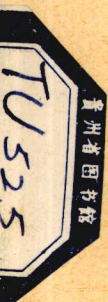


建材情报资料

总第8213号

水泥类 2

大中型水泥回转窑节能增产 调 研 报 告



建材部技术情报标准研究所

一九八二年八月

编 辑 前 言

建材部技术情报标准研究所1981年组织协调全国水泥技术情报网部分成员单位和有关大专院校分工协作，进行了“水泥生产节约能源与资源综合利用”课题的情报调研。该课题包含四个分项，其中“回转窑烧成工艺节能途径”一项由我所水泥组承担。通过半年多的工作，该项调研报告告完成，最后由甘焕兴执笔提出了总结报告。

现将该调研报告发表刊行以供参考。由于编撰和审阅者水平有限，讹误不当之处请批评指正。一些技术观点或出于管见，未必确切，谨求教于专家、同行。

建材部技术情报标准研究所

一九八二年二月

目 录

一、国外水泥工业节能增产途径概况.....	(1)
(一)发展干法优势、把湿法窑改为干法生产.....	(1)
(二)基本保留原有生产方式、革新改造向大型化发展.....	(2)
(三)窑外分解窑是当前国外水泥节能增产的重要途径和发展方向.....	(3)
二、我国大中型水泥回转窑能耗的基本情况 & 节能途径	
.....	(4)
(一)燃料燃烧合理化.....	(4)
(二)改善热交换条件、降低窑尾温度、减少废气热损失.....	(10)
(三)冷却及热回收合理化.....	(14)
(四)降低料浆水分、减少蒸发水份热损失.....	(19)
(五)提高保温隔热效率、降低机体辐射热损失.....	(20)
(六)结束语.....	(22)

能源是一切工业生产与人类生活的重要问题，随着工业的发展，能耗日益增多，使得世界能源呈现危机局势，对今后世界工业的发展潜存着严重的威胁，引起各国重视，因而在各个部门采取各种节能政策、技术措施，以求达到最大的节能增产效果，已成为当今世界的重要课题。

水泥工业是能耗较大的工业部门之一，目前世界水泥生产每年耗能达到1.7~1.8亿吨标准燃料，占世界总能耗的2.2%，加上窑的热利用率只有25~50%，与当前能源形势很不相适应，大有节能之必要。从窑的热效率之低、差异之大，可见其节能大有潜力可挖。如何减少窑的煅烧工艺系统的热损失，提高窑的热效率，是水泥工业中节能的关键所在。

因此，近年来世界各国围绕着窑煅烧工艺系统进行了大量的研究、革新、改造工作，采取各种技术政策、技术措施，力求达到燃烧合理化；加热、冷却、传热过程合理化；回收和利用余热合理化；热能转换合理化；保温、隔热效率高等，来达到最大的节能增产效果。

一、国外水泥工业节能增产途径概况

近年来国外水泥工业为了降低热耗、提高窑的热效率和产量、各国根据各自情况所采取的节能途径和方法有共同点也有所异，基本可分为以下三种情况：

(一)发挥干法优势、把湿法窑改为干法生产

在原来干法生产就比湿法占优势的国家，近年来把湿法改为干法生产比较突出，如西德、日本、法国从1965年到1979年干、湿法生产的比例变化情况见表1。

几个国家干湿法产量比例(%) 表 1

	1965		1970		1978		1979		湿	干
	湿	干	湿	干	湿	干	湿	干		
西 德	17	83	8	92			3	97		
日 本	40.4	59.6	25.7	74.3			2	98		
法 国			32	68	12	88				

并且在湿法改为干法生产时，重点是发展窑外分解窑，如日本从1973年到1977年窑型的变化情况见表2。

1973~1977日本水泥工业窑型变化 表 2

窑型	年份 台数、产量	1973		1977	
		台数	产量(%)	台数	产量(%)
带余热锅炉湿法窑		18	2.2	13	0.7
湿法窑		40	15.0	35	1.0
悬浮预热器窑		43	39.3	35	33
窑外分解窑		19	9.6	40	47.9

从表可见日本1973年窑外分解窑台数只占15.8%到了1977年为32.5%，在发展的21台窑外分解窑中，有3台是新建的，10台是从湿法窑改造的，8台是从悬浮予热器窑改造的。

西德到1979年有窑外分解窑27台，干法长窑2台，可见窑外分解窑发展之快，是这几个国家的特点。

因而在这几个国家熟料热耗有明显降低，西德平均熟料热耗为916千卡/公斤熟料；日本平均为921千卡/公斤熟料；法国平均为989千卡/公斤熟料。窑的热效率可达50%。可见干法生产尤其是窑外分解窑对节能的作用。

(二)基本保留原有生产方式、革新改造向大型化发展

在原有湿法生产比例较大的国家，对大量的湿法改为干法生产为数不多，只是对少数个别的窑进行改造，到目前为止仍以湿法为主，如苏联、美国 and 东欧的其他国家，见表3、表4。

苏联和美国1970~1980干湿法产量比例 表 3

	1970		1975		1979		1980	
	湿 (%)	干 (%)	湿 (%)	干 (%)	湿 (%)	干 (%)	湿 (%)	干 (%)
苏 联			85.5	14.5			77.4	22.6
美 国	68	32			59	41		

在东欧的几个国家(不包括苏联)干、湿法窑的台数如下表4。

表 4

总 计 窑 数 (台)	干 法 窑 (台)	湿 法 窑 (台)
630	195	435

从表4可见东欧的国家湿法窑仍占70%干法占30%。

这些国家目前的节能措施主要是窑系统进行多方面的技术革新和改造，往大型化和技术现代化方向发展。

如苏联1971~1975年期间对33个水泥厂的65台各种规格的湿法和干法窑的直径和长度进行了改造，并同时在窑内和窑尾装备现代化预热器，废除了11台长30~61米燃料消耗高的旧窑；

