

# 热工设备环形砌砖 设计计算手册

武汉威林科技股份有限公司

薛启文 莫瑛 林先桥 刘忠江 著



冶金工业出版社  
Metallurgical Industry Press

# 热工设备环形砌砖 设计计算手册

武汉威林科技股份有限公司

薛启文 莫 璞 林先桥 刘忠江 著



北京

冶金工业出版社

2015

## 内 容 提 要

本手册在简述了不同回转窑及钢水罐耐火内衬构造、耐火材料选择、砌筑的基本规定和使用效果的基础上,结合《回转窑用耐火砖形状尺寸》(GB/T 17912—2014)和《钢包用耐火砖形状尺寸》(YB/T 4198—2009)修订和制订过程中的有关问题,重点介绍了旋转和倾动炉窑的环形砌砖用砖形状尺寸的设计原理和环形砌砖的计算方法。为宣传贯彻实施这两项标准,本手册作为工具书优选出双楔形砖砌砖方案、导出了简易计算式、编制了砖量表、绘制了计算图和计算线。

本手册可供回转窑、钢水罐等工业炉窑热工设备耐火砖衬设计计算、砌筑、耐火材料制造和标准化管理等部门的科技人员使用,也可供大专院校相关专业师生参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

热工设备环形砌砖设计计算手册/薛启文等著. —北京:冶金工业出版社, 2015. 9

ISBN 978-7-5024-7018-0

I. ①热… II. ①薛… III. ①加热设备—环形—砖衬砌—设计计算—技术手册 IV. ①TK17-62

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 220125 号

出 版 人 谭学余

地 址 北京市东城区嵩祝院北巷 39 号 邮编 100009 电话 (010)64027926

网 址 www.cnmp.com.cn 电子信箱 yjcs@cnmp.com.cn

责任编辑 于昕蕾 美术编辑 吕欣童 版式设计 孙跃红

责任校对 石 静 责任印制 李玉山

ISBN 978-7-5024-7018-0

冶金工业出版社出版发行;各地新华书店经销;三河市双峰印刷装订有限公司印刷  
2015 年 9 月第 1 版, 2015 年 9 月第 1 次印刷

787mm×1092mm 1/16; 30.75 印张; 744 千字; 482 页

118.00 元

冶金工业出版社 投稿电话 (010)64027932 投稿信箱 tougao@cnmp.com.cn

冶金工业出版社营销中心 电话 (010)64044283 传真 (010)64027893

冶金书店 地址 北京市东四西大街 46 号(100010) 电话 (010)65289081(兼传真)

冶金工业出版社天猫旗舰店 yjgycbs.tmall.com

(本书如有印装质量问题,本社营销中心负责退换)

《热工设备环形砌砖设计计算手册》  
编辑委员会

主任 刘忠江

副主任 苏伯平 林先桥

委员 (按姓氏笔画排序)

丁良盛 王 翔 冯 广 孙海东 全坤朋

刘忠江 苏伯平 杜珏玉 李新健 宋 波

林先桥 姜灵玺 莫 璞 钱学英 雷青云

薛启文 魏 星

# 前 言

本手册是《炉窑环形砌砖设计计算手册》（冶金工业出版社，2010年出版）的续编。针对回转窑和钢水罐耐火砖衬，理论与实践相结合地阐述了旋转和倾动炉窑的环形砌砖的设计计算。

本手册是在国家标准《回转窑用耐火砖形状尺寸》（GB/T 17912—2014）、冶金行业标准《钢包用耐火砖形状尺寸》（YB/T 4198—2009）制、修订过程中编写的。武汉威林科技股份有限公司及作者有幸参与了制、修订这两项标准的工作，并见证了解决标准关键科技难题的全过程；在制、修订这两项标准过程中，始终坚持方便制砖、方便砌筑和方便设计计算，并以使用效果好为目标的原则。

炉窑环形砌砖设计及计算的主要内容，包括环形砌砖用耐火砖形状尺寸设计及环形砌砖砖量计算两部分。以前的有关耐火砖形状尺寸的标准着重砖形尺寸，很少或只简单涉及环形砌砖砖量计算，往往由于尺寸设计不合理，不便于环形砌砖砖量的计算。本手册以基于耐火砖尺寸特征（楔形砖直径、每环极限砖数和单位楔差等）的双楔形砖砌砖中国简化计算式为指导，同时兼顾标准中砖形尺寸设计与环形砌砖简化计算的规则。为了从理论与实践的结合上，更好地理解与运用中国简化计算式指导下的“耐火砖尺寸学”，能够很顺利贯彻实施这两项标准，本手册分别介绍和绘制了回转窑和钢水罐环形砌砖简易计算式、砖量表、计算图和计算线。期望本手册能起到贯彻实施这两项标准的工具书作用。

在制、修订上述两项标准和编写本手册过程中，作者详细剖析了国际标准、英国标准、法国标准、德国标准、日本标准和前苏联标准等国外标准，从中了解到国外这方面的技术进步和尚待攻关的难关。作者把这些技术难点当作科研课题和攻关目标。随着我国这两项标准的发布实施和本手册的出版，国际

上流行的等大端尺寸双楔形砖砌砖、等中间尺寸双楔形砖砌砖和等小端尺寸双楔形砖砌砖 [作者将其统称为等端(间)尺寸双楔形砖砌砖] 在我国也得到广泛应用, 同时我国又发现并成功应用推广了等楔差尺寸双楔形砖砌砖和规范化不等端尺寸双楔形砖砌砖。而作为“耐火砖尺寸学”中核心理论内容的基于耐火砖尺寸特征的双楔形砖砌砖中国简化计算式, 已经并将继续指导耐火砖尺寸设计和环形砌砖砖量计算。

