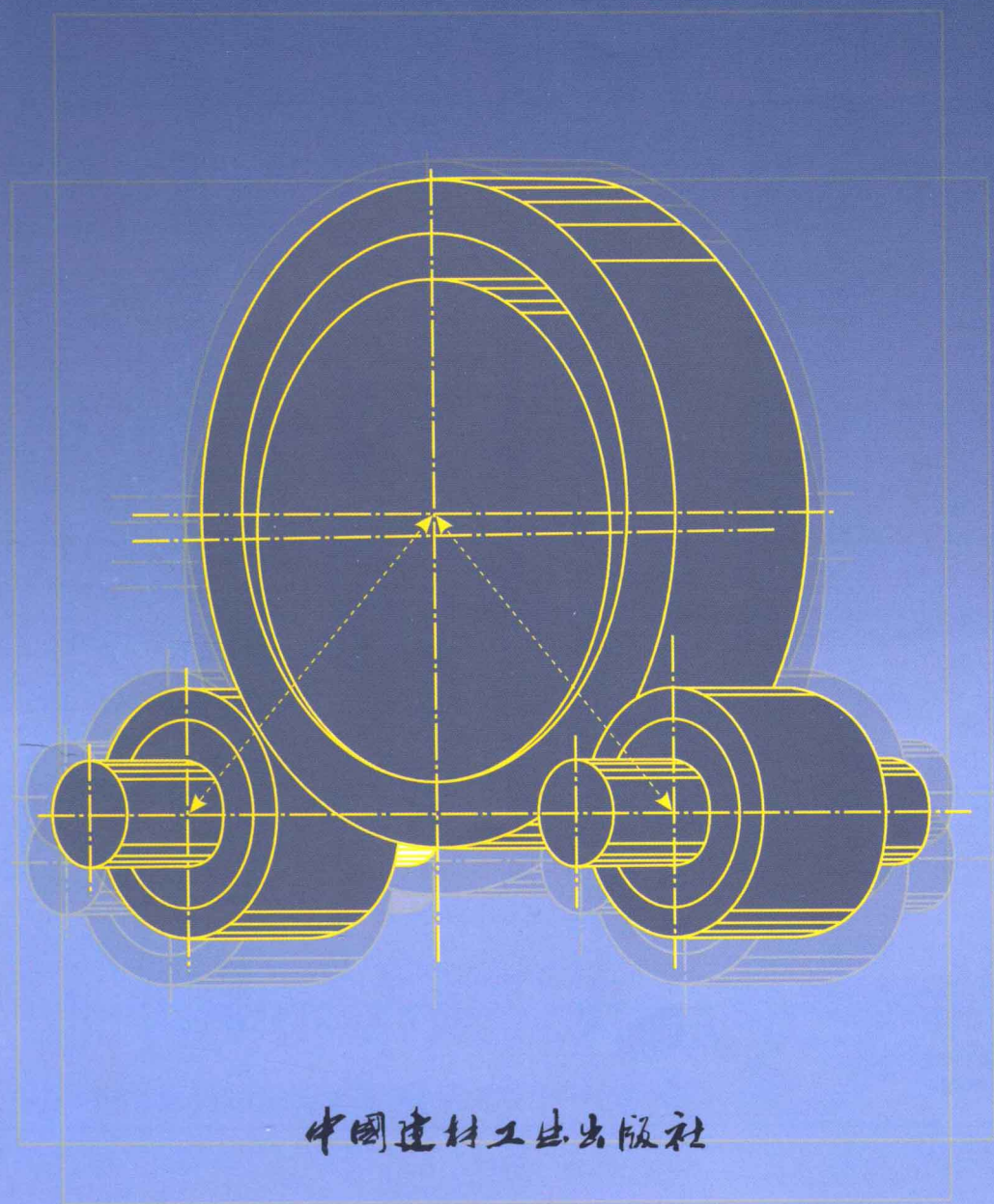


HUIZHUANYAO TUOLUN TIAOZHENG

回转窑托轮调整

江旭昌 编著



中国建材工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

回转窑托轮调整 / 江旭昌编著. —北京: 中国建材工业出版社, 2012. 9

ISBN 978-7-5160-0015-1

I. ①回… II. ①江… III. ①水泥—回转窑—技术
IV. ①TQ172. 6

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 176845 号

内 容 提 要

本书对回转窑托轮调整的作用、原理、托轮调整的几何分析、力学分析、窑筒体直线度的检测、托轮调整的方法、托轮与其轴的新型联接、永不需测定窑体中心线的新技术、托轮调整的具体实例等都进行了系统而全面的阐述。从理论上和实践上解决了当前与托轮调整及其有关方方面面的问题, 因此本书的内容更加丰富、更加全面系统, 适用性和可操作性更强。本书对从事建材、化工、黑色冶金、有色金属、环保产业和耐火材料等工业部门中与回转窑有关的科研设计工作者、大专院校的师生、工厂的技术人员和维护维修人员、尤其对目前水泥工业中的有关人员等都有很大的参考价值。

回转窑托轮调整

江旭昌 编著

出版发行: 中国建材工业出版社

地 址: 北京市西城区车公庄大街 6 号

邮 编: 100044

经 销: 全国各地新华书店

印 刷: 北京雁林吉兆印刷有限公司

开 本: 787mm × 1092mm 1/16

印 张: 24. 75

字 数: 630 千字

版 次: 2012 年 9 月第 1 版

印 次: 2012 年 9 月第 1 次

定 价: 96. 00 元

本社网址: www.jccbs.com.cn

本书如出现印装质量问题, 由我社发行部负责调换。联系电话: (010) 88386906

前 言

回转窑是理想的热工设备，目前在建材（水泥熟料煅烧、陶粒焙烧、高岭土焙烧等）、化工（铬盐生产、钡盐生产、制碱、以磷石膏制硫酸联产水泥、硬石膏制硫酸联产水泥和炭黑生产等）、黑色冶金（球团烧结、活性石灰生产、石棉铁生产、铁矿石焙烧等）、有色金属（镁砂烧结、氧化铝制取、镍矿焙烧、锂辉石转型焙烧、五氧化二钒生产、精铜矿焙烧等）、轻工（造纸等）、环保产业（垃圾处理等）和耐火材料等工业部门中广泛应用，尤其在水泥工业中的应用更为广泛。

世界水泥工业中最长的回转窑为 230m，最大直径为 $\phi 7.3\text{m}$ 。我国最长的回转窑为 180m，最大直径已达 $\phi 6.2\text{m}$ 。由于预分解技术的研制开发成功，在相同能力时回转窑规格已大为减小，尤其新型超短窑的发展，使回转窑的长度更加减小，其占全厂设备总重量和全厂总投资的比例必然会大大降低。当前世界上最大的 12000t/d 熟料水泥生产线，回转窑的规格也只有 $\phi 6.6\text{m}/7.0\text{m} \times 93\text{m}$ 。即使如此，回转窑的性能和运转情况仍然决定着水泥生产的产量、质量和生产成本，特别是经济效益。所以，它素有“水泥厂心脏”之称。人们这样评价它的重要作用：“只要大窑转，就有千千万”。由此可见，提高回转窑的运转率是非常重要的。如果现在全国水泥回转窑的运转率都提高 1%，每年增产的熟料就相当于新建 6 条 5000t/d 生产线的能力。现在建一条 5000t/d 熟料水泥生产线约需 5 亿元，6 条就是 30 亿元。不言而喻，提高回转窑运转率的价值是相当巨大的。