对25个厂改进工艺降低料浆水份，12个厂利用稀释剂降低料浆水份；

对30台窑装备了由花环式或垂挂式链条带组成的热交换装置、片式热交换器、锥型热交换器、螺旋式热交换器、环式或链式热交换器复合体。

对冷却机结构进行改进提高冷却机效率；提高150~185米长窑回转速度；改善生料配比等。

这些措施使燃料消耗降低3.6%。尽管如此，由于干、湿法比例没有得到根本的改变，所以降低热耗也没能获得很大的突破，1975年，美国和苏联每公斤熟料热耗仍在1300千卡~1500千卡左右。

在这些国家为何不把大量的湿法窑改为干法生产？正如《世界水泥工艺》评美国水泥工业一文所指出的：湿法改干法最大的阻力在于经济上的问题，因为建一个新的干法厂估计投资100美元/吨，而改一个湿法厂的投资需70美元/吨，占建新厂投资的70%，投资太高，除此之外，改造期间还有产量和利润的大量损失，经济不一定合算，改造后工艺线不一定合理。关于这一点，就世界范围而论，可以预见，到1985年前湿法改干法为数甚少，90%以上将建立新型干法窑，而将能耗高的超过35年的老厂关闭。

英国兰圈集团对湿法厂改为干法生产的分析，如果矿山原料水份在5%以下，建厂时就应选择干法生产。之所以建湿法，主要原因是原料水份比较大，加上已建成一套生产系统。把湿法窑的胴体截下一半改为原料烘干机，另一半胴体改为分解炉窑，带来的问题很多，产量增加一倍，生料磨、熟料磨及其他辅机设施，运输系统等都随之改造，因而比较复杂，生料制备系统将不能使用等。

加上这些国家湿法比例较大的历史现状，资源条件等。

看来上述问题是这些国家对湿改干问题上与日本、西德所采取的措施不一的原因所在。

(三)窑外分解窑是当前国外水泥节能增产的重要途径和发展方向

以上两点可见，欲从根本上大幅度地降低水泥热耗，提高热利用率，在新建与扩建下积极发展新型干法窑、尤其是窑外分解窑是当前国外的共同目标，不但是在窑外分解窑占有绝对优势的日本与西德，为进一步发展窑外分解窑、降低热耗、提高生产能力不断的研究和应用外，其他国家，如苏联和美国在新建和扩建中也以新型干法窑作为重点，苏联拟定选用RSP型分解炉窑作为主要发展方向，目前正在研究产量为3000吨熟料/日·的新型干法工艺线，并准备在克里沃罗什斯克水泥厂和涅夫扬斯克水泥厂安装，采用4.5×80米分解炉窑可代替原准备发展的6.4/7×95米大型干法窑建设新厂。

在美国十多个大的水泥公司1978~1981年发展规划中均采用在老厂建新窑工艺系统来代替旧窑，如孙特克斯公司在奥斯丁的一家水泥厂建一台带旋风预热器的干法窑；利海公司在梅孙城建一台年产为50万吨窑代替六台旧窑；艾迪耳贝赛公司在诺克斯维尔厂建一台年产58万吨的分解炉窑代替五台年产47万吨的湿法窑，科罗拉多厂建一台46万吨的立波尔窑代替2台旧窑，在锡沃多尔建一年产150万吨干法厂代替在谋比耳关闭的年产量为47万吨四台湿法窑的厂；屋里贡波特兰公司将建一年产50万吨干法厂代替在莱马已停产的年产20万吨的湿法厂；马尔加特水泥公司计划用1台年产为100万吨的新型干法窑代替光普-哲腊多丁的湿法窑，并将纳希维耳、科温、罗克马尔特和苏必利尔等工厂停产；德克萨斯工业公司计划在圣安东尼奥附近建一日产为1500吨分解炉窑；索斯多公司宣布安装带旋风预热器的新窑扩建欧德萨厂，扩建后年产50万吨，比原增加一倍。这是美国对湿法窑所采取的技术措施。

而加拿大对湿法窑所采取的措施近似美国。1977年圣马瑞斯水泥公司在圣马丽斯山水泥厂用一台年产75万吨旋风预热器窑，废除了年产70万吨的旧窑；海洋水泥公司在温哥华建一年产110万吨新型干法厂，将班别尔顿年产60万吨的厂关闭。法国规定从1973~1980不得新建湿法厂。

可见每个国家根据各自的情况不同而对湿法厂采用的措施就不一样，但总的来说在新建和扩建厂中都以新型干法窑为重点，这是当前各国共同的发展方向，也是节能增产最根本的重要途径。

在研究我国水泥工业节能增产途径及水泥工业发展方向时，以上几个主要水泥生产国家

根据各自情况所采取的措施值得借鉴。也就是首先根据本国国情出发，水泥工业历史现状，国民经济和劳动力等统一考虑改造，新扩建等措施。

二、我国大中型水泥回转窑能耗的基本情况 & 节能途径

我国大中型水泥企业现有回转窑 138 台，其中湿法窑 84 台，占 61%；干法窑 39 台，占 28%；半干法窑 15 台，占 11%。近年来贯彻国民经济调整方针，生产逐年上升，热耗有所下降，1980 年平均每吨熟料标准煤耗为 206.54 公斤 (1445.78 千卡/公斤熟料)，比历史上最好水平降低了 0.62 公斤标准煤/公斤熟料，但与每公斤熟料热耗为 916 千卡和 921 千卡的西德和日本相比，差距甚大，湿法窑比重大是其原因之一；其二就与国外同类窑型相比，也有较大的差距，见表 5。

我国与国外同类窑型相比每吨熟料热耗 表 5

生产方式	国内、外	生料水份 (%)	每公斤熟料热耗 (千卡)
湿法窑	国内	31.8~38.4 平均 34.88	1350~1890 平均 1478
	国外	30~36	1250~1400
半干法窑	国内	12 左右	1123~1390 平均 1233
	国外	12~14	800~900
带余热锅	国内		1315~2448 平均为 1552 (1683)
炉干法窑	国外	0.5	1400~1600

