

窑碓结构的推力作用线

唐福恒

(北京长城工业炉技术中心 北京市 102208)

摘要 以玻璃熔窑的熔化部大碓为例对窑碓结构的推力作用线做了说明,并对两条具有极限特征的窑碓推力作用线做了重点说明。介绍了碓结构压应力的计算公式,对烤窑中可能出现的最大推力作用线和松拉条时可能出现的最小推力作用线进行了分析。

关键词 玻璃熔窑 大碓 烤窑 推力作用线

中图分类号: TQ171 文献标识码: A 文章编号: 1003-1987(2016)02-0025-07

Thrust Line of Crown Structure of Glass Furnace

Tang Fuheng

(Technical center of Beijing great wall industrial furnace, Beijing, 102208)

Abstract: Taken the melting end crown of glass furnace as example, the thrust line of crown was described. Two thrust lines with ultimate characteristic of crown were illustrated in details. Computing formula of compression stress of crown structure was presented. Maximal thrust line which may arise in heating up of furnace and minimal thrust line which may occurred when loosening lashing-strip were analyzed.

Key Words: glass furnace, crown, heating up of furnace, thrust line

1 熔化部大碓结构的受力特点及其支撑体系

1.1 理论设计的熔化部大碓结构横断面示意图

理论设计的熔化部大碓结构横断面示意图(中心轴推力线)见图1。

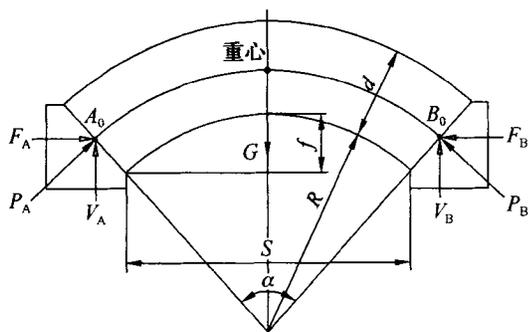


图1 窑碓中心轴推力线简图

1.2 大碓结构要素

玻璃熔窑熔化部炉膛顶盖通常采用圆弧形碓结构,一般采用楔形耐火砖砌筑而成。其结构要

素包括:碓跨度 s ,碓半径 R ,碓厚 d ,中心角 α ,碓股高 f ,碓长 L ,碓重 G 。大跨度窑碓的圆弧形断面碓厚可有不同做法:有采用全部等厚的,也有采用碓脚比碓顶厚一些的。

1.3 大碓结构的受力

(1)左右两端碓脚和碓顶中心区域是体现熔窑大碓受力情况的3个重点部位。本文中 A 和 B 分别表示左右两端碓脚,以 C 表示碓顶中心。大碓结构的受力通常可以简化为受到3个外力的作用:碓顶中心大碓自身重力 G 和左右两侧碓脚梁的斜向推力 P_A 和 P_B 。 P_A 和 P_B 大小相等,方向左右倾斜对称。

(2)左侧碓脚梁的斜向支撑力 P_A 可分解为垂直向上托力 V_A 和水平推力 F_A ;右侧碓脚梁的斜向支撑力 P_B 可分解为垂直向上托力 V_B 和水平推力 F_B 。 $V_A=V_B=G/2$,方向向上,用以平衡大碓重力 G ; $F_A=F_B$,方向相对,用以平衡两侧碓脚的水平推力。

(3)当碓结构形状不对称,或碓结构对称

但所受荷载不对称时，两侧碓脚的斜向推力就会有差别，熔化部大碓结构应避免出现这种情况。

(4) 窑碓结构中的每块碓砖也都是受到这样3个外力的作用：碓砖自重和左右两侧的斜向推力（夹持力）。

1.4 熔化部大碓结构的支撑体系

(1) 玻璃熔窑是高温熔炉，其熔化部顶盖采用圆弧形碓结构，既能构成无梁无柱的大面积顶盖，又能承受高温，这是其它结构形式无法取代的。熔化部大碓结构通常是由熔窑顶部左右两侧的钢碓脚梁（也叫钢碓碓）对称支撑在熔化部炉膛顶部两侧。钢碓脚梁又由连接在熔窑两侧钢立柱上部的支座（牛腿）支撑。大碓结构产生的斜向推力作用在钢碓脚梁上，斜向推力分解出的垂直力传给两侧支座，水平推力传给熔窑两侧钢立柱。