各国耐火砖形状尺寸和耐火砌体的术语及其定(含)义并未统一。本手册中的相关术语和相关表述, 以我国国家标准《耐火砖砖形及砌体术语》(GB/T 2992.2—2014) 为依据, 并对所采用的术语作了适当的探讨和解释。

标准受到标准修订日期的限制, 也是随着技术进步而不断提高的, 本手册中的某些表述如与正在实施的标准有不符, 应以新发布实施的标准为准。

受水平所限, 手册中又涉及新兴“耐火砖尺寸学”的内容, 若有不妥和错误之处, 诚恳欢迎批评指正。

作 者

2015年6月于武汉

# 目 录

<b>1 回转窑环形砌砖设计及计算</b> .....	1
1.1 回转窑衬构造 .....	1
1.1.1 回转窑构造简述 .....	1
1.1.2 回转窑筒体砌砖结构 .....	3
1.2 回转窑用砖形状尺寸和尺寸特征 .....	4
1.2.1 回转窑用砖形状和尺寸符号 .....	4
1.2.2 回转窑用砖尺寸特征 .....	5
1.3 回转窑用砖尺寸砖号和尺寸规格 .....	7
1.3.1 回转窑用砖尺寸砖号 .....	7
1.3.2 回转窑用砖尺寸规格 .....	26
1.4 回转窑用砖尺寸设计 .....	32
1.4.1 回转窑用扇形砖尺寸设计 .....	32
1.4.2 回转窑用厚楔形砖尺寸设计 .....	35
1.5 回转窑砖衬双楔形砖砖环计算 .....	49
1.5.1 基于砖尺寸的不等端双楔形砖砖环俄罗斯计算式 .....	50
1.5.2 基于总砖数和砖尺寸的等端（间）双楔形砖砖环英国计算式 .....	52
1.5.3 基于砖尺寸特征的双楔形砖砖环中国计算式 .....	55
1.5.4 回转窑砖衬双楔形砖砖环配砌方案优选 .....	122
<b>2 回转窑环形砌砖砖量表及计算图</b> .....	159
2.1 回转窑双楔形砖砖环砖量表 .....	159
2.1.1 回转窑双楔形砖砖环砖量表编制原理和编制方法 .....	159
2.1.2 等大端尺寸 100mm 双楔形砖砖环砖量表 .....	160
2.1.3 等中间尺寸 75mm 双楔形砖砖环砖量表 .....	166
2.1.4 等楔差双楔形砖砖环砖量表 .....	181
2.1.5 我国规范化不等端尺寸双楔形砖砖环砖量表 .....	195
2.1.6 回转窑双楔形砖砖环砖量表的使用 .....	196
2.2 回转窑双楔形砖砖环计算图 .....	225
2.2.1 回转窑双楔形砖砖环直角坐标计算图 .....	225
2.2.2 回转窑双楔形砖砖环计算线 .....	236
2.3 回转窑双楔形砖砖环计算式、砖量表、坐标图和计算线的选用 .....	326

<b>3 钢水罐环形砌砖设计及计算</b> .....	329
3.1 钢水罐和罐衬构造概述 .....	329
3.1.1 钢水罐构造概述 .....	329
3.1.2 钢罐脱气精炼装置简述 .....	331
3.1.3 钢罐耐火内衬的使用条件和对耐火材料的基本要求 .....	334
3.2 钢罐内衬耐火材料的选择 .....	337
3.2.1 钢罐渣线部位用耐火材料 .....	337
3.2.2 钢罐熔池用耐火材料 .....	359
3.3 砖砌钢罐砌筑 .....	373
3.3.1 砌缝 .....	373
3.3.2 膨胀缝 .....	376
3.3.3 罐壁环形砌体的合门砖 .....	376
3.3.4 罐壁螺旋砌砖 .....	377
3.3.5 综合罐衬 .....	379
3.3.6 罐壁砖环的平砌与竖砌 .....	380
3.4 钢罐砖衬用砖形状尺寸设计 .....	382
3.4.1 罐壁侧厚楔形砖尺寸设计 .....	382
3.4.2 罐壁平砌长楔形砖形状尺寸设计 .....	392
3.4.3 罐壁平砌竖宽楔形砖尺寸设计 .....	402
3.4.4 罐壁竖砌薄宽楔形砖尺寸设计 .....	403
3.4.5 钢罐用直形砖尺寸设计 .....	405
3.5 钢罐环形砌砖计算 .....	409
3.5.1 国外钢罐环形砌砖计算 .....	409
3.5.2 我国钢罐罐壁侧厚楔形砖砖环计算 .....	411
3.5.3 我国钢罐罐壁竖宽楔形砖双楔形砖砖环计算 .....	435
<b>4 钢水罐环形砌砖砖量表及计算图</b> .....	452
4.1 钢水罐环形砌砖砖量表 .....	452
4.1.1 钢罐侧厚楔形砖双楔形砖砖环砖量表 .....	452
4.1.2 钢罐侧厚楔形砖等楔差砖环砖量表 .....	454
4.1.3 钢罐侧厚楔形砖不等端双楔形砖砖环砖量表 .....	461
4.2 钢水罐环形砌砖计算线 .....	469
4.2.1 等中间尺寸竖宽楔形砖双楔形砖砖环组合计算线 .....	469
4.2.2 钢罐不等端尺寸竖宽楔形砖双楔形砖砖环组合计算线 .....	473
4.2.3 等楔差竖宽楔形砖双楔形砖砖环计算线 .....	475
<b>参考文献</b> .....	480