要保证回转窑能够长期、稳定、安全地运转，从设备维护和正确使用方面来说，调整好托轮就是重中之重的一项工作。许多水泥厂的回转窑因为托轮调整不当，引发了许多重大设备事故，对窑的运转率提高产生了很大的影响。例如：回转窑“下炕”或掉窑，如抚顺水泥厂等；筒体断裂，如河南七里岗、河北冀东、新疆天山股份等；托轮和轮带表面出现点蚀、磨损不均、掉渣掉块、裂纹两瓣，如淮海、江西、邯郸水泥厂等；托轮和轮带表面出现小波纹，严重时变成多边形，如内蒙古千里山、辽宁营口、湖北华新、云南昆明水泥厂等；托轮轴承烧瓦断轴，如小屯、瓦房店老虎、天津等；轮带侧面和挡块磨损过快，轮带顶掉或顶坏挡铁或挡块，垫板折断或脱落，如鲁南水泥厂等；窑体发生剧烈振动，产生弯曲，如辽宁营口、河南七里岗水泥厂、河南中国联合水泥集团有限公司南阳分公司等。以上这些问题，只要仔细分析就可以发现，与托轮调整不当都有关系。由此可见，托轮调整不当可以说是“事故之源”。尽管造成上述这些故障和事故不能全然归于托轮调整不当一种因素所致，然而它确是首要。当前，5000t/d 以上的大型窑发展极为迅速，这个问题就更加突出。当前已有众多水泥厂都认识到托轮调整的重要性，因而特别关注。要调整好托轮，不仅要有一定的理论基础，而且还必须具备丰

富的实践经验，否则是难以达到预期效果的。有不少厂因为托轮调整问题而要花高价外请专门人员帮助解决。在这里有一点需要特别注意，有的企业外请人员调整托轮只为了解决轴瓦发热的问题。托轮轴瓦发热是由多种因素造成的，诸如窑体中心线的直线度、润滑油的品质、轴瓦刮研的不合理等都会引起轴瓦发热。通过这种托轮调整虽然暂时解决了轴瓦的发热问题，然而，如果忽略了回转窑筒体的直线度问题，将存在更大的隐患。正确的做法应该是先对回转窑筒体的直线度进行检测，在已保证窑筒体中心线在热态时是一直线为基础上进行托轮调整。这就从根本上解决了问题，保证回转窑的正常运转和运转率更高。只有这样才能避免头痛医头，脚痛医脚的片面做法。对于回转窑托轮调整的问题，目前还存在一个误区。有人认为采用液压挡轮的回转窑托轮不需要调整，这是片面的。由于轮带和托轮制造时不可避免地存在锥度、安装时又没有注意到这种情况的影响、基础的不均匀沉降和同档托轮的不均匀磨损以及不同档轮带与托轮磨损的不均衡等，所以为了保证回转窑筒体的直线度，对托轮也需要进行有效的调整。由此可见，上述许多问题都与托轮调整是否正确而息息相关，可是目前还没有见到一本比较系统而全面的相关书籍。

为了解决托轮的调整问题，笔者曾经写了一篇长文，作为技术讲座栏目连续发表，深受有关广大读者的欢迎。笔者接到许多读者的信函、电话和传真，都要求能够出版一本关于回转窑托轮调整的科技图书。这足以证明，大家迫切需要在理论上和实践上解决这个问题。为满足和答谢广大读者的要求和关爱，填补这块空白，在上述连载文章的基础上加以补充、修改和编纂，使本书内容更加丰富、更加全面系统、适用性和可操作性更强，现予以正式出版，以飨读者。

托轮正确的调整是基于对回转窑轮带、托轮和筒体的准确检测以及相关的分析和计算。所以在托轮调整之前，必须进行有效的检测。在本书中介绍了许多传统和现代检测方法和分析计算的实例，以供大家参考。

另外，本书除主要阐述与回转窑托轮调整的问题之外，还介绍了与回转窑托轮调整表面上看似无关而实际关系也相当密切的窑筒体变形、温度测定等资料，更丰富了对回转窑筒体一些特征的了解，对维护好回转窑都有极为重要的参考价值。

在本书的编撰过程中，除笔者亲自调试和处理的问题之外，还借用了许多参考文献和有关资料，得到了大家的大力支持和帮助，在此一并致谢！

由于笔者水平有限，时间仓促，不当和纰漏之处在所难免，恳望广大读者斧正。

编著者

2012年6月

目 录

第一章 回转窑托轮调整的作用	1
第一节 保证回转窑筒体的直线度	2
一、回转窑筒体直线度的基本概念	2
二、回转窑筒体中心线直线度的新观点	3
三、对回转窑筒体中心线直线度的要求	4
四、保证回转窑筒体中心线直线度的方法	5
五、在生产实践中的反映	14
第二节 保证窑体上下有规律地往复窜动	15
一、窑体上下有规律往复窜动的必要性	15
二、窑体上下往复窜动速度的控制	16
三、窑体上下往复窜动量的控制	17
第三节 保证各档托轮均衡承受窑体载荷	18
一、窑体载荷及其分布	18
二、使各档受力均衡的措施	19
三、使同一档两个托轮受力均衡的措施	21
第二章 托轮调整的几何分析	25
第一节 对新托轮锥度的处理	25
第二节 两个直径相等托轮横向水平移动与窑筒体中心位置的关系	26
一、两个托轮同向水平移动相同距离的分析	26
二、两个托轮同时向里水平移动相同距离时的分析	27
三、两个托轮同时向外水平移动相同距离时的分析	30
四、两个托轮中一个横向水平移动的分析	31
第三节 两个不等直径托轮横向水平移动与窑筒体中心位置的关系	34
一、较小托轮向里水平移动量与窑体中心处在需要位置的分析	34
二、较小托轮继续向里水平移动与窑体中心位置的分析	36
三、两个不等径托轮同时向里水平移动相同距离时窑体中心位置的分析	38
第四节 托轮支承角的讨论	41
一、两个等径托轮同时向里水平移动相同距离时托轮支承角的变化	41
二、两个等径托轮一个水平移动时托轮支承角的变化	44
三、两个不等径托轮同时向里水平移动相等距离时托轮支承角的变化	45
四、托轮最大移动量的限制	45
第三章 托轮调整的力学分析	49
第一节 窑体静止时不下窜的力学分析	49

第二节	窑体运转时轴向窜动的力学分析	52
第三节	轮带与托轮接触的力学分析	59
第四章	窑体直线度的检测	101
第一节	碾压铅丝法	101
一、	铅丝法的操作	102
二、	铅丝检测法的分析	103
三、	铅丝法的分析实例	105
第二节	窑内检测法	107
一、	测标架	108
二、	激光测直仪	109
三、	窑内检测法的操作	110
第三节	窑外检测法	112
一、	窑外静态经纬仪检测法	112
二、	窑外动态简易检测法	126
三、	窑外的非接触式检测新技术	133
第五章	托轮的调整方法	141
第一节	托轮歪斜调整法	141
一、	托轮歪斜调整法的基本原理	141
二、	托轮歪斜方向的判别	142
三、	采用托轮歪斜调整法应注意的问题	145
第二节	改变摩擦系数法	148
一、	改变摩擦系数法的基本原理	148
二、	改变摩擦系数的措施及注意事项	148
第三节	混合法	149
第四节	液压挡轮法	150
一、	托轮歪斜调整法的缺点	151
二、	液压挡轮的工作原理及其液压系统	151
三、	液压挡轮装置的结构	156
四、	挡轮的形状分析	163
五、	挡轮的受力分析	166
六、	采用液压挡轮时托轮的调整	168
第六章	托轮与轴的新型联接	172
第一节	弹性环的种类及系列基本尺寸	172
一、	名词术语的讨论	172
二、	弹性环的种类	172
三、	部分弹性环的基本尺寸	173
第二节	弹性环联接的特点	204
一、	可大大提高轴类件的抗疲劳强度	205
二、	安装拆卸方便	205