(2) 钢立柱的下端直接或间接连接于窑底横向次梁上（也有用下拉条的），上端采用横向拉条或其它类型的拉杆，构成为“次梁—立柱—拉条”横向钢结构支撑体系。在此体系中，以立柱上的支座承载大碓的重量，以钢立柱上端的横向拉条和下端的横向次梁共同承载大碓的水平推力，保持熔化部大碓结构的整体安全稳定。

2 窑碓结构的推力作用线

2.1 将分散作用力合成为一个合力

(1) 沿熔窑纵向取出长度为 L_1 的某一段大碓作为分析研究对象。窑碓结构的每块碓砖承受的两侧面夹持力（或叫支撑力）是分散作用在每块碓砖的左右两侧整个砖面上的。

(2) 为了分析研究方便，根据力的合成原理，可以把作用在 L_1 段大碓同一排碓砖的同一个侧面上的全部分散力简化成为一个合力。合力的大小及其作用点位置都按力的合成原理确定，这是各类结构计算中常用的做法。

2.2 窑碓推力作用线

(1) 在 L_1 段大碓上任意相邻的两列碓砖之间

都有一对大小相等、方向相反的合力，此合力是在同一个作用点、以推力形式相互作用于相邻两排碓砖的侧面上，即从左侧碓脚到右侧碓脚每相邻的两列碓砖之间都有这种大小相等、方向相反的合力及其作用点。

(2) 可以把 L_1 段大碓上这些合力的作用点用连线连接起来，这条连接线实际是多段折线，段数与每环碓砖的数量相等，粗看这条连接线是“近似圆弧线”。 L_1 段大碓上的每一列碓砖其砖面上的合力作用点都在这条近似圆弧线上，作用方向也都是沿着这条近似圆弧线的。这条近似圆弧线就是 L_1 段大碓的“窑碓推力作用线”，也有的书中称之为“支撑线^[1]”。

(3) 如果不是用合力的做法分析研究某一段大碓，而是分析大碓的任意一个横断面，结果也是相同的，整个圆弧形大碓的所有位置横断面上都有一条窑碓推力作用线。对整个熔窑大碓来说，实际上是有个圆弧形推力作用面存在于大碓的全宽全长范围内。大碓任意位置的横断面与此圆弧形推力作用面相交，就可得到此断面处的窑碓推力作用线。

2.3 窑碓不同位置可以出现不同的推力作用线

窑碓结构中各个不同部位的情况是多变的，会受到许多因素的影响，如：不同砖块的楔形尺寸误差、砖材体积密度差、砌筑泥口大小、局部温度高低、拉条松紧、保温强弱等。因此，窑碓不同位置横剖面可以出现不同弧形的推力作用线，包括对称的和不对称的，碓脚推力大的和小的，弧形线光滑的和带突变点的等等，存在于不同位置的窑碓横断面内。

2.4 要尽量避免出现不对称的推力作用线

(1) 设计的熔化部大碓结构是对称的，受力也是对称的，推力作用线也应是对称的。但真实的大碓在某些因素的影响下，会有一些不对称的推力作用线出现，应当尽量避免出现不对称的窑碓推力作用线。如果在哪个部位出现了推力作

用线突变点，就可能在突变点处出现局部的拱起或凹陷，此部位就可能是大碓的安全薄弱区。

(2) 在大碓的砌筑阶段，就特别强调从熔窑两侧碓脚开始砌筑的整个过程中，对大碓左右两边的“对称性、同步性、一致性”严格要求。目的就是要尽量使整个大碓所有区域能够出现良好对称的窑碓推力作用线。

