

水泥工业技术革新经验汇编

第 四 辑

中国建筑工业出版社

水泥工业技术革新 经验汇编

第 四 辑

黄有丰 费修石 编

中国建筑工业出版社

本书收集了近几年来水泥生产、科研、设计单位的部分技术革新成果和经验，计有28篇文章，分为水泥回转窑的节能和增产措施、新设备新技术、新型耐热耐磨材料的应用、设备的维护与修理、收尘技术等五方面汇编。

书中内容联系当前水泥生产实际，着重总结推广新工艺、新技术、新设备。对水泥工业生产、科研、设计人员有一定参考价值。

水泥工业技术革新经验汇编

(第四辑)

黄有丰 费修石 编

*

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

北京市平谷县大华山印刷厂印刷

*

开本：787×1092毫米 1/32 印张：13¼ 字数：296 千字

1987年4月第一版 1987年4月第一次印刷

印数：1—2,560册 定价：2.05元

统一书号：15040·5129

目 录

I. 水泥回转窑的节能和增产措施	1
一、湿法回转窑应用耐热钢链条技术	1
二、提高立波尔窑成球质量改善料球性能	29
三、利用自动化检测手段降低水泥工业能耗	44
四、窑外分解系统的堵塞及其预防措施	53
II. 新设备新技术	62
五、四嘴固定式水泥包装机自动插袋机	62
六、浅谈水泥工业大型磨机的传动技术	88
七、钩头链斗式提升机的结构特点及其理论计算	100
八、冲击式破碎机磨损原理探讨——控制摩擦降低磨损	125
九、回转窑托轮与托轮轴的新型联接——弹性环联接	151
十、配重摆包机	162
III. 新型耐热耐磨材料的应用	172
十一、磨机衬板材质的选择	172
十二、耐磨合金高铬铸铁在水泥工业中的应用	204
十三、高铬铸铁的材质与热处理	216
十四、新型耐磨材料磨球的应用	232
十五、新型耐热抗磨合金的应用	249
十六、水泥生产中磨球磨衬的磨损和失效	261
十七、高锰钢铸件的使用寿命及其影响因素	274
IV. 设备的维护与修理	289
十八、轮带的位移和窑筒体中心线的校直计算	289
十九、水泥设备的润滑技术	301

二十、无机粘结在设备中的应用	315
二十一、窑尾排风机快速平衡法	330
V. 收尘技术	334
二十二、卧式电收尘器的常见故障与维修	334
二十三、提高电收尘器效率的措施	348
二十四、电收尘器星形电晕极与芒刺电晕极的比较	355
二十五、增湿塔出口温度自动调节系统	369
二十六、二级高效收尘器的顺序控制装置	382
二十七、防止袋式收尘器的结露	390
二十八、回转窑托轮轴探伤	398

I . 水泥回转窑的节能和增产措施

一、湿法回转窑应用耐热钢链条技术

夏日麒 程学玲 陈永志

我国大中型水泥企业的湿法回转窑占回转窑总台数的61.1%。1982年全国湿法窑熟料的平均热耗为1499.61千卡/公斤熟料，比国外同类型窑先进水平高250千卡/公斤熟料左右；单位容积产量约0.46吨/日·米³，比国外低0.04~0.14吨/日·米³。我国湿法回转窑热耗高、产量低的原因，主要是窑的预烧能力不足。特别是1979年推广烧成带使用镁质衬料，烧成带的煅烧能力得到提高后，这一矛盾就更加突出，窑内的热工制度出现了新的不平衡。为此，人们曾试图延长链条区，增加链条传热面积，以提高链区的传热效率，提高窑的预烧能力。但由于受到普通钢链条材质耐高温、耐磨蚀性能的限制，链区未能延伸到高温区，窑内热工制度的平衡问题仍未得到根本解决，窑尾气流温度仍达220°C左右，窑的生产能力得不到充分发挥。

为了解决这一问题，必须使钢链条选用耐高温、抗氧化性能好的材质，突破湿法回转窑传统的干燥带为布链区的概

念，把链区延伸到预热带，根据钢链条的材质，选择合适的链区工艺参数、布链形式和挂链方法，发挥链条的热交换效能，增强窑的预烧能力，降低窑尾废气的温度，以达到节能增产、充分挖掘窑的潜力的目的。

