

采用简化计算公式进行格子体设计

唐福恒

(北京长城工业炉技术中心 北京市 102208)

摘要: 文章较全面的总结了玻璃熔窑蓄热室格子体设计的思路。指出了玻璃熔窑炉膛内的火焰温度和炉壁温度的关系,助燃空气的预热温度和排出烟气的温度是互相锁定的关系,达到助燃空气预热温度是蓄热室格子体设计的目标。重点介绍了玻璃熔窑蓄热室格子体设计的简化计算公式,以及国投线 500t/d 浮法玻璃熔窑蓄热室按简化计算公式进行格子体设计的情况。还采用 TBCO 经验公式对计算结果进行了对比分析。

关键词: 浮法玻璃 熔窑 蓄热室 格子体

秦皇岛耀华国投线浮法玻璃熔窑,设计熔化能力 $P = 500t/d$,以重油为燃料,重油热值 $Q_d = 40000kJ/kg$,设计单位能耗 $r = 6900kJ/kg$ 玻璃。采用全连通蓄热室,条形砖格子体,格孔尺寸 165×165 ,编篮式排列。该熔窑 1996 年建成投产,2008 年停窑,连续运行 12 年多。本文以该熔窑为例介绍蓄热室格子体设计情况。

1. 玻璃熔窑蓄热室格子体设计思路

1.1. 玻璃熔窑熔化区炉膛内的实际火焰温度与炉壁温度:

①. 玻璃熔窑属于大型高温热工设备,炉膛容积宽大,火焰阻力小,采用喷射式燃烧,燃料的燃尽率高。在熔化区炉膛内,常用的几种不同燃料能够产生的实际火焰温度分别可达 $1750 \sim 1950^\circ\text{C}$ 以上。在玻璃熔窑运行中,并不是熔化区从头到尾都要求达到如此高温。而只需要沿熔窑纵向的“热点”区域达到最高温度,热点前后温度逐渐降低,这是通过调整各小炉的燃料及助燃空气供给量进行控制的。熔化区内最高温度区域与最低温度区域的实际火焰温度相差大约可超过 200°C 。

②. 炉膛火焰温度很难测量,即使能够测出火焰温度,也不能说明炉膛该区域已经普遍达到了火焰的温度。而炉膛内壁温度比较容易测量,熔化区纵向各部位的炉膛内壁温度,是由各部位的实际燃料耗量、充满炉膛的火焰温度、窑壁结构、窑外环境共同作用下炉膛内壁的平衡温度。对于燃重油、天然气等高热值燃料来说,炉膛内壁温度要比本区域实际火焰温度低约 $200 \sim 300^\circ\text{C}$,对于燃发生炉煤气来说要低约 $150 \sim 250^\circ\text{C}$ 。

③. 玻璃熔窑熔化温度制度的山形曲线就是按炉膛内壁温度制定的,最高温度点通常在熔化区的中后部,此点炉膛内壁温度(通常指容易测量的小炉垛处)要求达到 $1550 \sim 1590^\circ\text{C}$,有的甚至更高。此点被称为“热点”。热点前和热点后温度均比热点逐渐降低,熔窑入口的前脸墙处大约为 $1420 \sim 1450^\circ\text{C}$,卡脖入口处大约为 $1400 \sim 1420^\circ\text{C}$ 。

1.2. 进入蓄热室格子体的烟气温度:

①. 玻璃熔窑普遍采用立式箱型蓄热室结构,配有与小炉尾部连接的废气入口和格子体上部的大集气室。为了充分利用废气所带的热量和达到很高的助燃空气预热温度,需将蓄热室的上集气室尽量靠近熔化区炉膛结构,因此需将整个主窑体结构抬高。

②. 从熔化区炉膛进入小炉的烟气温度,就是对应各小炉的熔化区炉膛内的实际火

焰温度。小炉结构的四壁一般是用耐冲刷、耐腐蚀的电熔砖砌筑而成，但电熔砖的导热能力也很强。虽然小炉四壁的外层都做了保温，但高温烟气在经过小炉到达蓄热室格子体之前，还是降温了很多，大约可降低超过 200℃。

③. 烟气进入格子体时，仍以对应熔窑热点区域的烟气温度最高，要远高于 1450℃，而对应热点前和热点后小炉区域的烟气温度逐渐降低一些；即使在熔窑稳定的运行中，进入格子体的烟气温度和出格子体的空气预热温度都是随时间而变化的。通常在 20 分钟的换向周期时间内温度变化介于 25℃和 35℃之间。

④. 做蓄热室热平衡计算时设定的进入格子体烟气平均温度 1450℃，是包括两个含义的平均温度：其一是指全窑烟气进入格子体的平均温度，其二是指每个换向周期时间内烟气进入格子体的平均温度。烟气排出格子体平均温度也同样包括这两个含义。

1.3. 格子体内的传热属于不稳定传热：

①. 玻璃熔窑的蓄热室需要成对设置，从熔化区炉膛来的高温烟气在一侧蓄热室的格子体内向下流动逐渐释放热量被格子砖吸收；与此同时，另一侧蓄热室内的格子砖逐渐释放热量被向上流动的助燃空气（或煤气）吸收。如此交替循环运行，每 15~20 分钟交换一次，称之为换向周期。

②. 由于换向周期时间短，格子体内任何一点的烟气温度或助燃空气（或煤气）温度和格子砖温度，都在随时间而处于或上升或下降的周期循环变化之中。所以蓄热室格子体内的热交换过程属于工况不稳定传热。

③. 不稳定传热问题，可以用数学解析求解，但情况较为复杂时，数学解析就很困难。一般在工程上常用简化近似方法进行计算，玻璃熔窑蓄热室格子体就属于这种情况。

1.4. 玻璃熔窑蓄热室格子体存在很多可变因素：

蓄热室内格子砖的类型及其排列方式、格子砖的材料等都对传热有影响，燃料的种类对气体辐射起着很大作用。因此，格子体存在很多可变因素：格子砖的类型有不同、排列方式有不同、格子体的孔径大小有不同、孔的壁厚有不同、孔内气流速度有不同、格子砖不同材料的热容量不同、导热系数不同、不同燃料产生的烟气量不同、成分不同、传热特性不同、全窑各个小炉对应的格子体配置情况不同、烟气分配量不同、蓄热室腔道内通过各格子孔的烟气和空气流量分配会出现不均匀、同体积的格子体可有很多种长宽高尺寸组合、等等，这些可变因素对格子体的换热能力都会有影响。

1.5. 原料挥发分带入格子体热量与格子体结构散热：

①. 从蓄热室格子体热平衡计算来分析，进入格子体的烟气总热量（收入热）有三个支出去向，其一是助燃空气预热吸收的热量，其二是格子体结构自身散失的热量，其三是从炉条碓下排出烟气带走的热量，这一进三出是能量平衡关系。

