

窑炉和耐火材料

1. 简介.....	1
2. 窑炉、耐火材料和保温材料类型.....	5
3. 对窑炉的评估.....	18
4. 提高能源效率的可能性.....	27
5. 方案列表.....	34
6. 工作表.....	34
7. 参考文献.....	35

1.简介

本节介绍窑炉和耐火材料，并解释各种设计和运行方案。

1.1 什么是窑炉？

窑炉是用于熔化用于铸造的金属或对材料进行加热以改变其形状(如滚压和锻造)或性质(热处理)。

由于燃料产生的烟气直接与窑炉材料接触，因此窑炉选用的燃料类型是很重要的。例如，一些材料不能耐受燃料中的硫。固体燃料会产生颗粒物，它将干扰窑炉内的材料。因此：

- 大部分窑炉采用液体燃料、气体燃料或电能作为能源输入。
- 感应炉和电弧炉用电来熔化钢和铸铁。
- 用于有色金属的熔炼炉采用燃油。
- 燃油窑炉主要燃烧炉用重油，特别是用于材料的预热和热处理。
- 轻柴油(LDO)用于不能产生硫的窑炉。

最理想的窑炉是要用最少的燃料，投入最少的劳动力，将尽可能多的材料加热到一个统一的温度。窑炉高效运行的关键在于以尽可能少的过量空气使燃料完全燃烧。与其他燃烧设备，如锅炉(其效率高于90%)，相比，窑炉的运行效率相对较低(低到7%)。这是由于窑炉内较高的工作温度造成的。例如，一台将材料加热到1200 °C的窑炉会排放1200 °C甚至更高温度的废气，这造成大量的热量从烟囱流失。

热能设备：窑炉和耐火材料

所有的窑炉都有图 1 所示的以下构件(碳信托组织, 1993)：

- 由耐火材料建造的耐高温的炉膛，以保留高工作温度下的热能。
- 用于承载钢铁的炉床，它是由耐火材料制成，由钢结构支撑，部分采用水冷却。
- 燃烧器，它采用液体或气体燃料来升高并维持炉膛内的温度。煤或电可以用在再热炉中。
- 烟囱，它用于排出炉膛内产生的燃烧废气。
- 装料门和卸料门，通过它们给炉膛装料和卸料。装料和卸料设备包括辊道、传送带、装料机和窑炉推钢机。

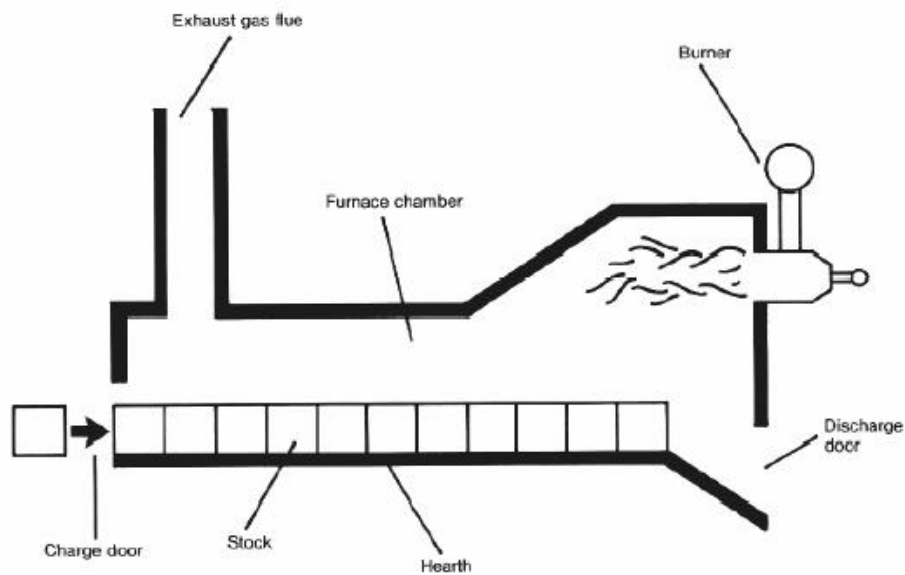


图 1: 典型窑炉构件 (碳信托组织, 1993)

1.2 什么是耐火材料?¹

任何能够耐受高温下的磨损性或腐蚀性固体、液体或气体的材料都可以叫做“耐火材料”。由于耐火材料的运行状况千差万别，因此必须生产出具有不同性质的系列的耐火材料。根据其用途，耐火材料有不同的组合方式和形状。对于耐火材料有以下基本要求：

- 耐高温
- 耐温度突变
- 能够耐受熔融金属熔渣、熔融玻璃、热气体等的作用
- 能够承受工作状态下的负荷
- 能承受负荷和磨损力

¹ 1.2 节摘自(有改编)《热电工程中的能源效率问题》, 2005, 经印度电力部能源效率局授权引用。

热能设备：窑炉和耐火材料

- 能够保存热量
- 热膨胀系数低
- 不能污染所接触的材料

表1对比了典型的高密度和低密度耐火材料的热性质。

表 1.典型耐火材料的性质(碳信托组织, 1993)

性质	高热质量 (高密度耐火材料)	低热质量 (陶瓷纤维)
导热率 (W/m K)	1.2	0.3
比热 (J/kg K)	1000	1000
密度 (kg/m ³)	2300	130

取决于各种应用领域，如锅炉、窑、炉、烘箱等，以及温度和大气的情况，需要用不同类型的耐火材料。耐火材料典型的安装方式如图2。



图 2a.窑炉拱门的耐火炉衬 (BEE, 2005)



图 2b.窑炉内部的耐火炉墙以及烧嘴砖 (BEE, 2005)

耐火材料的一些重要性质如下：

熔融点：纯净物再一定的温度下会立刻融化。大部分耐火材料是由熔融温度较高的颗粒粘合而成的。在高温下，这些颗粒会融化，形成熔渣。耐火材料的温度是使受测锥体(圆锥体)不能支撑其自身重量的温度。

尺寸：耐火材料的尺寸和形状是窑炉设计的一部分，因为它会影响窑炉结构的稳定性。精确的尺寸对于在窑炉内正确安装耐火材料，尽量减小施工缝是极为重要的。

容积密度：容积密度是耐火材料的一项有用的性质，它是指一定体积内的耐火材料重量(kg/m³)。某种耐火材料容积密度的增加会提高其体积稳定性、热容量和耐炉渣侵蚀的能力。

热能设备：窑炉和耐火材料

孔隙率：表观孔隙率是指液体可以渗入的开孔的体积占耐火材料总体积的百分比。如果耐火材料会和热装料和熔渣接触，这个性质就很重要。较低的表观孔隙率能够组织熔融材料渗入耐火材料。通常，宁可有大量的小孔也不要少量的大孔。

冷碎强度：冷碎强度是耐火材料抗破碎的强度，这种破碎大部分发生在运输过程中。冷碎强度和耐火材料的性能仅有间接联系，被当作抗磨强度的指示标准之一。容积密度和孔隙率也是抗磨强度的指示标准。

示温锥和示温熔锥当量(PCE)：(耐火)砖的“耐火性”是指使耐火材料由于不再能够支撑其自身的重量而弯曲的温度。示温锥用于在陶瓷工业中测试(耐火)砖的耐火性。它们由几种氧化物的混合物组成，这些氧化物的熔点已知，分布在一个较窄的温度范围内。将含有不同氧化物成分的示温锥按其熔点温度的顺序沿窑炉中的耐火砖排列。然后将窑炉点火，窑炉温度将升高。其中一个示温锥将和耐火砖一起弯曲。这时的温度就是这种耐火材料所能承受的最高温度，即示温熔锥当量温度(见图3)。

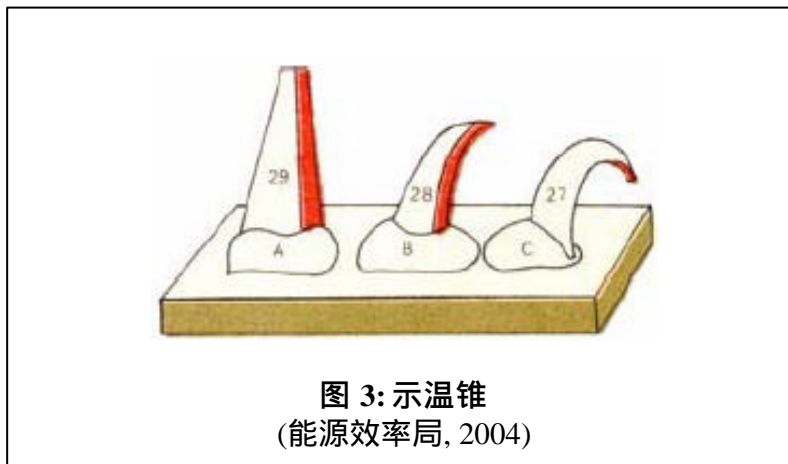


图 3: 示温锥
(能源效率局, 2004)

高温蠕变：蠕变是一个随时间变化的性质，它决定受压耐火材料在一定时间内和一定温度下的变形。

高温下的体积稳定性 膨胀和收缩：耐火材料在使用年限内可能发生收缩或膨胀的现象。这种变化是永久性的，其原因可能有：

- 同素异形体的变化，它会造成耐火材料比重改变
- 化学反应，从而产生一种比重不同的新材料
- 液相的形成
- 烧结反应
- 熔融粉尘和熔渣，或在粘土质耐火材料的碱性作用下，形成碱性硅酸铝。这通常存在于鼓风炉中。

可逆热膨胀：任何物质都有热胀冷缩的性质。可逆热膨胀是在加热和冷却时发生的物相变化的反映。

热能设备：窑炉和耐火材料

导热率：导热率取决于耐火材料的化学成分、矿物成分、硅含量，及其应用温度。导热率通常随温度升高而升高。当需要通过耐火砖传热时，需要耐火材料有较高的导热率，例如用于间壁换热器、回热器、马弗炉等。当耐火材料作为保温层，需要保持热量时，就需要较低的导热率。虽然增加保温层能够保持热量，但同时也提高了热表面温度，因此这时就需要用更高质量的耐火材料。因此，马丁炉的外炉顶通常是不保温的，因为保温层会造成炉顶坍塌。导热率较低的轻质耐火材料在低温热处理炉中用途较广，例如在批式炉中，耐火材料的热容量较低，最大限度地减少了在加热和冷却的循环过程中储存的热量。保温耐火材料的导热率较低。这通常是通过在耐火结构中多混入更高比例的空气来实现的。例如：

- 石棉等天然材料是很好的保温材料，但作为耐火材料不是特别好
- 矿物棉兼有良好的保温性和耐热性，但却不坚硬
- 多孔砖在高温下较为坚硬，导热率也较低。

2.窑炉、耐火材料和保温材料的类型

本节介绍供应中使用的窑炉、耐火材料和保温材料的类型，还提供了选择耐火材料以取得最佳效果的标准。

2.1 窑炉的类型

根据窑炉的生热方式，可以将其宽泛地划分为两种类型：用燃料生热的燃烧炉，以及用电生热的电炉。燃烧炉又能根据表2中的分类依据进行分类：使用燃料、加料方式、传热方式以及废热回收方式。不过，实践中用这种分类方法是不可行的，因为一个窑炉可以采用不同类型的燃料、不同的加料方式等等。应用最广泛的窑炉将在后面的章节中介绍。

2.1.1 锻炉²

锻炉用于预热坯料，使其达到“锻造”温度。窑炉的温度维持在大约1200到1500 °C。锻炉采用开放式火室系统，大部分的热量是通过辐射传导的。锻炉可承受的负荷一般是5到6吨，每天运行时间16到18小时。一个完整的运行周期可分为(i) 加热时间 (ii) 保温时间 (iii) 煅烧时间。锻炉的燃料比耗取决于材料的类型和需要“再热”的次数。