注：() 内为无矿渣配料

对于我国目前水泥工业的现状，如何降低热耗，重点在于湿法窑。在我国能否把湿法窑改为干法生产？据了解，有关规划、研究设计单位曾作过较详细的调查研究和经济比较，其结论是：改造湿法窑所需的投资与停产改造期间带来的产值损失，与建一个相同规模的新型干法窑的厂相比，经济上是不合理的，工艺布置也不一定理想，因此要改变目前我国干、湿法生产比例并非一时可以实现，节能增产的主要目标便落在目前企业已有窑型的烧成工艺系统上了，因为它占水泥生产总热耗的 70~80%，而热利用率湿法窑只有 21~31%；干法窑 (不算余热发电的热利用) 为 16~41%；立波窑为 29~38%。说明各种热损失相当大。

我国主要窑型各种热损失与国外同类窑型相比见表 6。

从表 6 可见，如果把各项热损失中的较高部分降到平均值，就可节省不少能源，如果降到国内最低值 (先进值)，可见其潜力就更大，因此在目前我国现有企业的水泥窑节能增产主要途径是采用各种先进技术和措施。使得燃料燃烧合理化；预热、冷却、传热过程合理化；回收利用废热合理化；热能转换合理化；保温、隔热合理化等，来降低以上各种热损失，取得较大节能效果。

(一) 燃料燃烧合理化

对于每一种燃料，在燃烧过程中其热值能否得到充分的发挥和利用，是燃烧是否合理的标志，如何才能做到燃料合理燃烧，就其主要影响因素来说，如燃烧空气量的大小，风煤混

表 6

生 产 方 式		不完全燃 烧热损失 (千卡/ 公斤熟料)	废气带走 热 损 失 (千卡/ 公斤熟料)	熟料带走 热损失 (千卡/ 公斤熟料)	机体散热 损 失 (千卡/ 公斤熟料)	蒸发水份带 走热损失 (千卡/ 公斤熟料)	窑灰带走 热 损 失 (千卡/ 公斤熟料)
湿 法	国 内	11~257	154~417 平均226.7	7~334 平均125	96.9~413 平均229.84	389~579 平均484	0.02~34.6 平均12.7
	国 外 (西德56年)		120~150	11~27	116~178	486~540	
干 法	国 内	14~123.4	612.36~1035.6 平均818.35	14.4~237 平均70	126.3~310 平均168.7		0.39~104 平均55.6
	国 外		173.6				
半 干 法	国 内	30.7~151.7	167.4~558 平均390	12.21~312.2 平均121.7	63.1~172.6 平均113.4	116~146.9 平均137	0.62~54.2 35.6
	国 外 (西德74年)	1~2	43~79	15~113	68	128	

合程度,煤粉细度,煤的水份和窑内温度等。

1. 目前我国大中型回转窑燃料燃烧情况

据1980年各厂的热工标定资料,统计了42台湿法窑,13台干法窑和5台半干法窑,其燃料燃烧情况见表7—1,表7—2。

(1) 正确选择过剩空气系数

从表7—1、7—2中可见,过剩空气量过多或偏低时,都是造成燃烧不合理的因素之一,在目前的煤质和煤粉细度的情况下,在湿法中,过剩空气系数在1.10~1.15之间较为适宜,它所产生的废气热损失与不完全燃烧的热损失之和较少;当过剩空气在1.05~1.09之间时,废气热损失虽然比前者少,但不完全燃烧热损失比前者大,其两项之和仍比前者大;当过剩空气大于1.15时,不完全燃烧热损失比以上两种情况都大,原因是当煤粉进入窑内,部份煤粉在燃烧带内还没有完全燃烧,就被较大的风速带走,并在出窑过程中又有部分煤粉不断燃烧和产生CO。之外,由于窑内有较大的过剩空气量,并且这些过剩空气大多是来自窑头漏风严重,如大同#2 #3窑窑头漏风达8676~8512米³/时;开远#2窑达20.36%;昆明#1窑达30.5%;江油#1窑达23.4%;因而也增加了对过剩空气加热到废气温度而造成的燃料损失,据资料介绍,对不同的过剩空气量加热到不同的温度所带来的燃料损失占总燃料量的百分数见表8。

由此可见,不适宜的过多的过剩空气量,不但带来过多的废气热损失,同时也会产生过多的不完全燃烧热损失。

为了使燃料得到合理燃烧,一般说过剩空气量控制在5~15%,而目前所统计的42台湿法窑中有24台超过了这一控制范围,占统计数的57%。

除了上述从全窑的统计外,从表7—1也可以看出在同一个厂同一煤种用不同的过剩空气系数的窑,所带来的废气与不完全燃烧热损失不同,如比较明显的耀县厂#1、#2窑所用的过剩空气系数为1.08和1.06其废气与不完全燃烧热损失就比过剩空气系数为1.1的#3、#4窑大,渡口厂#2窑过剩空气为1.209,它的废气与不完全燃烧所带来的热损失比过剩空气为1.14的#1窑大,光化厂#1、#2窑相比也是如此,这说明在目前情况下,我国湿法窑采用1.10~1.15的过剩空气系数较适宜。

从表7—1中又可以看出不管采用多大的过剩空气系数,化学与机械不完全燃烧都普遍存

表 7-1

湿法窑燃料燃烧情况

过 剩 空 气 系 数		1.05~1.09		过 剩 空 气 系 数		1.10~1.15		平均 值	
厂 名 及 窑 号	荆 门	耀 县	耀 县	江 油	江 油	江 油	江 油	江 油	江 油
过剩空气系数	1.05	1.06	1.08	1.08	1.07	1.05	1.08	1.07	1.05
CO	0.4	0.9	0.45	0.1	0	0	0.72	0.36	0
t尾温	225	240	240	204.7	190	180	212	213.1	236
Q度	245	310	308	233.54	214.29	220.65	260	255.92	324.6
Q不完全	14.34	59.2	31.1	19.05	12.19	12.08	21.1	0	0
Q度 + Q不完全	2.17	16.2	16.2	35.64	40.5	5.47	25.11	20.2	52.65
								297.2	