②. 国内外普遍认定全窑烟气进入格子体的平均温度是 1450℃，计算可知，如果只考虑 1450℃烟气带入热量，格子体的热平衡就很难达到，烟气带入的热量不足与三项支出热量平衡。经分析找到原因，收入热应包含原料挥发分随烟气被带入蓄热室所含的热量。如果不考虑原料挥发分被带入的热量，则烟气平均温度就应高于 1450℃而要达到接近 1480℃。

③. 原料挥发分随烟气被带入蓄热室的热量最高可达烟气带入总热量的 6%左右，格子体结构散热约占烟气带入总热量的 5~10%，这两项百分数都有一定的变化幅度。

④. 对多座玻璃熔窑格子体的热平衡计算后可知:取原料挥发分随烟气带入热量增加 2%与格子体结构散热 5%组合,能达到格子体热平衡;若都取较高百分比,也容易实现格子体热平衡。这里取高或取低只关系到格子体的热利用率,不影响其它热量关系。

1.6. 玻璃熔窑烟气热量的 50~70%可以得到回收:

①. 随助燃空气预热温度的高低不同,可以将烟气热量的 50~70%以助燃空气(和燃料气体)预热的形式回收入熔化区炉膛内循环燃烧利用,能够同时产生提高燃料的燃烧火焰温度和节能减排的综合效果。如果还想更高比例得到回收,就需要采用特殊措施。

②. 提高火焰温度情况:助燃空气预热温度从 1100℃提高到 1200℃,使用重油、天然气、焦炉煤气燃料情况下,大约可提高火焰温度 50℃;使用发生炉煤气燃料大约可提高火焰温度 40℃。

③. 节能减排情况:助燃空气预热温度提高 100℃,单位能耗大约可降低 5%左右,同时燃烧产生的污染物排放量也减少 5%左右。

1.7. 助燃空气预热温度与排出烟气温度的关系:

燃重油的玻璃熔窑,进入格子体烟气平均温度 1450℃情况下,助燃空气平均预热到 1100℃,排烟温度约为 600℃左右,是容易实现的;助燃空气预热到 1200℃时,排烟温度则要低于 500℃,通过增加格子体高度加大换热面积也能够实现;助燃空气的预热温度越高,排出烟气的温度就越低,实现起来越不容易。助燃空气预热温度和排出烟气的温度是互相锁定的关系。不同燃料的空气预热温度与排烟温度有不同的锁定关系。

1.8. 提高助燃空气预热温度是格子体设计的目标:

①. 格子体设计是整个玻璃熔窑设计的重要内容之一,设定助燃空气预热温度很容易,能够达到却是很难的。助燃空气预热温度取决于蓄热室格子体的实际换热能力:格子体要有足够的储热能力,要有适宜的换热面积,还要有对应的综合换热系数。

②. 若格子体换热面积不足,肯定达不到设想的助燃空气预热温度,但也不是格子体的换热面积越大越好。即使换热面积合适,若格子体的体型结构不合理,比如格子体的平面尺寸太大,而高度不足,属于矮胖形状,就会出现烟气、空气在格子孔内的流量分配不均匀,甚至出现部分烟气与空气路径不同,必然会出现烟气热量不能按要求传递给助燃空气,同样达不到设定的助燃空气预热温度。

③. 设计优良的格子体是能够使烟气的热量尽量多地传递给助燃空气,使助燃空气预热温度尽量得到提高。

2. 玻璃熔窑蓄热室格子体设计的简化计算公式

2.1. 格子体设计的经验做法或经验公式:

①. 格子体内的传热情况很复杂,采用传热计算来进行格子体设计是很困难的。以往做格子体设计时,是以熔化区面积做基数,按 25~45 倍熔化区面积确定格子体换热面积,差别范围很大、很粗略。后来出现了做格子体设计的一些经验做法或经验公式,是以每秒助燃空气体积量为基数进行格子体设计,准确度有所提高,简单而实用。

②. 原国际驰名烧结耐火材料供应商德国 DIDIER 公司(现已被 RHI 公司收购)提出的经验做法^[1],是以每秒助燃空气体积量为计算基数,根据格子体孔径大小,按每秒每标准立方米(Nm³/s)助燃空气,配置定量体积的格子体。这可称之为“单位助燃空气的格子体体积变量”,根据此体积变量和单位助燃空气量即可求出熔窑单侧蓄热室的格

子体体积, 然后就可根据其它给定条件进行格子体设计了。

③. 美国 TECO 公司提出的经验公式^[2], 也是以每秒助燃空气体积量为计算基数, 根据助燃空气要达到的预热温度, 按 Nm^3/s 助燃空气, 配置定量换热面积的格子体。这可称之为“单位助燃空气的格子体换热面积变量”, 并给出了以此换热面积变量计算助燃空气预热温度的高次方计算公式。

④. 采用 TECO 经验公式做格子体设计时, 首先要确定出助燃空气的预热温度, 再根据高次方计算公式求出能够达到此助燃空气预热温度的“单位助燃空气格子体换热面积变量”(有时要经过试算调整)。然后根据求出的换热面积变量和单位助燃空气量, 计算出单侧蓄热室格子体需要的换热面积, 最后根据其它给定条件完成格子体设计。TECO 经验公式直接与格子体换热面积挂钩, 更符合实际换热情况。

2.2. 寻求准确程度更高的格子体计算公式:

①. 在玻璃熔窑运行中, 虽然两侧蓄热室格子体内的烟气→格子砖→助燃空气这种热量传递是瞬时变化的量, 是不稳定传热; 但是在交替循环的每个换向周期中, 烟气释放出的总热量和助燃空气吸收的总热量, 确都是基本稳定不变的量, 这种情况可以定义为“固定周期时间内具有稳定的总传热量”。

②. 无论多么复杂的传热结构, 只要符合“固定周期时间内具有稳定的总传热量”, 就应可以将这个稳定的总传热量用计算公式来表达。任何传热结构不管其多么复杂, 都有其自身结构所决定的、固有的总传热系数(单位面积单位时间传热量)与其总传热面积。有了总传热系数和总传热面积, 并确定出温度差, 三者的乘积就等于总传热量。

③. 对于玻璃熔窑蓄热室格子体来说, 通常给定条件是进出格子体的烟气和助燃空气的温度以及构成格子体的不同格子砖的相关数据。根据助燃空气要达到的预热温度, 通过格子体热平衡计算可求出需要的总传热量, 如能求出格子体的总传热系数, 就能顺利地求出需要的格子体总传热面积, 也就能很容易完成格子体的设计。蓄热室格子体设计最关键的问题是根据给定条件求出每个换向周期中格子体的总传热系数。

④. 《工业炉设计手册》^[3]提供了一种蓄热室格子体总传热系数的计算方法, 是将整个格子体总传热系数“K”分解成上下两部分计算, 然后取上部和下部的综合传热系数的平均值作为整个格子体的总传热系数。可以将此计算法称之为玻璃熔窑蓄热室格子体设计的“简化公式”算法。

⑤. 此算法在《玻璃窑炉热工计算及设计》^[4]中也有介绍, 两者表述方式略有不同, 实质内容一致、计算结果很相近, 本文一并进行介绍。

2.3. 格子体设计“简化公式”介绍:

①. 《工业炉设计手册》的蓄热室格子体上下部的综合传热系数计算公式:

$$K_s \text{ 或 } K_x = \frac{1}{\frac{1}{a_k Z_k} + \frac{1}{3} \left(\frac{1}{\delta \gamma_z C_z} + \frac{4\delta}{3\lambda_z Z_0} \right) + \frac{1}{a_y Z_y}} \left(\text{kcal}/\text{m}^2 \cdot \text{周期} \cdot \text{C} \right) \text{-----}$$

(1)

《玻璃窑炉热工计算及设计》蓄热室格子体上下部综合传热系数计算公式表述方式与上式略有不同, 为了进行对比需将两式改为同一表述形式, 改后仅在两式分母的中间

段有些差别，其余相同：

$$K'_s \text{ 或 } K'_x = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_k Z_k} + 0.4 \left(\frac{2}{\delta \gamma_z C_z} + \frac{\delta}{2 \lambda_z Z_0} \right) + \frac{1}{\alpha_y Z_y}} \left(\frac{\text{kcal}}{\text{m}^2 \cdot \text{周期} \cdot \text{°C}} \right) \text{ ----}$$

(2)

注：公式（1）中 δ 为格子砖厚度之半，

公式（2）中 δ 为格子砖厚度，

其余变量两式相同：

α_k, α_y —分别代表空气、烟气与格子砖之间的传热系数，

γ_z, C_z, λ_z —分别代表格子砖的容重、比热容、导热系数，

Z_k, Z_y, Z_0 —分别代表空气、烟气周期时间和全周期时间 $Z_0 = Z_k + Z_y$ 。

②. 所谓格子体上部和下部，只是虚拟概念性的说法，并没有给出对格子体进行划分上下的界限，也不是要把整个格子体分解为上下两部分、或两段分别进行传热系数计算。实际是以格子体顶面和底面处的烟气和助燃空气的流速、温度与格子体顶部和底部格子砖的相关数据为变量，分别代表格子体上部和下部的给定条件，进行格子体上下部的综合传热系数计算的。

③. 格子体上部和下部的综合传热系数计算采用同一公式，是因为上下部的传热形式是完全相同的，只是变量数值不同而已。这两个计算公式的时间单位为“周期”，是指空气（或烟气）的换向周期时间，一般为 15~20 分钟，计算中需要换算为小时。（计算公式中采用的是老标准的单位制，本文照用）。

④. 烟气在格子体内放热过程中，烟气对格子砖的传热系数包括对流传热系数和辐射传热系数，是这两个系数之和；而助燃空气在格子体内吸热过程中，格子砖对助燃空气只有对流传热系数，没有辐射传热系数，因为空气无吸收热辐射能力。

⑤. 蓄热室格子体内的传热包括传导、对流、辐射三种方式。两个公式分母显示的格子体传热总热阻同为三部分组成：前部为助燃空气传热系数构成的热阻，后部为烟气传热系数构成的热阻，中部内容应属于格子砖孔径壁厚（格子砖厚度）方向的传导传热构成的热阻。格子砖壁厚方向的传热是格子体总传热系数计算的主体，在这里应当是对格子体繁琐复杂的传热过程进行了大幅度的简化处理而得出的近似计算表达式。

⑥. 在本算法中，给出了格子体上、下部的综合传热系数计算公式。还给出了从属于上、下部综合传热系数计算公式的格子体内烟气辐射传热的子公式和计算图，以及分别给出了编篮式、西门子式等四种类型格子体内烟气或空气的对流传热计算的子公式和计算图。

⑦. 该算法没有具体介绍属于格子砖传导传热的计算公式，但在上下部的综合传热系数计算公式中包含有传导传热的计算内容。计算公式中有格子砖的厚度（格子孔的壁厚）、格子砖的比热容、导热系数、格子砖容重、换向周期时间等变量，这些都是与格子砖的传导传热能力相关的参数。

2.4. 确定蓄热室腔道平面尺寸和计算格子孔内气体流速：

①. 在进行蓄热室腔道设计时，需首先根据熔窑两侧的小炉中心线分布情况确定出

沿熔窑纵向的蓄热室腔道长度尺寸,无论全连通、组合连通或全分隔蓄热室都是如此。再根据熔化部池宽尺寸、格子体孔径的尺寸、孔径的壁厚(条形格子砖厚度),确定出沿熔窑横向的蓄热室腔道宽度尺寸。蓄热室腔道宽度尺寸大约为熔化部池宽尺寸的30~40%范围,小孔径、薄孔壁的格子体取较小百分比;大孔径、厚孔壁的格子体取较大百分比。并要使蓄热室横向的格子孔数量为双数,因为横向每两孔设一道炉条碓。

②.在确定蓄热室腔道的长度尺寸时,也要结合格子孔的孔径大小、孔的壁厚、以及格子体与周边墙体的间隙尺寸,统筹设计格子孔的数量。之后即可计算出单侧蓄热室的格子孔总数量,以及格子孔内的气体上下流通总面积,然后分别计算出格子孔内助燃空气和烟气的流速,格子孔内的气体流速是对流传热计算的重要变量之一。

2.5. 格子体内助燃空气和烟气的对流传热系数计算:

①.在计算格子体内的空气、烟气对流传热系数时,该算法给出的计算公式由基本公式和修正公式组合构成,基本公式是以 $t=600^{\circ}\text{C}$ 为计算条件,公式中包含传热最关键的格子体孔径及孔内气流速度两个变量;修正公式中的修正系数“k”,要根据格子体顶面和底面处的烟气、空气温度从计算图(图6-36,蓄热室对流给热系数)中查找出来,基本公式计算结果与修正系数的乘积即为烟气、空气相应温度的对流传热系数。

②.《工业炉设计手册》给出的格子体内气体流速为:空气 $0.3\sim 0.6\text{Nm}^3/\text{s}$,烟气 $0.5\sim 0.8\text{Nm}^3/\text{s}$ 。《玻璃窑炉热工计算及设计》给出的气体速度为:空气 $0.2\sim 0.4\text{Nm}^3/\text{s}$,烟气 $0.25\sim 0.5\text{Nm}^3/\text{s}$,两者略有不同。笔者认为,玻璃熔窑蓄热室腔道的平面尺寸和格子体孔径尺寸都较大,气体上下流通面积较大,气体流速较低,后者数据更符合实际情况。

2.6. 格子体内烟气辐射传热系数和烟气总传热系数计算:

①.格子体内的辐射传热体现在烟气对格子体的传热上,在计算格子体内的辐射传热系数时,该算法给出了辐射传热的基本计算公式,同时也给出了烟气辐射传热计算图(图6-35,蓄热室烟气辐射给热系数),计算公式和计算图均可单独使用。