2.5 具有极限特征的两条推力作用线

(1) 虽然每一窑碓可以出现多条不同弧形的推力作用线，但是窑碓不同位置的每个横断面内却只能有一条推力作用线。在窑碓不同横断面可能出现的各种不同推力作用线中，可以找出具有极限特征的两条推力作用线：“最大推力作用线”或“最小推力作用线”。

(2) 最大推力作用线或最小推力作用线都具有极限特征：极点性、极值性、界限性。这两条推力作用线是由熔窑两侧碓脚和碓顶3个部位内的不同极点分别构成的近似圆弧线，在各自不同的3个极点处窑碓的推力都达到了极值（允许的最大值或最小值）。

(3) 对于某一大碓来说，都仅是在极少数情况下有可能在某个断面处出现最大推力作用线或最小推力作用线，而不是每个大碓必定会出现，也不是大碓所有断面处同时都出现。大多数情况下是不会出现最大推力作用线或最小推力作用线的，而是介于最大推力作用线和最小推力作用线之间。

2.6 最大推力作用线或最小推力作用线表明窑碓已经达到安全极限

(1) 最大推力作用线表示两侧碓脚处的水平推力已经达到了允许的最大值。超过这个最大值就会使窑碓顶部出现向上的V形开口裂缝，同时两侧碓脚也要出现向下的倒V形开口裂缝。局部出现微小开裂也是允许的，但不能过大，否则就可能造成开裂反面处的碓砖受到严重挤压而碎裂，就有可能导致窑碓垮塌。

(2) 同样最小推力作用线表示两侧碓脚处的水平推力达到了允许的最小值。再减小水平推力就会使窑碓顶部出现向下的倒V形开口裂缝，同时两侧碓脚也要出现向上的V形开口裂缝。裂缝达到一定深度时，也会导致窑碓垮塌。

(3) 这是窑碓结构具有的特殊性，不但有允许的最大推力，还有允许的最小推力。碓脚的水平推力只能在最大值与最小值之间变化。因此，对于窑碓结构来说，最大推力作用线和最小推力作用线都是具有安全意义的限定界限。在烤窑中或运行中个别熔窑就曾出现过碓塌落，就是因为超过了这两个限定界限。

2.7 熔窑两侧碓脚和碓顶是大碓结构的集中安全薄弱区

由于极点处是容易出现裂缝、导致碓砖碎裂的部位，所以玻璃熔窑两侧碓脚和碓顶区域是可预测到的大碓结构集中的安全薄弱区。这3个区域在整个熔化部大碓纵向构成3条安全薄弱带。所以有的大碓保温要把碓顶和两侧碓脚分别留出一定宽度不保温，这是为了能够容易观察到这3个区域可能出现的情况。

2.8 熔窑两侧碓脚和碓顶之外区域的安全性

(1) 碓结构的推力作用线只要处在碓弧中心线的1/3碓厚范围内，就不会在碓的上下表面出现过大的压应力，也就不会出现碓砖碎裂的危险。

(2) 窑碓达到最大推力作用线或最小推力作用线情况时，只是在两侧碓脚和碓顶这3点处达到了极限值，而在其余位置推力作用线仍处于碓弧中心线的1/3碓厚范围内，所以在其余区域仍有一定的安全储备，是相对比较安全的区域。

(3) 如果在两侧碓脚和碓顶之外哪个区域出现了推力作用线的突变点，并有可能超出碓弧中心线的1/3碓厚范围，那也会出现压应力过大，有出现局部碓砖碎裂的危险。有的玻璃熔窑在运行的中后期，出现大碓局部穿透性的漏火大孔洞，有可能就是此种原因造成的。