（一）湿法回转窑的现状和应用耐热钢链条技术的依据

我国湿法回转窑的入窑料浆水分为31.8~38.4%，一般在34%左右；窑尾废气温度为200~220℃，废气带走的热损失占熟料热耗的17~18%。近几年来，烧成带使用镁质衬料，窑的煅烧能力大大加强，但由于入窑料浆水分大，链区短（一般干燥带链区约占窑总长的18~20%），预烧能力不足的问题更加明显。

如何提高湿法回转窑的预烧能力，使之与煅烧能力相平衡呢？这就应该根据回转窑的长径比 L/D 的大小来确定具体措施。对于 L/D 在20左右的湿法回转窑，可增设窑外干燥预烧系统，如采用喷雾干燥或料浆压滤等方法；当窑的长径比 L/D 在35左右时，则应该采取投资少、综合经济效益好的提高窑内预烧能力的技术措施。我国湿法回转窑的长径比 L/D 一般在29~41左右，应当多采用后一种措施。

湿法回转窑干燥预热带的主要任务是蒸发料浆的水分，并将生料加热到750℃左右。干燥预热带的长度占窑总长的45~60%，是烧成带长度的6~8倍。因此，充分利用回转窑自身的长度范围，提高窑内的预烧能力，则比较经济。这是解决湿法回转窑窑内热平衡、实现节能增产的关键所在。

回转窑窑内的传热是辐射、对流和传导传热三种方式并存。根据各个带的温度、煅烧物料的物理化学反应和窑内装置的不同，这三种传热方式在各带作用的比例也有所不同。

在干燥、预热带中,对流和传导传热作用所占的比例较大。

热流量的计算公式

(1) 辐射传热:

$$Q_{\text{辐射}} = \varepsilon_1 C_0 F_1 \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right] \quad (1)$$

(2) 对流传热:

$$Q_{\text{对流}} = \alpha \cdot \Delta t \cdot F \quad (2)$$

(3) 传导传热:

$$Q_{\text{传导}} = \frac{\lambda}{\delta} \cdot \Delta t \cdot F \quad (3)$$

式中 $Q_{\text{辐射}}$ 、 $Q_{\text{对流}}$ 、 $Q_{\text{传导}}$ ——热流量(千卡/小时);

ε_1 ——黑度;

C_0 ——黑体辐射系数, 4.96 (千卡/米²·小时·°K⁴);

T_1 、 T_2 ——气流、物料的绝对温度(°K);

F_1 、 F ——热交换表面积(米²);

λ ——导热系数(千卡/米·小时·度);

δ ——厚度(米);

α ——放热系数(千卡/米²·小时·度);

Δt ——温度差(°C)。

由上列公式可知,传热中热流量的大小,和物料与气流、衬料表面、热交换装置表面的温度差 Δt 值成正比;和热交换装置表面积 F (F_1)成正比。回转窑每转一周,链条处于气流中的时间约占3/4,处于物料中的时间约占1/4。链条在气流中时,以对流、辐射传热方式为主。当气流温度由900°C提高到1100°C时,其辐射传热量将增加1.6倍。

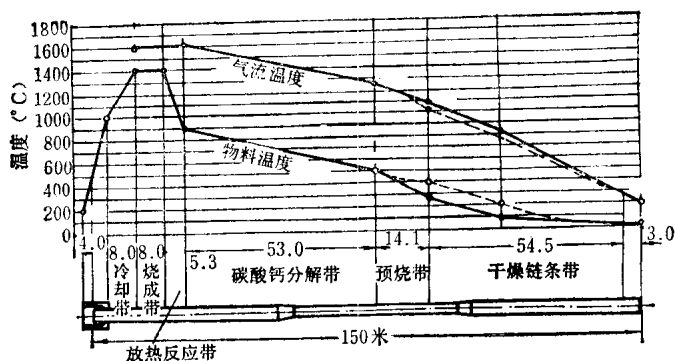


图 1-1 3.6/3.3/3.6×150米回转窑挂耐热钢链条前后的温度梯度曲线
 ——挂耐热钢链条前的温度梯度曲线；----挂耐热钢链条后的温度梯度曲线

从图1-1可以看出，在回转窑烧成带煅烧能力提高的条件下，增加链条的传热面积，并将链区向预热带延伸，使气流通过链条释放的热流量增加，从而使物料所得到的热量也相应增加，使窑尾气流的温度随之降低。

综上所述，要想加强窑的预烧能力，必须选用耐高温、耐磨蚀性能好的链条材质，以抵抗高温、气蚀、磨损，使链区向预热带延伸，从而充分发挥链条的热交换效能，较大幅度地提高窑的预烧能力，使其与窑的煅烧能力相平衡，达到节能增产的目的。