②.烟气辐射传热计算图是以燃料发热量 $Q=2000\text{kcal}/\text{Nm}^3$ 时,根据烟气温度和几种格子孔当量直径条件下的蓄热室烟气辐射给热系数,同时给出了燃料不同发热量的调整系数图(见图6-35顶部区域)。

③.需首先根据烟气温度及格子体孔径尺寸,查出燃料发热量 $2000\text{kcal}/\text{Nm}^3$ 时的辐射传热系数,并查出实际燃料发热量的修正系数,两者相乘求得烟气辐射传热系数。再将烟气的对流传热系数与辐射传热系数相加,即为烟气对格子砖的总传热系数。

2.7. 求出格子体总传热系数完成格子体设计:

①.在已经分别计算出了格子体上部和下部的助燃空气对流传热系数,烟气的对流与辐射传热系数之和构成烟气的总传热系数之后,即可按“简化公式”分别计算出格子体上部和下部的综合传热系数,最后计算出熔窑单侧蓄热室格子体的总传热系数。

②.在格子体换热面积计算中,烟气与助燃空气之间的温差也是变量之一,由于蓄热室格子体内的烟气与助燃空气的温度均以非线性规律变化,本算法采用对数平均温差计算,比较符合格子体实际传热情况。

③.根据助燃空气预热所需热量、单侧蓄热室格子体的总传热系数、烟气与助燃空气之间的对数平均温差、以及设定的蓄热室热利用率 η 值(90~95%),即可求出熔窑单侧蓄热室格子体所需要的换热面积。再根据前面已经确定出的单侧蓄热室腔道的长宽平面总尺寸,完成熔窑蓄热室格子体设计。

2.8. 国投线熔窑蓄热室格子体设计情况:

秦皇岛耀华国投线 500t/d 浮法玻璃熔窑设计时, 采用此“简化公式”计算法的两个表达式分别进行了格子体计算。本文同时又采用“TECO 经验公式”对计算结果进行了验算对比, 现介绍如下。

3. 国投线 500t/d 熔窑燃烧基础数据和蓄热室热平衡计算

3.1. 国投线熔窑燃烧基础数据计算:

①. 单位时间燃料耗量: (重油)

$$\begin{aligned} R_L &= P \cdot 10^3 \cdot r / Q_d \\ &= 500 \times 1000 \times 6900 / 40000 \\ &= 86.25t/d \\ &= 3554kg/h \\ &= 1kg/s \end{aligned}$$

②. 单位燃料的理论助燃空气耗量:

$$L_0 = \frac{0.2Q_d}{1000} + 2 = \frac{0.2 \times 40000}{1000} + 2 = 10Nm^3/kg \text{重油}$$

③. 每秒实际助燃空气耗量 ($\alpha=1.2$):

$$K_Q = \alpha \cdot L_0 \cdot R_L = 1.2 \times 10 \times 1 = 12Nm^3/s$$

④. 每秒产生的烟气体积:

$$\begin{aligned} Y_Q &= \left[\frac{0.27 \cdot Q_d}{1000} + (\alpha - 1) \cdot L_0 \right] \cdot R_L \\ &= \left[\frac{0.27 \times 40000}{1000} + (1.2 - 1) \times 10 \right] \times 1 \\ &= 12.8Nm^3/s \end{aligned}$$

3.2. 国投线熔窑蓄热室热平衡计算:

国投线熔窑设定助燃空气进入格子体初始温度 100℃, 预热平均温度 1140℃。烟气进入格子体平均温度 1450℃, 从格子体炉条碓下排出温度平均大约为 550℃。

①. 蓄热室格子体的温度分布和气体热容量: (见表 1)

表 1: 国投线熔窑蓄热室格子体的温度分布和气体热容量:

| 序号 | 项目 | 温度 (°C) | 气体热容量 (kJ/Nm ³ ·°C) |
|----|----------|---------------|--------------------------------|
| 1 | 烟气进格子体温度 | $t_{v1}=1450$ | $C_{v1}=1.591$ |
| 2 | 烟气出格子体温度 | $t_{v2}=550$ | $C_{v2}=1.451$ |
| 3 | 空气进格子体温度 | $t_{k1}=100$ | $C_{k1}=1.323$ |
| 4 | 空气预热温度 | $t_{k2}=1140$ | $C_{k2}=1.454$ |

②. 每秒烟气带入蓄热室格子体热量: (由原料挥发分随烟气带入的热量按增加 2% 考虑):

$$\begin{aligned}
 Q_{YQ} &= 1.02 \cdot Y_Q \cdot C_{Y1} \cdot t_{Y1} \\
 &= 1.02 \times 12.8 \times 1.591 \times 1450 \text{-----}(100\%) \\
 &= 30120 \text{ kJ/s}
 \end{aligned}$$

③. 每秒助燃空气预热热量:

$$\begin{aligned}
 Q_{KQ} &= K_Q (C_{K2} \cdot t_{K2} - C_{K1} \cdot t_{K1}) \\
 &= 12 \times (1.454 \times 1140 - 1.323 \times 100) \text{-----}(60.77\%) \\
 &= 18303 \text{ kJ/s}
 \end{aligned}$$

④. 排出格子体的实际烟气温度: (设定格子体热利用率 $\eta=95\%$)

$$\begin{aligned}
 t_{Y2S} &= \frac{1}{C_{Y2}} (C_{Y1} \cdot t_{Y1} - \frac{Q_{KQ}}{Y_Q \cdot \eta}) \\
 &= \frac{1}{1.451} \left(1.591 \times 1450 - \frac{18303}{12.8 \times 0.95} \right) \\
 &= 553^\circ \text{C}
 \end{aligned}$$

⑤. 每秒烟气带出热量:

$$\begin{aligned}
 Q_{YC} &= Y_Q \cdot C_{Y2} \cdot t_{Y2S} \\
 &= 12.8 \times 1.451 \times 553 \text{-----}(34.10\%) \\
 &= 10271 \text{ kJ/s}
 \end{aligned}$$

⑥. 每秒蓄热室格子体结构散热: (设定 $\approx 5\%$, 与格子体热利用率 $\eta=95\%$ 相配)

$$\begin{aligned}
 Q_{XS} &= Q_{YQ} - Q_{KQ} - Q_{YC} \\
 &= 30120 - 18303 - 10271 \text{-----} (5.13\%) \\
 &= 1546 \text{ kJ/s}
 \end{aligned}$$

4. 国投线熔窑蓄热室腔道平面尺寸设计

国投线 500t/d 浮法玻璃熔窑设 6 对小炉, 小炉中心线间距 3300/3000mm。当时国内对筒形格子砖缺少使用经验, 所以本熔窑确定采用条形格子砖。

4.1. 本熔窑蓄热室格子砖数据:

| | |
|--------------|---|
| 格子砖类型及排列方式 | 条形砖、编蓝式排列 |
| 格子体孔径 | $d_{gk} = 165 \text{ mm}$, |
| 格子砖尺寸 | 砖长 $l_{gz} = 345 \text{ mm}$, 砖厚 $s_{gz} = 65 \text{ mm}$, 高度 $h_{gz} = 114 \text{ mm}$, |
| 格子体单位体积换热面积 | $A_{gr} = 10.586 \text{ m}^2 / \text{m}^3$, |
| 格子体单位体积砖体积 | $V_{gz} = 0.424 \text{ m}^3 / \text{m}^3$, |
| 格子体横断面自由流通面积 | $A_{glt} = 0.515 \text{ m}^2 / \text{m}^2$, |
| 格子砖材料 | 碱性砖为主 (80% 体积), 低气孔粘土砖 (20% 体积) |