三、对中性能特别优良	206
四、轴和毂的相对位置在轴向和环向能够随意调整	207
五、传递的转矩和轴向力负荷大	208
六、可实现安全联接或弹性联接	208
七、可减少边缘应力集中	209
八、大大缩短设计计算时间	209
九、防腐蚀抗冲击性能好	209
十、使用灵活方便	210
第三节 弹性环联接的选择和计算	210
一、弹性环型式的选择	210
二、弹性环联接负荷的计算	210
三、采用弹性环时有关几何尺寸的核算	211
四、相关联接件的公差与表面粗糙度的确定	219
第四节 回转窑托轮与轴的联接	220
一、回转窑托轮与托轮轴传统联接方法的缺点	220
二、托轮与托轮轴采用弹性环联接的优点	222
三、弹性环的选择	224
四、具体结构设计	225
第七章 永不需测定窑中心线的一种新技术	231
第一节 基础资料的测定	231
一、轮带数据的测定	231
二、托轮直径的测定	233
三、轮带和托轮直径磨损量的测定方法	234
四、轮带间隙的测定	235
五、基础沉降的测定	236
第二节 回转窑安装时的初始中心线标记处理	236
一、基础画线与支承装置底板就位	236
二、轴承底座的初始安装定位与指针和刻度尺的设置	237
第三节 永不需测窑新技术的举例	238
二、永不需测窑新技术的具体举例	244
第八章 回转窑托轮调整的几个具体实例	262
第一节 激光窑外测定及托轮调整实例	262
一、广西柳州水泥厂 $\phi 3.5/4.0\text{m} \times 128.8\text{m}$ 湿法窑的窑外测定与托轮调整	262
二、鲁南水泥厂两条 $\phi 4\text{m} \times 60\text{m}$ 回转窑窑外测定和托轮调整	287
第二节 激光窑内测定及托轮的调整	294
一、 $\phi 3.5\text{m} \times 145\text{m}$ 湿法回转窑的窑内测定及托轮调整	294
二、 $\phi 4/\phi 3.5/\phi 4\text{m} \times 145\text{m}$ 哑铃型湿法窑的窑内测定及托轮调整	297
三、窑内测定的几点结论	300

第三节	回转窑中心线近代检测及托轮调整的实例	300
一、	3000t/d 级 $\phi 4.3\text{m} \times 64\text{m}$ 回转窑中心线的测定与托轮调整实例	300
二、	$\phi 4.8\text{m} \times 72\text{m}$ 回转窑中心线的动态检测	312
三、	$\phi 6.2\text{m} \times 92\text{m}$ 回转窑中心线的动态检测	319
四、	回转窑筒体中心线直接检测方法	325
五、	回转窑筒体中心线直线度的光电检测法	329
第九章	与回转窑托轮调整有关的几项检测和处理技术	333
第一节	利用 b 值分析法对回转窑中心线的检测与托轮调整	333
一、	铅丝的碾压和测量	333
二、	b 值分析图绘制	334
三、	托轮位置图的绘制	334
四、	托轮中心线歪斜方向合理性的分析	335
五、	调整托轮时的注意事项	335
六、	回转窑托轮调整中 b 值分析法的应用实例	336
第二节	利用托轮调整解决回转窑大小齿轮齿顶间隙的合理控制问题	340
一、	回转窑大小齿轮齿顶间隙和齿侧间隙评述	340
二、	$\phi 3.95\text{m} \times 56\text{m}$ 回转窑为保证大小齿轮齿顶间隙的托轮调整	344
三、	$\phi 4\text{m} \times 60\text{m}$ 预分解窑为保证大小齿轮齿顶间隙的检测与托轮调整	348
第三节	回转窑筒体变形和表面温度的测定	359
一、	$\phi 4\text{m} \times 60\text{m}$ 回转窑筒体变形的测定	359
二、	$\phi 4.8\text{m} \times 72\text{m}$ 回转窑筒体变形的测定	364
三、	广东云浮亨达利水泥有限公司 $\phi 4\text{m} \times 60\text{m}$ 窑的筒体表面温度分布	368
第四节	回转窑托轮轴承球面体和轴瓦的最佳设计与刮研	370
一、	概述	370
二、	球形瓦的发展	371
三、	几点说明	379
参考文献		381

第一章 回转窑托轮调整的作用

回转窑体是一个与水平倾斜一定角度放置的大圆形筒体，它由几组或几档由轮带和两个托轮、托轮轴承、轴承底板等组成的装置支承着，通过不同传动装置回转。当前国内外的回转窑最多的支承装置达九档之多，最少也有两档（现代的新型超短窑），如图 1-1 所示。