(二) 耐热钢链条材质的选择

1. 使用性能的要求

回转窑运转时，链条的平均温度约比所处断面的气流温度低40~50℃；随着窑的运转，链条进入物料内，链条的温度约降低95~145℃。国外提供的有关数据见表1-1。我国华新水泥厂曾测定原热交换器热端的气流温度为1055℃，物料温度为447℃。根据国内外提供的资料分析，当回转窑运转时，链条温度接近所处位置的气流温度，因此，链区热端链条的材质可按使用温度为900~1100℃选择。并可根据链区的气流温度梯度曲线，对于不同温度区段，选择不同的材质，以提高综合经济效益。

链区热端的物料和气流温度

表 1-1

	美 国	加 拿 大	英国兰圈
全链区热端物料温度	648.94℃	500~650℃	
全链区热端气流温度	900℃	930~1050℃	900~950℃

由于耐热钢链条是在900~1100℃的高温工况下传热的，因而就要求它在上述温度范围内具有：①足够的高温强度；②一定的韧性，不发生脆断现象；③较高的抗氧化、耐磨蚀性能，能达到一定的使用寿命周期，以提高回转窑的运转率。

2. 材质的选择

耐热合金钢含有各种不同的元素，这些元素可以单一或同时提供满足上述要求的各种性能。各主要元素的作用分别为：

碳——提供合金钢的强度。含碳量愈高，其强度和抗蠕变性愈高。

铬——是提高合金钢抗氧化性能的主要元素。它与碳化合生成碳化铬化合物，能提高合金钢的耐高温强度。若加入一定量的镍，可形成坚硬的奥氏体微晶结构，能提高抗氧化性能和耐磨损性能；它附在金属表面，能保护内部的金属不受高温腐蚀和磨损的破坏。

镍——有助于在合金钢内形成奥氏体微晶结构。高铬镍钢在窑内气体中氧含量不超过2%的情况下，具有抗氧化能力，可增强高温耐腐蚀性能和提高抗蠕变的能力。

硅、铝——在高温氧化情况下，硅、铝和铬可化合成密实的层状物，附着于钢材表面，能防止其他有害物质侵入钢材内部，提高其耐磨蚀性。

在湿法回转窑的燃烧气氛中，很难避免燃料所带入的含硫成分。硫在燃烧中形成了二氧化硫，它与合金元素镍反应生成硫化镍化合物。由于硫化镍的熔点比其他化合物低（见表1-2），因而在650°C时，就发生表面腐蚀。随着腐蚀面积的扩大，腐蚀速度加快，加速降低材质的高温强度和抗氧化性能。因此，链条材质中的含镍量应适当限制或减少，因为它缺乏抗硫侵蚀的能力，所以镍含量不宜超过20%，一般以选择在10%左右较好。

各种硫化物的熔点

表 1-2

硫化物	硫化铁	硫化镍	三硫化二铝	镍及硫化镍	铁及硫化铁
熔点(°C)	1190	797	1100	645	985

下面将常用的几种耐热钢种的化学成分、使用部分钢种的推荐温度和室温性能的有关情况，分别列于表1-3、表1-4、

常用耐热钢种的化学成分 表 1-3

序号	钢 种	C	Cr	Ni	Si	Mn	S	P	N	其他
1	4Cr ₁₂ Ni ₁₀	0.30~0.45	23.5~26.5	19.0~21.0	1~2	<2.0	≤0.03	≤0.035	—	
2	4Cr ₁₂ Ni ₁₅	0.30~0.45	23.5~26.5	14~17	1~2	≤2.0	≤0.03	≤0.035	—	
3	4Cr ₁₂ Ni ₁₀	0.30~0.45	23.5~26.5	9~11	1~2	≤2.0	≤0.03	≤0.035	—	
4	4Cr ₁₂ Ni ₆	0.30~0.45	22~24	5~8	1~2	≤2.0	≤0.03	≤0.035	—	
5	4Cr ₁₂ Ni ₁₀ N	0.30~0.45	23.5~26.5	9~11	1~2	≤2.0	≤0.03	≤0.035	0.2~0.3	
6	3Cr ₁₄ Ni ₇ N	0.30~0.45	23~26	7~9	1.3~2	≤2.0	≤0.03	≤0.035	0.2~0.3	
7	4Cr ₁₂ Ni ₄ N	0.30~0.45	22~24	3~5	1.2~2	≤2.0	≤0.03	≤0.035	0.2~0.3	
8	4Cr ₁₂ Si ₂	0.30~0.45	23.5~26.5	—	2~3	≤2.0	≤0.03	≤0.035	—	
9	4Cr ₁₂ Al	0.30~0.45	23.5~26.5	—	1~2	≤2.0	≤0.03	≤0.035	—	Al 1~2
10	4Cr ₁₂ Ni ₁₀ Mn	0.30~0.45	23.5~26.5	19~23	1~2	3~5	≤0.03	≤0.035	—	