4.2. 国投线熔窑采用全连通蓄热室, 格子体纵向分 4 段码砌:

①. 第一段 (对应 1~2# 小炉, 以备粉尘堵塞向窑头方向增加 4 排孔):

$$L_{x1} = 82 + (28 \times 230 + 65) + 33 = 6620 \text{mm},$$

②. 第二段 (对应 3~4.5#小炉):

$$L_{x2} = 32 + (22 \times 230 + 65) + 30 = 5187 \text{mm},$$

③. 第三段 (对应 4.5~5#小炉):

$$L_{x3} = 30 + (22 \times 230 + 65) + 28 = 5183 \text{mm},$$

④. 第四段 (对应 6#小炉): (为了全窑炉条碛一致, 向后增加 1 排孔)

$$L_{x4} = 27 + (16 \times 230 + 65) + 82 = 3854 \text{mm}$$

4.3. 蓄热室腔道长度、宽度尺寸及格子孔数量:

①. 蓄热室腔道内的长度尺寸组合 (熔窑纵向):

$$\begin{aligned} L_x &= L_{x1} + L_{x2} + L_{x3} + L_{x4} \\ &= 6620 + 5187 + 5183 + 3854 \\ &= 20844 \text{mm}, \end{aligned}$$

②. 蓄热室腔道宽度尺寸组合 (熔窑横向):

$$B_x = 47.5 + (18 \times 230 + 65) + 47.5 = 4300 \text{mm} (\approx \text{熔化部池宽的 } 39.09\%)$$

③. 每侧蓄热室格子孔总数量:

$$N_x = 18 \times (28 + 22 + 22 + 16) = 18 \times 88 = 1584 \text{孔},$$

4.4. 求出蓄热室格子孔内气体的流速:

①. 单侧蓄热室腔道内格子孔的总流通面积:

$$\begin{aligned} A_{LT} &= A_{gt} \cdot N_x \cdot \left(\frac{d_{gz} + s_{gz}}{1000} \right)^2 \\ &= 0.515 \times 1584 \times \left(\frac{165 + 65}{1000} \right)^2 \\ &= 43 \text{m}^2, \end{aligned}$$

②. 格子体中助燃空气标态流速:

$$w_k = K_Q / A_{LT} = 12 \div 43 = 0.279 \text{Nm}^3 / \text{s},$$

③. 格子体中烟气标态流速:

$$w_y = K_Y / A_{LT} = 12.8 \div 43 = 0.298 \text{Nm}^3 / \text{s},$$

5. 蓄热室格子体上部传热计算 (采用旧标准单位制)

5.1. 格子体上部的空气对流给热系数:

国投线熔窑蓄热室采用编篮式格子体, 助燃空气初始温度 $t_{ki}=100^\circ\text{C}$, 预热温度 $t_{k2}=1140^\circ\text{C}$ 。首先计算出 $t=600^\circ\text{C}$ 的空气对流给热系数, 然后查图 6-36 右下角的温度系数, 查出对应 1140°C 的修正系数 $k=1.093$, 即可求得格子体上部的空气对流给热系数。

$$a_k^{d(600)} = 7.5 \frac{\sqrt{w_k}}{\sqrt[3]{d_{gz}}} = 7.5 \times \frac{\sqrt{0.279}}{\sqrt[3]{0.165}} = 7.223 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{ }^\circ\text{C}$$

$$a_k = k \cdot \alpha_k^{d(600)} = 1.093 \times 7.223 = 7.891 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{ }^\circ\text{C}$$

5.2. 格子体上部的烟气对流给热系数:

烟气在进入格子体顶部时的平均温度 $t_{y1}=1450^\circ\text{C}$ ，先计算出 $t=600^\circ\text{C}$ 烟气的对流给热系数；然后查图 6-36，得到相应烟气温度的修正系数 $k=1.16$ ，即可求出格子体上部烟气的对流给热系数。

$$a_y^{d(600)} = 7.5 \frac{\sqrt{w_y}}{\sqrt[3]{d_{gz}}} = 7.5 \times \frac{\sqrt{0.298}}{\sqrt[3]{0.165}} = 7.465 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{ }^\circ\text{C}$$

$$a_y^d = k \cdot \alpha_y^{d(600)} = 1.16 \times 7.465 = 8.659 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{ }^\circ\text{C}$$

5.3. 格子体上部的烟气辐射给热系数:

根据烟气进入格子体的平均温度 $t_{y1}=1450^\circ\text{C}$ ，格子孔尺寸 165mm，查图 6-35 首先得到燃料热值 $Q_d = 2000 \text{ kcal/Nm}^3$ 时烟气的辐射给热系数。本熔窑以重油为燃料，重油热值 $Q_d = 10000 \text{ kcal/kg}$ ，查图得到调整系数 $\beta = 1.15$ ，即可求得格子体上部的烟气辐射给热系数。

$$a_y^{f(2000)} = 40 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{ }^\circ\text{C}$$

$$a_y^f = \beta \cdot \alpha_y^{f(2000)} = 1.15 \times 40 = 46 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{ }^\circ\text{C}$$

5.4. 格子体上部的烟气总给热系数: (对流+辐射)

$$a_y = a_y^d + a_y^f = 8.659 + 46 = 54.66 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{ }^\circ\text{C}$$

5.5. 换向周期时间及格子体上部格子砖的有关数据: (20 分钟/周期)

格子体顶部格子砖均为碱性砖，但型号不同，对应 1~2# 小炉区域为 ZRX，对应 3~6# 小炉为 RUBINAL VS，相关数据 (见表 2)。

表 2: 国投线熔窑蓄热室换向周期时间及上部格子砖的相关数据:

| 名称 | 数量 | 名称 | 数量 |
|-------------------------------------|-----|---------------------|----------------------------------|
| 空气换向周期时间 Z_k (小时) | 1/3 | 格子砖厚度之半 δ | 0.032m |
| 烟气换向周期时间 Z_y (小时) | 1/3 | 上部格子砖容重 γ_z | 平均 3000kg/m ³ |
| 换向全周期时间 Z_0 (小时) $Z_0=Z_k+Z_y$ | 2/3 | 上部格子砖导热系数 λ | 3.126kcal/m. h. $^\circ\text{C}$ |
| | | 上部格子砖比热容 C_z | 0.309kcal/kg. $^\circ\text{C}$ |

5.6. 蓄热室格子体上部的总传热系数:

①. 采用公式 (1) 进行计算, 式中格子砖厚度之半 $\delta = 0.032\text{m}$ 。

$$\begin{aligned}
 K_s &= \frac{1}{\frac{1}{\alpha_k Z_k} + \frac{1}{3} \left(\frac{1}{\delta \gamma_z C_z} + \frac{4\delta}{3\lambda Z_0} \right) + \frac{1}{\alpha_y Z_y}} \\
 &= \frac{1}{\frac{1}{7.891 \times 1/3} + \frac{1}{3} \left(\frac{1}{0.032 \times 3000 \times 0.309} + \frac{4 \times 0.032}{3 \times 3.126 \times 2/3} \right) + \frac{1}{54.66 \times 1/3}} \\
 &= \frac{1}{0.3802 + 0.0181 + 0.0549} \\
 &= 2.207 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{周期} \cdot \text{°C}
 \end{aligned}$$

②. 采用公式 (2) 进行计算, 式中格子砖厚度 $\delta = 0.064\text{m}$ 。

$$= \frac{1}{\frac{1}{\alpha_k Z_k} + \frac{1}{3} \left(\frac{1}{\delta \gamma_z C_z} + \frac{4\delta}{3\lambda Z_0} \right) + \frac{1}{\alpha_y Z_y}}$$

6. 蓄热室下部传热计算

6.1. 格子体下部的空气对流给热系数:

前面已求出 $t=600^\circ\text{C}$ 的空气对流给热系数, 助燃空气进入格子体初始温度 $t_{k1}=100^\circ\text{C}$, 查图 6-36, 得到修正系数 $k=0.82$, 即可求得格子体下部的空气对流给热系数。

$$a_k^d = k \cdot \alpha_k^{d(600)} = 0.82 \times 7.223 = 5.923 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{°C}$$

6.2. 格子体下部的烟气对流给热系数:

前面已求出 $t=600^\circ\text{C}$ 的烟气对流给热系数, 格子体排出烟气平均温度约为 $t_{y2}=550^\circ\text{C}$, 查图 6-36, 得到修正系数 $k=0.975$, 求得格子体下部的烟气对流给热系数。

$$a_y^d = k \cdot \alpha_y^{d(600)} = 0.975 \times 7.465 = 7.278 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{°C}$$

6.3. 格子体下部的烟气辐射给热系数:

蓄热室排出烟气平均温度约为 $t_{y2}=550^\circ\text{C}$, 格子孔尺寸 165mm, 查图 6-35 首先得到燃料热值 $Q_d = 2000 \text{ kcal/Nm}^3$ 时烟气的辐射给热系数。重油热值 $q = 10000 \text{ kcal/kg}$, 修正系数 $\beta = 1.15$, 即可求得格子体下部烟气辐射给热系数。

$$a_y^{f(2000)} = 10 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{°C}$$

$$a_y^f = \beta \cdot \alpha_y^{f(2000)} = 1.15 \times 10 = 11.5 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{°C}$$

6.4. 格子体下部的烟气总给热系数: (对流+辐射)

$$a_y = a_y^d + a_y^f = 7.278 + 11.5 = 18.778 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{°C}$$

6.5. 换向周期时间及下部格子砖的有关数据:

国投线 500t/d 熔窑蓄热室格子体下部均为 15 层低气孔粘土砖 ZGN-42, 相关数据(见表 3)。

表 3: 国投线熔窑蓄热室换向周期时间及下部格子砖的相关数据:

| 名称 | 数量 | 名称 | 数量 |
|-------------------------------------|-----|---------------------|-----------------------|
| 空气换向周期时间 Z_K (小时) | 1/3 | 格子砖厚之半 δ | 0.0325 m |
| 烟气换向周期时间 Z_Y (小时) | 1/3 | 下部格子砖容重 γ_Z | 2300kg/m ³ |
| 换向全周期时间 Z_0 (小时) $Z_0=Z_K+Z_Y$ | 2/3 | 下部格子砖导热系数 λ | 0.92kcal/m.h.℃ |
| | | 下部格子砖比热容 C_Z | 0.21kcal/kg.℃ |

6.6. 蓄热室格子体下部的总传热系数:

①. 采用公式 (1) 进行计算, 式中格子砖厚度之半 $\delta=0.0325\text{m}$ 。

$$\begin{aligned}
 K_x &= \frac{1}{\frac{1}{\alpha_x Z_k} + \frac{1}{3} \left(\frac{1}{\delta \gamma_z C_z} + \frac{4\delta}{3\lambda Z_0} \right) + \frac{1}{\alpha_y Z_y}} \\
 &= \frac{1}{\frac{1}{5.923 \times 1/3} + \frac{1}{3} \left(\frac{1}{0.0325 \times 2300 \times 0.21} + \frac{4 \times 0.0325}{3 \times 0.92 \times 2/3} \right) + \frac{1}{18.778 \times 1/3}} \\
 &= \frac{1}{0.5065 + 0.0448 + 0.1598} \\
 &= 1.406 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{周期} \cdot \text{°C}
 \end{aligned}$$

②. 采用公式 (2) 进行计算, 式中格子砖厚度 $\delta=0.065\text{m}$ 。

$$\begin{aligned}
 K'_x &= \frac{1}{\frac{1}{\alpha_x Z_k} + 0.4 \left(\frac{2}{\delta \gamma_z C_z} + \frac{\delta}{2\lambda Z_0} \right) + \frac{1}{\alpha_y Z_y}} \\
 &= \frac{1}{\frac{1}{5.923 \times 1/3} + 0.4 \left(\frac{2}{0.065 \times 2300 \times 0.21} + \frac{0.065}{2 \times 0.92 \times 2/3} \right) + \frac{1}{18.778 \times 1/3}} \\
 &= \frac{1}{0.5065 + 0.0467 + 0.1598} \\
 &= 1.403 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{周期} \cdot \text{°C}
 \end{aligned}$$

7. 蓄热室格子体总传热系数和格子体计算

7.1. 本熔窑蓄热室格子体总传热系数分别为: (分别对应公式 (1) 和 (2))

$$\text{①. } K = \frac{1}{2} (K_s + K_x) = \frac{1}{2} (2.207 + 1.406) = 1.807 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{周期} \cdot \text{°C}$$

$$\text{②. } K' = \frac{1}{2} (K'_s + K'_x) = \frac{1}{2} (2.209 + 1.403) = 1.806 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{周期} \cdot \text{°C}$$

7.2. 烟气与助燃空气的对数平均温差: (按逆流方式考虑)

①. 进入格子体烟气温度与助燃空气预热温度的温差:

$$\Delta t_s = t_{y1} - t_{k2} = 1450 - 1140 = 310 \text{ }^\circ\text{C}$$

②. 排出格子体烟气与进入格子体助燃空气的温差:

$$\Delta t_x = t_{y2} - t_{k1} = 553 - 100 = 453 \text{ }^\circ\text{C}$$

③. 蓄热室格子体的对数平均温差:

$$\Delta t_d = \frac{\Delta t_s - \Delta t_x}{\ln \frac{\Delta t_s}{\Delta t_x}} = \frac{310 - 453}{\ln \frac{310}{453}} = \frac{-143}{-0.3793} = 377^\circ\text{C}$$