² 2.1.1 到 2.1.3 节摘自(有改编)《热电工程中的能源效率问题》，2005，经印度电力部能源效率局许可

热能设备：窑炉和耐火材料

表 2. 窑炉的分类

分类方法 使用燃料	类别和实例
	燃油窑炉
	燃气窑炉
加料方式	燃煤窑炉
	间歇 / 批量加料
	定期加料 <ul style="list-style-type: none"> ▪ 锻炉 ▪ 二次轧钢炉 (投料机/推料机) ▪ 熔锡炉
传热方式	连续加料 <ul style="list-style-type: none"> ▪ 推料机 ▪ 步进式炉底 ▪ 步进式炉床 ▪ 连续循环活底炉 ▪ 转底炉
	辐射 (开放式火室)
	对流 (通过媒介进行加热)
废热回收方式	换热炉
	回热炉

2.1.2 再轧机窑炉

a) 批量式

箱式炉可用作批量式再轧机窑炉。这种炉主要用于加热回炉料，以及用于再轧的2到20kg的小块坯料。批量式再轧机窑炉采取人工装料和卸料的方式，最终产品是钢条、钢带等。运行温度约为1200 °C。整个循环时间可进一步分为加热时间和再轧时间。原料在加热时间内被窑炉加热到需要的温度，然后被人工撤出窑炉，进行再轧。这类窑炉的日平均产量在10到15吨，燃料比耗在180到280千克煤/吨加热材料之间。

b) 连续送料式

连续送料式再轧机窑炉的工艺流程和运行循环和批量式再轧机窑炉一眼。运行温度约为1250 °C。通常，这类窑炉每天运行8到10小时，产量20到25吨。当坯料顺着窑炉的隧道运动时，会回收烟气中的部分热量。与批量式窑炉相比，在连续送料式窑炉中，材料在吸热缓慢、稳定，受热面均匀。

2.1.3 连续式再热炉

在连续式再热炉中，钢坯以一个连续的材料流的方式在窑炉中移动，被加热到需要的温度。钢坯的温度通常被提高到900°C 到1250°C，直到足够软化，从而能够被压制或轧制成需要的尺寸或形状。窑炉也必须满足一定的坯料加热速率，以满足金属工艺和生产率的要求。

热能设备：窑炉和耐火材料

为了保证能量损失被控制在最小的限度内，窑炉的出入口尺寸应当足够小，要设计来能够避免空气进入。连续再热炉可根据在窑炉内传送坯料的两种方式进行分类：

- 将坯料一起连续推过窑炉。这种窑炉叫做推料式窑炉。
- 将坯料放置在一个运动的炉床或支撑结构上，通过它们运送坯料通过窑炉。这类窑炉包括步进炉底式窑炉、步进炉床式窑炉、连续循环窑车式窑炉以及转底炉几种类型。

表 3比较了工业中应用的连续式再热炉的主要类型。

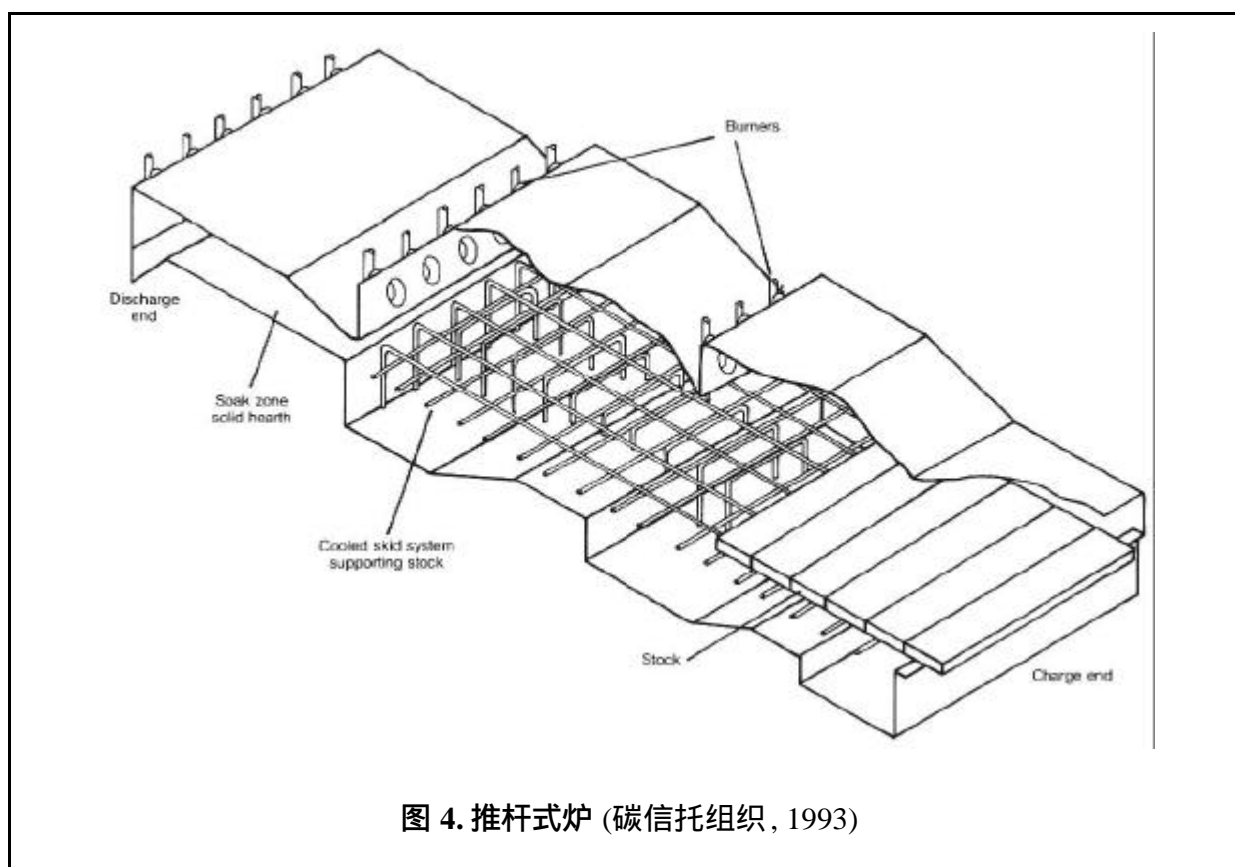
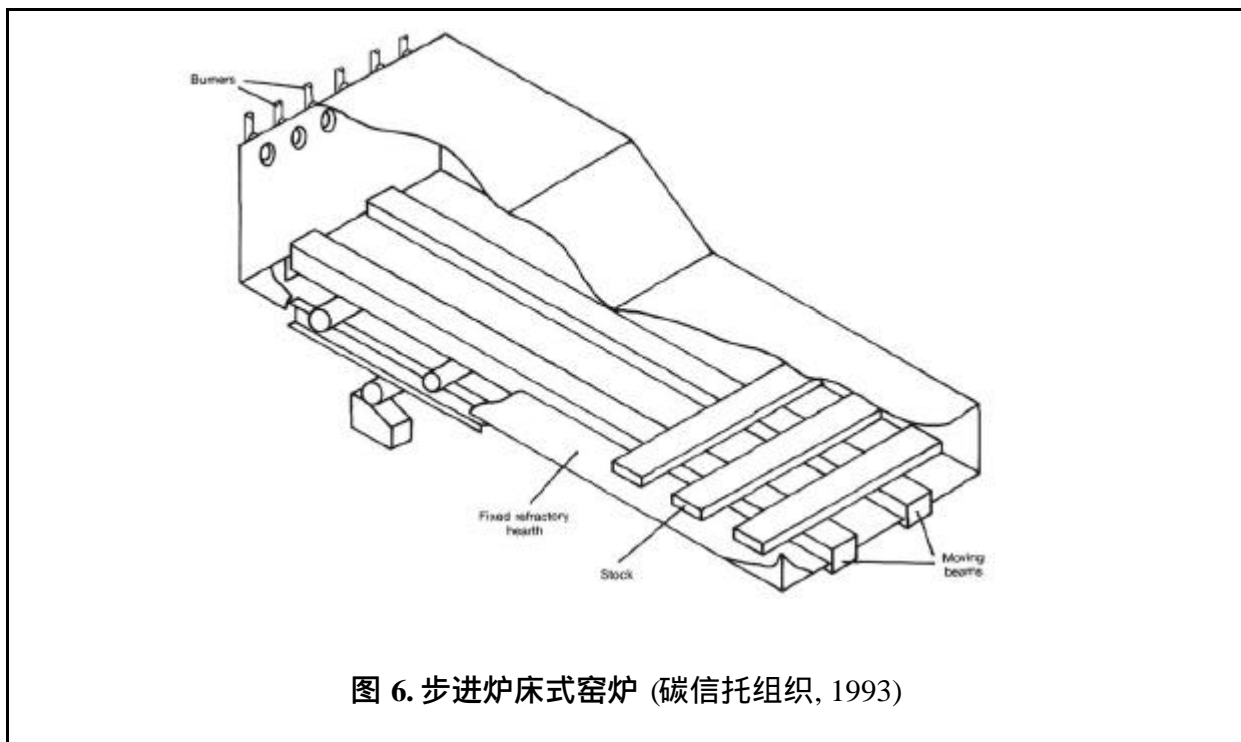
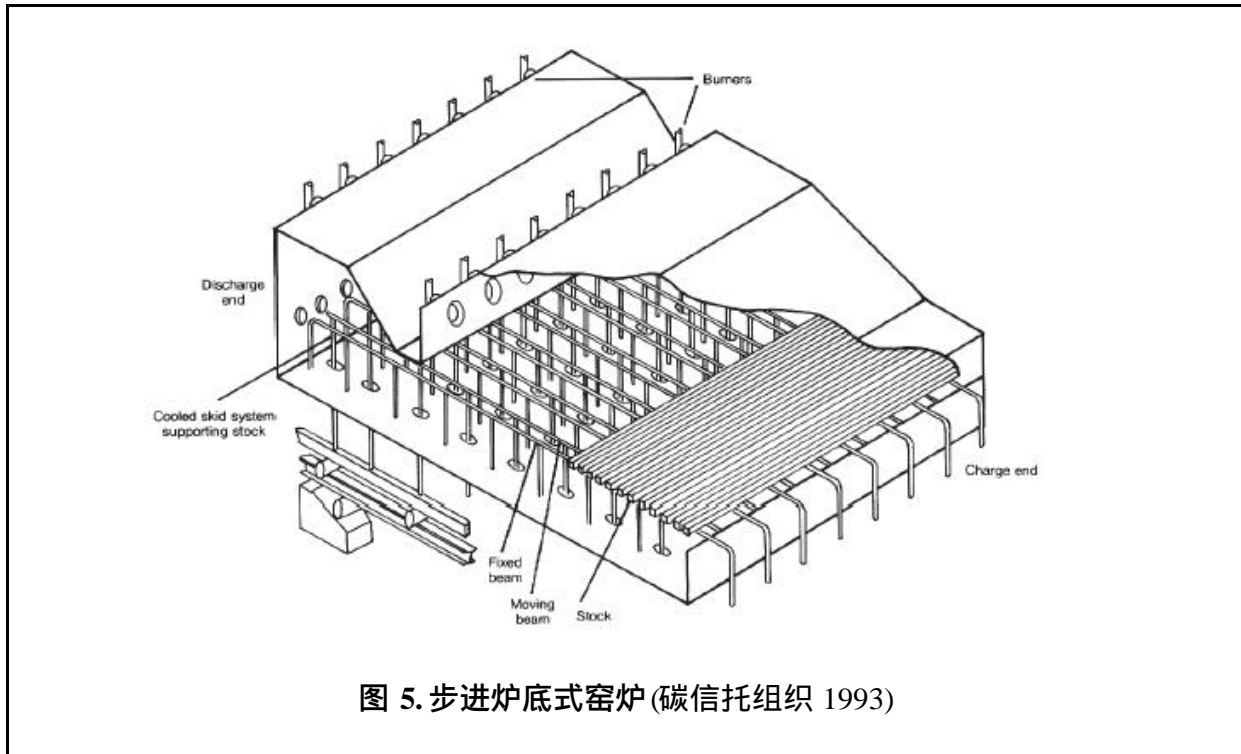