# 1 回转窑环形砌砖设计及计算

## 1.1 回转窑衬构造

### 1.1.1 回转窑构造简述

回转窑 (rotary kiln) 为衬砌耐火材料的钢板圆桶 (一般直径 2~6m, 长 40~180m), 倾斜放置并连续慢速转动, 对原料或炉料连续加热煅烧、焙烧、烧结、挥发或离析的热工设备<sup>[1~4]</sup>。回转窑由筒体 (rotary drum)、滚圈 (tire)、托轮 (roll)、传动装置、热交换装置、窑头和燃烧室、窑尾、窑头和窑尾密封装置, 以及窑衬等组成。回转窑的生产能力大、机械化程度高、维护和操作简单, 能适应多种工业原料或炉料的工艺过程, 被广泛用于水泥、冶金、耐火材料和化工等行业。

1985 年出现的煅烧水泥熟料 (cement clinker) 的水泥回转窑 (rotary cement kiln) 可作为回转窑的代表。水泥回转窑的种类经历了一系列演变: 从煅烧泵入窑内料浆的长达 145m 以上的湿法长窑 (wet process long kiln)、煅烧生料成球的半干法立波窑 (semi-dry Lepol kiln)、煅烧细粉生料的传统干法窑 (dry process kiln) 到带悬浮预热器 (suspension preheater) 和窑外预分解 (precalcining) 的新型干法窑 (new dry process kiln)。传统水泥窑 (湿法长窑、立波窑和老式干法窑) 与新型干法水泥窑的变化, 主要发生在预热器部位。所有上述水泥回转窑的主体部位, 都包括回转窑筒体。本章及第 2 章所讨论的内容, 主要是回转窑筒体环形砌砖的设计及计算。

传统水泥回转窑筒体的段带, 按炉料走向分为进料端 (feed end)、预热带 (preheating zone)、分解带 (calcining zone)、后过渡带 (back intermediate zone)、烧成带 (firing zone, calcining zone, burning zone)、前过渡带 (front intermediate zone) 和卸料端 (discharging end)。新型干法水泥回转窑筒体的段带, 从后窑口向前窑口分为预热带、分解带、后过渡带、烧成带和前过渡带。可见, 新型干法水泥回转窑与传统水泥回转窑, 在筒体段带区分名称上基本一致。但各段带的长度和直径并不相同。

回转窑筒体的窑形有: (1) 直筒形。筒体各段带的形状和内径相同, 制造和安装都方便, 窑内物料的填充系数<sup>①</sup> (filling coefficient of material in the kiln) 和移动速度均匀一致。(2) 窑头扩大形。窑头燃烧空间和供热能力增大, 有利于提高产量。(3) 窑尾扩大形。可增大物料干燥的受热面, 便于安装换热器, 可降低热耗和烟尘率, 多用于湿法加料窑。

① 当回转窑的生产能力  $G$  (t/h) 和窑筒体直径  $D_{\text{均}}$  确定后, 可根据炉料在窑内的轴向移动速度  $w_{\text{料}}$  (m/h) 和炉料堆密度  $\gamma_{\text{料}}$  (t/m<sup>3</sup>) 按下式计算物料在窑内的填充系数  $\varphi$ :

$$\varphi = \frac{4G}{\pi D_{\text{均}}^2 w_{\text{料}} \gamma_{\text{料}}}$$

(4) 两端扩大形。兼有窑头扩大形和窑尾扩大形的优点外, 窑中间部位的填充系数提高, 有利于防止料层滑动, 但气流速度加快, 增大了烟尘率。(5) 局部扩大形。窑筒体各段带能力不平衡时, 在热工薄弱环节段带采取部分扩大。例如, 干燥带能力富余而烧成带能力不足时, 将其高温烧成带扩大成“大肚窑”便可显著提高产量, 但操作难以掌握。国内外回转窑筒体窑形的发展趋势, 主要为大直径的直筒形。现代回转窑筒体的规格, 仅有窑壳有效直径 (m) 和长度 (m), 就是大直径直筒形回转窑筒体主要趋势的证明。

水泥回转窑筒体各段带耐火砖衬的使用条件不同, 选用耐火砖的品种和质量也不相同。由于水泥熟料的烧成温度在 1400 ~ 1500℃ 范围, 火焰温度高达 1650℃ 左右, 新型干法水泥回转窑筒体的烧成带和其前后的过渡带砖衬, 经受高温引起的破坏作用。氧化气氛下严重的碱侵蚀和六价铬公害, 是回转窑筒体高温带砖衬损毁的特征。此外, 回转窑筒体砖衬受转动时椭圆度变化和加热膨胀 (或收缩) 等结构应力作用下的破坏也不可忽视。筒体高温带砖衬与水泥熟料之间易形成富含  $C_4AF$  的窑皮保护层 (clinker coating), 对保护砖衬有利。考虑到耐高温、抗碱侵蚀、挂窑皮难易和节能环保等诸要求均能得到较令人满意的平衡, 新型干法水泥回转窑筒体高温带砖衬必须采用碱性耐火砖 (basic refractory brick)。这些碱性砖包括: 普通镁铬砖 (common magnesia chromite brick)、半直接结合镁铬砖 (semi-directbonded magnesia chromite brick)、直接结合镁铬砖 (directbonded magnesia chromite brick)、尖晶石砖 (spinel brick)、白云石砖 (doloma brick)、低铬镁铬砖 (low-chrome magnesia chromite brick), 以及含锆 (zircon containing) 或不含锆 (zircon-free) 的特种镁砖 (special magnesia brick) 等。水泥回转窑筒体高温带外的其他段带, 由于在具有一定斜度 (inclination of rotary kiln) 或倾斜角<sup>①</sup> (angle of rotary kiln inclination) 和转速<sup>②</sup> (rate-of-turn) 共同条件下, 炉料由高端向低端沿筒体砖衬移动, 砖衬受冲击、磨损和剥落是其主要损毁特征。抗剥落、耐磨和耐碱高铝砖 (high alumina brick) 在这些段带得到广泛应用。水泥回转窑筒体各段带内衬采用的耐火材料, 经过长期不断更新, 开发出许多品种, 但始终以压砖机压制的耐火砖为主。仅在回转窑筒体的进料端和卸料端应用过进料端砌块 (feed-end blocks) 和卸料端砌块 (discharging-end blocks)。