7.3. 求出格子体换热面积:

前面蓄热室热平衡计算已求出助燃空气预热需要每秒吸收热量为 18303kJ/s(需按本算法换算为 kcal/s),按每个换向周期时间(20 分钟)需要吸收的热量计算格子体换热面积,蓄热室热平衡计算中已设定格子体热效率按 $\eta=95\%$ 考虑,计算出单侧蓄热室需要的格子体换热面积分别为:(分别对应公式(1)和(2))

$$\textcircled{1}. A_{GZT} = \frac{Q_{kQ}}{K\Delta t_d \eta} = \frac{(18303/4.1868) \times 60 \times 20}{1.807 \times 377 \times 0.95} = \frac{5245916}{647.2} = 8106\text{m}^2$$

$$\textcircled{2}. A'_{GZT} = \frac{Q_{kQ}}{K'\Delta t_d \eta} = \frac{(18303/4.1868) \times 60 \times 20}{1.806 \times 377 \times 0.95} = \frac{5245916}{646.8} = 8111\text{m}^2$$

7.4. 计算出需要的格子体高度分别为:(分别对应公式(1)和(2))

$$\textcircled{1}. H_x = \frac{A_{GZT}}{B_x L_x A_{br}} = \frac{8106}{4.3 \times 20.844 \times 10.586} = 8.543\text{m}$$

$$\textcircled{2}. H'_x = \frac{A'_{GZT}}{B_x L_x A_{br}} = \frac{8111}{4.3 \times 20.844 \times 10.586} = 8.549\text{m}$$

7.5. 国投线熔窑蓄热室格子体设计高度及相关数据:

①. 格子体设计高度:(取上述两者的平均值 $\approx 8.546\text{m}$,并按格子砖的高度组合)

$$H_{GZT} = 73 @ 114 + 170(\text{格子体支撑层}) = 8492\text{mm}$$

②. 单侧蓄热室格子体的实际体积:(按对应格子体高度的蓄热室腔道尺寸计算)

$$V_{GZT} = B_x \cdot L_x \cdot H_{GZT} = 4.3 \times 20.844 \times 8.492 = 761\text{m}^3$$

③. 单侧蓄热室格子体的砖体积:(单位体积格子体的砖体积 $V_{gz}=0.424\text{m}^3/\text{m}^3$)

$$V_{GZZ} = V_{GZT} \cdot V_{gz} = 761 \times 0.424 = 322\text{m}^3$$

④. 全窑格子砖设计重量:(根据品种和数量,格子砖的平均容重 $\gamma \approx 2.82\text{t}/\text{m}^3$)

$$G_{GZZ} = 2V_{GZZ} \cdot \gamma = 2 \times 322 \times 2.82 = 1816t。$$

7.6. 国投线熔窑蓄热室格子体施工图设计的格子砖实际重量情况:

按“简化公式”算法得出的格子体总重量 1816t, 比施工图设计的格子体总重量 1792t (见表 4) 多出 24t, 是因格子体与周边墙体的间隙也计算在格子体内了。

表 4: 国投线 500t/d 浮法玻璃熔窑蓄热室格子体实际设计数量及重量

| 格子砖品种 | 砖尺寸(mm) | 单重 (kg/块) | 数量 (块) | 总重 (kg) |
|---------------|------------|-----------|---------------------------|----------|
| 碱性砖 ZRX,VS,EZ | 345×114×64 | 7.55kg/块 | 2×93220 | 2×703811 |
| ,, | 205×114×64 | 4.49kg/块 | 2×10012 | 2×44954 |
| 低气孔粘土砖 ZGN-42 | 345×114×65 | 5.84kg/块 | 2×23700 | 2×138408 |
| ,, | 205×114×65 | 3.47kg/块 | 2×2520 | 2×8744 |
| 全窑蓄热室格子砖设计总重量 | | | 258904 块, 1791834kg≈1792t | |

8. 采用 TECO 经验公式计算对比

8.1. 计算助燃空气预热温度:

①. 单侧蓄热室格子体实际体积: (前面已求出)

$$V_{GZT} = 761m^3,$$

②. 单侧蓄热室格子体实际换热面积:

$$A_{GHR} = V_{GZT} \cdot A_{gz} = 761 \times 10.586 = 8056m^2,$$

③. 计算单位助燃空气的格子体换热面积变量: (助燃空气量 $K_Q=12Nm^3/s$)

$$R_G = A_{GHR} / K_Q = 8056 \div 12 = 671m^2 / Nm^3 / s \text{ 助燃空气},$$

④. 能够达到的助燃空气预热温度: (TECO 经验公式采用华氏度, 转换为摄氏度)

$$\begin{aligned} t_k &= 3.3793 \times 10^{-7} \cdot R_G^3 - 1.1316 \times 10^{-3} \cdot R_G^2 + 1.474 \cdot R_G + 633.23 \\ &= 3.3793 \times 10^{-7} \times 671^3 - 1.1316 \times 10^{-3} \times 671^2 + 1.474 \times 671 + 633.23 \\ &= 102.1 - 509.5 + 989 + 633.23 \\ &= 1215(^{\circ}C) \end{aligned}$$

8.2. 计算排出格子体的烟气温度:

①. 每秒助燃空气预热热量:

$$\begin{aligned} Q_{KQ} &= K_Q (C_{K2} \cdot t_{k2} - C_{K1} \cdot t_{K1}) \\ &= K_Q \times (1.461 \times 1215 - 1.323 \times 100) \\ &= 12 \times 1642.8 \\ &= 19714kJ/s \end{aligned}$$

②. 排出格子体的烟气温度：（格子体热效率按 $\eta=95\%$ 考虑）

$$\begin{aligned} t'_{r2s} &= \frac{1}{C_{Y2}} \left(C_{Y1} \cdot t_{r1} - \frac{Q_{kQ}}{YQ \cdot \eta} \right) \\ &= \frac{1}{C_{Y2}} \left(1.591 \times 1450 - \frac{19714}{12.8 \times 0.95} \right) \\ &= \frac{1}{1.444} (2307 - 1621.2) \\ &= 475^\circ \text{C} \end{aligned}$$

8.3. 采用 TECO 经验公式计算对比分析：

①. 国投线 500t/d 浮法熔窑蓄热室格子体采用“简化公式”计算与“TECO 经验公式”计算结果：助燃空气预热温度分别为 1140℃ 与 1215℃，相差 75℃、差别率为 6.6%；排出烟气温度分别为 553℃ 与 475℃，相差 78℃、差别率为 16%，两者计算结果存在较大的不同，差别率超过了 10%。（对其它大小不同吨位玻璃熔窑进行对比计算结果表明，最大差别率可达 20%~30%）。