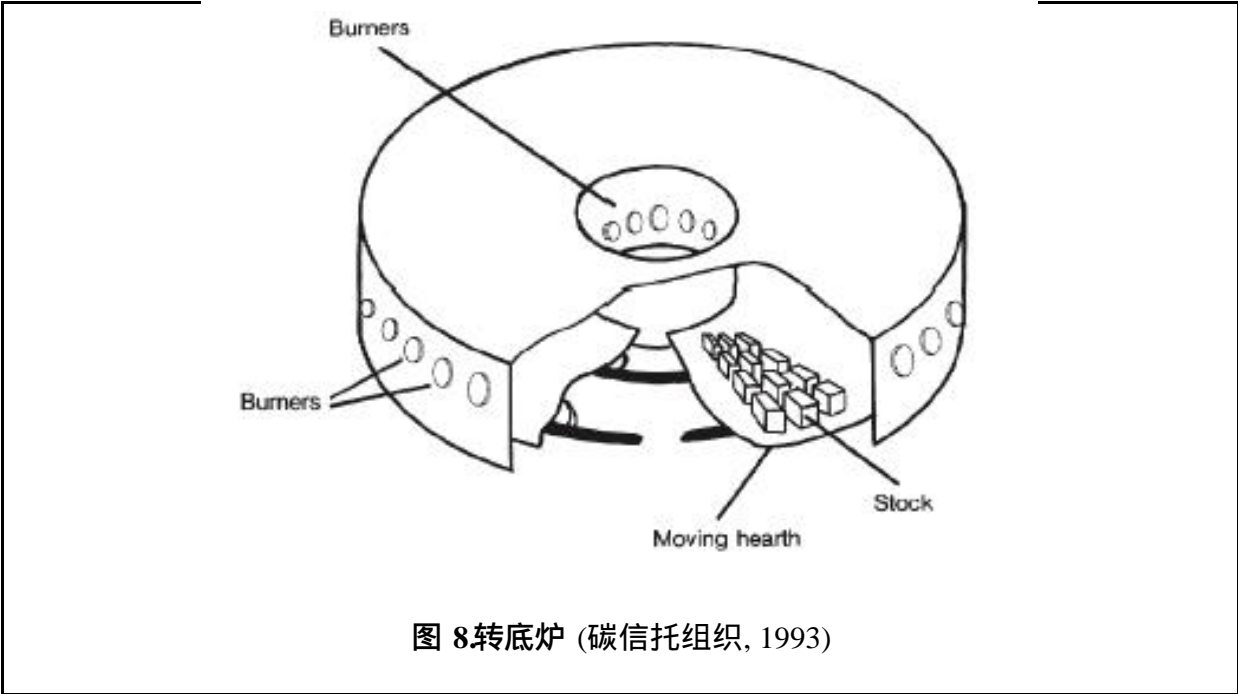
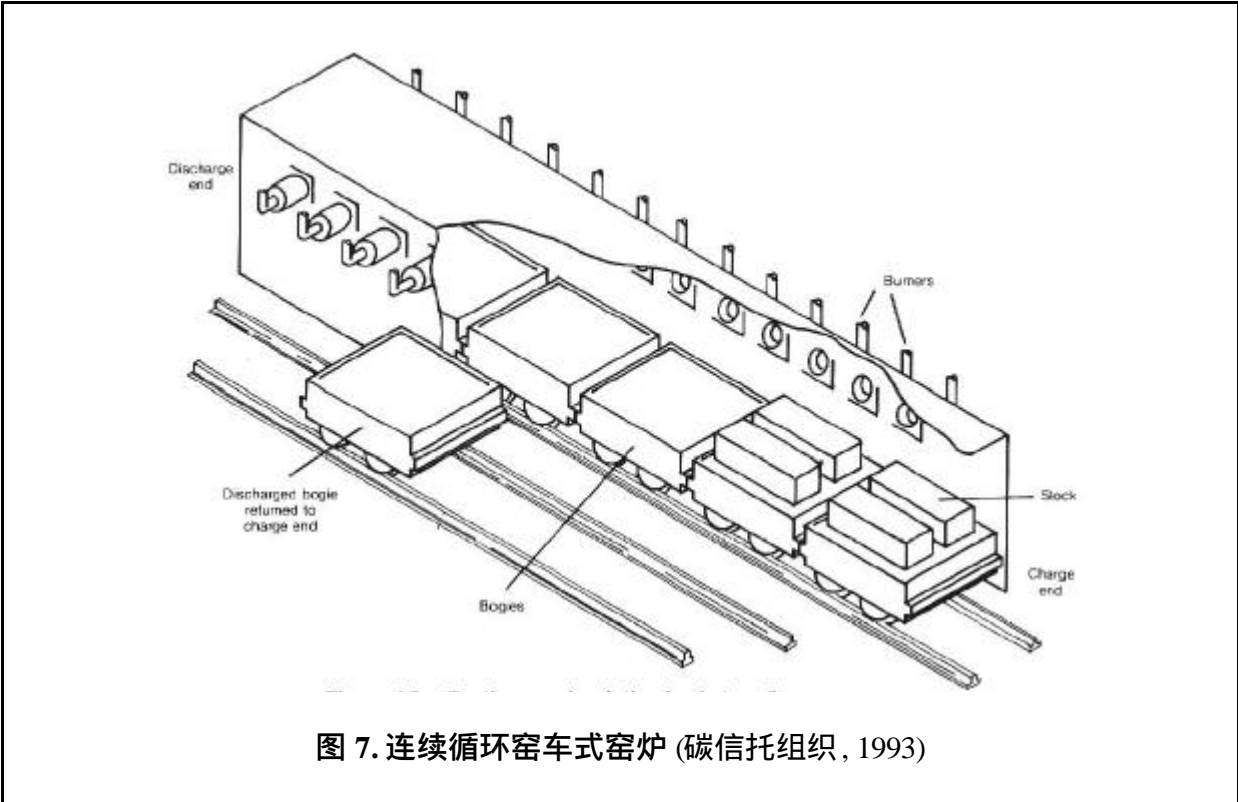
表 3. 不同类型连续式再热炉比较 (Adapted from 碳信托组织, 1993 and BEE, 2005)

类型	特点	优点	缺点
推杆式炉 (图 4)	<p>推杆式炉的主要特点是：</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ 推杆式炉有用固体炉床的，但大部分是用推料机进行加料和卸料。推料机“炉底滑道” (轨道)上滑动。 ▪ 这类窑炉通常有一个向卸料端倾斜的炉床，长度达35米，在顶烧炉中分为5个区域。 ▪ 燃烧器位于窑炉的卸料端，或在窑炉的顶部和/或底部，从而同时从顶部和底部进行加热或只从一面进行加热。 ▪ 在这类窑炉的卸料端有一个烟囱，烟囱带有一个换热器，以回收废热。 	<p>安装和维修成本较低(与移动炉床式窑炉相比)。</p> <p>同时从顶部和底部燃烧的优点：</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ 对坯料加热更快 ▪ 坯料的温差较小 ▪ 坯料在窑炉内停留时间较短 ▪ 窑炉长度较短(与固体炉床窑炉相比) 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 顶部和底部燃烧式窑炉中采用水冷的炉底滑道和坯料支撑结构会造成能量损失。 ▪ 卸料必须通过装料来完成。 ▪ 坯料尺寸和重量以及窑炉的长度受摩擦和坯料堆积的可能性限制。 ▪ 要完全清空窑炉需要专门的装置。 ▪ 由于(a)滑道造成的物理痕迹，即“滑痕”(b)由于顶部和底部燃烧炉的水冷支架而造成的沿坯料长度方向的温度差而造成产品质量下降。
步进炉底式窑炉 (图 5)	<p>这类窑炉的工作原理如下：</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ 坯料放置在固定的炉脊上 ▪ 步进式炉底从底部升起，托起坯料 ▪ 步进式炉底带着坯料向前移动 ▪ 在窑炉末端，步进式炉底下降，将坯料放置在固定的炉脊上 ▪ 将坯料从窑炉中卸掉，步进式炉底回到窑炉入口 <p>最初的步进炉底式窑炉的温度上限是1000 °C，但最新的型号能够达到1100 °C</p>	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 克服了推杆式炉的很多问题(滑痕、坯料堆积、装料/卸料) ▪ 可以从坯料的底部进行加热，从而缩短坯料加热时间和窑炉的长度，更好地控制加热速度，统一出料温度，提高操作的灵活性。 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 水冷会造成较高的能量损失(与步进炉床式窑炉相比) ▪ 很多窑炉位于轧钢机平面以下；这可能会在一些应用领域中称为一个限制因素 ▪ 有时由于窑炉的传统机构而必须从侧面进行煅烧，这样会造成坯料受热不均匀

热能设备：窑炉和耐火材料

类型	特点	优点	缺点
步进炉床式窑炉 (图 6)	基于步进炉床式窑炉的设计，坯料被放在从炉床上的开口延伸出的固定耐火砖上。坯料被“步进式炉床”断续地送往卸料端，这与步进炉底式窑炉相似。	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 设计简单 ▪ 建造简单 ▪ 能够满足不同尺寸的坯料 (在一定的限度内) ▪ 由于水冷造成的能量损失可忽略不计 ▪ 能够清空 ▪ 给坯料造成的物理痕迹很少 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 坯料的温度不均匀，因为坯料的底部不能被加热，而且坯料之间较小的空间限制了对侧面的加热。增大坯料之间的空间能够在一定程度上减轻这个问题。但是这样会使坯料在窑炉内的停留时间增加数小时，因而影响窑炉的灵活性和产量
连续循环窑车式窑炉 (图 7)	这类窑炉有一条狭长的隧道，隧道内有滑轨，工作原理如下： <ul style="list-style-type: none"> ▪ 坯料放置在窑车上(带轮的小车)，窑车上有耐火材料制成的炉床 ▪ 多个窑车连在一起，像一列火车一样在窑炉内移动 ▪ 坯料在卸料端被卸掉，窑车返回窑炉的装料端 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 适合批量加热各种尺寸和几何外形的坯料 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 在窑车内的坯料必须经过加热、冷却、再加热的循环 ▪ 窑车的加热和冷却会造成热储量损失 ▪ 窑车之间和炉身的缝隙密封不严，去除炉渣困难，窑炉狭长的形状给加热造成困难
转底炉 (图 8)	转底炉是最近开发出的一种窑炉，正在取代窑车式窑炉。这种窑炉的炉底承载着坯料在托辊上做圆圈运动，而炉墙和炉顶则保持静止。热气则向炉底运动的相反方向运动，烟气则在装料口附近排出。转底炉加热坯料的温度可达到 1300 °C	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 适合加热不同尺寸和几何外形的坯料 ▪ 与窑车式窑炉相比，降低了热储量损失 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 环状外形和旋转式炉底使得设计更加复杂 ▪ 由于装料和卸料位置较接近，可能给布置轧钢机和锻造机的位置造成计算上的困难





热能设备：窑炉和耐火材料

2.2 耐火材料的类型³

耐火材料可根据化学成分、最终用途和制造方法进行分类，如下表所示。

表 4.耐火材料的分类 (摘自 Gilchrist)

分类方法	举例
化学成分	
酸性，容易与碱性物质发生反应	硅质耐火材料，半硅质耐火材料，铝硅酸盐耐火材料
碱性，主要由金属氧化物组成，能够耐受碱性物质的作用	镁氧耐火材料，铬镁耐火材料，镁铬耐火材料，白云石耐火材料
中性，既不与酸发生反应也不与碱发生反应	火泥砖，铬质耐火材料，纯氧化铝耐火材料
特种耐火材料	碳素耐火材料，碳化硅耐火材料，氧化锆耐火材料
最终用途	高炉铸造坑耐火材料
制造方法	干压耐火材料，熔铸耐火材料，手工制造耐火材料，标准成形耐火材料，烧结或化学结合耐火材料，未成形耐火材料(整体耐火材料，耐火塑料，捣打耐火材料，喷涂熔铸耐火材料)