2.9 烤窑过程中对窑碓膨胀的调整

烤窑过程中对窑碓膨胀的调整可有不同的操作，有的采用“显升显降”来调整窑碓的膨胀（比如升10 mm降7 mm），烤窑过程中松拉条次数较少，烤窑时间较短，大约为2周，国外有的专业烤窑公司采用此操作；也有采用“微升微降”操作的（如升3 mm降2 mm），烤窑过程中松拉条次数较多，烤窑时间较长，为3~4周，国内一般采用“微升微降”。

3 窑碓结构压应力的计算公式

3.1 窑碓各点的压应力都是能够按照静力学的公式计算的

(1) 如果窑碓推力作用线处于碓厚的中心点位置，则此处碓砖整个侧面上所受压应力是均匀分布的，砖面上各点的压应力是相等的。若推力作用线偏离碓厚的中心点，则此处碓砖整个侧面上所受的压应力就不相等了。

(2) 碓脚处的水平推力作用点与碓顶处碓厚的中心点不是在同一直线上，这相当于偏心压杆的受力，要产生压缩与弯曲组合的应力。窑碓各点的压应力都是能够按照静力学的公式计算的。

3.2 窑碓最大压应力和最小压应力的计算公式

计算公式中的代号： F —水平推力， A —窑碓的纵断面面积， d —碓厚， S —碓长， e —推力作用点的偏心距， M —窑碓受偏心压力产生的弯矩， W —窑碓的剖面模量。

为了容易理解计算公式，每一公式中都包含了：起始计算式、中间转换式、最后结果式，实际计算中使用最后结果式。

窑碓的最大压应力和最小压应力计算公式如下：

(1) 最大压应力计算的通用公式（压应力与弯曲应力之和）：

$$\sigma_{\max} = \frac{F}{A} + \frac{M}{W}$$

$$\begin{aligned} &= \frac{F}{d \cdot S} + \frac{F \cdot e}{S \cdot d^2} \\ &= \frac{F}{d \cdot S} + \frac{6F \cdot e}{S \cdot d^2} \\ &= \frac{F}{d \cdot S} \left(1 + \frac{6e}{d}\right) \end{aligned} \quad (1)$$

(2) 最小压应力计算的通用公式（压应力与弯曲应力之差）：

$$\begin{aligned} \sigma_{\min} &= \frac{F}{A} - \frac{M}{W} \\ &= \frac{F}{d \cdot S} - \frac{F \cdot e}{S \cdot d^2} \\ &= \frac{F}{d \cdot S} + \frac{6F \cdot e}{S \cdot d^2} \\ &= \frac{F}{d \cdot S} \left(1 - \frac{6e}{d}\right) \end{aligned} \quad (2)$$

(3) 当 $e = d/6$ 时最大压应力的极限情况（偏心受压的最大压应力）：

$$\begin{aligned} \sigma_{\max} &= \frac{F}{A} \left(1 + \frac{6e}{d}\right) \\ &= \frac{F}{d \cdot S} \left(1 + \frac{6e}{d}\right) \\ &= \frac{F}{d \cdot S} \left(1 + \frac{6 \times \frac{d}{6}}{d}\right) \\ &= \frac{F}{d \cdot S} \times 2 \end{aligned} \quad (3)$$

(4) 当 $e = d/6$ 时最小压应力的极限情况（偏心受压的最小压应力）：

$$\begin{aligned} \sigma_{\min} &= \frac{F}{A} \left(1 - \frac{6e}{d}\right) \\ &= \frac{F}{d \cdot S} \left(1 - \frac{6e}{d}\right) \\ &= \frac{F}{d \cdot S} \left(1 - \frac{6 \times \frac{d}{6}}{d}\right) \\ &= 0 \end{aligned} \quad (4)$$