过 剩 空 气 系 数 >1.15

过 剩 空 气 系 数		>1.15		过 剩 空 气 系 数		>1.15		平均 值	
厂 名 及 窑 号	江 南	江 西	英 德	华 新	华 新	江 油	江 油	江 油	江 油
过剩空气系数	1.40	1.32	1.19	1.30	1.19	1.31	1.66	1.37	1.51
CO	1.15	0.01	0.4	0.2	1.1	0.6	0.4	0.37	0
t尾温	202	200	170	225	225	220	210	210	240
Q度	204	180.15	269.2	246	225.67	200.5	251	248	281.89
Q不完全	99.21	36.84	15.97	20	33.83	20.30	22.73	14.37	50.65
Q度 + Q不完全	12.96	19.44	24.3	10.53	12.96	14.58	30.78	17.82	29.26

注: t尾温——窑尾温度; Q度——窑尾废气带走热损失; Q不完全——燃料不完全燃烧带走热损失

干 法 半 干 法 燃 料 燃 烧 情 况

表 7-2

过 剩 空 气 系 数 <1.05						1.05~1.09					
厂 名 及 窑 号	抚顺	工源	大连	大连	平均值	抚顺	大连	本溪	光华	新疆	平均值
	* 2	* 1	* 4	* 1		* 1	* 3	* 1	* 4	* 1	
过剩空气系数	1.01	1.0	1.03	1.02		1.06	1.05	1.075	1.06	1.08	
CO	0.6	2	0	0.23	0.7	0.3	0.1	0.4	0.35	0.1	0.25
t尾温	930	979	950	882	935	850	932	960	610	970	864
Q废	633.91	828.01	856	879.6	799.3	612.36	828.4	809.84	848.29	841.68	788.1
化学	32.74	116.36		6.4	38.8	17.2	6.8		33.83	31.8	17.93
Q不完全											
机械			21.9	24.3	11.55		31.2	26.23		0.30	11.54
Q废 + Q不完全					849.7						817.57

厂 名 及 窑 号	1.10~1.15		>1.15		平均值	<1.05		1.05~1.09		1.10~1.16	
	大连	锦西	锦西	锦西		小屯	松江	琉璃河	松江	琉璃河	
	* 5	* 1	* 3	* 2		* 1	* 2	* 1	* 1	* 2	
过剩空气系数	1.14	1.14		1.24	1.38	1.04	1.03	1.09	1.08	1.15	
CO	0	0		0	0	2.51	0.15	0.5	0.2	1.3	
t尾温	921	760	840.5	958	700	834	266	180		150	
Q废	1035.6	767.6	901.6	805.32	830.37	817.8	255.5	416.76	374.8	416.54	380.5
化学							91.35				
Q不完全											
机械	11.6		5.8								
Q废 + Q不完全			907.4		817.8						

表 8

燃烧资气中的O ₂ %(体积)	过剩空气量 %(体积)	不同温度下燃料损失占总燃料量的百分数(%)		
		238℃	404℃	516℃
1	4.8	0.3972	0.6942	0.8925
2	10.2	0.8512	1.490	1.916
3	16.3	1.377	2.410	3.100
5	31.5	2.724	4.867	6.130

在, 这一方面说明在目前的煤质情况下煤粉的细度还过粗, 另一方面说明风煤混合不好或喂煤量不准等。

在干法窑中, 从表7-2可以看出, 当过剩空气系数小于1.05时, 不完全燃烧热损失最大; 当过剩空气在1.10以上时, CO虽基本能完全燃烧, 但废气热损失有所增加; 无论从统计数字或从抚顺、大连厂所用的不同过剩空气系数的窑来看, 过剩空气系数均以1.05~1.09的范围较为适宜, 废气与不完全燃烧热损失之和较少。

(2) 堵塞窑头漏风

合理控制过剩空气量是使燃料合理燃烧的重要条件，为此对目前普遍存在较为严重的窑头漏风必须采取技术措施和加强管理进行密闭堵漏，从而减少过剩空气量，降低废气和不完全燃烧的热损失，并可增加进窑的二次风量和提高窑内温度。

目前国内密封装置主要有迷宫式、接触式、气封式及石墨块密封等，都收到一定的效果，尤其是石墨块密封装置经石岭、抚顺等厂使用效果良好，随着窑头漏风量减少，二次风温得到提高，有助于煤粉燃烧，提高火焰温度，降低热耗。

牡丹江厂窑头安装迷宫式密封圈也收到良好的效果。

除了密封外，对其余漏风点进行堵漏也是不可忽视的，喀尔滨水泥厂深有体会：由于管理不善漏风量逐年有所增加，随之废气带走的热损失也逐年增大，见表9

表 9

年 度	项 目	废 气 量 (标立方米/公斤熟料)	废气带走热损失 (大卡/公斤熟料)	点火烟囱废气带走热损失 (大卡/公斤熟料)
1977年		4.78	139	197
1979年		6.39	233	277
1980年		6.89	323	220

后来在检修中把堵塞漏风工作当为一项重点来抓，密闭了82个漏风点，堵漏以后效果很明显，漏风量减少了0.8标立方米/公斤熟料，加热机工作很正常，大烟囱帽基本不放废气，使他们体会到堵漏工作对节能增产的重要性。

(3)降低煤粉细度

煤粉愈细、燃烧速度愈快，可以减少不完全燃烧热损失，从而收到提高窑内温度等好处。

根据目前已有资料、统计了20个厂煤粉细度与其它成份见表10、不完全燃烧见表7—1、7—2。

湘乡水泥厂从1976年煤粉细度控制指标由25%降至10%后，燃料燃烧比以前好，提高了火焰温度，并改善了熟料质量，不完全燃烧热损失有所降低，因此根据煤磨的生产能力与煤质情况，选择合理的煤粉细度，在可能情况下降低煤粉细度对节省燃料有重要作用。