2.2.1 火泥耐火材料

火泥是最常见的耐火材料。它广泛应用于钢铁工业、非铁冶金业、玻璃工业、陶瓷窑、水泥工业等多个领域。

火泥耐火材料，如火泥砖、硅质耐火粘土以及铝土耐火材料，是由硅酸铝组成的，可变硅(SiO₂)含量达 78%，Al₂O₃含量达 44%。表 5 显示，火泥砖的熔融点(PCE)随杂质含量的增加以及 Al₂O₃含量的减少而降低。这种材料常用于窑、炉中，因为分布广泛，价格相对比较低廉。

图 5.典型火泥砖的性质 (BEE, 2005)

火泥砖类型	SiO ₂ 百分比	Al ₂ O ₃ 百分比	其他成分的百分比	PCE °C
特级火泥砖	49-53	40-44	5-7	1745-1760
高级火泥砖	50-80	35-40	5-9	1690-1745
中级火泥砖	60-70	26-36	5-9	1640-1680
高级火泥砖(硅质)	65-80	18-30	3-8	1620-1680
低级火泥砖	60-70	23-33	6-10	1520-1595

³ 2.2 节摘自(有改编)《热电工程中的能源效率问题》，2005，经印度电力部能源效率局许可

热能设备：窑炉和耐火材料

2.2.2 高铝耐火材料

通常，将铝含量高于45%的硅酸铝耐火材料定义为高铝耐火材料。高铝耐火材料的铝含量范围在45%到100%之间。高铝耐火材料的耐火性随铝含量的增加而提高。高铝耐火材料可用做高炉炉床和烟囱、陶瓷窑炉、水泥窑炉、玻璃熔炉和可融化多种金属的坩埚。

2.2.3 硅砖

硅砖(或称为“戴那砖”)是 SiO₂ 含量不低于 93%的耐火砖。这种耐火砖的原料是高品质的岩石。各种等级的硅砖广泛用于钢铁熔炉和玻璃工业。除了熔融点高，能够制成各种形状的耐火材料外，硅砖还具有耐热冲击(散裂)能力强以及耐火性强等重要性质。硅砖出色的性质体现在，在温度没有达到其熔融点前，它的高热负荷下不会软化。这一性质与很多其他的耐火材料形成了鲜明对比，例如硅酸铝耐火材料，它在比熔融点低很多的温度下就开始熔融和蠕变。硅砖还具有抗结渣能力强、体积稳定性强和耐热震能力强等优点。

2.2.4 镁氧耐火材料

镁氧耐火材料是碱性材料，氧化镁含量在 85%以上。它是天然存在的菱镁矿(MgCO₃)制成的。镁氧耐火材料的性质取决于工作温度下的硅酸盐结合剂浓度。高质量的镁氧耐火材料通常 CaO-SiO₂ 比例不小于 2，铁氧体含量最低，特别是当窑炉被衬以在氧化和还原状态下工作的耐火材料时。镁氧耐火材料的抗结渣能力非常强，特别是抗石灰石和铁含量较高的结渣。

2.2.5 铬质耐火材料

铬质耐火材料分为两类：

- 铬镁耐火材料，它通常含 15%-35%的Cr₂O₃和42%-50%的MgO。它们的质量选择范围很宽，用于建造高温窑炉的关键部位。这种耐火材料能够耐受酸性炉渣和烟气，耐火性也很高。
- 镁铬耐火材料，它含有 60%的MgO和8%-18%的Cr₂O₃。它们适合用于在最高的温度下工作，适合用于接触熔钢炉中酸性最强的炉渣。镁铬耐火材料的抗热震性通常也比铬镁耐火材料好。

2.2.6 氧化锆耐火材料

氧化锆(ZrO₂)是一种多形态材料。在将其用做耐火材料前必须对其进行稳定，这是通过在氧化锆中混合少量的钙、镁和氧化铈等材料来实现的。氧化锆耐火材料的性质主要取决于稳定的程度、稳定剂的总量和原始材料的质量。氧化锆耐火材料在室温下强度非常高，并且能够保持到 1500⁰C 的高温。因此，它们在窑炉中用做高温建筑材料。氧化锆的导热率比大多数其他的耐火材料低很多，因此这种材料可用做高温保温材料。氧化锆造成的热损失非常低，不容易于液态金属发生反应，因此特别适合用于制造耐火材料坩埚等冶金容器。玻璃熔炉也使用氧化锆耐火材料，因为它不容易被玻璃浸渍，也容易和玻璃发生反应。

2.2.7 氧化物耐火材料(氧化铝)

由氧化铝组成，几乎不含杂质的耐火材料叫做纯氧化铝耐火材料。氧化铝是已知的化学稳定性最高的氧化物。其机械强度也很高，不溶于水、过热蒸汽、大部分无机酸和碱。氧化

热能设备：窑炉和耐火材料

铝的性质使它适合制成用于熔化碳酸钠、氢氧化钠和过氧化钠的坩埚。氧化铝耐受氧化和还原性气体的能力很强。它广泛应用于热加工工业。高度多孔的氧化铝用于填充工作温度高达 1850°C 的窑炉。

2.2.8 整体耐火材料

整体耐火材料是按照设备的形状单间铸形而成的，如图 9 所示的钢包的衬垫层。它们正在很多应用领域，包括工业窑炉，取代传统的烧结耐火材料。整体耐火材料的主要优点有：

- 消除了接缝这一耐火材料固有的缺点
- 敷贴速度更快
- 不需要专门的安装技术
- 装卸和运输简便
- 能够更大程度的减少停工维修时间
- 大大减少库存量，不需要再保存特殊形状的备件
- 保持热能
- 抗热震性更好
- 体积稳定性更好

整体耐火材料可以用多种办法安装到位，如捣打、浇铸、喷射、喷涂以及投砂。捣打需要合适的工具，通常用于冷敷法，材料的充分固结是很重要的。捣打也用于空气硬化和高温硬化的耐火材料。由于采用铝酸钙做胶结剂，因此需要注意储存，以免吸潮。这种耐火材料的强度在使用 6 到 12 个月后开始下降。

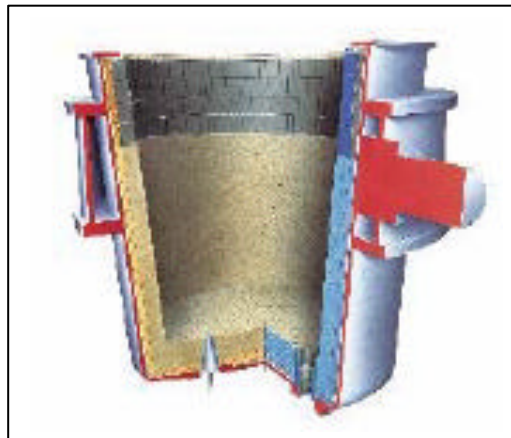


图 9. 钢包的整体衬垫层

热能设备：窑炉和耐火材料

2.3 保温材料⁴

保温材料能够大大减少从炉壁的热损失。对窑炉的保温是通过在内部热表面和外表面之间夹一层导热率低的材料从而使外表面温度保持在较低的水平来实现的。

保温材料可分为以下几类：

- 保温砖
- 浇铸保温材料
- 陶瓷纤维
- 硅酸钙
- 陶瓷涂层

保温材料的导热率之所以低，是因为它们疏松多孔，而它们的热容量取决于其体积密度和比热。空气保温材料由很多细小的孔构成，小孔中充满了空气，而空气的导热率是很低的。过量的热量对所有保温材料都有不利影响，但这种情况在多高的温度下出现，不同的保温材料是有很大大差别的。因此，保温材料的选择必须根据其耐热能力以及能够承受的最高温度来决定。硅藻土是应用最广泛的保温材料之一，这种材料也称为 *kiesel guhr*，它是由大量水生植物的遗骸在数千年前沉积在海床和湖床上形成的。硅藻土的化学成分是混有粘土和有机物的氧化硅。如今，用硅藻土制成了很多种类、性质各异的保温材料。表6显示了一些保温材料的重要物理性质。

表 6. 保温材料的物理性质 (BEE, 2005)

类型	400°C 下的导热率	最高安全温度 (°C)	冷碎强度 (kg/cm ²)	孔隙度 (%)	体积密度 (kg/m ³)
密实硅藻土	0.025	1000	270	52	1090
多孔硅藻土	0.014	800	110	77	540
粘土	0.030	1500	260	68	560
高铝质保温材料	0.028	1500-1600	300	66	910
氧化硅	0.040	1400	400	65	830

2.3.1 可浇铸材料和混凝土

窑炉的整体耐火炉衬可以通过浇铸耐火保温混凝土，添加轻骨料使其紧密结合而制成。耐火混凝土还可用做陶瓷工业的窑车底板。耐火混凝土的成分与用做件式耐火材料材料相似，除了含波特兰水泥或高铝氧水泥的混凝土。

2.3.2 陶瓷纤维

陶瓷纤维是一种具有较低热质量的保温材料，它彻底改变了窑炉衬层系统的设计。陶瓷纤维由氧化铝和硅石在 1800 – 2000°C 的高温下混合和熔化后，用压缩空气鼓吹的方法破坏熔化液体或将该熔化液体坠落在转盘上，以形成疏松或松散的陶瓷纤维。该松散的纤维用

⁴ 2.3 节摘自(有改编)《热电工程中的能源效率问题》，2005，经印度电力部能源效率局许可

热能设备：窑炉和耐火材料

来制造各种各样保温产品如毯子，带子，贴面和锚定模块，纸张，真空成形板以及模型，绳索，湿毡和胶粘水泥等。一般情况下根据 Al_2O_3 的含量的不同，在两个温度等级下生产该纤维。一种新产品是加入铝矽酸盐的 ZrO_2 ，它能够帮助纤维降低收缩程度从而使纤维适用于更高温度的工作环境。推荐纤维连续的运行温度见表 7。

表 7. 推荐纤维连续的运行温度 (BEE, 2005)

	Al_2O_3	SiO_2	ZrO_2
1150°C	43 – 47 %	53 – 57 %	-
1250°C	52 – 56%	44 – 48%	-
1325°C	33 – 35 %	47 – 50%	17 – 20 %

通常情况下陶瓷纤维以大量毛绒状的形式生产出来，然后将其织成一个密度在 64 - 190 kg/m^3 的毯子。织成的毯子可转化为 40 多种不同形式的其它产品以满足各种要求。

陶瓷纤维的特点是它同时具备了耐火材料和传统保温材料的特性。

a) 更低的热传导率

由于它的热传导率很低（密度为 128 kg/m^3 的毯子在 600 °C 时每小时每 °C 的传导率为 0.1 kCal/m ），因此就有可能达到相同的热效率的情况下，构建一个比传统耐火材料更薄的衬层。由于衬层厚度降低，就增加了窑炉的容量。陶瓷纤维比质量较好的保温砖的效率高出 40%，其性能比石棉好 2.5 倍。与硅酸钙相比而言，陶瓷纤维是一个更好的绝热体。

b) 轻质量

陶瓷纤维的平均密度是 96 kg/m^3 。它的重量是保温砖的十分之一，是石棉/硅酸钙板的三分之一。因此新窑炉的结构支撑量可降低 40%。

c) 更低储热量

由于陶瓷纤维衬层的密度较低，因此它吸收的更少的热量。陶瓷纤维衬层系统的储热量范围为 2700 - 4050 kCal/m^2 (1000 - 1500 Btu/Ft^2)，而传统衬层系统的储热量范围为 54200-493900 kCal/m^2 (20000 - 250000 Btu/Ft^2)。

d) 抵抗热冲击

由于陶瓷纤维衬层有弹性矩阵结构，因此它们能抵抗热冲击。这也使得加热和冷却周期更快，从而提高窑炉的可用性和生产力。

e) 抵抗化学腐蚀

陶瓷纤维可以抵抗大多数化学侵蚀，并不受烟气中烃类，水和蒸汽的影响。

f) 机械弹力

陶瓷纤维具有较高的机械弹力，这使得可以不在现场组装纤维衬层窑炉，而是可以组装好后发往现场，这不会有损坏的危险。

热能设备：窑炉和耐火材料

g) 较低的安装成本

安装陶瓷纤维有是一套标准的过程，并不需要特殊的技能。纤维衬层不需要晾干或养护时间，并且当它们加热后再安装时没有出现裂缝或破裂的危险。

h) 维修方便

在出现物理损伤的情况下，受损的陶瓷纤维部分可以迅速的用新材料替换掉。可以预先制造出一整块以便进行快速安装，尽量降低停炉时间。

i) 易于处理

所有形式的产品都易于处理，大多数可以用刀子或剪刀迅速进行剪裁。真空下生成的产品可能需要用带锯进行剪裁。

j) 热效率

用陶瓷纤维作为衬层可以提高窑炉热效率的原因有两点。第一，由于陶瓷纤维的热传导率较低，因此衬层厚度更小，从而窑炉可以变得更小。第二，陶瓷纤维对温度变化的快速反应使得控制更加精确，窑炉内的温度分布也更加均匀。