(5) 当 $e > d/6$ 时的最大压应力（如 $e = d/5$ ，偏心受压超过最大极限的压应力）：

$$\begin{aligned} \sigma_{\max} &= \frac{F}{A} \left(1 + \frac{6e}{d}\right) \\ &= \frac{F}{d \cdot S} \left(1 + \frac{6e}{d}\right) \\ &= \frac{F}{d \cdot S} \left(1 + \frac{6 \times \frac{d}{5}}{d}\right) \\ &= \frac{F}{d \cdot S} \times 2.2 \end{aligned} \quad (5)$$

(6) 当 $e > d/6$ 时的最小压应力 (如 $e = d/5$, 偏心受压超过最小极限的压应力):

$$\begin{aligned} \sigma_{\min} &= \frac{F}{A} \left(1 - \frac{6 \cdot e}{d}\right) \\ &= \frac{F}{d \cdot S} \left(1 - \frac{6 \cdot e}{d}\right) \\ &= \frac{F}{d \cdot S} \left(1 - \frac{6 \times \frac{d}{5}}{d}\right) \\ &= \frac{F}{d \cdot S} \times (-0.2) \end{aligned} \quad (6)$$

计算出的压应力如果出现负值, 说明此处已经开裂。因此两侧窑脚和窑顶这3点处推力作用点的位置移动, 不论是向上移动还是向下移动, 都不能明显超过窑顶弧形中心线 $1/6$ 的窑厚 ($e = \pm d/6$), 超过就出现开裂。

4 窑顶结构的最大推力作用线

4.1 最大推力作用线状态的窑顶横断面示意图

最大推力作用线状态的窑顶横断面示意图 (最大推力作用线状态) 见图2。

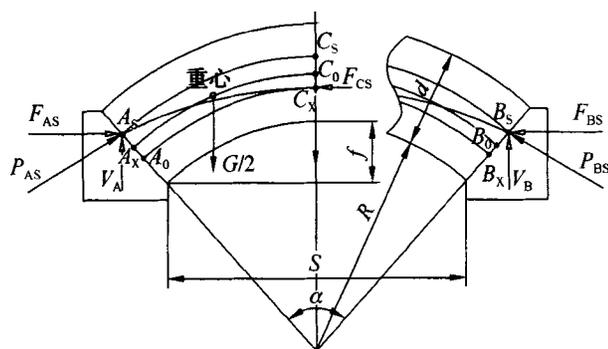


图2 窑顶最大推力线简图

4.2 最大推力作用线的构成

(1) 构成最大推力作用线的3个极点分别是: ①左侧窑脚斜线上距大窑内表面 $2/3$ 窑厚处的 A_s 点; ②窑顶垂直中心线上距大窑内表面 $1/3$ 窑厚处的 C_x 点; ③右侧窑脚斜线上距大窑内表面 $2/3$ 窑厚处的 B_s 点。

(2) 由“ A_s 、 C_x 、 B_s ”这3个极点构成的近似圆弧线, 其窑脚推力作用线与水平夹角最小, 所以水平推力 F_{AS} 和 F_{BS} 达到最大。但垂直分力 V_A 和 V_B 是始终不变的, 总是等于大窑的半重。烤窑过程中如果采用“显升显降”操作, 当拉条涨得很紧时就有可能出现最大推力作用线。

4.3 松拉条前窑顶跨度不变窑顶区域升高

在烤窑升温过程中, 拉条螺母不松动情况下窑顶的跨度可以认为是固定不变的 (拉条受热膨胀伸长不考虑)。随着窑内温度的升高, 窑顶膨胀, 整个窑顶结构也逐渐膨胀。由于窑顶长度不变, 致使窑顶受到的压应力增大, 并会导致窑顶顶部区域逐渐升高。

4.4 烤窑升温相当于在升温前水平推力基础上又增加了“新的推力”

对于整体窑顶结构来说, 随着烤窑温度的升高, 窑脚水平推力逐渐增大, 相当于在升温前水平推力的基础上又逐步增加了“新的推力”。温度越高新的推力越大, 由于窑脚处新的推力是偏离窑顶处窑厚的中心点的, 就使整体窑顶受到了偏心压力的作用, 就要产生压缩与弯曲的组合应力。