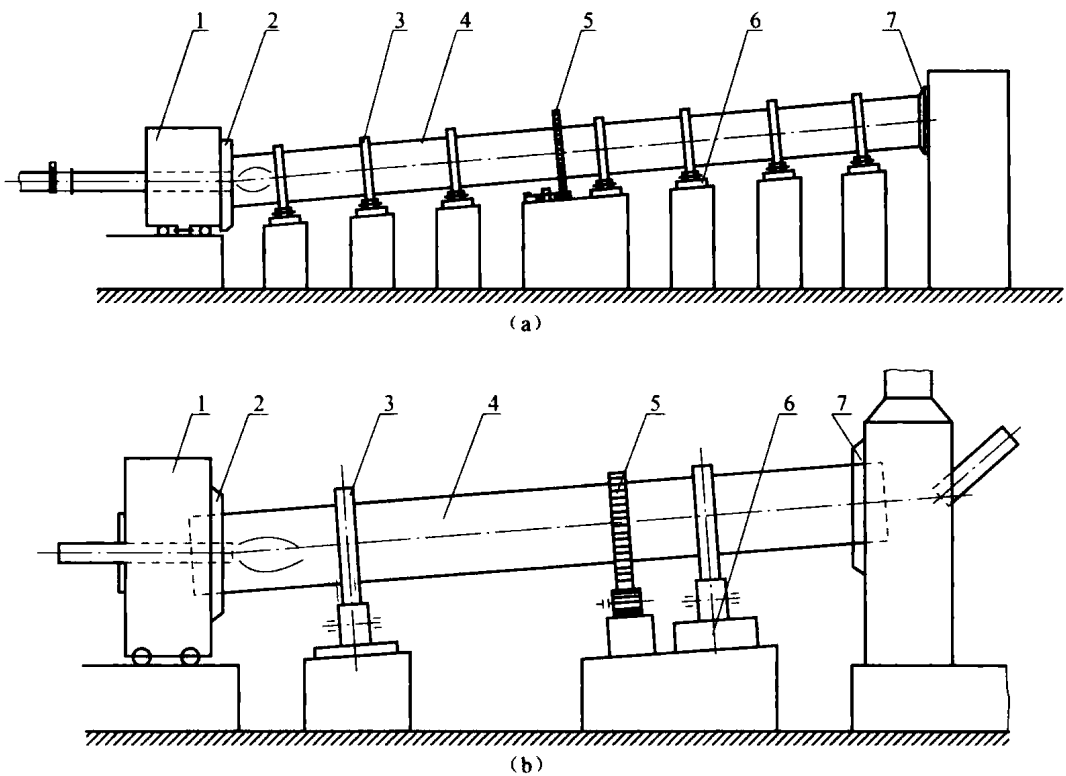


图 1-1 不同挡数支承装置的回转窑

(a) 七档支承装置的回转窑；(b) 两档支承装置的回转窑

1—窑头罩；2—窑头密封装置；3—轮带；4—回转窑筒体；5—传动装置；6—支承装置；7—窑尾密封装置

为了保证回转窑的正常连续工作，这些托轮均需调整。挡数越多的回转窑，托轮调整越复杂、越困难，因而要求的技术水平也就越高。

要使回转窑能够长期、稳定、安全地运转，调整好托轮的作用就相当重要。归纳起来，回转窑托轮调整的作用或目的主要有四点：一是使回转窑筒体中心线在热态时永远是一条直线，从而保证托轮和轮带受力均匀，不产生超载和偏载现象。一方面可以降低功率，另一方面可以避免或减少故障和事故的发生；二是使窑体能够按所设定的规律沿轴向正常地上下往复窜动，以保证托轮和轮带外表面的均匀受力和磨损，延长机件的使用寿命；三是使各档托轮能够均衡地承担窑体载荷，保证不产生附加应力，减少或避免机件的过早损坏；四是当液

压挡轮出现故障不能承受设计的力量时，可以通过托轮调整减轻液压挡轮的负荷，维持一段时间的正常生产，免受较长时间停窑所造成的巨大经济损失等。

第一节 保证回转窑筒体的直线度

一、回转窑筒体直线度的基本概念

现代的回转窑设计理论和实践经验指出，对回转窑筒体应本着圆而直和纵柔横刚的两条最重要理念进行设计。所谓圆而直，是指筒体横截面要保证一定的圆度，或者说回转窑筒体任何横截面都应该是圆的，在回转窑筒体的纵向中心线应尽可能直。可实际上，不论规格大小的回转窑，其筒体都不可能保证绝对的圆和绝对的直。而且越大的回转窑，其圆度偏差和直线度偏差越大。所以，在设计时都用公差来控制，满足公差要求的筒体就认为圆而直了。所谓的纵柔横刚，是指回转窑筒体在长度方向上的柔度应大一些，即在长度方向上筒体比较柔软。这样，既可以节省材料，降低造价，又可以更好地保证安全运转。而在支承处的筒体，其横向应保证有足够的刚度。因为水泥工业所用的回转窑，在筒体内表面要镶砌耐火材料。要保证耐火砖稳固，加大在支承处的筒体刚度意义重大。通过理论研究和许多实际检测表明，回转窑筒体最大的横向变形是在支承部位，逐渐向跨间衰减。这就是说，只要保证支承处的筒体有足够的刚度，跨间筒体的横向变形是很小的，完全可以保证耐火砖的稳定性，如图 1-2 所示。

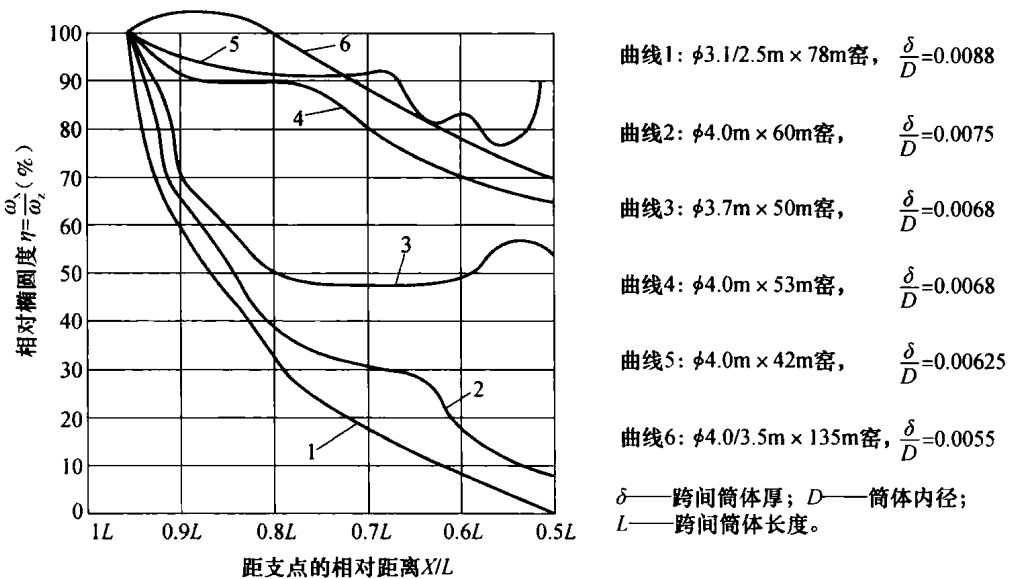


图 1-2 筒体横向变形沿纵向的衰减测定曲线

现以 $\phi 3.1/2.5m \times 78m$ 回转窑筒体相对椭圆度的测定曲线 1 为例进行说明。在支点附近约 $0.95L$ 处的相对椭圆度为 100%，到两跨之间，即为 $0.5L$ 处时，则相对椭圆度衰减到 0。也就是说，如果在支承处的筒体刚度足够，筒体的变形在允许范围内，那么在两支承处正中间的筒体基本不变形，保持原来的椭圆度。其他窑筒体相对椭圆度的测定曲线 2~6，虽然与曲线 1 有差别，但基本规律是一致的。

由上述可见，在运转中的回转窑，其筒体的中心线不可能是一条直线，而是如图 1-3 所

示的形状。这里所说的筒体直线度，是指回转窑筒体中心在各支承处连线的直线度。也就是说，把筒体在各支承处的中心点连成一条直线，这条直线的准直程度就是在本书中所说的筒体直线度。回转窑筒体中心线的不直度往往是空间的，但为了说明问题可以分解成铅垂方向的不直度和水平方向的不直度两个分量，如图 1-4 所示。这样，在分析时就简单方便多了。