(4)降低燃料水份、减少废气热损失

煤粉中水份对燃烧影响是很大的，如果大于1~1.5%，对燃烧带来不良后果，除降低火焰温度、延长火焰外并能提高废气温度，据资料介绍，燃料中含1%水份约降低火焰温度10~20℃，并带来2~4%的废气热损失，而目前所统计的20个厂的入窑煤粉水份中有9个厂超过1.5%，占45%，见表10，有的厂水份达16.53%，因而利用窑废气中的热烘干煤粉是节能的措施之一。

(5)做到喂煤量准、改善风煤混合

目前燃料不完全燃烧的原因之一是喂煤量不准和风煤混合不好，造成喂煤不准的原因是喂煤系统设备调节不灵活，不能根据窑内温度的变化，适当增减煤量；二是下煤不均匀，为了解决以上问题，在煤粉仓中心锥体里装煤胆，减少煤粉落差，起到缓冲作用，减少跑煤；美国资料介绍，煤粉仓下煤口相应扩大，并装上园锥型喂煤绞刀，煤在绞刀内逐渐被挤，不

表 10

1981年入窑煤粉工业分析				
厂 名	灰 份 (%)	水 份 (%)	细 度 (%)	挥 发 份 (%)
峨眉水泥厂	22.03~23.5	0.95~11.3	12.6~15.2	22.43~299.1
华新水泥厂	22.77~26	1.61~2.05	24.11~37.45	28.96~30.07
开远水泥厂	14.36~20.24	11.28~16.53	9.09~12.95 11.6~20.34	30.03~33.47
上海水泥厂	22.1~26.66	1.0	8.9~12.6	28.33~32.68
大通水泥厂		2.8~6.47	16.6~22.5	
永登水泥厂	15.27~18.2	22.2~3.84		24.06~27.23
贵州水泥厂	27~29.54	0.52~1.01	11.4~16.9	16.09~17.85
新化水泥厂	32~33.52	1.0	13.8~21.86	22~25.76
英德水泥厂	30~32	0.9~1.5	12.7~18.9 15.5~20.7	23~25.38
大同水泥厂	10.80~11.74	2.9~4.9	23.5~27.4	29.35~30.46
江南水泥厂	23.65~25.49	1.39~1.69	17.96~19.59	31.05
江山水泥厂	24.85~26.35	0.5~0.9	10.1~13.3	29.51
耀县水泥厂	19.77~21.71	2.64~3.77	6.69~9.04	29.91~32.06
光化水泥厂	21.56~33.15	0~0.3	20.3~36.5	23.4~28.55
渡口水泥厂	18.13~20.0	1.19~1.37	6.9~10.4	25.48~26.39
大连水泥厂	20.31~27.12	1.66~2.37	12.2~18.0	23.75~28.23
松江水泥厂	14.54~23.84	5.92~6.98	30.28~44.7	35.65~41.02
哈尔滨水泥厂	26.02~29.75	1.0~1.2	14~14.4	
永安水泥厂	28.97~32.32	0.6~1.56	18.6~31.8	23.07~26.86
邯郸水泥厂	26.67~27.91	0.42~4.2	22.8~24.8	20.89~21.02

易造成跑煤，喂煤量也易得到保证；煤粉系统采取大循环、牡丹江厂窑头设有煤粉仓、出磨煤粉经提升机、绞刀喂入双管绞刀，多余煤粉回煤仓，回煤仓的粉煤再加入大绞刀内，使煤粉均匀喂入窑内，没有跑煤和断煤现象。还有华新水泥厂采用电子计数器，琉璃河水泥厂采用电子皮带称，做到计量喂煤而花钱不多，值得推广应用。

其次改善风煤混合是为燃料完全燃烧提供良好条件，风煤混合好坏取决于喷枪的形式与结构、一次风量的大小、喂煤量的多少，目前我国所用的单管喷枪，一次风量增加的同时煤粉量也随之增大，不能根据煤粉量灵活的调整一次风，因而不易达到良好的风煤混合效果，增加风量反而增加了煤耗量。如目前我国各种窑一次风量与国外相比并不小，在57台湿法窑中，一次风量超过25%的有39台，占总数的68%，最高的一次风量达53.7%，最低也达13.14%；在16台干法窑中一次风量为10~15% 6台，占37.5%，为15~25%的有7台，占44%；在9台半干法窑中一次风为10~15%的有8台，只有一台为7.5%；而国外目前一次风量仅为5~10%，这与广泛使用双套管和三套管喷枪，使得风煤混合得好有关。

双套管喷枪是由两个套管组成，一次风分两股分别进入两个套管中，在内套管是不含煤粉的纯净空气，通过管出口的旋流装置，风呈扩散和旋流状喷出，在外套管中一次风呈轴流状或稍带一点扩散度喷出，煤粉可以直接加到外套管中，也可以用风力输送到外套管内与轴流的一次风混合喷出，这就可以改变内、外套管的一次风量，增加风量不至于带进大量的煤粉，这就便于调整风煤量并使其更好的混合。

三层套管喷枪主要特点是煤粉加入中层套管，而内管和外管均为纯净空气，内管出口部位装有旋流装置，中间套管不加任何装置，在外层套管管口装有轴流器，如果需要也可装一个调节的扩散器，内外套管的一次风量可由喷枪的2个调节器分别进行调节、控制风速、扩散度和旋流度，使煤粉与空气达到最佳混合状态，这样为煤粉达到完全燃烧提供了良好条件，达到减少废气与不完全燃烧热损失。

(二)改善热交换条件、降低窑尾温度、减少废气热损失

废气带走热损失的大小是与窑尾温度及废气量成正比关系，从图一可以看到窑尾温度、废气量与废气带走热损失三者之间的关系，在同一窑尾温度下废气量增大、废气热损失也随之增大。同样在等量废气中尾温越高，废气热损失也越大，因此降低窑尾废气温度是减少废气热损失的重要措施之一。