4.5 烤窑过程中每次松拉条前窑顶都有可能达到最大推力作用线状态

(1) 烤窑过程中随着窑内温度的升高, 窑脚受“新的推力”作用产生的“负弯矩^[1]”使窑顶顶部向上弯曲, 窑顶逐渐上升, 窑顶顶部 (锁砖处) 窑外侧压应力逐渐变小, 而窑内侧压应力逐渐变大。两侧窑脚部位则相反, 窑外侧压应力逐渐变大, 窑内侧压应力逐渐变小。

(2) 松拉条前窑顶处水平推力作用点的变

化：随着碓顶区域的逐步升高，碓顶水平推力作用点就会向下逐渐移动，允许最大可移动到 C_x 点。用“ F_{cx} ”表示作用在碓顶 C_x 点的水平推力。此时碓顶的外表面压应力允许减少到0，碓顶内表面压应力允许增加到平均压应力的2倍。（见前面的压应力计算公式（2））。

（3）两侧碓脚处水平推力作用点的变化：碓脚水平推力作用点就会沿碓脚斜线向上逐渐移动，允许最大可移动量左侧到 A_s 点、右侧到 B_s 点。用“ F_{As} ”和“ F_{Bs} ”分别表示作用在左右侧碓脚的水平推力。此时碓脚处的窑外侧表面压应力增加到平均压应力的2倍，窑内侧表面压应力为0。

（4）大碓拉条的变化：此时大碓拉条明显的张紧拉直，达到了允许的最紧状态，这就是烤窑期间松拉条前熔窑大碓最大推力作用线的安全临界点。

5 窑碓结构的最小推力作用线

5.1 最小推力作用线状态的窑碓横断面示意图

最小推力作用线状态的窑碓横断面示意图（最小推力作用线状态）见图3。

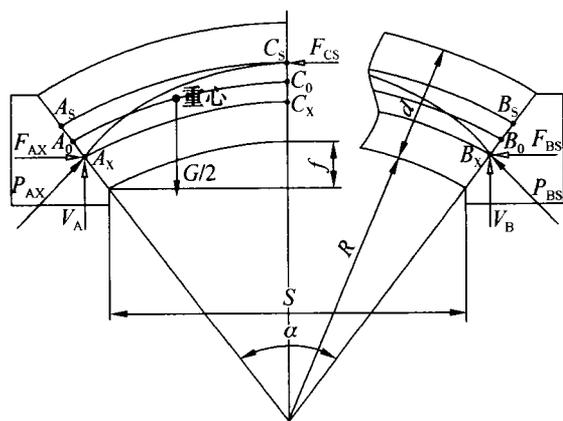


图3 窑碓最小推力线简图

5.2 最小推力作用线的构成

（1）构成最小推力作用线的3个极点分别是：①左侧碓脚斜线上距大碓内表面1/3碓厚处的 A_x 点；②碓顶垂直中心线上距大碓内表面2/3碓厚

处的 C_s 点；③右侧碓脚斜线上距大碓内表面1/3碓厚处的 B_x 点。

（2）由“ A_x 、 C_s 、 B_x ”这三个极点构成的近似圆弧线，其碓脚推力作用线与水平夹角最大，所以水平推力 F_{Ax} 和 F_{Bx} 达到最小。垂直分力 V_A 和 V_B 总是等于大碓的1/2重量。烤窑过程中，松拉条时如果松得过分了就可能出现最小推力作用线的情况。

5.3 松拉条过程中窑碓跨度逐渐增加

在松拉条过程中，熔窑两侧立柱的上端分别向熔窑外部的两侧倾斜，使窑碓的跨度逐渐增加，从而使碓砖本身受到的压应力逐渐减轻，并会出现窑碓顶部区域逐渐下降，这会导致窑碓推力线向最小推力线趋势变化。