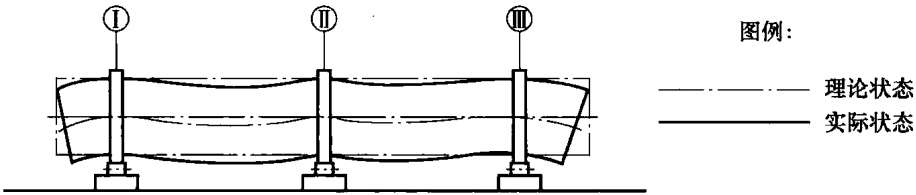


图 1-3 回转窑筒体在使用中的实际形状

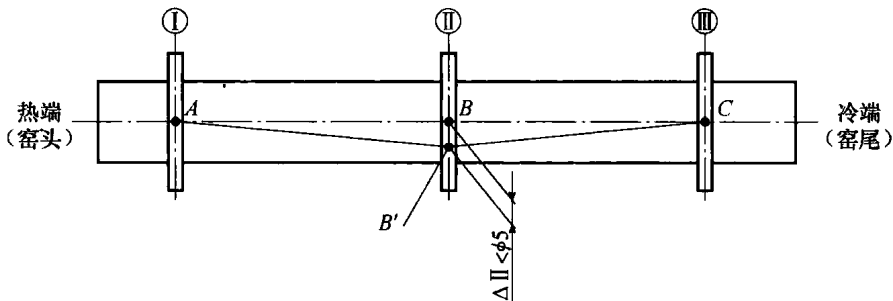


图 1-4 回转窑筒体中心线空间变形情况

不论在新窑安装时，还是在运转一段时间后，要保证回转窑筒体的直线度，都必须通过调整托轮来实现。

二、回转窑筒体中心线直线度的新观点

回转窑筒体要求圆而直，原来的“直”是指冷态，现在的“直”是指热态工作时筒体中心线要直。

直线度在回转窑筒体的设计和安装中，历来都要求其纵向中心线必须是一直线。在《水泥机械设备安装工程施工及验收暂行技术规程》（建规 7-62）、冶金工业出版社出版的《回转窑》、北京水泥工业设计院编写的援助巴基斯坦国讲义《水泥回转窑的设计》，中华人民共和国建材行业标准 JC 333—1983《水泥工业用回转窑》及 1991 年修订后的该标准中都规定：回转窑筒体在安装后，即在冷态时其纵向中心线必须是一直线。安装部门也以在冷态时安装找正的直为荣，依据是空负荷运转电流小，表明筒体安装得很直。殊不知这恰恰是不好的，因为筒体在冷态时是直线，在工作的热态时肯定就是弯曲的。

回转窑是热工设备，工作时筒体的温度都会升高。升高的温度由热端向冷端逐渐降低，因窑型不同，各档的温度也不同，热膨胀量也不同。所以，每档的升高值就不同，这样就使在冷态时是直线的窑体产生了弯曲。由于回转窑经常在运转，绝大部分时间都处在热态下工作，因此不仅会增大运转功率的消耗，而且还会使筒体、筒体垫板焊缝的应力增高，这是筒体断裂、垫板焊缝开裂的主要原因之一。

这个问题很早就有人注意到了，苏联在 1975 年出版的《水泥设备易损件的耐久性》一书中就有这样的论述：“回转窑冷态几何中心线的位置同热态中心线的位置有相当大的差

别。水泥设计局所作的测量表明，随窑规格的增大，温差也相应增大。窑越大，则其冷态中心线位置与热态中心位置的变化也就越大。在窑点火和启动时，其中心线位置的变化可达 20~25mm。根据中央水泥院的计算表明，由于窑筒体中心线弯曲造成支承点高差 10mm 时，支承处的弯矩和筒体应力约增加 3 倍，托轮上的压力增大一倍”。这个结论是苏联在分析若干条窑筒体产生裂断主要原因之后提出来的，可是一直未引起人们的足够重视。20 世纪 70 年代初新型干法水泥生产技术诞生后发展极为迅速，并且向大型化的发展趋势十分明显。当今 5000t/d 的生产线已相当普遍，10000t/d 的生产线也屡见不鲜，世界上最大的生产线为 12000t/d。我国自行设计的 12000t/d 也早已投产，这些新型干法窑，不仅规格大，而且筒体温度比湿法窑要高许多，最大的筒体支点高差可达 15mm。这个筒体支点处的温差变化，对回转窑筒体的可靠度将产生严重影响，不容忽视。因此丹麦史密斯公司（FLS）和法国 FCB 公司在 20 世纪 90 年代所设计的双窑筒体都考虑了这一因素。丹麦史密斯公司提供给我国柳州水泥厂 3200t/d 生产线所用的 $\phi 4.55\text{m} \times 68\text{m}$ 预分解窑，珠江水泥厂 4000t/d 生产线所用的 $\phi 4.75\text{m} \times 75\text{m}$ 预分解窑，法国 FCB 公司提供给我国云浮水泥厂 2000t/d 生产线所用的 $\phi 4\text{m} \times 58\text{m}$ 预分解窑等都考虑了这一因素，使用多年从未出现什么问题。可是，德国、日本、美国等在设计回转窑时至今也没有考虑这个因素，所以多出现问题。冀东水泥厂 4000t/d 预分解生产线所用的 $\phi 4.7\text{m} \times 74\text{m}$ 回转窑，是日本石川岛播磨重机公司（IHI）提供的，没有考虑支承点热膨胀的重要影响。运转不到 5 年时间，筒体中间档附近便发生了多段环形裂纹，最长者达 2130mm。我国同德国、日本和美国等一样，在设计回转窑时原来也没有考虑到支点处温差的大小不同，也要求在冷态时的筒体中心线为一直线，所以也常出现筒体的裂断问题。现在我国有部分人已经认识到了这个问题的严重性，在设计中也有体现。

通过作者以前写的有关文章，不少用户已认识到这个问题的重要性。在回转窑安装时向安装施工部门提出这种要求，可是因为没有具体设计数据，担心万一出什么问题不好解释。另外，也不符合我国现行的有关规程或标准要求，担心在验收时遇到麻烦，往往不易接受。我国设计制造的回转窑，从传统窑型到新型干法窑，规格从小 $\phi 2\text{m}$ 到大 $\phi 5.8\text{m}$ 筒体发生断裂的现象屡见不鲜。回转窑筒体出现断裂的因素比较复杂，有设计、加工制造、安装调试和使用不当等因素。然而，窑体长期在弯曲状态下运转是其最主要的因素。而形成这种状态又往往被人们忽视，就是因为对窑体冷热态发生的变化认识不足。因为窑体在冷态时保持直线，在热态下运转恰恰是弯曲的。这样相当于基础下沉，筒体的应力明显增大。

如果对这一影响有较明确的认识，即使在设计时没有考虑各档支点升高值的不同，在安装和使用时通过调整托轮也可实现。双阳水泥厂 2000t/d 的 $\phi 4\text{m} \times 60\text{m}$ 窑，在设计时没有考虑这种因素的影响，在安装时采取了相应措施。通过将 I 档和 II 档的托轮拉开，使窑体中心在冷态时的 I 档和 II 档比窑尾的 III 档低 1.5mm 左右。多年的运转实践证明，效果相当良好。由此表明，在设计、安装、使用和维护中，始终保持窑体中心线在热态工作时为直线是相当重要的、合理的。

三、对回转窑筒体中心线直线度的要求

回转窑在热态正常工作时，其筒体应尽可能地保持直而圆。可实际上它既不会绝对的直，也不会绝对的圆，只是在实际生产运行中采取一定的措施，将偏差控制在最小的范围之内。回转窑筒体是通过松套于自身的轮带与支承装置上的托轮接触滚动而转动工作的，筒体