钢铁工业用原料和炉料的加热处理, 很多都采用回转窑。随着转炉炼钢工艺需要优质活性石灰 (active lime, reactive lime, soft-burnt lime), 以优质洁净水洗石灰石 (块度 18 ~ 50mm) 为原料, 以低硫液化气或煤气为燃料、带有竖式预热器 (vertical preheater, shaft preheater) 和竖式冷却器 (vertical cooler, shaft cooler) 的活性石灰回转窑 (rotary active lime kiln, rotary kiln of active lime), 在国内外被广泛采用。一种活性石灰窑筒体的规格为

① 回转窑筒体的斜度  $i$  或倾斜角  $\beta_1$ , 即筒体轴向中心线与水平的夹角, 斜度以 % 表示, 倾斜角以度 ( $^\circ$ ) 表示。水泥回转窑冷却筒 (rotary cooler) 的倾斜角  $4^\circ \sim 7^\circ$ , 有色冶金回转窑筒体的斜度为 2% ~ 5%, 耐火原料煅烧回转窑筒体的斜度为 3% ~ 3.5%。

② 回转窑筒体转速  $n$  (r/min), 取决于窑筒体内炉料流通能力  $G$  (t/h)、窑内炉料自然堆角  $\alpha$  ( $^\circ$ ) (angle of repose)、炉料堆密度  $\gamma_{\text{料}}$  (t/m<sup>3</sup>)、炉料在窑内的填充系数  $\varphi$ 、窑筒体平均内径  $D_{\text{窑}}$  (m) 和斜度  $i$  (%), 可按下式计算:

$$n = \frac{G \sin \alpha}{1.48 D_{\text{窑}}^3 \varphi \gamma_{\text{料}} i}$$

在回转窑实际生产过程中, 为方便操作或处理故障, 常用转速都有一定调节范围。有色冶金回转窑的常用转速范围在 0.5 ~ 1.2 r/min, 耐火原料煅烧回转窑的常用转速范围在 1 ~ 2 r/min。

$\phi 4.2\text{m} \times 50\text{m}$ ，内衬由黏土砖（fireclay brick）、高铝砖和镁铬砖（或镁铝砖）砌筑。作为转炉炼钢的炉料，轻烧白云石（soft-burnt dolomite）也有在回转窑煅烧的。炼铁炉采用的铁矿石球团（pellet），也有在球团回转窑（rotary pellet kiln）烧结的。镍铁的生产也有采用回转窑的，例如镍铁回转窑（ferronickel rotary kiln）。

用于有色金属的挥发、氯化焙烧、离析和煅烧等工艺的有色冶金回转窑（rotary kiln for non-ferrous metallurgical）包括挥发回转窑（volatilization rotary kiln）、氯化焙烧回转窑（chlorination roasting rotary kiln, chlorination rotary roaster）等。含锌 21% ~ 23% 的锌浸出渣与焦粉按一定比例（一般 2 : 1）混合进行还原挥发的锌浸出渣挥发回转窑（rotary kiln for volatilization of zinc-slag），可将 Zn 含量提高到 62% ~ 68%。例如，日处理 160t 干锌浸出渣挥发回转窑的规格为  $\phi 2.4\text{m} \times 45\text{m}$ ，其运转参数：斜度为 5%，常用转速为 0.75r/min，调速范围为 0.54 ~ 1.2r/min，轴向料速为 30m/h，填充系数为 0.062，炉料在窑内停留时间（material resident time in the kiln, resident time of kiln feed）平均为 1.51h。炉料在窑内停留时间  $\tau(\text{h})$  可以由窑长  $L(\text{m})$  和炉料在窑内的轴向移动速度  $w_{\text{料}}(\text{m/h})$  求出， $\tau = L/w_{\text{料}}$ 。该窑衬高温带温度为 1200℃，挥发带（volatilization zone）采用镁砖，其余段带采用高铝砖和黏土砖。

为生产金属铝，从铝矾土矿（bauxite）生产氧化铝。氧化铝的生产要经过氢氧化铝的焙烧。起初铝矾土矿的干燥和煅烧、氢氧化铝的焙烧等工艺过程在一台氧化铝回转窑（rotary alumina kiln）内完成。氧化铝回转窑内衬的工作条件恶劣苛刻，衬砖应具备以下性能：高温（1200 ~ 1300℃）抗碱侵蚀性能；高温下耐气流冲刷和炉料冲击的力学性能。因此，氧化铝回转窑烧成带应砌以  $\text{SiO}_2$  含量低的高铝砖和镁铬砖。由于在气-固传热效率和系统散热损失等方面，氧化铝回转窑比不上氢氧化铝流态化焙烧炉（fluidized roaster of aluminum hydroxide, aluminum hydroxide fluidized roasting furnace），前者已开始并将继续被后者淘汰。