陶瓷纤维的其它优点有：

- 减轻窑炉重量
- 简化钢铁构架工作
- 缩短停机时间
- 增加生产率
- 增加容量
- 降低维修成本
- 更长的使用期
- 更高的热效率
- 更快的反应速度

2.3.3 高发射率涂层

通常认为发射率（表示材料吸收和辐射热量的能力）是一个不会改变的内在物理性质（其它的诸如密度，比热和热传导率）。尽管如此，高发射率的涂层可以使材料的表面发射率增加。高发射率涂层用于窑炉内部表面上。图10表示了各种保温材料的发射率随着过程温度的增加而降低的关系。高发射率涂层的优点在于它的发射率大致保持在一个恒定值上。

高温运行下的窑炉发射率为 0.3。通过使用高发射率的涂层，窑炉发射率可以增加到 0.8，增加了辐射传热量。

其它窑炉室内高发射率涂层的优点是能使加热均匀，增加耐火材料和其它金属元件如辐射管和加热设备的使用寿命。对于间歇式窑炉或其它需要快速加热的设备，使用这样的涂层可以降低燃料或能量 25 – 45%。

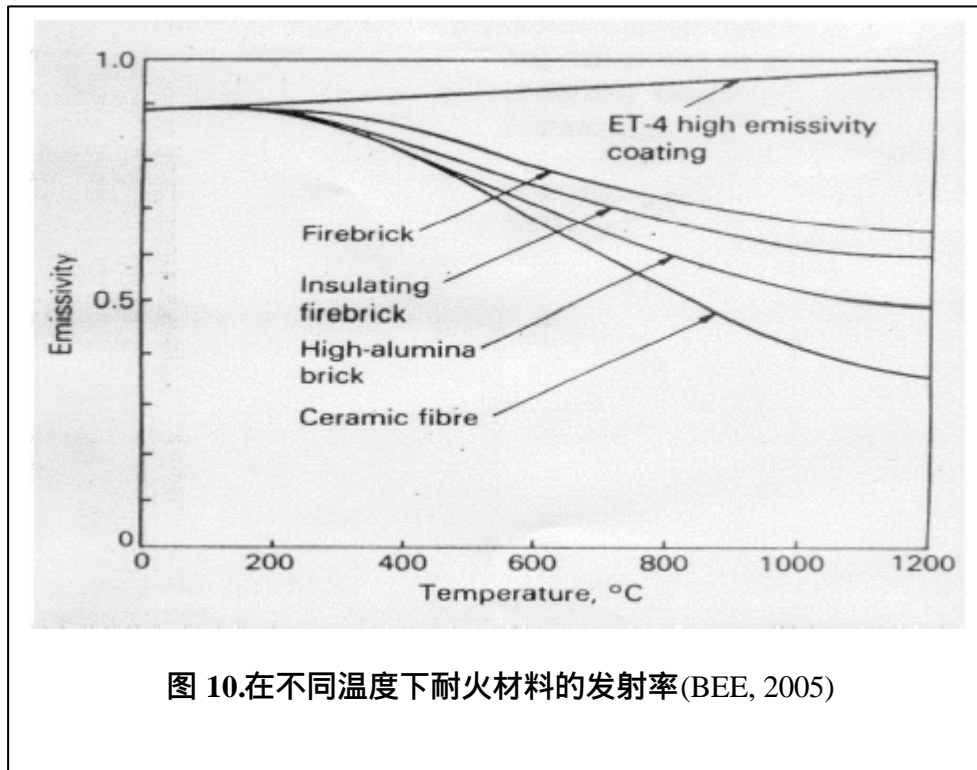


图 10.在不同温度下耐火材料的发射率(BEE, 2005)

3.对窑炉的评估

该章节描述了各种各样用来量化窑炉热损失的方法和技术，以及进行典型窑炉性能评估的方法。

3.1热损失影响窑炉性能

理想情况下，所有供给窑炉的热量都应该用来加热负荷或炉料。然而实际操作中，很多热量通过各种方式损失掉了，如图11所示。

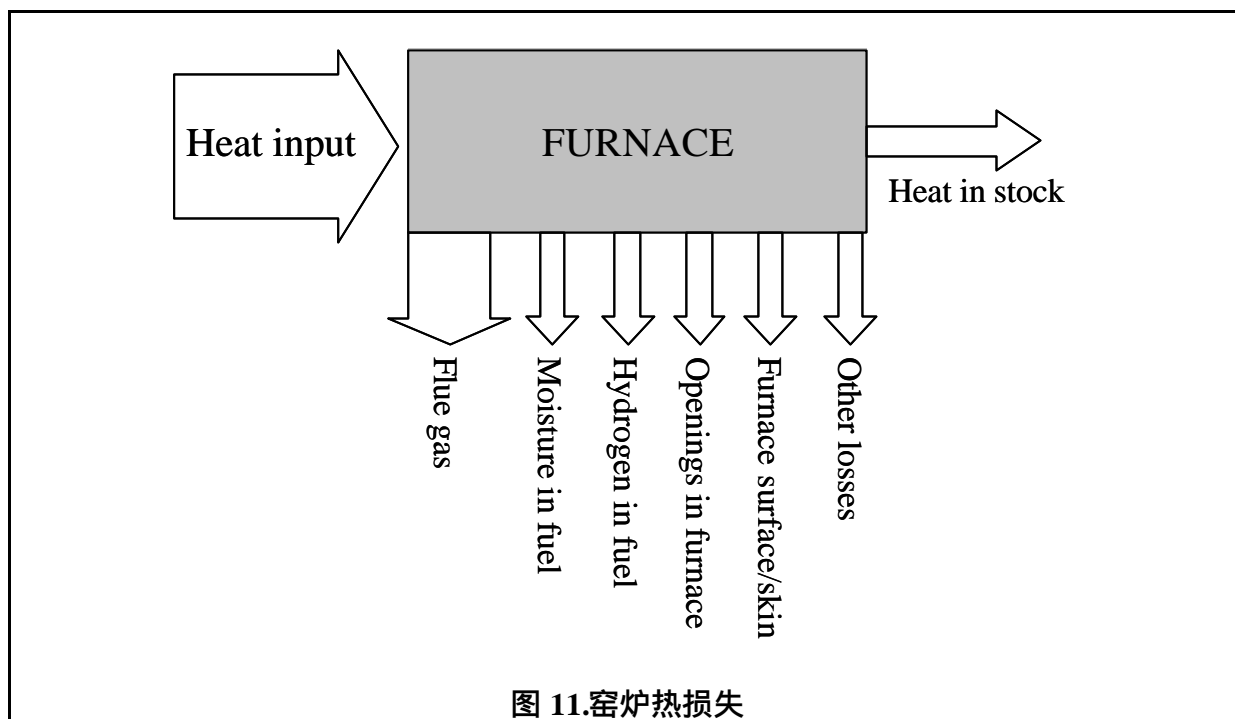


图 11.窑炉热损失

这些窑炉热损包括 (BEE, 2005 and US DOE, 2004)：

- **烟气损失：**一部分热量留在窑炉内的炉气里。该损失也称为废气损失或烟囱损失。
- **燃料水分热损失：**一般情况下燃料包括一些水分，因此窑炉内的一些热量将耗于蒸发这些水分。
- **燃料里的氢元素热损失** 燃料中的氢元素会生成水，从而耗费热量。
- **窑炉的开孔热损失：**当窑炉外围出现开孔时会带来大量的辐射热损失，特别是当窑炉的运行温度高于 540°C 时。第二损失是空气渗透造成的。由于炉体/烟囱的抽风使得窑炉内部呈负压，这使得空气从漏洞和裂缝中或打开的窑炉门中渗入。
- **窑炉表面损失**，也叫做炉墙热损失：当窑炉内部的温度很高时，热量通过炉顶，炉底和炉墙达到窑炉表面并散发到周围大气中。
- **其它损失：**窑炉还有其它很多损失热量的方式，要将这些热损失量化是非常困难的。一些热损失方式包括：
 - 储存热损失：当窑炉启动时窑炉结构和保温层也被加热，当窑炉停机时这些热量也仅仅留在了窑炉结构中。因此在许多次窑炉的启动停机之后，这种方式损失的热量就积累起来了。
 - 材料处理热损失：将坯料从窑炉中去掉的设备，如传送带，振动梁，台车等同样也吸收热量。每次这些设备离开窑炉时它们会损失掉自己的热量，增加的热量损失量与设备数量和它们进出窑炉的频率有关。
 - 冷介质损失：用来冷却设备，转子，轴承的水和空气会造成热量损失，因为这些介质本身会吸收热量。
 - 不完全燃烧损失：如果燃烧不完全就会产生热量损失，因为不完全燃烧的燃料和颗粒会吸收热量而这些热量没有得以利用。

热能设备：窑炉和耐火材料

- 形成污垢而导致产生热损失

3.2 评估窑炉性能的仪器⁵

在减掉各种各样的热损失后计算窑炉效率。使用间接方法得到窑炉效率的方式，需要测量很多参数，如窑炉每小时的耗油量，运出的坯料，过量空气量，烟气温度，窑炉不同区域的温度等。这些参数值一部分可以从生产记录中得到，而其它参数值必须通过特殊监控仪器才能测量到。表8列出了测量这些参数所需要的仪器。

表 8. 测量窑炉性能参数的仪器 (BEE, 2005)

被测参数	测量点	所需仪器	指示范围
窑炉均热带温度 (再热窑炉)	均热带和侧墙	带有指示器和记录器的 Pt/Pt-Rh 热电偶	1200-1300°C
烟气温度	在管道排出口附近，进入换热器处	Chromel Alumel 式带指示器的热电偶	最大值 700°C.
烟气温度	换热器之后	Hg in steel thermometer	300°C (最大值)
加热区窑炉压力	在装料末端和炉底上方侧墙	Low pressure ring gauge	+0.1 mm of Wc
烟气中的氧含量	在管道出口末端	测量氧气和温度的燃料效率监控仪	5% O ₂
坯体温度	便携式	红外线高温计或光学高温计	-

3.3 计算窑炉性能

传给窑炉内部的坯料或负荷的热量比例越高，窑炉的效率就越高。类似于锅炉，窑炉效率的计算方式也有两种，直接法和间接法。两种方法阐述如下。

3.3.1 直接法

窑炉效率可以通过测量坯料吸收的热量，并将该热量除以消耗燃料的总热量来得到。

$$\text{窑炉热效率} = \frac{\text{坯料热量}}{\text{加热坯料消耗的燃料所含热量}}$$

⁵ 3.2 节摘自(有改编)《热电工程中的能源效率问题》，2005，经印度电力部能源效率局许可

热能设备：窑炉和耐火材料

传给坯料的热值量(Q)可以通过以下等式计算出：

$$Q = m \times C_p (t_1 - t_2)$$

其中：Q = 坯料吸热量，单位：kCal

m = 坯料质量，单位：kg

C_p = 坯料平均比热，单位：kCal/kg °C

t_1 = 坯料最终温度，单位：°C

t_2 = 坯料进入窑炉之前的起始温度，单位：°C

计算示例见 3.3.3 章节

3.3.2 间接方法

与计算锅炉效率相似，窑炉效率同样可以通过间接法得到。原理很简单：将热损失从供给窑炉的热量中减去。图 11 表示了不同形式的热损失。表 9 给出了普通工业锅炉的典型热效率。