的圆度问题与托轮调整无关，所以本书不作为重点讨论。可是回转窑筒体中心线的直线度却与托轮的安装和调整关系密切，本书依此为重点进行讨论。

回转窑筒体中心线的直线度对保证正常运转至关重要，所以对其偏差都有严格要求。筒体中心线的直线度偏差过大，将会导致许多重大事故发生，给企业造成巨大损失。特别是对大中型的新型干法窑，其损失更大。因此，国家建材局于1992年以[1992]646号文件颁发了《新型干法水泥企业设备管理实施细则》，其中规定回转窑筒体直线度偏差最大不能超过5mm。因为回转窑经过较长期运转后，轮带、托轮、轴承瓦和筒体垫板都会磨损或变形，有的基础还会下沉，所以往往会造成筒体中心线直线度发生变化而超差。为不因窑体中心线直线度发生变化引起重大设备事故，上述细则中规定：预分解回转窑每两年必须对窑体中心线的直线度进行一次检测，通过托轮调整确保窑体中心线的直线度偏差在规定范围之内。筒体的轴向变形，也就是筒体轴向中心线弯曲程度都是以支承处筒体中心点来衡量的。对于Ⅲ档窑，以首尾两档筒体的中心点为基准，来检测中间档筒体中心点的位置偏差，如图1-5所示并参见图1-4。在检测时一般只能检测出水平和垂直两个方向的偏差值 x 和 y ，然后用下式计算出窑筒体弯曲的最大值：

$$\delta_{\max} = \sqrt{x^2 + y^2} \quad \text{mm} \quad (1-1)$$

由图1-5可见， $\delta_{\max} = OO'$ 。按规定， $\delta_{\max} < 5\text{mm}$ 。

对多档的回转窑，如湿法长窑也可参照上述方法处理。支承处筒体中心线直线度偏差也不能大于5mm，因为从基础下沉对筒体强度的影响与Ⅲ档窑是一致的，所以对多档窑也应满足这一要求。

四、保证回转窑筒体中心线直线度的方法

为使回转窑中心线在热态时永保一直线，主要有以下三种方法：

(一) 设计计算法

为保证窑体中心线在热态时永保一直线，在设计计算时就应考虑到各档因温度不同而热膨胀量不同这一因素的影响，在安装时就方便很多，即按设计要求安装即可。丹麦史密斯公司（FLS）为我国柳州水泥厂3200t/d熟料水泥生产线 $\phi 4.55\text{m} \times 68\text{m}$ 预分解窑和珠江水泥厂4000t/d熟料水泥生产线 $\phi 4.75\text{m} \times 75\text{m}$ 预分解窑，其筒体中心线的直线度就是这样设计的。法国FCB公司为我国广东云浮水泥厂2000t/d熟料水泥生产线 $\phi 4\text{m} \times 58\text{m}$ 预分解窑，其筒体中心线也是这样设计的。

1. 正常运转时各档筒体温度的确定

为能真正实现回转窑在热态正常运转，其筒体中心线应保持一直线，首先必须能够比较准确地确定出各档筒体的温度，或者说平均温度。因为回转窑在热态工作时，筒体的温度不仅在轴向长度上的分布不同，而且每一个截面上在不同位置温度也不同，如图1-6所示。筒体的温度不仅与窑型、窑况、耐火砖的品种、砌筑时采用的措施和使用磨蚀后的薄厚等都有关系。当采用隔热措施砌筑的窑衬时，其筒体温度要比不用隔热材料在相同窑况下

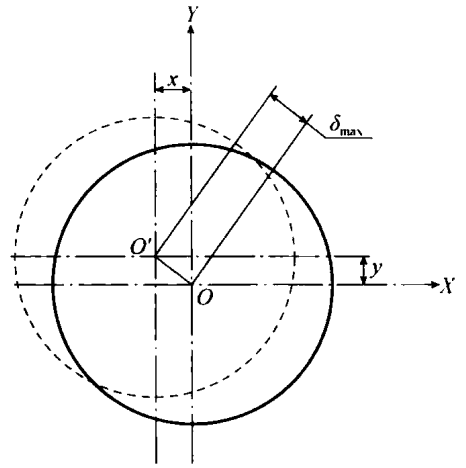


图1-5 窑体弯曲允许的最大值及其表示方法

低 30℃ ~ 50℃。对已经砌筑好窑衬的一台回转窑，其筒体温度也是随时都在根据窑情的变化而变化。即使如此，也有一定的规律。根据这些规律就可以比较准确地确定出其平均温度，据此便可以计算各档的升高值。

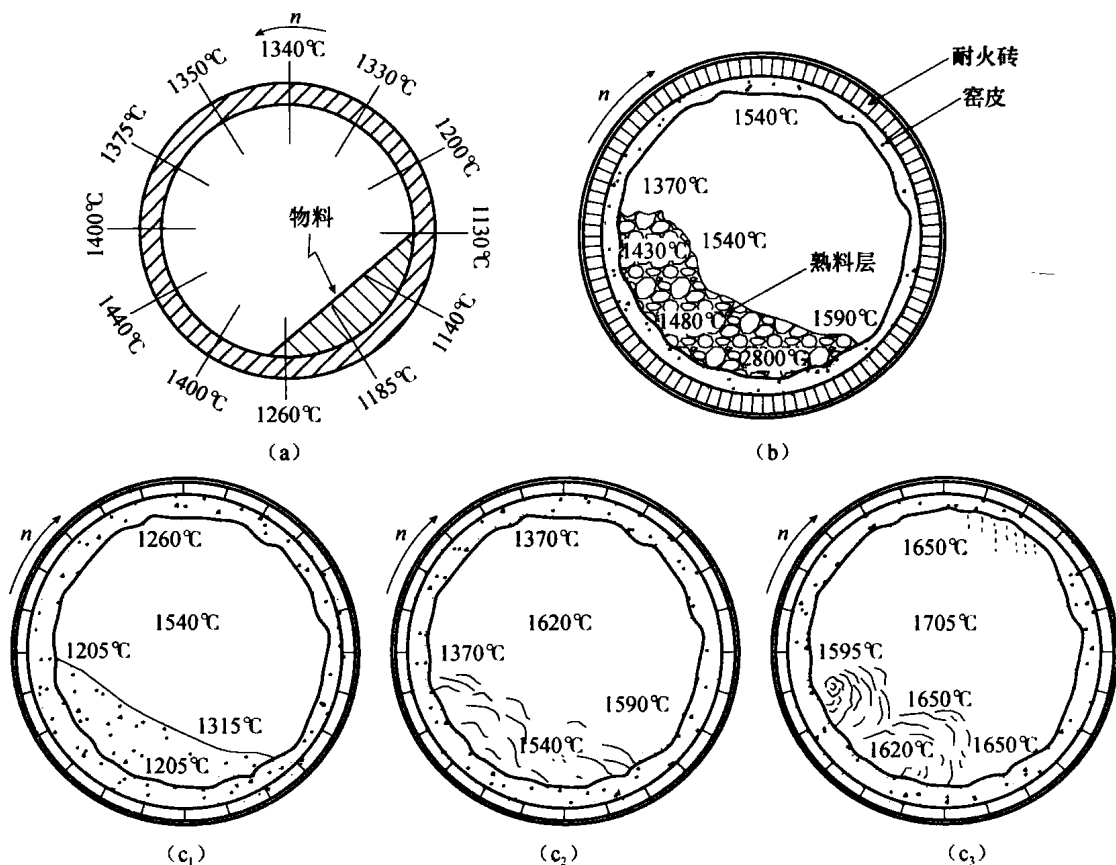
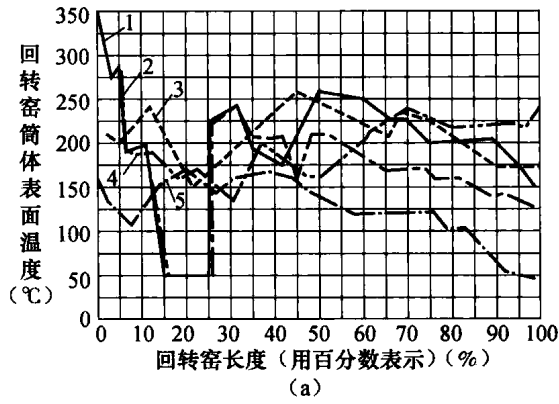