煅烧黏土熟料（chamotte clay）和高铝熟料（high-alumina chamotte）等普通耐火原料回转窑（rotary refractory raw material kiln），多以煤粉为燃料，个别采用煤气。规格较多，以  $\phi 2.5\text{m} \times 50\text{m}$  或接近者为主。烧结刚玉（sintered corundum）、合成莫来石（synthetic mullite）、镁铝尖晶石（magnesia-alumina spinel）、镁铬砂（magnesia-chrome spinel clinker）和镁钙砂（dead burned high-calcium magnesite）等高纯耐火原料的煅烧，在超高温回转窑（ultrahigh temperature rotary kiln）内完成。为满足 1850℃ 以上超高温要求，至少采用以下措施：（1）采用重油机械雾化烧嘴（mechanical atomizing oil burner）。（2）高温煅烧带窑衬采用镁铝尖晶石砖（magnesia-alumina spinel brick）：预热带用镁铝尖晶石砖的原料为矾土基镁铝尖晶石和 MgO97 高纯烧结镁砂（high-purity sintered magnesia clinker）；烧成带用镁铝尖晶石砖的原料为工业氧化铝基镁铝尖晶石、MgO97 高纯烧结镁砂和 MgO97 电熔镁砂（fused magnesite）。（3）高温煅烧带工作衬（working lining）的背面（紧靠窑壳）采用背面隔热衬（back up insulation），控制筒体表面温度在 300℃ 左右。

### 1.1.2 回转窑筒体砌砖结构

回转窑筒体砖衬（brick lining）是微斜放置的空心圆柱砌体，横截面为圆环。回转窑筒体的砌砖结构属于具有半径（radius） $r$ 、中心角（central angle） $\theta$  及表面为圆弧形的辐

射形砌砖 (radial brickworks) 范畴。由于回转窑筒体砌砖中心角  $\theta = 360^\circ$ ，常称其为环形砌砖 (circular brickworks, ring brickworks, annular brickworks)。环形砌砖分为水平砌体基面 (horizontal base of brickwork) 的环形砌砖 (例如高炉炉墙、转炉炉体) 和弧形砌体基面 (bow-shape base of brickwork) 的环形砌砖 (例如管道砖衬、回转窑筒体砖衬)。

高炉和转炉水平砌体基面的环形砌砖，常采取砖大面 (large face) 置于水平 (或稍倾斜) 砌体基面的平砌 (bricklaying on flat, laying brick on flat)，而回转窑筒体弧形砌体基面的环形砌砖常采取砖热面 (hotface) 置于拱胎表面 (surface of center) 或作为工作面的竖砌 (bricklaying on end, laying brick on end) (对于竖厚楔形砖而言) 或侧砌 (bricklaying on edge, laying brick on edge) (对于侧厚楔形砖而言)。与固定不动的高炉内衬环形砌砖和出钢出渣等周期性倾动的转炉内衬环形砌砖不同，回转窑筒体环形砌砖经常连续转动，环形砌砖内的每块砖都会转动到筒体的上半圆——半圆拱 (semi-circular arch)，特别是转动到中心角不超过  $120^\circ$  或径跨比 (inner radius-span ratio of arch)  $r/s \geq 0.577$  的推力拱 (sprung arch) 内，处于拱的推力状态。因此，随窑壳一起转动的回转窑筒体环形砌砖又兼有拱形砌砖 (arch brickworks, arched brickworks) 的特征。回转窑筒体环形砌砖内的衬砖，除经受高温热冲击、窑气和炉料化学侵蚀和磨损外，还经受砖间及窑壳的挤压应力。为承受这些破坏应力，回转窑筒体环形砌砖和所用耐火砖形状尺寸的设计和计算，应采取特殊的方法。

## 1.2 回转窑用砖形状尺寸和尺寸特征

### 1.2.1 回转窑用砖形状和尺寸符号

回转窑筒体环形砌砖采用两种形状的砖：扇形砖和厚楔形砖<sup>[5]</sup>，见图 1-1。这两种形状砖的尺寸符号 (dimension symbols)，各国标准不同<sup>①</sup>。为讨论方便，本书采用我国标准<sup>[6-8]</sup>规定的楔形砖统一尺寸符号。反应楔形砖特征尺寸 (characteristic dimensions) (包括大小端距离和大小端尺寸) 的对称梯形砖面 (symmetrical trapezoidal face of brick) 两底间的高或大端与小端间的距离称为大小端距离 (distance between the backface and hotface)，符号统一为  $A$ ；两底中的较大尺寸称为大端尺寸 (backface dimensions; outer dimensions; coldface dimensions)，符号统一为  $C$ ；两底中的较小尺寸称为小端尺寸 (hotface dimensions, inner dimensions)，符号统一为  $D$ ；通常以符号  $C/D$  共同表示大小端尺寸 (backface and hotface dimensions)；大小端的平均尺寸  $(C + D)/2$  称为中间尺寸 (median dimensions)，符号统一为  $P$ ；楔形砖大端尺寸  $C$  与小端尺寸  $D$  之差称为楔差 (taper)，符号统一为  $\Delta C$ 。回转窑用砖，特别是回转窑用厚楔形砖，完全应当采用这些尺寸名称和尺寸符号，见图 1-2。

① 我国回转窑用厚楔形砖的大小端距离符号  $A$  对应于日本的  $D$ ，英国、德国、法国、国际标准的  $H$  (高，英语 Height 首个字母)；我国大端尺寸符号  $C$  对应于日本、英国、德国、国际标准的  $A$ ；我国小端尺寸符号  $D$  对应于日本、英国、德国、国际标准的  $B$ ，法国的  $A$ ；我国另一尺寸  $B$  对应于日本的  $C$ ，英国、德国、法国、国际标准的  $L$  (长，英语 Length 首个字母)。我国的  $A$ 、 $C/D$  和  $B$  分别对应于前苏联的  $B$ 、 $a/a_1$  和  $\sigma$ ，PRE (欧洲耐火材料生产者联合会) 的  $c$ 、 $a/b$  和  $d$ 。