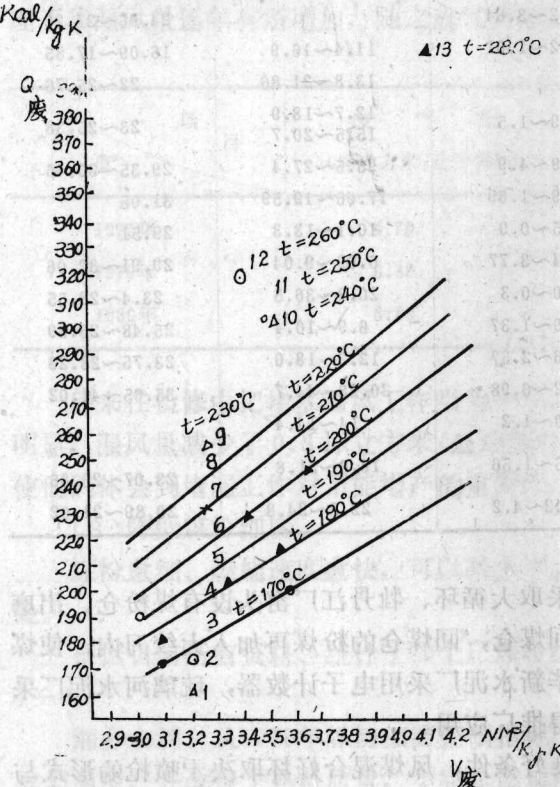


图 1

为了降低窑尾温度、减少废气热损失，增加窑内物料热交换面积是一个很重要措施，为此有些厂在窑内纵向砌筑高低砖，这样一方面可增大物料与窑衬的接触面积，增加窑衬对物料的热传递，另一方面增加了物料与热风的热交换面积，从而提高预烧能力，达到降低热耗的效果，如琉璃河水泥厂干法窑至今仍用此法砌筑，对降低热耗起到一定的作用。

一般在预热带与分解带内砌筑，据资料介绍可比原有面积增加50%。

之外，在湿法窑改进挂链方法、合理增加单位熟料链重对降低窑尾温度、减少废气与窑灰逸出所带走热损失也是非常重要的。

1.改进湿法窑挂链，降低窑尾温度，见表11，目前我国湿法窑的挂链方法一共有以下六种，从窑尾冷端至热端有垂一花挂链；垂一花一垂有的加挂周边链；垂一花一周边；花环一垂挂；花环挂；全垂挂等。

在45台湿法窑中，有6台用垂一花挂链，占13.3%；有8台用垂一花一垂或加周边链，

表 11

厂名及窑号	链条带 占窑长 (%)	单位熟 料链重 (吨/吨)	挂链方法 冷—热端	小时窑灰 (吨/时)		出链物料		窑尾温度 (°C)
				逸出	回收	温 度 (°C)	水 份 (%)	
上海*5	26.1	2.40	垂一花	3.46	2.55	120~150	<1.0	244
耀县*1	18.2	2.35	垂一花 ₁	3.06	7.05	91		244
*2	18.2	2.61	垂一花 ₂		6.4	101		244
*3	24.39	2.95	垂一花环—小花		7.27	97		200
*4	20.00	2.23	垂一花 ₁		3.23	158		225
大同*1	25.79	3.03	垂一花			96~98	4~6	180

厂名及窑号	链条带 占窑长 (%)	单位熟 料链重 (吨/吨)	挂链方法 冷—热端	小时窑灰 (吨/时)		出链物料		窑尾温度 (℃)
				逸出	回收	温 度 (℃)	水 份 (%)	
华新*1	26.0	3.66	垂—花—垂	4.11	0.12	200/350	0	150~180
*2	18.6	2.96	垂—花—垂	3.4	0.06	250/350	0	180~210
*3	17.8	2.17	垂—花—垂	3.16	0.05	300/400	0	180~220
湘乡*1	18.6	2.03	垂—花—垂	6.85	5.51	200	0	200
*2	18.5	2.26	垂—花—垂	10.88	10.75	250	0	235
*3	18.5	1.77	垂—花—垂	4.60	4.59	150	0	224
渡口*1	25.48	3.88	垂—花—垂—周边	4.18	4.16	281	0	180
*2	24.46	3.71	垂—花—垂—周边	5.89	5.54	337	0	196
永登*1	22.12	2.49	垂—花—周边	14.102	13.3			212
广州*2	29.15	2.4	垂—花—周边	4.24	4.12	100	0.2	210
大同*2	27.89	3.67	花环—垂	10.225	9.42	96~98	4~6	220
*3	28.25	4.03	花环—垂	6.745	6.20	96~98	4~6	175
开远*1	15.1	2.9	花环—垂	0.422	1.853	142	0	287
*2	14.1	3.49	花环—垂	0.0234	1.20	261	0	220
昆明*1	16.88	3.33	花环—垂	6.89	5.	295	0	207
光化*1	17	1.88	花环—垂	1.447	0.864	197	0.2	165
*2	19.4	2.05	花环—垂	0.878	0.343	135	0.2	165
胜利*2	20.48	2.644	花环—垂	1.85		279.8	0	210
贵州*1	23.0	2.09	花—垂			120		250
*2	23.0	1.92	花—垂			100		260
*3	25.7	2.76	花—垂			280		180
*4	25.7	2.74	花—垂			250		180
峨嵋*1	14.6	1.759	花环	4.13	3.06	100	1.5	190
英德*1	18.83	2.8	花环	5	基本喂窑	130	0	225
*2	18.83	2.8	花环	5.3	基本喂窑	130	0	225
水城*1	20.21		花环	2.97	1.20	90		187
江南*1		2.27	花环=重叠	5.35	5.35	377	0	200
*2		1.93	花环=重叠	5.77	4.94	358	0	202
*3		2.89	花环=重叠	2.22		168	0	236
大同*4	26.49	2.89	花环			96~98	4~6	180
上海*2	21.74	1.25	花环	2.04	1.93	160~200	0	264
江油*2	25.7	2.90	全垂	4.12	3.48	>110	0	190
*3	24.7	2.77	全垂(冷旋)	4.23	3.57	>140	0	204.7
江西*1	22.1	3.88	全垂	3.5	1.59	95	0~4	160
*2	22.1	3.83	全垂	6.88	6.67	95	0~4	170
江山*2	27	2.93	全垂	6.71	5.41	130	0	230
巢湖*1	16.25	2.94	全垂	1.512	2.341	117	0	250
*2	16.25	2.93	全垂	1.302	1.485	94	1.4	200
上海*1	20.9	2.68	全垂	1.73	1.72	280~300		213