图 1-6 回转窑窑内的温度分布

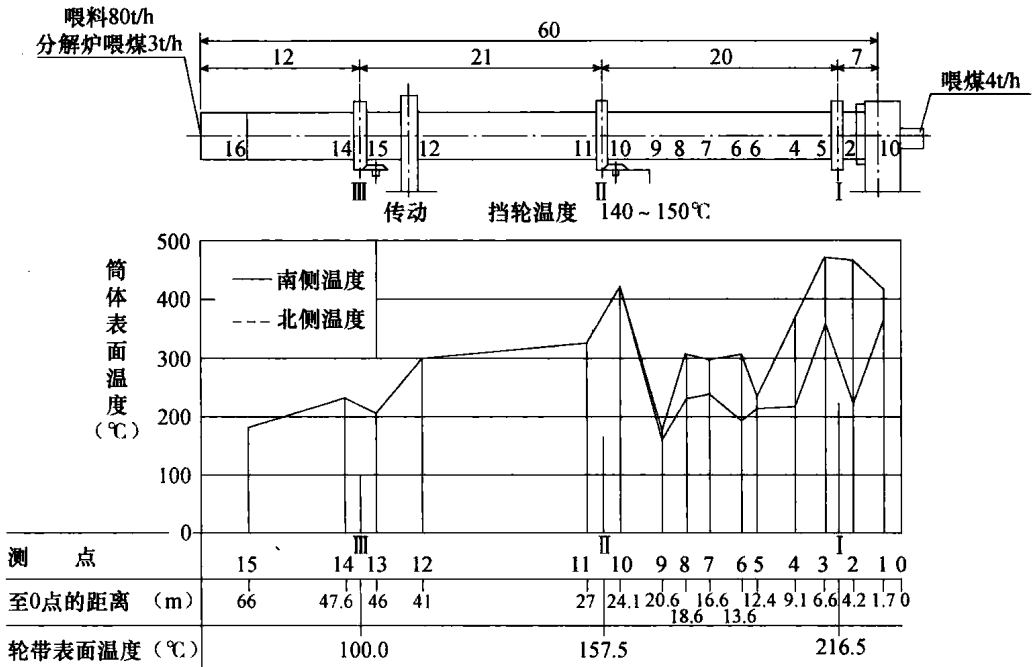
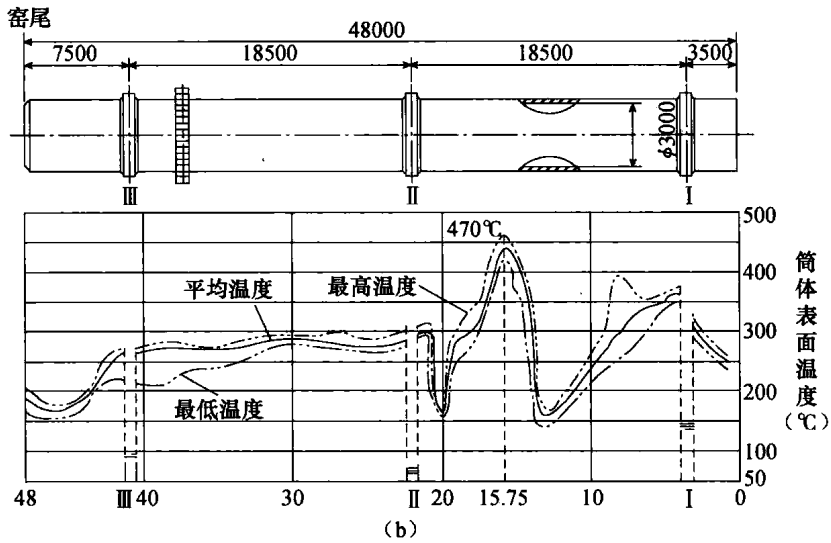
(a) 筒体周围一般的温度分布；(b) 烧成带熟料层及窑皮温度变化；
(c₁) 冷火焰窑内温度分布；(c₂) 正常火焰窑内温度分布；(c₃) 热火焰窑内温度分布

这些平均温度可以通过对不同窑型筒体表面温度的测定值找出规律，如图 1-7 所示。图 1-7 (a) 是传统窑型（湿法窑、立波尔窑、旧干法窑、余热发电窑等）的筒体表面温度测定值曲线，图 1-7 (b) 是北京燕山水泥厂 700t/d 生产线 $\phi 3m \times 48m$ 预分解窑筒体表面温度的测定值曲线，图 1-7 (c) 是江西水泥厂 2000t/d 预分解生产线 $\phi 4m \times 60m$ 回转窑筒体表面温度的测定值，图 1-7 (d) 是广东云浮亨达利水泥制品有限公司 2500t/d 熟料（设计）预分解生产线 $\phi 4m \times 60m$ 回转窑筒体表面温度红外线检测结果。

通过这些测定结果可以看出，不论什么窑型在热端的第一档处筒体温度都是最高的，即使对于新型干法窑也是如此。不过要注意，对于新型干法窑，过渡带一般都处在三档窑的中间档附近。因为此处正常情况下没有窑皮，所以此处的筒体温度很接近或者在个别时候还要高出第 I 档的筒体温度，但大部分时间都低于第 I 档。在图 1-7 (a) 中 0 ~ 30m 内有一段筒体表面温度仅为 50℃，这是在此段筒体淋水的缘故。对于新型干法窑，轮带的表面温度也能达到 215℃。



1— $\phi 3.7/3.3 \times 70\text{m}$ 干法中空窑；2— $\phi 3.5 \times 60\text{m}$ 干法中空窑；3— $\phi 3 \times 60\text{m}$ 干法中空窑；
4— $\phi 4 \times 42\text{m}$ 立波尔窑；5— $\phi 3.5 \times 145\text{m}$ 湿法回转窑



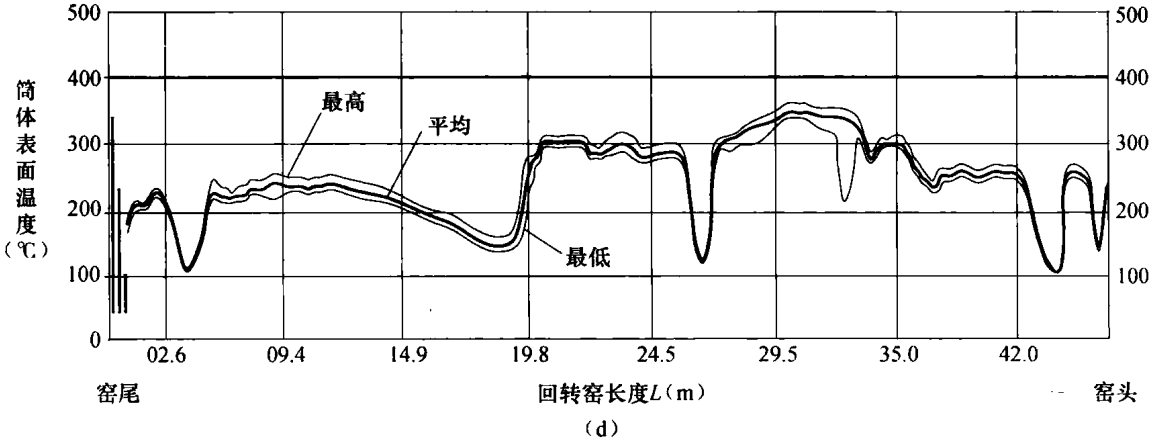


图 1-7 不同窑型筒体表面温度的测定曲线

(a) 传统窑型筒体表面的温度测定曲线; (b) 北京燕山水泥厂 $\phi 3\text{m} \times 48\text{m}$ 窑筒体表面温度测定曲线;