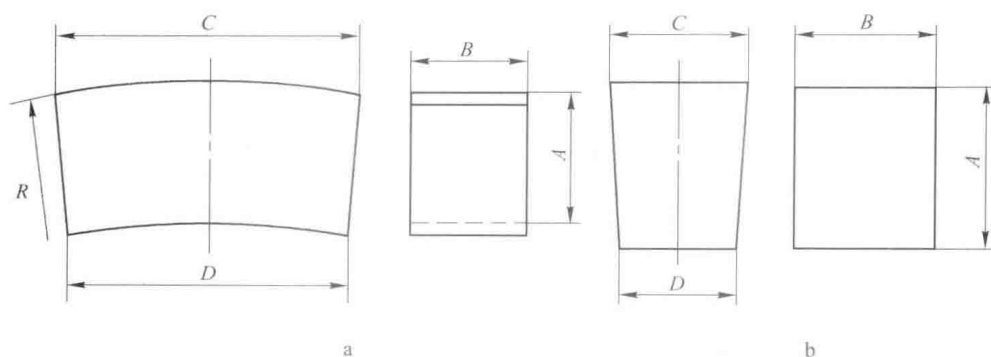


图 1-1 回转窑筒体用砖形状和尺寸符号

a—扇形砖；b—厚楔形砖

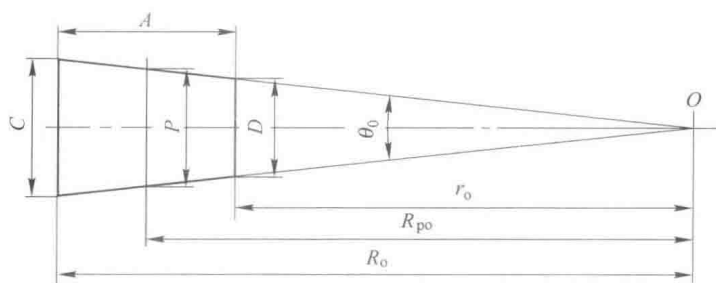


图 1-2 楔形砖对称梯形砖面

 $\theta_0$ —楔形砖中心角； $r_0$ —楔形砖内半径； $R_{po}$ —楔形砖中间半径； $R_o$ —楔形砖外半径；

A—大小端距离；C—大端尺寸；D—小端尺寸；P—中间尺寸

### 1.2.2 回转窑用砖尺寸特征

反映回转窑筒体环形砌砖设计、计算、砌筑和使用中砖尺寸性能的尺寸特征 (dimension characteristics) 包括：回转窑用砖单位楔差、直径、每环极限砖数和中心角等。

#### 1.2.2.1 回转窑用砖单位楔差

回转窑筒体环形砌砖用扇形砖或厚楔形砖楔差  $\Delta C = C - D$  对其大小端距离  $A$  之比称为该砖的单位楔差 (specific taper)，简称为大小端差距比，符号为  $\Delta C'$ ，即  $\Delta C' = \Delta C/A = (C - D)/A$ 。

#### 1.2.2.2 回转窑用砖直径<sup>①</sup>

全部用一种尺寸扇形砖或厚楔形砖单独砌筑的中心角  $\theta = 360^\circ$  回转窑筒体单楔形砖砖环 (mono-taper system of ring) 的外直径、内直径和中间直径分别当做该砖的外直径 (outer diameter)  $D_o$ 、内直径 (inner diameter)  $d_o$  和中间直径 (median diameter)  $D_{po}$ ，其定义计算式如下：

① 回转窑环形砌砖的计算习惯上常采取直径，回转窑用砖的尺寸特征中也随着以直径为基础。

$$D_o = \frac{2CA}{C-D} = \frac{2C}{\Delta C'} \quad (1-1a)$$

$$d_o = \frac{2DA}{C-D} = \frac{2D}{\Delta C'} \quad (1-1b)$$

$$D_{po} = \frac{2PA}{C-D} = \frac{2P}{\Delta C'} \quad (1-1c)$$

或

$$D_{po} = \frac{PA}{P-D} \quad (1-1d)$$

式中,  $C$ 、 $D$  和  $P$  分别为回转窑用扇形砖或厚楔形砖的大端尺寸、小端尺寸和中间尺寸, mm, 计算中均需另加砌缝厚度 (thickness of joints, jointing space), 通常取 1mm 或 2mm;  $A$  为砖的大小端距离, mm;  $\Delta C'$  为砖的单位楔差。

上述计算式的直径为半径的 2 倍。而这些半径计算式的推导见文献 [9] 的式 1-3、式 1-3a 和式 4-1d。由图 1-2 知  $C/D = R_o/(R_o - A)$ 、 $C/D = (r_o + A)/r_o$  或  $P/D = R_{po}/(R_{po} - A/2)$  可导出这些计算式。

### 1. 2. 2. 3 回转窑用砖每环极限砖数

中心角  $\theta = 360^\circ$  回转窑筒体单楔形砖砖环或两种尺寸楔形砖配砌的双楔形砖砖环 (tow-taper system of ring) 内每种厚楔形砖的最多砖数称为其每环极限砖数 (utmost number of brick in each ring), 并且为按下式计算的定值, 符号为  $K'_o$ 。

$$K'_o = \frac{2\pi A}{C-D} = \frac{2\pi}{\Delta C'} \quad (1-2a)$$

$$K'_o = \frac{\pi A}{P-D} \quad (1-2b)$$

或

$$K'_o = \frac{360}{\theta_o} \quad (1-2c)$$

式中,  $A$ 、 $C$ 、 $D$ 、 $P$  和  $\Delta C'$  的符号意义与 1. 2. 2. 2 节中相同;  $\theta_o$  为楔形砖的中心角 (见 1. 2. 2. 4 节)。这些计算式的推导见文献 [9] 的式 1-4b、式 4-2c、式 4-2a 和式 1-4c。众所周知  $K'_o = \pi D_o/C$  和  $K'_o = \pi D_{po}/P$ , 将式 1-1a 和式 1-1c 分别代入之即得式 1-2a 和式 1-2b。由式 1-3a 导出式 1-2c。

