作为取舍原材料依据之一 次要成分中包括有害成分，结合原材料质量标准（均以成分表示），判断是否可以使用或如何进行调配。当含有害成分含量超过标准或规范限值时，在无预处理措施下，该原料便失去在水泥生产行业中的使用价值，不宜购买。

③ 改善窑内物料液相性能 原料中的次要成分，使生料成分多元化，降低最低共熔温度（如在传统四元成分系统中有次要组分存在下，其最低共熔温度可降至 $1250\sim 1280^\circ C$ ），起到降低熟料烧成温度，液相提前出现、增加液相量并降低液相黏度，加快粒子扩散和反应速度，使熟料形成速率加快，提高台时产量和降低热耗的效果。

④ 形成固溶体结构 如 MgO 、 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 、 R_2O 等氧化物进入 C_3S 结构中，形成固溶体（通常称为阿利特或 A 矿），固溶程度越大，晶格变形程度和无序程度也越大，则矿物活性越大、强度越高。同样， C_2S 及 C_4AF 在高温形成过程中也可溶入少量氧化物，形成固溶体结构（通常分别称为贝利特或 B 矿以及才利特或 C 矿），降低晶格稳定性，增加活性。

⑤ 超量产生负面影响 量变引起质变，这是规律。以氧化镁为例： MgO 是石灰质原料和水泥熟料中含量最多且不可忽视的一种次要成分。 MgO 含量少，可与熟料矿物结合成固溶体和进入玻璃相中，对熟料性能无明显不良影响，还有利于煅烧。若因生料中氧化镁超过可固容量，以游离态、结晶态方镁石出现，则后果值得注意。

a. 对水泥熟料安定性的影响。生料中氧化镁经煅烧可部分固溶于硅酸盐水泥熟料矿物中，形成固溶体，成为无害体，而多余的氧化镁晶体以游离状态方镁石存在，生成氢氧化镁时体积膨胀 148%，成为膨胀源，在一定条件下会导致水泥安定性不良，破坏水泥石结构。

b. 增加熟料中 $fCaO$ （游离 CaO ）。含高镁生料因液相表面张力降低过多，迫使降低煅烧温度，窑内烟气热动力不足，固相反应较慢，不利于 $fCaO$ 吸收，使熟料中 $fCaO$ 增高。

c. 降低熟料强度。试验研究表明，在水泥熟料生产过程中，因 $MgCO_3$ 比 $CaCO_3$ 分解温度低， MgO 较 CaO 先形成，故石灰石中 MgO 含量越高，熟料强度越低。

d. 对操作的影响。当生料中氧化镁含量过高时，因液相量增多、液相黏度略有下降，煅烧范围变窄，增大操作难度。也容易使窑内结大块、结圈、结厚窑皮和飞砂现象严重，影响正常操作。此外，表面呈液相的熟料颗粒，易损坏篦冷机的篦板。

e. 缓解措施。使用高镁原料时，会遇到一系列问题，但可以在矿山管理上，控制石灰石矿开采，实施高低氧化镁搭配和加强石灰石预均化效果，加上配料上（如提高铁含量，增大熟料中玻璃相量，使溶入的 MgO 更多，减少结晶 $fMgO$ ）和操作上（如控制窑尾温度比正常低、降低入窑物料分解率，以防止液相过早出现；要保证窑内足够用风，避免形成还原气氛，而引起硫酸镁分解，造成窑尾结圈、结皮和熟料快速冷却，促使方镁石晶体尺寸减小等）的配合，取得能有效使用的高镁矿石原料。四川星船水泥有限公司、陕西尧柏水泥公司等，均有在预分解窑生产线上使用氧化镁高石灰石的经验，值得借鉴。

f. 膨胀性的利用。 MgO 和 CaO 都是立方晶体结构，但因晶体尺寸大小不同，与氧排成的八面体结构紧密度上有差别，如 MgO 结构中 Mg^{2+} 与 O^{2-} 呈紧密堆积，而 CaO 结构中 Ca^{2+} 尺寸大，将 O^{2-} 推开，不能紧密堆积。从离子间距离越小，结合键能越大，水化能力越小的结晶化学观点，来解释为什么在同样高温下形成的 $fMgO$ 较 $fCaO$ 晶体活性低，粗大方镁石晶体水化慢，需几个月甚至几年的现象。“问题和作用同时存在”，如今人们却利用其膨胀速度能与混凝土硬化后期由于降温而产生的收缩速度相匹配，在大坝工程中恰如其分地控制水泥熟料中 $fMgO$ 适当含量，发挥其补偿、收缩作用，从而避免或减少大坝因温度应力而产生混凝土的裂缝，此举已在三峡等大坝工程成功应用。见图 1-1。