注: 1~4 号和10号钢种如采用废钢冶炼, 其化学成分中的W + Mo + Nb要求小于2%。

部分钢种推荐的适用温度

表 1-4

序号	钢 种	适用温度	序号	钢 种	适用温度
1	4Cr ₂₅ Ni ₃₀	1100°C (建议不选用)	6	3Cr ₂₄ Ni ₇ N	900~1000°C
2	4Cr ₂₅ Ni ₁₅	950~1100°C	7	4Cr ₂₂ Ni ₄ N	800~950°C
3	4Cr ₂₅ Ni ₁₀	900~1050°C	8	4Cr ₂₅ Si ₂	800~1000°C
4	4Cr ₂₃ Ni ₆	950°C	9	4Cr ₂₅ Al	800~1000°C
5	4Cr ₂₅ Ni ₁₀ N	900~1050°C	10	4Cr ₂₅ Ni ₂₅ Mn	1100°C (建议不选用)

部分钢种室温下的机械性能

表 1-5

钢 种	σ_b (公斤/毫米 ²)	%
1~3号、5~7号、10号	≥ 40	10
4号、8号、9号	≥ 35	8

表1-5, 供参考。

综合上述, 在选择耐热钢链条的材质时, 一定要根据窑内各区段不同的气流温度、燃烧气氛(如二氧化碳、二氧化硫、硫化氢)的影响, 合理选择相适应的材质。

(三) 链区技术参数、挂链方法的选择和布链形式的探讨

选择合理的挂链参数、挂链方法和布链形式, 对提高链条的传热效率, 加强物料的预烧, 具有重要作用。在六十年代到七十年代, 由于受链条材质的限制, 链区向预热带延伸的难度较大, 因而采取了在原普链区增加链条的密度以加大

其传热面积的做法；继而又推广了垂挂链和复合链幕。这些，对提高链条的传热效率都起了一定作用。采用复合链幕后，虽然在主观上想突破传统的链带即干燥带的基本概念，但限于材质问题，链区的热端只能在气流温度 $700\sim 800^{\circ}\text{C}$ 范围内作业，而且热端的链条寿命只能维持 $3\sim 4$ 个月，影响了窑的运转率和生产的稳定。

耐高温、耐磨蚀的耐热钢链条应用于湿法回转窑后，链区向预热带的热端延伸，使链条的传热面积大幅度增加，充分发挥了链条利用高温气流对物料进行热交换的作用，但同时也带来链区阻力和窑内飞灰量可能增大的问题。因此，应当根据链条的传热、输送物料作用、飞灰量的大小和链条的材质，选择合理的布链形式、挂链方法和技术参数。

1. 链区技术参数的选择

(1) 链区长度

我国湿法回转窑采用耐热钢链条之前，全链区占窑总长平均为21.7%，与英国兰圈集团提供的数据30%相比，尚有较大差距。

在链条材质的耐高温问题解决后，为了充分利用高温气流的传热作用，链区应向预热带热端延伸到它所能承受的高温部位，并保持一定的使用寿命。否则，就失去采用耐热钢链条的意义。例如，1980年5月江山水泥厂在原有的周边链区试挂1吨南京尧辰机械厂浇铸的 $1\text{Cr}_{25}\text{Ni}_6$ 耐热钢链（当时主要是进行材质试验），窑的台时产量和窑尾废气温度无明显变化（有些厂仅在原链区热端换上几排耐热钢链条，只能对冷端的普通钢链条起到屏蔽作用）；同年11月，该厂把原周边链区全挂上耐热钢链条，并向热端延伸1米，使链区长度占窑总长达到32.71%，周边链区的物料温度提高了 137°C 。

窑尾废气温度降低了20°C，台时产量也有所提高。

华新水泥厂采用耐热钢链条后，使原链区向热端延伸了11.01米，链区长度占窑总长由原来的21.55%增加到29.18%；湘乡水泥厂的链区向热端延伸了14.19米，使链区长度占窑总长由原来的20.30%增加到30.08%；巢湖、渡口、江油水泥厂的链区较原链区长度均有延长，都取得了明显的效果（见表1-6）。