### 1. 2. 2. 4 回转窑用砖中心角

回转窑筒体环形砌砖用砖对称梯形砖面 (见图 1-2) 两斜边延长线至交点 (圆心) 形成的夹角当做该砖的中心角 (central angle of brick for rotary kiln), 符号为  $\theta_o$ , 单位为度 ( $^\circ$ ), 按下式计算:

$$\theta_o = \frac{360}{K'_o} \quad (1-3a)$$

或

$$\theta_o = \frac{180(C-D)}{\pi A} = \frac{180\Delta C'}{\pi} \quad (1-3b)$$

式中,  $A$ 、 $C$ 、 $D$  和  $\Delta C'$  的符号意义见 1. 2. 2. 2 节和 1. 2. 2. 3 节, 其推导见文献 [9] 的式 1-5 和式 1-5a。将式 1-2a 代入式 1-3a 得式 1-3b。

### 1.3 回转窑用砖尺寸砖号和尺寸规格

#### 1.3.1 回转窑用砖尺寸砖号

为区别不同尺寸回转窑用砖，赋予每个尺寸回转窑用砖以代号，称为砖号（brick designations）。砖号包括以数字顺序表示的顺序砖号（sequential designations）和标明形状、主要尺寸或尺寸特征的尺寸砖号（size designations）。各国回转窑用砖尺寸标准中。有单独采取顺序砖号或尺寸砖号的，也有同时对照采取顺序砖号与尺寸砖号的，它们的表示法不尽相同。

日本回转窑用扇形砖同时对照采取顺序砖号和尺寸砖号<sup>[5]</sup>，见表 1-1。尺寸砖号中 RS 表示回转窑用扇形砖，其后被半字线（“-”）隔开的三组独立数字：第一组数字为大端尺寸  $C$  的  $1/25$ ；第二组数字为大小端距离  $A$  的  $1/25$ ；第三组数字为用于回转窑筒体钢壳内直径的  $1/100$ 。例如用于筒体钢壳内直径（或砖环外直径）为  $3600\text{mm}$ ， $C = 250\text{mm}$ ， $A = 150\text{mm}$  的扇形砖，其顺序砖号为 B3，尺寸砖号写作 RS-10-6-36。

日本回转窑用厚楔形砖也同时采取顺序砖号和尺寸砖号<sup>[5]</sup>，见表 1-2。尺寸砖号中 RA 表示回转窑用厚楔形砖，其后被半字线（“-”）隔开的两组独立数字：第一组数字为大小端距离  $A$  的  $1/25$ （取整数），其后的  $a$  为大端尺寸  $C$  的小尺寸系列（ $89\text{mm}$ ）， $b$  为  $C$  的中尺寸系列（ $100\text{mm}$ ）， $c$  为  $C$  的大尺寸系列（ $110\text{mm}$ ）；第二组数字为小端尺寸  $D$  的由小向大的顺序号。例如  $A = 200\text{mm}$ ， $C = 100\text{mm}$ ， $D = 88\text{mm}$  回转窑用厚楔形砖顺序砖号 M1 的尺寸砖号写作 RA-8b-1。顺序砖号中 K 和 L 表示小直径回转窑用砖，M、N、P 和 R 表示大直径回转窑用砖。

表 1-1 日本回转窑用扇形砖尺寸和尺寸特征<sup>[5]</sup>

尺寸砖号	顺序砖号	尺寸/mm			单位楔差 $\Delta C' = \frac{C-D}{A}$	外直径/mm $D_o = \frac{2CA}{C-D}$	每环极限砖数/块 $K' = \frac{2\pi A}{C-D}$
		$A$	$C/D$	$B$			
RS-9-6-31.5	A1	150	225/203	100	0.147	3095.5	42.84
RS-9-6-34.5	A2	150	225/205	100	0.133	3405.0	47.124
RS-9-6-36	A3	150	225/206	100	0.127	3584.2	49.604
RS-9-6-37.5	A4	150	225/207	100	0.120	3783.3	52.36
RS-9-6-39	A5	150	225/208	100	0.113	4005.9	55.44
RS-10-6-31.5	B1	150	250/225	100	0.167	3024.2	37.699
RS-10-6-34.5	B2	150	250/228	100	0.147	3436.4	42.84
RS-10-6-36	B3	150	250/229	100	0.140	3600.0	44.88
RS-10-6-37.5	B4	150	250/230	100	0.133	3780.0	47.124
RS-10-6-39	B5	150	250/231	100	0.127	3978.9	49.604
RS-10-6-42	B6	150	250/232	100	0.120	4200.0	52.36
RS-10-6-46	B7	150	250/234	100	0.107	4725.0	58.905
RS-10-6-52	B8	150	250/236	100	0.093	5400.0	67.32



续表 1-1

尺寸砖号	顺序砖号	尺寸/mm			单位楔差 $\Delta C' = \frac{C-D}{A}$	外直径/mm $D_o = \frac{2CA}{C-D}$	每环极限砖数/块 $K'_o = \frac{2\pi A}{C-D}$
		A	C/D	B			
RS-10-8-36	C3	200	250/222	100	0.140	3600.0	44.88
RS-10-8-37.5	C4	200	250/223	100	0.135	3733.3	46.542
RS-10-8-39	C5	200	250/224	100	0.130	3876.9	48.332
RS-10-8-42	C6	200	250/225	100	0.125	4032.0	50.266
RS-10-8-46	C7	200	250/228	100	0.110	4581.8	57.12
RS-10-8-52	C8	200	250/231	100	0.095	5305.3	66.139