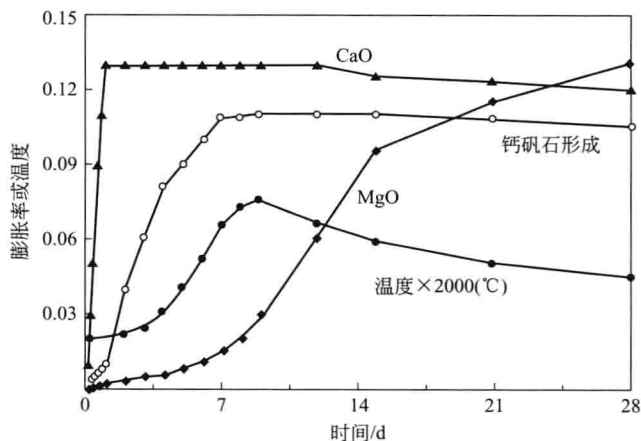


图 1-1 熟料矿物水化的膨胀历程和大坝温度过程示意
[中国水泥. 2013 (9): 97.]

(3) 微量元素的作用

水泥生料中微量元素（如硫、氟、磷、Ti、Cu 等杂质离子）来至原料、燃料。使用工业废渣、废料和尾矿后，带入少量杂质离子，能加速液相产生，有效促进

C₃S 形成, 改善生料易烧性。对熟料煅烧、矿物形成产生不同影响。从表 1-2 可看出少量金属离子对改善生料易烧性的效果。微量元素产生的有利作用如下。

表 1-2 微量元素对生料易烧性影响试验

表 1-2(1) 掺加 1% 微量元素生料在不同温度下的 fCaO 含量试验值

温度/℃	CuO	ZnO	CaF ₂	CaCl ₂	CaSO ₄	CuCl ₂	CuCl	CuSO ₄	ZnCl ₂	ZnSO ₄	对比样
KH=0.98 SM=2.40 IM=2.40 液相量=24.70%(1450℃)											
1350	2.49	4.02	9.74	15.71	21.13	7.03	4.78	2.74	4.81	2.87	19.49
1400	2.02	2.04	2.82	—	—	4.69	2.55	1.75	3.67	2.35	13.26
1450	0.77	0.94	0.24	1.02	1.49	1.69	0.85	0.58	0.04	0	3.20
KH=0.98 SM=2.40 IM=0.64 液相量=23.45%(1450℃)											
1350	1.28	1.44	8.48	12.35	9.31	6.54	2.40	4.46	3.98	7.85	20.01
1400	0.60	0.80	3.25	—	—	2.42	1.55	3.15	3.09	4.82	17.72
1450	0.03	0	0.03	0.13	0.10	0.03	0.16	0.07	3.07	0.03	3.26

注: 总体看, 掺有各种杂质的氧化物, 均能改善生料易烧性。

表 1-2(2) 不同工业废渣对生料易烧性(用 fCaO 含量测试结果表示)影响试验

温度/℃	铜渣掺量(质量分数)/%					磷渣掺量(质量分数)/%						铅锌渣掺量(质量分数)/%					
	0.00	0.50	1.00	1.50	1.67	0.00	4.00	5.00	6.00	7.00	8.00	9.00	0.00	1.00	2.00	3.00	3.80
1350	7.77	8.78	7.73	7.86	8.09	7.92	5.16	1.87	4.67	1.03	3.83	2.57	6.39	5.56	5.24	5.30	5.54
1400	4.49	4.97	5.65	5.25	6.05	6.21	2.41	1.06	2.49	0.55	1.83	1.67	3.27	3.23	2.77	3.02	3.04
1450	3.65	3.96	3.75	3.25	3.86	3.85	1.41	0.31	1.15	0.18	1.06	1.01	2.13	2.44	1.81	2.41	2.12
说明	本试验采用铜渣, 其掺量低, 最高只有 1.5%, 微量组分 CuO 含量不到 0.05% (一般要到 0.5%), 所以改善生料易烧性效果不明显					本试验中掺 7% 的磷渣中, P ₂ O ₅ 的含量为 0.26% (在 0.1%~1% 时, 就可以减少熟料中 fCaO 含量), 能很好地改善生料易烧性。磷渣中含有较多的其他微量成分, 也能改善液相性质						铅锌渣主要含有 Fe、Si、Ca 等矿物以及玻璃体。ZnO 在熟料煅烧中既是矿化剂, 又是助熔剂, 加快固相反应速度。本试验掺量少, 改善易烧性效果不明显					

① 溶剂的作用——改变液相性质 微量元素使生料的烧成最低共熔点降低, 液相提前出现, 降低液相黏度、增加液相量, 粒子扩散速率加快, 改善生料易烧性, 加速熟料矿物形成。