注：单位熟料链量、产量为台、时。

占17.7%；有2台垂—花—周边挂链，占4.4%，有12台用花—垂挂链、占26.6%；有9台用花环挂，占20%；有8台用全垂挂，占17.7%。

平均单位熟料挂链重量：垂—花挂为2.595吨/吨；垂—花—垂或加周边挂为2.805吨/吨；

垂一花一周边挂为2.445吨/吨；花一垂挂为2.792吨/吨；花环挂为2.324吨/吨全垂挂为3.108吨/吨；可见，平均单位熟料挂链最重是全垂挂链法，其次是垂一花一垂或加周边挂，最轻为花环挂。

平均窑尾温度：垂一花为221.5℃；垂一花一垂或加周边链为199.37℃；垂一花一周边为211℃；花一垂挂为209.9℃；花环挂为208℃；全垂挂为202℃，可见平均窑尾温度以垂一花一垂或加周边链为最低，其次是全垂挂。

以上说明：由于挂链方法不同，单位熟料挂链重量也不同，因而对窑尾温度影响很大，从表11可见以垂一花一垂或加周边链的挂链法，出链物料普遍较高，窑尾温度都较低，因而这种挂链方法是可取的。

这种挂链方法有利于物料（料浆）进入链条带后，在它的干燥进程中所经历的三种状态，即最初阶段是料浆物料；第二阶段是可塑性固态物料；第三阶段是即将干燥后成球粒物料，这三种不同状态物料在链条带所处的位置称为料浆区、塑性区、球粒（粉）区。这种挂链法是根据各区物料的特点而设置的，它能充分发挥各区段链条应有的作用。

在塑性区采用垂挂链幕，有合理较大的挂链密度，链条间隙小，窑内空洞也较小，利用料浆粘稠在链条上的粘性特点，这样有较大的热交换面积，因而较好地回收废气中的热，降低废气带走热损失。并充分利用料浆糊在链条上的粘性特点有效地回收飞灰，有利于减少窑灰逸出量、减少窑灰带走热损失。

在塑性区采用花环挂链，由于该区物料不是处于流态，而是有较大的粘结性粘结在窑衬上，所以采用花环挂链有利于刮落附在窑衬上的物料，并借助于链条下滑给物料刮落和往前推移，不易造成没被刮落物料的死角而造成回浆，使物料能顺利往前移动与空气进行热交换。

在球粒区、该区主要是把物料合理地造成球粒，把残余水份迅速蒸发出去，提高物料出链温度，因而采用比料浆区稍稀、稍短的链条垂挂，增加球粒热交换面积，使到达前二区的热空气含热较为合理。如果采用过长和过密的链条时，容易降低成球率造成过多的粉尘，所以在该区选择合理的链条长度和挂链密度很重要。

在国外，如伊朗的西迈尔水泥厂 $\varnothing 3.15 \times 100$ 米湿法窑用这种挂链方法后，由于捕尘效果有明显好转，烧成系数由原来的0.53变成0.56，使熟料产量增加5.7%。并且在窑尾废气中测定，从废气中回收了较大量的热。

另一种挂链法就是在链条带采用全垂挂链，如果在链条带各区段采用合理的挂链密度、链条重量和长度，同样达到增加热交换面积，提高热交换效率和捕尘效果，达到节能增产的目的。在美国和欧洲成功地应用这种挂链方法。

美国德拉贡水泥厂一台 $\varnothing 5.18/4.4 \times 158$ 米湿法窑采用了全垂挂链法，链条带长为26.72米，链条总重量为158.76吨，所有链条平均长度为3.66米，钢链环内径为1.9厘米 $\times$ 7.6厘米。

挂法：从窑喂料端5.76米开始，料浆带长13.72米，挂700条C₁₀₃₀耐磨钢链，链条挂在连续螺旋形挂链板上。塑性区长8.23米，挂2640条M₁₀₀₃碳钢链，球粒区长4.88米，挂9⁹条309型不锈钢链。

另有三个工厂几台湿法窑用类似挂链法，能持续地超过额定产量18~25%，热耗为1108.4千卡/公斤·熟料~1185.86千卡/公斤·熟料。

2. 增挂耐热钢链条、降低窑尾温度

目前我国生产耐热钢链条的厂有北京东升合金厂、大冶钢厂、南京尧辰机械厂等。在华

新、江山两厂试用了 $1\text{Cr}_{25}\text{Si}_2$ 和 $1\text{Cr}_{25}\text{Ni}_{20}\text{Si}_2$ 两种型号的耐热钢链条。挂链位置是距原链条带热端有一定距离开始挂链,这一距离长度,江山厂为2.7米、华新厂为2.595米。耐热钢链条带长度,江山厂为5.5米、华新厂为5.678米加0.99米空挡再挂4.342米。经初步试验与原设挂前相比有以下效果:

- (1)江山厂提高了窑内同部位物料温度 137°C 。
- (2)降低了窑尾温度,江山厂降低 20°C 、华新厂降低了 30°C 。
- (3)节省了煤耗,江山厂每吨熟料节省15.85公斤实物煤、华新厂一台窑每年节省1290吨实物煤。
- (4)增加了产量,江山厂提高3.21%;华新厂台时增加0.5吨。
- (5)提高了质量。