注：1. 尺寸符号意义见图 1-1a（经本书统一）。

2. 尺寸特征（单位楔差、外直径和每环极限砖数）经本书计算。

3. 外直径计算中，尺寸 C 和 D 另加 2mm 砌缝。

表 1-2 日本回转窑用厚楔形砖尺寸和尺寸特征<sup>[5]</sup>

尺寸砖号	顺序砖号	尺寸/mm			单位楔差 $\Delta C' = \frac{C-D}{A}$	外直径/mm $D_o = \frac{2CA}{C-D}$	每环极限砖数/块 $K'_o = \frac{2\pi A}{C-D}$
		A	C/D	B			
RA-6-1	K1	150	89/80	230	0.060	3033.333	104.720
RA-6-2	K2	150	89/81	230	0.053	3412.500	117.810
RA-6-3	K3	150	89/82	230	0.047	3900.000	134.640
RA-6-4	K4	150	89/83	230	0.040	4550.000	157.080
RA-6-7	K7	150	115/106	230	0.060	3900.000	104.720
RA-6-8	K8	150	75/69	230	0.040	3850.000	157.080
RA-8a-1	L1	200	89/77	230	0.060	3033.333	104.720
RA-8a-2	L2	200	89/78	230	0.055	3309.091	114.240
RA-8a-3	L3	200	89/79	230	0.050	3640.000	125.664
RA-8a-4	L4	200	89/80	230	0.045	4044.444	139.627
RA-8a-5	L5	200	89/81	230	0.040	4550.000	157.080
RA-8a-6	L6	200	89/82	230	0.035	5200.000	179.520
RA-8a-7	L7	200	115/103	230	0.060	3900.000	104.720
RA-8a-8	L8	200	75/67	230	0.040	3850.000	157.080
RA-8b-1	M1	200	100/88	230	0.060	3400.000	104.720
RA-8b-2	M2	200	100/89	230	0.055	3709.091	114.240
RA-8b-3	M3	200	100/90	230	0.050	4080.000	125.664
RA-8b-4	M4	200	100/91	230	0.045	4533.333	139.627
RA-8b-5	M5	200	100/92	230	0.040	5100.000	157.080
RA-8b-6	M6	200	100/93	230	0.035	5828.571	179.520
RA-8b-7	M7	200	125/115	230	0.050	5080.000	125.664
RA-8b-8	M8	200	85/78	230	0.035	4971.429	179.520



续表 1-2

尺寸砖号	顺序砖号	尺寸/mm			单位楔差 $\Delta C' = \frac{C-D}{A}$	外直径/mm $D_o = \frac{2CA}{C-D}$	每环极限砖数/块 $K'_o = \frac{2\pi A}{C-D}$
		A	C/D	B			
RA-9b-1	N1	230	100/90	230	0.043	4692.000	144.514
RA-9b-2	N2	230	100/91	230	0.039	5213.333	160.571
RA-9b-3	N3	230	100/92	230	0.035	5865.000	180.642
RA-9b-4	N4	230	100/93	230	0.030	6702.857	206.448
RA-9b-7	N7	230	125/115	230	0.043	5842.000	144.514
RA-9b-8	N8	230	85/78	230	0.030	5717.143	206.448
RA-9c-1	P1	230	110/100	200	0.043	5152.000	144.514
RA-9c-2	P2	230	110/101	200	0.039	5724.444	160.571
RA-9c-3	P3	230	110/102	200	0.035	6440.000	180.642
RA-9c-4	P4	230	110/103	200	0.030	7360.000	206.448
RA-9c-7	P7	230	125/115	200	0.043	5842.000	144.514
RA-9c-8	P8	230	85/78	200	0.030	5717.143	206.448
RA-10c-1	R1	250	110/100	200	0.040	5600.000	157.080
RA-10c-2	R2	250	110/101	200	0.036	6222.200	174.533
RA-10c-3	R3	250	110/102	200	0.032	7000.000	196.350
RA-10c-4	R4	250	110/103	200	0.028	8000.000	224.400
RA-10c-7	R7	250	125/115	200	0.040	6350.000	157.080
RA-10c-8	R8	250	85/78	200	0.028	6214.286	224.400

注：1. 尺寸符号意义见图 1-1b（经本书统一）。

2. 尺寸特征（单位楔差、外直径和每环极限砖数）经本书计算。

3. 外直径计算中，尺寸 C 和 D 另加 2mm 砌缝。

英国早期水泥回转窑用厚楔形砖尺寸标准<sup>[10,11]</sup>中仅采取尺寸砖号，并且区分了碱性砖与非碱性砖（黏土砖和高铝砖）。在水泥回转窑用碱性砖尺寸标准<sup>[10]</sup>（见表 1-3）中，碱性砖的尺寸砖号由数字组成：左起首位数字表示该砖标称外直径（nominal outer diameter）（m），后两位数表示该砖的大小端距离 A（cm）。例如 A = 250mm，B = 198mm，C/D 为 103mm/96.5mm，外直径  $D_o = 8076.923\text{mm}$ （标称外直径的米数为 8）的水泥回转窑用碱性砖，其尺寸砖号写作 825。当特征尺寸与 825 相同（A = 250mm，C/D 为 103mm/96.5mm），外直径也与 825 相同（ $D_o = 8076.923\text{mm}$ ），尺寸 B = 178mm 时，这种碱性砖尺寸砖号写作 825X。英国早期水泥回转窑用黏土砖和高铝砖尺寸标准<sup>[11]</sup>中尺寸砖号的数字部分表示法与碱性砖相同，但 B = 198mm 时数字尾加 Y，B = 250mm 时数字尾加 Z。例如 A = 230mm，C/D 为 103mm/97.0mm，外直径  $D_o$  为 8050.0mm 的水泥回转窑用黏土砖或高铝砖：B = 198mm 时尺寸砖号写作 823Y；B = 250mm 时尺寸砖号写作 823Z，见表 1-4。