部分水泥厂链区长度与其它参数的关系 表 1-6

项 目	华 新	江 山	湘 乡	巢 湖	渡 口	江 油
挂 耐 热 钢 链 条 前						
全链区长度占窑总长(%)	21.55	27.0	20.30	≈28	25.48	25.70
出链区热端物料温度(°C)	200~350	130	200	117	281	<200
窑尾废气温度(°C)	200±10	230	210	210	220±10	200 ~220
挂 耐 热 钢 链 条 后						
全链区长度占窑总长(%)	29.18	32.71	30.08	32.80 ~33.28	32.75	27.37
出链区热端物料温度(°C)	600	687		600	≈650	560 ~620
窑尾废气温度(°C)	170~180	190~200	195±10	130	208	170 ~180

由此可见，湿法回转窑采用耐热钢链条后，全链区长度占窑总长的百分数可选择为29~35。

(2) 挂链面积与相适应的全链区重量密度

据英国兰圈集团资料介绍，全链区的重量密度为0.2吨/米³。我国在使用普通链条时，因受耐热温度的限制，链区无法向热端延伸，一般采用较短的链区长度、较大的传热面

积和较高的重量密度。特别是重量密度，一般都大于0.2吨/米³。而过大的重量密度，会给设备及衬料带来一定影响，并使链区的气流速度加快，造成飞灰增大。

采用耐热钢链条后，在链区延长、链条面积大幅度增加的情况下，全链区的重量密度可保持不变或略有下降，通过改善链区的布链形式，达到提高链条的热效率，同时又不增大窑尾的飞灰量。因此，重量密度以选择0.2~0.3吨/米³较为适宜。

耐热钢链区的传热面积，可根据窑的大小不同，选取300~500米²。部分水泥厂的挂链面积（即传热面积）、重量密度的情况见表1-7。

部分水泥厂的挂链面积和重量密度

表 1-7

项 目	华 新	江 山	湘 乡	巢 湖	渡 口	江 油
耐 热 钢 链 区						
传热面积(米 ²)	480.02	448	417	318	381.65	450.2
重量密度(吨/米 ³)	0.28	—	0.184	0.07	0.21	0.22
全 链 区						
传热面积(米 ²)	1958.99	1553	1571	1656	1303.9	2151.8
重量密度(吨/米 ³)	0.29	—	0.193	0.41	0.25	0.28
挂耐热钢链前全链区的重量密度(吨/米 ³)	—	—	0.267	0.41	0.38	0.285

2. 挂链方法

湿法回转窑链条的悬挂结构往往容易被人们所忽视。但它却关系到回转窑的正常生产、检修、更换链条的难易程度和飞灰量的大小。不合理的结构还会导致链条绕团、回浆、过早断损和扬灰严重等现象。例如，湘乡水泥厂曾进行过冷

态测定：单块挂链板采取平行窑中心线的布置时，运转中每块挂链板可带起料灰0.5公斤，每小时的扬灰量可高达20吨左右（冷态下），从而使飞灰剧增。另外，部分水泥厂因耐热钢链区的挂链装置采用普通钢材质，在高温下因挂链装置断损造成掉链，因此，采用耐热钢链条时，对它的挂链装置的结构、材质，应当与链条同样对待。

国内水泥厂常用的几种挂链结构见图1-2至图1-9。各厂可根据窑的具体情况进行选择。选择的原则是：①挂链板、螺栓和垫圈的材质应当与同区段链条的材质相匹配；②采用挂链板结构时，应选用垂直窑中心线的布置方案（见图1-2、1-3、1-4、1-9），以减少挂链板带起的飞灰量；③耐热钢链区中，埋入衬料的挂链板部分，可采用普通钢材与暴露在气

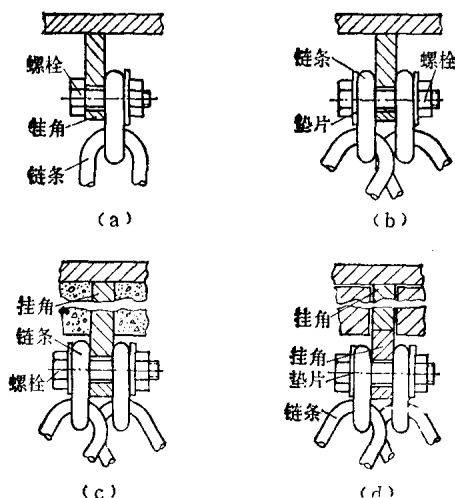


图 1-2 湘乡水泥厂挂链装置