可见改进挂链方法对节能增产的重要性。

3. 提高半干法窑加热机热效率、减少废气热损失

为了减少立波窑废气热损失与不完全燃烧热损失,必须提高目前加热机的热效率。目前我国立波窑加热机热效率低的主要原因是加热机上物料透气性不好,热气流不能很好通过料层进行热交换,料层阻力增大,使窑内通风不良,造成燃料不完全燃烧,因而废气热损失和不完全燃烧热损失增大。为了提高加热机的热效率必须解决物料层的透气性。

加热机上物料透气性不好、主要是成球与生产工艺不相适应,如料球强度与落差、球料孔隙率与急剧温升使水份迅速蒸发所引起料球破损率大,造成料球之间孔隙减少,篦孔受到堵塞,通风不良。解决这一问题可以采用以下方法:

(1) 降低料球落差、减少料球挤压

目前我国立波窑料球强度虽然一般都达到要求,有的还高达2000多克,即使这样,但由于成球盘到喂料溜子落差大,料球被砸碎、料层被砸实,为了解决这一问题,牡丹江厂、琉璃河厂在成球盘下部加一台皮带机、减少落差高度2~2.5米,料球破损率有所减少,加热机上料层透气性得到明显的改善。其次料球溜子下料口结构不合理,也会造成料球间互相挤压或桶溜子上的积料而造成料球破损,如小屯厂把料球溜子下料口宽度由700毫米改为380毫米,并改小了料球溜子容积,起到了减少料球互相挤压破损和料球互相压实的效果,改善了料层透气性和热交换,窑内通风有所改善、窑台时产量有明显提高。但有的厂把料口缩得过小,缩至150~180毫米、造成溜子积料、效果适得其反。

(2) 改善料球孔隙率

料球孔隙率的大小,对料层透气性影响很大,料球孔隙率小、料球急热水份迅速蒸发导致料球炸损,造成加热机通风不良。目前我国料球孔隙率大多在28%以下,料球炸裂现象比较严重,据资料介绍,国外料球孔隙率一般不小于30%,如小于30%时也会发生炸裂现象。

为了增加料球的孔隙率,松江厂将成球盘边由900毫米削低为700毫米,倾角由 45° 增至 53° ,使料球在成球盘内的停留时间由6分钟减至2分钟、湿球强度由1300克降至650克,料球炸裂温度由 550°C 提高到 750°C 。

在国外一些国家研究热法成球,其理论依据是因料球在加热机先经干燥室干燥后,还有残余水分1.0~2.5%,到预热室又承受 800°C 高温,其中25%的 CaCO_3 被分解,同时少量残余水分急速蒸发,致使球粒破碎,干燥后残余水分的存在是由于干燥方法不合理所造成的。球粒中水分的蒸发过程可分为两步;表面水分蒸发到周围气流中的外部扩散,气流加热料

球、造成从表面到中心的递降温度分布，温度梯度产生的压力降，阻碍着内部扩散进程，结果使料球留有较多的残余水份。合理的干燥方法应该减少温度梯度，但降低气流温度是不合适的，不但减慢干燥速度，而且造成热气流的热损失。因此只有提高料球温度比较现实，办法是预热生料粉和用热水成球，保加利亚建材科学院试验先将生料粉加热到80℃，再用沸水成球，模拟立波窑加热机的工艺条件进行料球干燥试验，球粒干燥温度为115℃，对比试验表明，干燥5~6分钟，表面水分蒸发后，干燥速度主要取决于内部扩散，而用热法成球的与普通料球相比，扩散进程是不同的，在干燥18分钟后，普通料球含水1.97%，而热法成的球为0.54%，当在650℃停留18分钟后普通料球破碎22%，而热法成的球仅为4%，由此可见热法成球干燥快，机械强度高，耐热性好。这个试验得出的原理值得研究借鉴。

由此可见，料球炸损不但与料球粒度、孔隙率有关，还与料球的预热、干燥温度有关，在目前加热机的预热和干燥过程中使其温度有一个逐步递增过程，减少料球破损将会有益，要做到这一点，合理设置风罩数与位置，改善一、二室风量分配与调节，达到一、二室温度有一个逐步递增的过程，降低炸球率。

(三)冷却及热回收合理化

在水泥工业中除了降低窑尾废气热损失和合理利用窑尾废气带走的热，如余热发电，预热器窑外，还有对熟料合理冷却和热回收问题，也就是对熟料不但冷却到有较低的温度，而且把冷却过程中放出的热尽可能大的回收入窑，这就需提高冷却机的热效率、减少熟料带走热损失。这一问题对于我国水泥工业节能也是非常重要的。

1.目前我国大中型回转窑冷却机使用情况

目前我国水泥工业主要使用的熟料冷却机有多筒式、单筒式和篦式（水平推动、震动、回转）三种类型、见表12。

表 12

生产方式及窑数	多筒冷却机		单筒冷却机		篦 式 冷 却 机					
					推 动		震 动		回 转	
	窑 数 (台)	占总 (%)	窑 数 (台)	占总 (%)	窑 数 (台)	占总 (%)	窑 数 (台)	占总 (%)	窑 数 (台)	占总 (%)
湿法窑(62台)	41	66.1	3	4.8	8	12.9	9	14.5	1	1.6
干法窑(21台)	7	33.3	8	38.0	2	9.5	1	4.76	3	14.3
半干法窑(11台)			3	27.3	5	45.45	1	9.0	2	18.18
合 计	48	51.06	14	14.9	14	15.95	11	11.7	6	6.38

从表12中可见使用多筒式冷却机的窑占51%，其次是推动篦式占15.95%，单筒占14.9%。我国目前几种冷却机的热效率与熟料出窑后带走热损失见表13、表14。

在表13中可见：水平推动篦式冷却机热效率最高、平均为75%，除邯郸厂*3窑的46.2%、湘乡厂*3窑的60%外，其余均在70%以上。多筒式冷却机热效率在60~70%的有14台、占总29%，在50~60%有13台、占27%，在50%以下的有21台、占43.7%；单筒式冷却机热效率在70%以上的有11台、占78.5%，平均热效率达66%；而震动篦式与回转篦式热效率都比较低。