② 矿化剂的功能——加速 C₃S 形成 传统生料和作为替代原料的工业废渣中氟化物、氯化物、硫酸盐、磷酸盐、金属离子等微量元素, 具有助熔性(改善液相性质)和矿化性(增加晶体缺陷, 改善固相和液相反应), 起矿化剂作用。作为矿化剂, 一是破坏和活化原料组分晶格, 增强活性功能, 如破坏 Si—O 键, 使结晶石英活化, 破坏 Al—O 键使黏土易于反应, 加速 C₂S 形成, 进而形成 C₃S; 二是低温下形成中间过渡相, 形成 C₃S, 温度降低到 1150℃ 左右, 因而加速熟料煅烧过程中的烧成反应; 三是降低熔融物黏度, 增加液相中离子的扩散作用, 随着 C₂S



和 CaO 的溶解率提高, 缩短熟料烧成时间, 也就提高 C_3S 形成速率。此外, 有的工业废渣中含有的微量水泥矿物组分起“品种”作用, 能促进熟料矿物形成, 降低 $fCaO$ 。但需注意微量元素掺入的量, 过多则起负面效果。

③ 起稳定剂的效果——稳定 $\beta-C_2S$ 根据资料介绍, 适量的金属氧化物不仅会降低液相黏度, 加速 C_3S 形成速率并有助于晶体发育, 而且有的金属离子进入熟料的固溶体中, 对 $\beta-C_2S$ 起稳定作用, 提高熟料强度。如少量 ZnO 可阻止 $\beta-C_2S$ 向 $\gamma-C_2S$ 转化, 并促进阿利特的形成, TiO_2 、CaO、SrO 既是矿化剂, 也是防止 $\beta-C_2S$ 向 $\gamma-C_2S$ 转化的稳定剂, P_2O_5 含量低时 (0.1%~0.3%), 可稳定 $\beta-C_2S$, 降低液相黏度, 有利于 C_3S 发育, 从而提高强度。

④ 离子固溶的效应——提高熟料矿物活性 利用“掺加杂质离子技术”, 引入适量的杂质离子, 引起熟料矿物晶格畸变或自由能降低, 阻止多晶转变, 稳定晶型。微量元素的介入改变液相性质, 有的能降低液相出现温度, 有的能降低液相黏度, 有的能降低液相的表面张力。试验表明, 在低温下, 由于液相量增加且黏度、表面张力降低, 增大 C_2S 和 CaO 的溶解度, 有利于形成 C_3S 。 C_3S 掺杂后, 晶型结构变化总趋势是: 由未掺杂时的三斜型 (T) 逐渐向介稳的单斜型 (M) 转变。对于 C_2S , 有资料介绍, 由于杂质离子在 C_2S 晶面上富集, 使缺陷的自由能降低, 阻碍向 $\gamma-C_2S$ 转换, 可稳定 β 型 C_2S 。

需要提醒的是: 杂质离子与熟料矿物的固溶具有选择性和极限固溶量, 超过一定范围, 从共溶转为置换, 可能引起 $fCaO$ 增加。

(4) 有害成分的影响

不同熟料品种的“有害成分”项是不同的, 如对铝酸盐、硫铝酸盐水泥熟料来讲, 当 SiO_2 含量高于 10.5% 时, 与 CaO、 Al_2O_3 形成惰性的 C_2AS , 消耗有用成分, 则是“有害成分”。少量的碱、硫、氯, 在生产硅酸盐水泥熟料中起矿化作用, 但超量则产生严重的碱、硫、氯的循环富集, 使预分解窑运行中出现结皮、结圈, 干扰系统正常运转, 成为“有害成分”, 其限值在技术规范中有规定, 见附录二。对其影响分别进行分析探讨。

① 碱含量 (原料和生料中碱含量 $R_2O = Na_2O + K_2O$; 窑灰、熟料和水泥中碱含量 $Na_2O_{eq} = Na_2O + 0.658K_2O$) 水泥熟料中碱主要由硅铝质原料、矾土质原料和使用替代原料 (工业废渣、废料、尾矿等) 带入。少量碱对熟料性能不造成多少危害, 过量的碱不论以何种形式存在, 都会对水泥窑产质量、操作产生不利影响。因此, 水泥标准对原料、熟料、水泥中碱含量采取不同指标要求——选择性指标或强制性指标。

a. 对水泥熟料质量的影响。生料中碱 (R_2O) 能降低最低共熔温度和熟料烧成温度, 起助熔作用, 而且其碱性比氧化钙高, 且溶出快, 能增加溶液碱度, 并激发水泥中混合材料活性, 有利于提高早期水泥熟料强度。若生料中含碱量过高 (硫碱比小于 1), 碱除与硫结合形成硫酸碱外, 多余的碱 (K_2O 、 Na_2O) 则与熟料矿物反应形成 $K_2O \cdot 23CaO \cdot 12SiO_2$ 、 $Na_2O \cdot 8CaO \cdot 3Al_2O_3$, 析出 $fCaO$ 。这些矿