表9. 普通工业锅炉热效率(BEE 2005)

窑炉型号	典型热效率 (百分比)
1) 低温窑炉	
a. 540 – 980 °C (间歇式)	20-30
b. 540 – 980 °C (连续式)	15-25
c. 带卷退火 (钟形) 辐射式	5-7
d. 带材退火耐火罩式	7-12
2) 高温窑炉	
a. 推料机, 旋转机械	7-15
b. 间歇铸造	5-10
3) 连续窑炉	
a. 霍夫曼式	25-90
b. 隧道式	20-80
4) 加热炉	
a. 间接加热炉 (20 °C – 370 °C)	35-40
b. 直接加热炉 (20 °C – 370 °C)	35-40

在下章节中给出了一个使用间接计算法计算效率的示例。

3.3.3 计算窑炉效率示例

使用直接法和间接法计算燃油再热窑炉的效率，使用以下数据：

运行温度：1340°C

预热器出口的烟气温度：750°C

大气温度：40°C

热能设备：窑炉和耐火材料

预热空气温度：	190°C
燃油比重：	0.92
平均耗油量：	400 升/h= 400 x 0.92 =368 kg/h
燃油热值：	10000 kCal/kg
烟气中 O ₂ 平均百分比	12 percent
1 kg 燃油所含水分	0.15 kg
1 kg 燃油所含 H ₂	0.1123 kg
燃烧 1 kg 燃油所需要的理论空气量：	14 kg
坯料重量：	6000 kg/hr
坯体比热：	0.12 kCal/kg ⁰ C
炉墙厚度 (D)：	460 mm
坯体抽出口(X)：	1 m x 1 m

加热和均热带的平均表面温度 122 °C

非加热带和非均热带的平均表面温度： 80 °C

加热带和均热带面积： 70.18 m²

非加热带和非均热带面积： 12.6 m²

直接计算法

燃油输入量为 400 l/hr，用燃油的比重将该值单位转换为 kg，因此：400 l/hr x 0.92 kg/l = 368 kg/hr

输出热量值计算如下：

$$\begin{aligned} &= m \times C_p \times \Delta T \\ &= 6000 \text{ kg} \times 0.12 \times (1340 - 40) \\ &= 936000 \text{ kCal} \end{aligned}$$

效率：

$$\begin{aligned} &= (\text{热量输入值} / \text{热量输出值}) \times 100 \\ &= [(936000 / (368 \times 10000))] \times 100 = 25.43\% \end{aligned}$$

估计热损失 100% - 25% = 75%

间接方法

不同的热损失值计算如下。

a) 烟气热损失

过量空气 (EA)

$$= \text{O}_2 \text{ 百分比} / (21 - \text{O}_2 \text{ 百分比})$$

热能设备：窑炉和耐火材料

$$= 12 / (21 - 12)$$
$$= 133 \%$$

供给空气量

$$= (1 + EA/100) \times \text{理论空气量}$$
$$= (1 + 1.13) \times 14$$
$$= 32.62 \text{ kg/kg 燃油}$$

$$\% \text{ 烟气热损失} = \frac{m \times C_p \times ? \times T \times 100}{\text{燃料 GCV}}$$

其中：

$$m = \text{烟气质量 (空气 + 燃料)} = 32.62 + 1.0 = 33.62 \text{ kg/kg 燃油}$$

C_p = 比热

? T = 温差

$$\% \text{ 热损失} = \frac{\{33.62 \times 0.24 \times (750 - 40)\} \times 100}{10000} = 57.29\%$$

b) 燃料水分热损失

$$\% \text{ 燃料水分热损失} = \frac{M \times \{584 + C_p (T_f - T_{\text{amb}})\} \times 100}{\text{燃料 GCV}}$$

其中：

M = 燃油中所含水分量，kg

T_{fg} = 烟气温度， $^{\circ}\text{C}$

T_{amb} = 大气温度， $^{\circ}\text{C}$

GCV = 燃料总热值，kCal/kg

$$\% \text{ 热损失} = \frac{0.15 \times \{584 + 0.45 (750 - 40)\} \times 100}{10000} = 1.36\%$$

c) 燃料含氢热损失

$$9 \times H_2 \times \{584 + C_p (T_f - T_{\text{amb}})\} \times 100$$

热能设备：窑炉和耐火材料

$$\% \text{ 燃料含氢热损失} = \frac{\text{燃料 GCV}}{\text{燃料 GCV}} \times 100$$

其中，

$$H_2 = 1 \text{ kg 燃油含 } H_2 \text{ 量} (= 0.1123 \text{ kg/kg 燃油})$$

$$\% \text{ 热损失} = \frac{9 \times 0.1123 \times \{584 + 0.45 (750 - 40)\}}{10000} \times 100 = 9.13\%$$

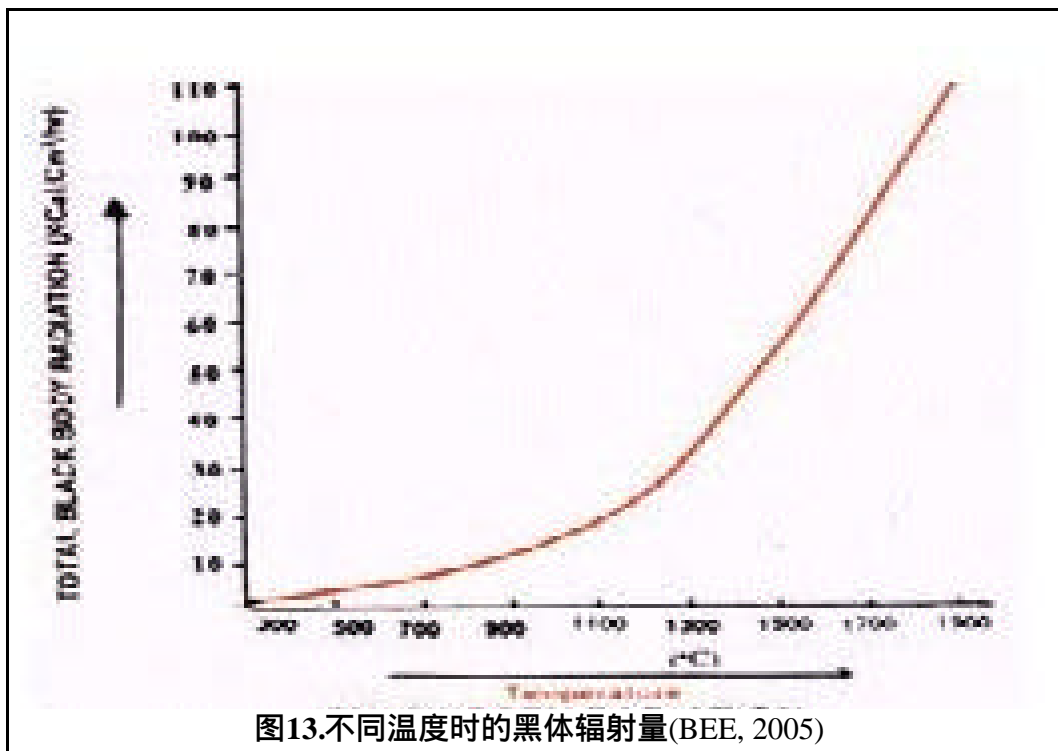
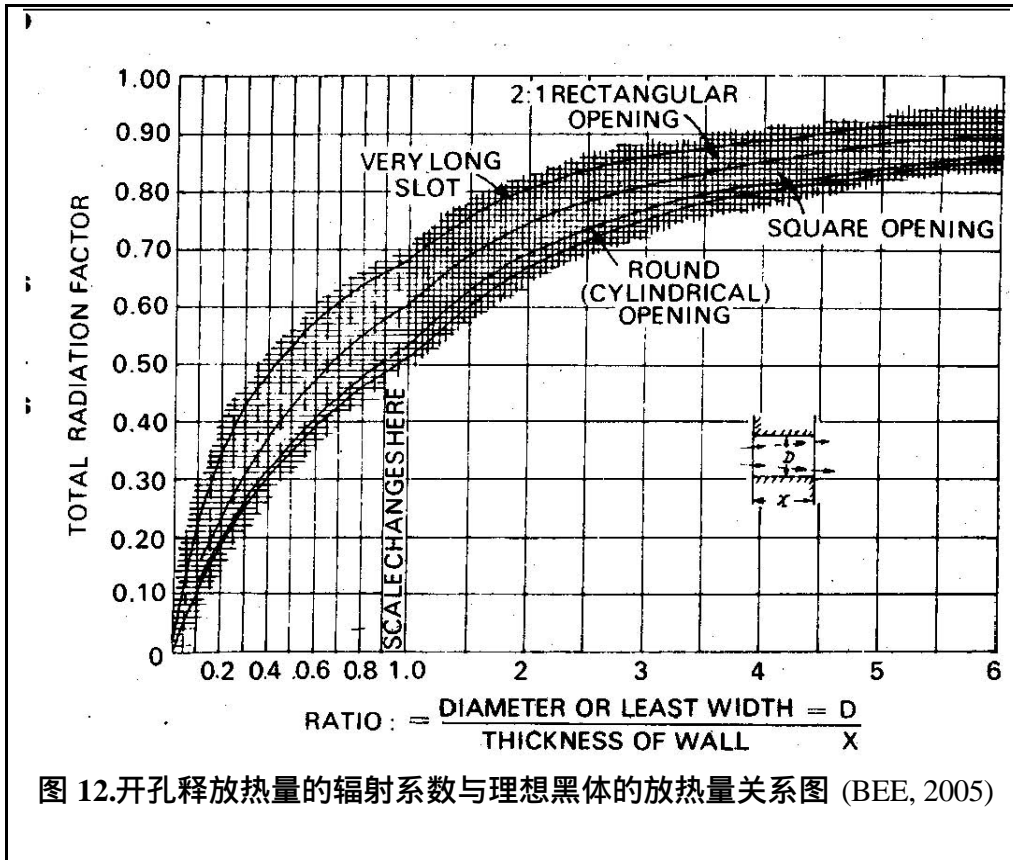
d) 窑炉开孔热损失

$$\% \text{ 窑炉开孔热损失} = \frac{(\text{黑体辐射系数} \times \text{发射率} \times \text{辐射系数} \times \text{开孔面积}) \times 100}{\text{燃油量} \times \text{燃油 GCV}}$$

开孔的辐射系数和黑体辐射系数可以从标准图表中查出，如图12和图13所示。

- 辐射系数 (见图 12) = 0.71
- 1340 °C 时的黑体辐射 (见图 13) = 36 kCal/kg/cm²/hr
- 开孔面积为 100 cm x 100 cm = 10000 cm²
- 发射率 = 0.8

$$\% \text{ 窑炉开孔热损失} = \frac{36 \times 0.8 \times 0.71 \times 10000 \times 100}{368 \times 10000} = 5.56\%$$



热能设备：窑炉和耐火材料

e) 窑炉表面热损失

为了得到窑炉表面热损失值，必须单独计算炉顶，炉墙和其它区域的热损失值。

i). 炉顶和炉墙的热损失 (= 加热和均热带):