②. “简化公式”与“TECO 经验公式”都是玻璃熔窑蓄热室格子体设计中简单的近似计算方法。笔者认为“简化公式”计算法的准确程度可能较高一些，“TECO 经验公式”法更简便一些，两者计算结果有较大差别率，只能用来做粗略对比验算。

9. 采用 160mm 孔筒形砖格子体计算对比

当今国内浮法玻璃熔窑蓄热室广泛使用筒形砖格子体，多数采用孔径 160mm，壁厚 40mm 的筒形格子砖。如果国投线 500t/d 熔窑也采用 160mm 孔筒形砖格子体，需要重新进行格子体设计。设定助燃空气预热温度 1150℃，从格子体炉条碓下排出烟气温度则为 543℃，计算过程从略，计算结果如下。

9.1. 蓄热室腔道尺寸设计：（仍采用全连通蓄热室）

①. 蓄热室腔道内的长度尺寸组合（熔窑纵向）：在原尺寸基础上做适当调整。

$$\begin{aligned} L_x'' &= L_{x1}'' + L_{x2}'' + L_{x3}'' + L_{x4}'' \\ &= 6500 + 5280 + 5080 + 3700 \\ &= 20560\text{mm}, \end{aligned}$$

②. 蓄热室腔道内的宽度尺寸组合（熔窑横向）：

$$B_x'' = 30 + (18 \times 200 + 40) + 30 = 3700\text{mm} \quad (\approx \text{熔化部池宽的 } 33.64\%)$$

③. 每侧蓄热室格子孔总数量：

$$N_x'' = 18 \times (32 + 26 + 25 + 18) = 18 \times 101 = 1818 \text{孔},$$

9.2. 蓄热室格子体总传热系数和格子体设计：

①. 蓄热室格子体总传热系数：

$$K'' = \frac{1}{2} (K_s'' + K_x'') = \frac{1}{2} (2.155 + 1.215) = 1.685 \text{kcal/m}^2 \cdot \text{周期} \cdot ^\circ\text{C}$$

②. 蓄热室格子体的对数平均温差：

$$\Delta t_d'' = \frac{\Delta t_s - \Delta t_z}{\ln \frac{\Delta t_s}{\Delta t_z}} = \frac{300 - 443}{\ln \frac{300}{443}} = \frac{-143}{-0.3898} = 367^\circ\text{C}$$

③. 求出格子体换热面积:

根据助燃空气预热温度 1150°C , 计算出助燃空气预热每秒吸收热量为 18492kJ/s , 按每个换向周期时间 (20 分钟) 吸收的热量计算格子体换热面积,。

$$A_{GZT}'' = \frac{Q_{KQ}''}{K'' \Delta t_d'' \eta} = \frac{(18492/4.1868) \times 60 \times 20}{1.685 \times 367 \times 0.95} = \frac{5300086}{587} = 9029\text{m}^2$$

④. 计算需要的格子体高度: (格子体单位体积换热面积 $14.94\text{m}^2/\text{m}^3$)

$$H_x'' = \frac{A_{GZT}''}{B_x L_x A_{hr}} = \frac{9029}{3.7 \times 20.56 \times 14.94} = 7.944\text{m}$$

⑤. 设计格子体高度:

$$H_{GZT}'' = 67 @ 120 = 8040\text{mm}$$

⑥. 全窑格子砖设计重量:

$$G_{GZZ}'' = 1430\text{t}.$$

9.3. 采用筒形砖格子体计算结果分析:

采用 160mm 孔筒形砖格子体与 165mm 孔条形砖格子体相比较, 蓄热室腔道宽度尺寸由 4300mm 减少到 3700mm , 格子体高度尺寸由 8492mm 减少到 8040mm , 助燃空气预热温度由 1140°C 提高到 1150°C , 排烟温度由 553°C 下降到 543°C , 全窑格子砖设计重量由 1816吨 减少到 1430吨 , 可见筒形砖格子体具有明显优势。

10. 结束语

①. 在《工业炉设计手册》和《玻璃窑炉热工计算及设计》两书中, 分别载有蓄热室格子体综合传热系数计算公式 (1) 和 (2), 这两个公式都可单独用于蓄热室格子体设计计算。由于目前没有准确的蓄热室格子体传热计算方法, 暂时无法判断到底哪个公式准确度更高一些。因为格子砖的砖厚方向是双面传热, δ 取格子孔壁厚之半 (半砖厚) 更符合传热实际情况。如果两式中的格子孔壁厚 δ 同取格子砖的半砖厚, 整理之后则两个公式会更加相近。两个公式分母的中间段分别为:

$$\text{公式 (1) 的分母中间段: } \frac{1}{3} \left(\frac{1}{\delta \gamma_z C_z} + \frac{4\delta}{3\lambda_z Z_0} \right),$$

$$\text{公式 (2) 的分母中间段: } \frac{1}{2.5} \left(\frac{1}{\delta \gamma_z C_z} + \frac{\delta}{\lambda_z Z_0} \right).$$

②. 目前国内浮法玻璃熔窑蓄热室多数使用孔径 160mm , 壁厚 40mm 的筒形格子砖。应属于中等孔径、薄壁厚的情况, 设计蓄热室腔道横向尺寸时, 应按熔化部池宽尺寸的 $32\sim 35\%$ 范围内选取, 并要使蓄热室横向的格子孔数量为双数。格子体设计“简化公式”计算法中没有针对筒形砖格子体的相关计算公式, 只能暂时采用比较接近的编篮式格子

体的公式进行计算。

③. 使用高热值燃料时, 玻璃熔窑熔化区炉膛内热点处实际火焰温度在 1800~1900℃以上, 熔窑入口的前脸墙区域火焰温度也在 1600℃以上, 整个熔化区炉膛内的平均火焰温度在 1650℃以上。此高温烟气经过小炉进入蓄热室上部集气室, 向下转向进入格子体时平均降低了大约为 $1650-1450=200^{\circ}\text{C}$, 烟气热量损失大约为 15%左右, 这是很值得回收的热量。至少应当加强小炉区域和蓄热室格子体顶部之上区域的保温, 尽量减少此部位的烟气热损失, 提高进入格子体的烟气温度。

④. 本文使用的格子体设计简化计算公式属于近似计算公式, 大约在 40 多年前就已经出现了, 计算的准确程度有限。随着计算机技术的发展可以对玻璃熔窑蓄热室格子体换热情况进行更为准确的计算。其方法是沿格子体内气体流动方向把格子体分成多个区段, 求出各区段在一定时间内烟气、空气、格子体之间的换热量, 从而整个格子体的换热量也就准确地计算出来了。

参考文献

- 1.唐福恒等.玻璃熔窑的蓄热室格子体设计[J]玻璃, 2007 (2) .
- 2.唐福恒.蓄热室格子体设计与助燃空气预热温度计算[J]玻璃, 2014 (10) .
- 3.《工业炉设计手册》, 第一机械工业部第一设计院主编, 1981 年 10 月第一版.
- 4.孙承绪等.玻璃窑炉热工计算及设计, 中国建筑工业出版社, 1983 年 4 月第一版.