(c) 江西水泥厂 $\phi 4\text{m} \times 60\text{m}$ 窑筒体表面温度测定曲线;

(d) 广东云浮亨达利水泥制品有限公司 $\phi 4\text{m} \times 60\text{m}$ 窑筒体表面温度测定曲线

回转窑筒体各段节的平均升高温度可按下式确定:

$$\Delta t = \frac{\Delta L}{\alpha L} \quad (1-2)$$

Δt 是筒体每个段节的平均升高温度, 即这里计算时所需要比较准确的温度, 单位为 $^{\circ}\text{C}$ 。
 ΔL 是每个筒体段节的长度热膨胀量, 单位为 mm, α 是钢的线膨胀系数, $\alpha = 0.0000121/^{\circ}\text{C}$ 。
 L 是筒体每个段节的长度, 即跨间长度, 单位为 mm。

2. 窑体中心各档升高值的计算

回转窑在运转时, 筒体、轮带和托轮等的温度都会升高一些, 而且依次减小, 因而都会产生热膨胀, 热膨胀量也会依次减小, 如图 1-8 所示。

筒体的热膨胀量 ΔD_s 用下式计算:

$$\Delta D_s = \alpha D_s \Delta t_s \quad (1-3)$$

轮带的热膨胀量 ΔD_l 用下式计算:

$$\Delta D_l = \alpha D_l \Delta t_l \quad (1-4)$$

托轮的热膨胀量 Δd_r 按下式计算:

$$\Delta d_r = \alpha d_r \Delta t_r \quad (1-5)$$

热膨胀后轮带与垫板之间的间隙即轮带间隙 ΔC 用下式计算:

$$\Delta C = \Delta D_l - \Delta D_s + C \quad (1-6)$$

冷态时各档筒体中心高 H_0 用下式计算:

$$H_0 = \frac{D_l + d_r}{2} \cos \beta \quad (1-7)$$

热态时各档筒体中心高 H 用下式计算:

$$H = \frac{D_l + \Delta D_l + d_r + \Delta d_r}{2} \cos \beta \quad (1-8)$$

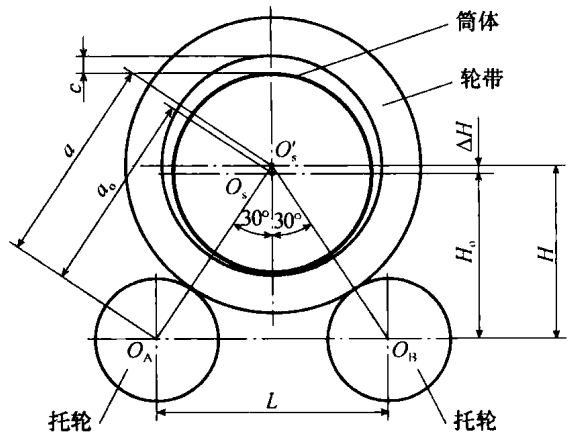


图 1-8 各档筒体中心升高值的计算分析图

各档筒体中心升高值 ΔH 近似地按下式计算：

$$\Delta H = H - H_0 + \frac{C}{2} \quad (1-9)$$

式中 α ——钢的热膨胀系数， $\alpha = 0.0000121/^\circ\text{C}$ ；

D_s 、 D_l 、 d_r ——分别为筒体、轮带和托轮的外直径，mm；

Δt_s 、 Δt_l 、 Δt_r ——分别为筒体、轮带和托轮在热态和冷态时的温度差， $^\circ\text{C}$ ；

β ——两个等直径托轮中心与窑筒体中心连线的夹角，在新窑时 $\beta = 30^\circ$ ；

C ——冷态时轮带间隙，即轮带内径与垫板之间的上部间隙，在图纸和安装说明书中已给出；

ΔC ——热膨胀后的轮带间隙，mm。

通过对 $\phi 4.55\text{m} \times 68\text{m}$ 、 $\phi 4.75\text{m} \times 75\text{m}$ 和 $\phi 4\text{m} \times 60\text{m}$ 预分解窑推算结果，证明这些公式是能够满足要求的，因而完全可用于工程计算。

3. 设计计算实例

利用上述公式，对 $\phi 4.55\text{m} \times 68\text{m}$ 、 $\phi 4.75\text{m} \times 75\text{m}$ 和 $\phi 4\text{m} \times 58\text{m}$ 预分解窑进行实例计算，三条窑的基本数据列在表 1-1 中。由此可见，这三条窑的设计都是要保持筒体中心线在热态时为一直线。具体计算方法见表 1-2 和表 1-3，圆整后的值与表 1-1 给出的数据十分相符，说明这种计算方法是可以使用的。对于云浮水泥厂 $\phi 4\text{m} \times 58\text{m}$ 窑，从窑头往窑尾数各档升高的绝对值分别为 $\Delta H_I = 7.601\text{mm}$ ， $\Delta H_{II} = 7.644\text{mm}$ ， $\Delta H_{III} = 6.122\text{mm}$ 。以窑尾的 III 档为 0，则 II 档与 III 档的升高差为 $\Delta_{II} = 7.644 - 6.122 = 1.522 \approx 1.5\text{mm}$ 。I 档与 III 档的升高值差为 $\Delta_I = 7.601 - 6.122 = 1.479 \approx 1.5\text{mm}$ 。即 II 档和 I 档均比 III 档低 1.5mm，就可以保证该窑体中心线在热态运转时成为一直线。从窑体各段节平均温度的计算看，丹麦史密斯公司只给出一个固定的数值，而法国 FCB 公司则给出一个变动范围，以正负差表示，参见表 1-2。丹麦史密斯公司不如法国 FCB 公司给出的方式科学。

(二) 托轮调整法

用设计计算来确定回转窑筒体中心线在热态时为一直线，固然比较准确，可是需用基本数据资料较多，一般难以齐全。另外，计算的工作量大，缺一个数据便无法进行。而用托轮调整法就简单多了，将托轮拉开一个距离，使第 I 档和第 II 档的筒体中心比第 III 档的窑体中心低 1~3mm 即可。具体降低的高度根据窑型和规格确定。我国 2000t/d 生产线的 $\phi 4 \times 60\text{m}$ 预分解窑，在江西和鲁南水泥厂事故频繁发生，迟迟不能达标达产，其中回转窑的事故占有很大比例。如托轮轴承烧瓦、顶掉轮带档铁，垫板压断撕裂、焊缝开裂脱落等事故频发，大大影响了窑的运转率。到双阳水泥厂 2000t/d 时，已认识到支点高差的影响，在安装时要求第 I 档和第 II 档比第 III 档支承的窑体中心低 1.5mm，使窑体中心线在热态时保持一直线，效果很好。从未发生过江西和鲁南水泥厂出现的那些问题，很快达标达产。

这种方法不仅在新窑安装时可以使用，而且在日常生产的维护中也可以使用。在新窑安装时，因为两个托轮的直径基本相等，托轮拉开的距离计算也比较简单。如果在维修中采用，因为同一档两个托轮的直径不一定相等，计算托轮拉开的距离就要复杂得多。具体计算方法在后面详述。