- 总共平均表面温度 = 122°C
- 122°C 时热损失 (见 14) = 1252 kCal / m² hr
- 加热带 + 均热带总面积 = 70.18 m²

$$\text{炉顶热损失} = \frac{\text{炉顶和炉墙热损失}}{\text{炉顶和炉墙面积}}$$

$$\text{总热损失} = 1252 \text{ kCal} / \text{m}^2 \text{ hr} \times 70.18 \text{ m}^2 = 87865 \text{ kCal/hr}$$

ii) 非加热带和非均热带热损失

- 总平均表面温度 = 80 °C
- 80°C 时热损失 (见图 14) = 740 kCal / m² hr
- 总面积 = 12.6 m²

$$\text{其它区域热损失} = \frac{\text{其它区域热损失}}{\text{其它区域面积}}$$

$$\text{总热损失} = 740 \text{ kCal} / \text{m}^2 \text{ hr} \times 12.6 \text{ m}^2 = 9324 \text{ kCal/hr}$$

$$\% \text{窑炉表面热损失} = \frac{(\text{热损失 i} + \text{热损失 ii}) \times 100}{\text{燃油 GCV} \times \text{每小时耗油量}}$$

$$\% \text{窑炉表面热损失} = \frac{(87865 \text{ kCal/hr} + 9324 \text{ kCal/hr}) \times 100}{10000 \text{ kCal/kg} \times 368 \text{ kg/hr}} = 2.64\%$$

f) 未说明损失

除非知道其它形式的热损失，否则无法计算未说明损失。

窑炉效率

热能设备：窑炉和耐火材料

将 a 到 f 的热损失加起来得到总热损：

a) 烟气损失	= 57.29 %
b) 燃料水分热损失	= 1.36 %
c) 燃料含氢热损失	= 9.13 %
d) 窑炉开孔热损失	= 5.56 %
e) 窑炉表面热损失	= <u>2.64 %</u>
总损失	= 75.98 %

通过间接方法计算窑炉效率 = $100 - 75.98 = 24.02\%$

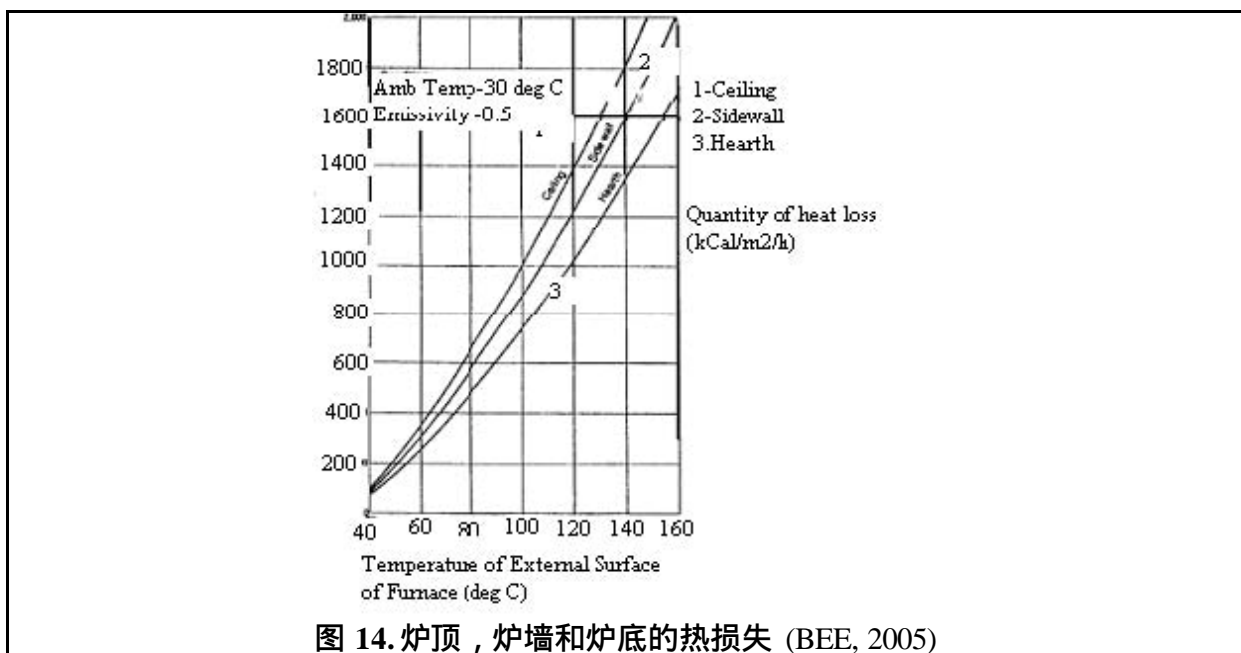


图 14. 炉顶，炉墙和炉底的热损失 (BEE, 2005)

4. 提高能源效率的可能性

该章节阐述了各种各样节约窑炉能量的方案。⁶工业窑炉的典型能源效率方案有：

1. 在保证完全燃烧的基础上最小化过量空气
2. 适当分配热量
3. 在最优窑炉温度下运行
4. 降低窑炉开口热损失
5. 保持恰当的窑炉通风量
6. 优化容量利用
7. 回收烟气废热
8. 最小化耐火材料损失
9. 使用陶瓷涂层

⁶ 第 4 节摘自(有改编)《热电工程中的能源效率问题》，2005，经印度电力部能源效率局许可

10. 选择正确的耐火材料

4.1 在保证完全燃烧的基础上最小化过量空气

烟气中的热损失量（烟囱损失）取决于过量空气量。为了达到在保证完全燃烧的基础上最小化过量空气，就必须控制渗入的空气，保持燃烧空气压力，燃料质量和监控过量空气量。过多的过量空气会降低火焰温度，窑炉温度和加热速度。过量空气过少会增加烟囱排气中的不完全燃烧成分，并会造成更多的结垢损失。

优化燃烧空气是节约能量的最好的和最经济的方法。当窑炉温度较高时，潜在节约量也更高。空气比值（=实际空气量/理论燃烧空气量）表示过量空气量。如果一个再热窑炉没有安装自动空气/燃料比例控制器，那就必须定期抽取窑炉烟气样本并用烟气分析仪测量其含氧量。

4.2 适当分配热量

一个窑炉必须设计来保证用最少的燃料，在给定的时间内将坯料均匀加热到理想温度，

当燃烧器点燃窑炉时，必须注意以下几点，以保证适当的分配热量：

- 火焰不能碰到任何固体，或被固体阻挡。障碍物会阻止燃料颗粒雾化，这会影响燃烧从而产生黑烟。如果火焰撞击坯料，结垢损失会增加。如果火焰撞击到耐火材料上，不完全燃烧的固体会沉淀下来，在高温下会和耐火材料反应。
- 不同燃烧器的火焰应该互不干扰，因为火焰交叉会导致燃烧不完全。在相对炉墙上布置的燃烧器也应该尽量错开。
- 在坯料上方的燃烧器火焰可以在燃烧区域内自由窜动。因此，小窑炉的燃烧器轴线不能平行于炉底，而是应该有一个向上倾斜的角度，但注意火焰不能撞击到炉顶。
- 容量较大的燃烧器可产生较长的火焰，这使得将火焰控制在炉墙内很难。在窑炉里布置更多的小容量的燃烧器可使得热量分配更好，并且可以增加窑炉寿命。
- 对于使用燃油的小窑炉，一个能产生金黄色较长火焰的燃烧器可以改进均衡加热。由于火焰接触烟囱或窑炉门时会损失热量，因此火焰也不应该过长。

4.3. 在最优化窑炉温度下运行

在最优化的窑炉温度下运行是非常重要的。各种窑炉的运行温度见表 10。运行的温度过高会造成热量损失，过度氧化，脱碳和耐火材料负荷过大。窑炉温度的自动控制是为了避免人为误操作。

表 10.不同窑炉的运行温度

厚板再热窑炉	1200°C
轧制窑炉	1200°C
薄板轧机链条炉	800°C

热能设备：窑炉和耐火材料

台车式退火炉	650°C - 750°C
--------	---------------

4.4. 降低窑炉开口热损失

热量可以通过窑炉开口的直接热辐射损失掉，如装料口，抽取口和炉墙或炉顶上的窥视孔。窑炉内部和外界环境的压差会导致燃气从开口处泄漏出去，从而导致热损失。但是绝大部分损失热量是由于外界空气渗透入窑炉造成的，因为渗入空气除了会导致热损失外，还会使得窑炉和坯料的温度不均匀，甚至导致坯体氧化。

因此保持开口尽可能的小或封闭开口是非常重要的。另一种有效的降低窑炉开口热损失的方法是尽量少开窑炉门，并将开门时间缩到最短（另一种方案见 4.5 节）。如果适当的控制窑炉压力，该损失的热量约是窑炉内产生的总热量的 1%。

3.3.3 节已经阐述了一种计算开口热损失值的方法。另一种计算方法为以下等式：

$$Q = 4.88 \times \left(\frac{T}{100} \right)^4 \times a \times A \times H$$

其中：

Q = 热损失值

T = 绝对温度(K)

a = 总辐射系数

A = 开口面积， m²

H = 时间 (小时)

例如，一个温度为 1340 °C 的再热窑炉，其炉墙厚度为 460 mm(X)，炉门为 1 m 高(D) × 1 m 宽。D/X = 1/0.460 = 0.71，见图 12，总辐射系数为 0.71，开口的热损失量为：

$$Q = 4.88 \times \left(\frac{1340 + 273}{100} \right)^4 \times 0.71 \times 1 = 2,34,500 \text{ kCal/hr}$$

4.5. 控制窑炉通风

如果窑炉内部存在负压，空气就会通过裂缝和开口进出窑炉，从而影响空气 - 燃料比。这会导致金属不能达到需要的温度或导致金属温度不均匀，这会影响下面的工序如锻造和碾压。同时会增加燃料的消耗和产品不合格率。在看起来密封的窑炉上做的测试结果表明，渗入的空气达到了 40% 以上。为了避免该现象，需要在窑炉里维持一点正压（其它措施见 4.4）。

热能设备：窑炉和耐火材料

但是压差不能太高，因为压差过高会导致外渗现象。虽然外渗问题没有渗入问题这么严重，但是它也能导致火焰冲出窑炉，使耐火材料过热从而降低耐火砖寿命，增加窑炉的维修和烧坏管道及设备。

因此，恰当的管理窑炉内外压差对于最小化热损失和最小化对产品的负面影响是非常重要的。

4.6. 优化容量利用

一个影响窑炉效率最为重要的因素是负荷。这包括放在窑炉内的坯料量，坯料分布和坯料在窑炉内的停留时间。

a) 优化负荷

如果窑炉的负荷过低，那么被负荷吸收的热量占可得到的总热量的比例就减少，从而导致效率低下。负荷过高会导致不能将材料在给定的时间内加热到需要的温度。

有一个特定的负荷可使窑炉的运行热效率最大，即每kg坯料耗费的燃料最低。一般通过记录每次给料的重量，达到需要温度的时间和消耗的燃料来得到这个特定的负荷值。窑炉应该一直维持在最优的负荷上，尽管在实际操作中并不能一直满足这点。

b) 优化负荷分布

炉底上的坯料负荷分布应该满足以下要求：

- 坯料能够接收到加热室和火焰的最大辐射热量。
- 热烟气有效的在坯料吸收表面回旋。
- 坯料不应放在以下位置：
 - 在燃烧器火焰的直冲路径上或可能发生火焰冲击的地方
 - 在可能对窑炉烟气系统造成堵塞和阻碍的地方
 - 接近任何可能生成冷点的炉门开口的地方

c) 优化负荷停留时间

如果负荷仅保持在窑炉内达到需要的物理和冶金性质，就能保持最低燃料消耗量和得到最好的产品质量。

有时装料和生产进度与窑炉容量并不匹配。如果发生这种情况，会导致以下任意一种情况发生：

- 负荷高于或低于最优负荷
- 长于或短于理想的停留时间。停留时间过长会导致材料表面氧化，从而导致产品的不合格。氧化速度取决于时间，温度和自由氧量。
- 需提高温度以补偿缩短的停留时间。工作温度越高，每单位时间的损失量就越高。

这三种结果都会导致浪费燃料，有时还会降低产品质量。因此窑炉操作员，生产和计划人员之间的相互配合是十分必要的。

热能设备：窑炉和耐火材料

可以在设计阶段就对窑炉进行优化使用设计，通过选择大小和型号（间歇式，连续式）使之与生产进度最佳搭配。

一个连续型窑炉可以通过回收热烟气流的热量来提高其总效率。若只使用间歇式窑炉，仔细的计划负荷就非常重要了。应该尽快的给窑炉装料以利用窑炉剩下的热量。

4.7.回收窑炉烟气废热

在任何工业窑炉中，燃烧产物离开窑炉的温度都高于坯料温度。烟囱排走的烟气会带走窑炉热量的35%到55%。过量空气量越多、烟气的温度越高，可得到的废热量就越多。然而，首要目的是通过能量节约措施尽量降低产生的废热量。只有当进一步的能量节约措施不能实现或不现实时才考虑废热回收。