5.4 松拉条相当于对窑碓两侧碓脚施加了一对“假想拉力”

松拉条使拉条的拉力减小，拉条螺母松出的越多拉条拉力减小得越多，窑碓的跨度也变得越大。松拉条相当于对已经受到很大水平推力作用的窑碓两侧碓脚施加了与原水平推力反方向的一对“假想拉力”。拉条松出得越多相当于这种“假想拉力”也越大，对原受到的水平推力抵消掉的越多，从而使碓脚水平推力减少。碓脚的这种“假想拉力”对窑碓顶部来说是偏心受拉的，要产生拉伸与弯曲的共同作用。

5.5 烤窑松拉条过程中窑碓可能达到最小推力作用线状态

（1）烤窑过程中随着拉条螺母的松出，碓脚所受的“假想拉力”对碓顶中心点产生的“正弯矩”使碓顶向下逐渐沉降。窑碓顶部（锁砖处）窑外侧的压应力逐渐变大，而窑内侧的压应力逐渐变小。两侧碓脚部位则相反，窑外侧的压应力逐渐变小，窑内侧的压应力逐渐变大。

（2）松拉条过程及结束后，碓顶处水平推力作用点的变化是：随着碓顶区域的逐步下沉，碓顶水平推力作用点会向上逐渐移动，最大可移动到 C_s 点。用“ F_{cs} ”表示作用在碓顶 C_s 点的水平

推力。此时碓顶的外表面压应力增加到平均压应力的2倍，碓顶内表面压应力减少到为0。

(3) 松拉条导致两侧碓脚处水平推力作用点的变化是：碓脚水平推力作用点就会沿碓脚斜线向下逐渐移动，最大移动量左侧可到 A_x 点、右侧可到 B_x 点。用“ F_{Ax} ”和“ F_{Bx} ”分别表示作用在左右侧碓脚的水平推力。此时碓脚处的外表面压应力减少到为0，内表面压应力增加到平均压应力的2倍。

(4) 大碓拉条的变化：大碓拉条明显出现松弛下挠，达到了允许的最松状态，这就是烤窑期间松拉条时熔窑大碓最小推力作用线的安全临界点。

6 结论

(1) 无论在烤窑或是在熔窑运行过程中，

并不是很容易就会出现最大或最小推力作用线的，只要碓砖质量合格，砌筑认真，烤窑良好，运行平稳，完全可以不出现或者极少出现。

(2) 碓结构的推力作用线只要处在碓弧中心线的1/3碓厚范围内 ($e = \pm d/6$)，就不会在碓的上下表面出现过大的压应力，也就不会出现碓砖碎裂的危险。

参考文献

- [1] 沃尔夫冈·特里尔. 玻璃熔窑构造与运行特性[M]. 上海: 全国玻璃搪瓷工业科技情报站, 1989
- [2] 刘鸿文, 主编. 材料力学[M]. 高等教育出版社, 1992.9
- [3] 豆照良, 陈东, 张文海. 工程力学[M]. 航空工业出版社, 2010.4

秦皇岛玻璃工业研究设计院节能技术所

- ◆全氧燃烧玻璃生产线工程咨询、设计和技术服务
- ◆浮法玻璃0号小炉全氧助燃系统供货、安装调试
- ◆全氧燃烧喷枪及燃烧系统供货、安装调试
- ◆浮法玻璃在线Low-E镀膜、增透膜和TCO玻璃技术的合作开发
- ◆电熔窑、马蹄焰窑玻璃生产线设计和技术服务
- ◆玻璃原料COD值及Redox数的分析控制技术
- ◆化学钢化/单片防火玻璃技术和设备转让
- ◆玻璃熔窑富氧燃烧技术节能改造

联系地址：河北省秦皇岛市河北大街西段91号 (066004)

联系人：赵恩录

联系电话：0335-5911522 (兼传真) 13903338152