烟气中的废热可以回收用来预热装料（坯料，负荷），预热燃烧空气或下述的其它过程

a) 预热装料

若在生料进入加热窑炉之前被排出烟气预热，就会降低需要用来加热它们的窑炉燃料量。由于原料温度通常为室温，可以用高温的烟气充分的加热原料，从而大量地降低燃料消耗率。

b) 预热燃烧空气

在很长一段时间里，烟气仅用来预热大型锅炉，熔铁炉和高温窑炉的燃烧空气。但是现在也用烟气来加热快装锅炉和快装工业窑炉。

有很多设备可以用来回收废热。最常使用的设备是外部换热器，但同时也使用其它技术，如具有换热功能的燃烧器。例如，一个现代换热器利用窑炉 1000°C 的排气可以将燃烧空气加热到 500°C 以上，从而与燃烧冷空气相比可以节约高达 30% 的能量。

由于当燃烧空气被加热时，其体积将增加，因此很有必要在修改空气管道直径和送风机时考虑到这点。需要注意的是用燃气预热硫分较高的高密度燃油时，可能导致与烟尘或硫化物混合而造成堵塞，腐蚀或增加氮氧化物的生成量。

c) 将废热作为其它过程的热源

其它过程（生产蒸汽或热水的余热锅炉）

即便是烟气预热装料或燃烧空气后，窑炉的排烟温度仍可达到 400- 600 °C。一个可能的方案是安装一个余热锅炉来利用这些热量生产蒸汽或热水，特别是当工厂需要大量的蒸汽或热水时。有时排气热量可以用于其它设备的加热目的，但仅仅当热量，温度范围，运行时间等适合时才可行。燃料消耗量可大大的降低。一个现存的例子是将淬火窑炉的排气作为回火窑炉的热源。

4.8. 最小化窑炉表面损失

用于间歇式或连续式窑炉的30%到40%的燃料是用来补偿窑炉表面或炉墙热损失了。炉墙热损失的程​​度取决于：

- 炉墙发射率
- 耐火材料的热导率
- 炉墙厚度
- 窑炉是连续运行还是间歇运行

有很多方法可以最小化窑炉表面热损失：

- **选择适当的耐火材料**
- **增加炉墙厚度**
- **安装保温砖。** 一个装有耐火砖和保温砖的复合炉墙的表面温度和热损失要比同样厚度的但仅装有耐火砖的炉墙低的多。原因就在于保温砖具有很低的传热率。
- **计划窑炉的运行时间**对于大多数小窑炉，运行周期和停炉周期是交替着的。当窑炉停机时，在运行期间被耐火材料吸收的热量逐渐通过冷面的辐射和对流以及通过窑炉内的空气流动而消散掉。当窑炉再次启动时，又需要额外的燃料来加热耐火材料。若窑炉是三天内连续运行 24 小时，那么几乎储存在耐火材料里的所有热量都损失掉了。但如果窑炉每天运行 8 小时，那么储存在耐火材料里的热量并没有全部消散掉。一个耐火砖墙的厚度为 350mm 的窑炉，预计过 16 个小时停炉，那么耐火材料里只有储存的 55% 的热量从冷表面消散出去了。仔细地计划窑炉的运行时间可以降低热损失从而节约燃料。

used: 窑炉表面的热损失量(Q)是自然对流和热辐射的总和。除了在 3.3.3 章中阐述的计算方法以外，也可以用下述等式：

$$Q = ax(t_1 - t_2)^{5/4} + 4.88E x \left(\left(\frac{t_1 + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{t_2 + 273}{100} \right)^4 \right)$$

其中：

Q = 散热量 (kCal/hr)

a = 关于自然对流面方向的系数，炉顶 = 2.8,

炉墙 = 2.2, 炉底 = 1.5

t₁ = 窑炉外墙表面温度 (°C)，基于尽量多次测试的平均值，以降低偏差

t₂ = 窑炉周围空气的温度 (°C)

E = 窑炉外墙表面的发射率

等式的第一部分给出了自然对流带来的热损失，第二部分是辐射热损失。图15表示了外墙的表面温度和用该公式计算所得的热损失量的关系。

热能设备：窑炉和耐火材料

计算窑炉表面热损失的例子如下所示：

一个再热窑炉的炉顶，炉墙和炉底的表面面积分别为 20 m²，50 m² 和 20 m²。它们的平均表面测量温度分别是 80°C，90°C 和 100°C。基于图 14，炉顶，炉墙和炉底的单位面积热损失量分布为 650 kCal/m²h，720 kCal/m²h 和 730 kCal/m²h。

因此，总散热量 Q

$$\begin{aligned} &= \text{炉顶热损} + \text{炉墙热损} + \text{炉底热损} \\ &= (650 \times 20) + (720 \times 50) + (730 \times 20) \\ &= 13000 + 36000 + 14600 = 63,600 \text{ kCal/hr} \end{aligned}$$

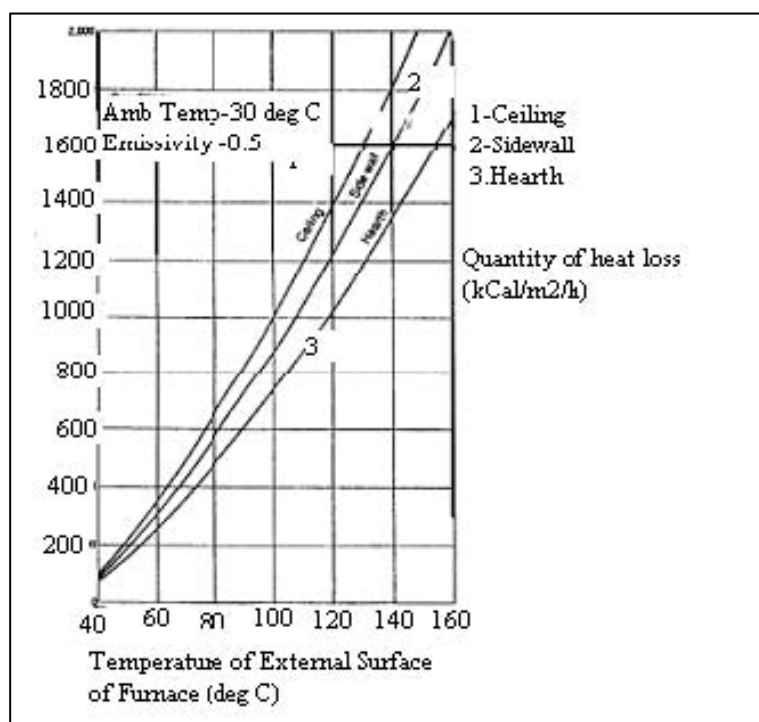


图 15. 表面温度和热损失量关系图 (BEE, 2005)

4.9 使用陶瓷涂层 (高发射率涂层)

窑炉室里的陶瓷涂层可以促进热传递快速有效地进行，使加热温度均匀并延长耐火材料的使用寿命。当温度升高时，传统耐火材料的发射率会降低，反而陶瓷涂层的耐火材料的发射率会稍微有所增加。利用这个突出的特性，人们将陶瓷涂层用于热表面的保温。陶瓷涂层的发射率很高，并且在高达 1350°C 下都具有较长的寿命。一般有两种类型的陶瓷涂层：用于金属衬底的涂层，和用于耐火材料衬底的涂层。这些涂层无毒，不易燃烧并具有水基性。在室温下使用时，从喷洒到风干不到 5 分钟。该涂层使得衬底可以保持其设计的冶金特性和机械强度。在停机时间内可以迅速的完成安装。报道指出根据窑炉类型和运

热能设备：窑炉和耐火材料

行条件的不同可以节约 8% - 20%的能量。在 2.3.3 节中有关于高发射率涂层的进一步描述。

4.10 选择耐火材料

选择耐火材料的目的是为了最大化窑炉，回转炉或锅炉的性能。窑炉的制造商和用户在选择耐火材料时应该考虑以下几点：

- 窑炉类型
- 给料类型
- 存在炉渣
- 适用领域
- 工作温度
- 磨损程度和影响
- 容量结构负荷
- 由结构温度梯度和温度波动引起的压力
- 窑炉环境的化学兼容性
- 热传递和节约燃料
- 成本考虑

5.方案列表

为窑炉列出一个综合方案列表是很困难的，因为不同的窑炉其能源效率改进方案不一样。但是适用于大多窑炉的方案有：

- 检查渗入的空气：用炉门或空气帘
- 监控 O₂/CO₂/CO 并将过量空气控制在最优值
- 改进燃烧器设计，燃烧控制和仪表设施
- 保证窑炉燃烧室处于微正压状态
- 在分批运行时使用陶瓷纤维
- 使负荷与窑炉容量匹配
- 更新热回收设备
- 调查周期次数
- 提供温度控制器
- 保证火焰不接触到坯料

6.工作表

窑炉和耐火材料没有拟定工作表

热能设备：窑炉和耐火材料

7. 参考文献

印度电力部能源效率局，*热电工程中的能源效率问题*，2005

印度政府煤炭部，*煤炭和工业窑炉*，1985

印度政府石油部，石油资源保持协会，*窑炉和废热回收的燃料经济性*，www.pcra.org

英国政府能源效率办公室，碳信托组织，*先进的实践指导 76 - 连续钢铁再热炉: 参数设计和设备*. 1993. www.thecarbontrust.co.uk/energy/pages/home.asp

Trinks, W. *工业窑炉* (Vol-2). John Wiley and Sons Inc, New York, 1925

Gilchrist J. D. *燃料, 窑炉和耐火材料*, Pergamon Press, 1977

Vladimir B Ginzburg *扁平滚轴基本原理*, 由 Marcel Dekker 通过 Google Books Partner Program 提供

William L Roberts, *钢的热轧*, 由 Marcel Dekker 通过 Google Books Partner Program 提供

联合国工业发展组织(UNIDO)和日本国际贸易和工业部(MITI). *钢铁工业的能源节约研讨会成果*. 1992

UA 能源部 (US DOE), *废热减少及其回收以提高窑炉效率和生产力、降低排放*. 2004
<http://eereweb.ee.doe.gov/industry/bestpractices/pdfs/35876.pdf>

Copyright:

Copyright © United Nations Environment Programme (year 2006)

This publication may be reproduced in whole or in part and in any form for educational or non-profit purposes without special permission from the copyright holder, provided acknowledgement of the source is made. UNEP would appreciate receiving a copy of any publication that uses this publication as a source. No use of this publication may be made for resale or any other commercial purpose whatsoever without prior permission from the United Nations Environment Programme.

版权声明：

本出版物可供任何形式的培训或非盈利活动全部或部分复制使用，无需经过版权所有者的特别许可，而只需在副本中注明出处即可。如需在其他出版物中引用本出版物中的内容，请向 UNEP 发送一份该出版物的副本。

未经联合国环境规划署的书面许可，禁止将此出版物用于转售或任何其他商业用途。

Disclaimer:

This energy equipment module was prepared as part of the project "Greenhouse Gas Emission Reduction from Industry in Asia and the Pacific" (GERIAP) by the National Productivity Council, India. While reasonable efforts have been made to ensure that the contents of this publication are factually correct and properly referenced, UNEP does not accept responsibility for the accuracy or completeness of the contents, and shall not be liable for any loss or damage that may be occasioned directly or indirectly through the use of, or reliance on, the contents of this publication, including its translation into other languages than English. This is the translated version from the chapter in English, and does not constitute an official United Nations publication.

免责声明：

该能源设备简介是“亚太地区工业温室气体排放削减计划”(GERIAP)的一部分，由印度国家生产力委员会编写。尽管 UNEP 为保证此出版物的内容的正确性做出了不懈的努力，但是 UNEP 不承担其内容的准确性和完整性的责任，对任何通过直接或间接使用或者依赖该出版物内容，包括其非英语译本，而遭受的损失或者伤害，UNEP 概不负责。本材料是英文原版的中文译本，不属于联合国的官方出版物。