

铁矿石烧结 点火过程

〔苏〕 B.A.舒尔哈尔著

周兴德 袁文彬 李上峰 邓庆球译

邓守强 周兴德 谢良贤校

杉 木总校

冶金工业部烧结球团情报网
冶金工业部炼铁情报网

76.2127

76.2127

铁 矿 石 烧 结

点 火 过 程

〔苏〕 B.A.舒尔哈尔著

周兴德 袁文彬 李上峙 邓庆球译

邓守强 周兴德 谢良贤校

杉 木总校

冶金工业部烧结球团情报网
冶金工业部炼铁情报网

目 录

原 序	(1)
第一章 烧结料层点火过程温度-热工制度与气体动力学制度的特性	(3)
一、点火强度	(4)
二、点火过程热工制度	(7)
三、点火过程温度制度与气流制度	(15)
四、点火过程气体动力学制度	(18)
第二章 抽风烧结过程热量传递	(20)
一、烧结过程热流的波浪特性	(20)
二、点火过程热流脉冲形状及其温度场	(22)
三、料层厚度上热脉冲移动速度及其形状变化	(25)
1. 热脉冲移动状态数学模型	(25)
2. 料层厚度上热脉冲移动速度的研究	(29)
四、烧结过程中料层内的热量传递	(33)
五、料层厚度上热脉冲与固相燃料燃烧带移动状态的一致性	(53)
第三章 铁矿石烧结点火过程试验研究	(57)
一、铁矿石原料简要特性及其烧结特点	(57)
二、工业性研究方法	(71)
三、KMA矿石混合料双层布料烧结过程的温度-热工制度	(76)
四、点火温度对烧结操作指标的影响	(82)

四、点火时间对烧结操作指标的影响·····	(88)
六、保温时间对烧结过程温度-热工制度、利用系数 及烧结矿质量的影响·····	(95)
七、外部热源单位消耗对烧结操作指标及烧结矿质量 的影响·····	(112)
八、AKM-252/312 型 烧结 机料层 保温双层 烧结工 艺·····	(120)
九、点火过程气体动力学制度对烧结过程和烧结矿质 量的影响·····	(138)
十、厚料层烧结点火过程·····	(148)
1. 厚料层烧结操作技术经济指标·····	(148)
2. 料层厚度、混合料含碳量与烧结机利用系数的 关系·····	(156)
3. 厚料层烧结中保温操作的效果·····	(161)
第四章 提高点火过程效果与燃料利用效率的途径··	(161)
一、抽风气流氧浓度对固体燃料碳氧化程度及其化学 能利用程度的影响·····	(156)
二、抽风气流氧浓度对烧结料层中燃烧带移动速度的 影响·····	(181)
三、抽风气流氧浓度对烧结操作指标的影响·····	(186)
四、点火器内气体燃料热风点火·····	(203)
五、提高点火烟气氧浓度的最优方案选择·····	(208)
六、混合料预热·····	(219)
七、辐射-对流点火方式·····	(223)
参考文献·····	(231)

原 序

如今，在苏联以及大多数发达资本主义国家（日本、联邦德国、法国、英国等）烧结矿都是高炉炉料含铁料的主要组成部分。1978年世界烧结矿总产量为5.44亿t，球团矿总产量为1.82亿t^[1]。

烧结是冶炼前铁矿石原料准备的热处理过程，在该过程中需要固体和气体（液体）燃料。提高燃料利用率和改善成品烧结矿质量是十分重要而迫切的课题。解决这些课题的方针之一是正确组织烧结机上烧结料层的点火过程（外部加热）。

点火过程对铁矿石混合料烧结过程的进展，继而对烧结机利用系数和烧结矿质量都有着重要的影响。但是，长期以来，点火过程的作用没有得到充分认识。1963年新利佩茨克钢铁公司投入工业使用的在当时属于独一无二的252m²烧结机上，烧结料层点火质量不良就证明了这一点^[2]。该机装有单排煤气喷射式烧嘴点火器。有效点火段（高温外部加热段）的长度约为4m。台车的速度为7.0m/min时，相应的点火时间为0.4~0.6min。在点火器后面安设煤气烧嘴装置对烧结料层进行保温（补充加热）后，烧结机的操作指标有很大改善，这证明苏联有些烧结厂的料层点火能力不足^[3-5]。

苏联一些烧结厂料层点火质量不良的主要原因之一在于他们是按每吨烧结矿的外部热耗来评价外部热源对料层的作用。早在1936年С.Т.罗斯托夫采夫（Ростовцев）和С.М.梅耶罗夫（Мсеров）^[6]就发表过论著^[6]指出，在烧结非熔剂

性氧化铁矿石（赤铁矿）混合料时，为获得优质烧结矿，点火热耗约为 $170000\text{kJ}/\text{t}$ 烧结矿。后来，在设计不论使用哪种烧结料的新烧结厂时，都把该值当作基准值。显而易见，在评价外部热能对烧结料层的作用时，把一定时间内由点火器传递给烧结料层的热量摊算到相应的烧结矿产量上是完全错误的。

Л.А.科瓦尔斯基（Ковальский）^[7]指出：每吨烧结矿的外部热耗决定于混合料的物质组成及其烧结工艺特性。因此，他研究出一种通过与垂直烧结速度相关的台车速度来考虑各种烧结料的烧结过程特点的耗热量计算方法。

必须根据料层通过加热装置（点火器）时 1m^2 料层表面所得热量（外部热能单耗）来评价外部热源对料层的作用。1959年А.А.西戈夫（Сигов）论证了这种评价方法的合理性。正如在西西伯利亚和新利佩茨克钢铁公司 252m^2 烧结机上的试验研究结果所表明^[9、10]：烧结矿成品率、机械强度及烧结过程的燃料消耗主要决定于外部热能的单耗。

本书系根据多年试验室和直接在烧结机上的试验研究结果写成的，专门论述了点火过程的作用及其对料层烧结过程和烧结矿冶金性能的影响。

第一章 烧结料层点火过程温度-热工制度与气体动力学制度的特性

当铁矿石混合料用抽风方法进行烧结时，料层中以一个不太厚的区段进行下列过程：固体燃料燃烧、结晶水和碳酸盐分解、氧化物的铁和锰氧化或还原、混合料组份相互作用并生成新的化合物、软化和熔融（图1.1）。经过熔体的结晶和凝固作用，生成烧结物质，即：烧结饼。下文中，我们把这个区

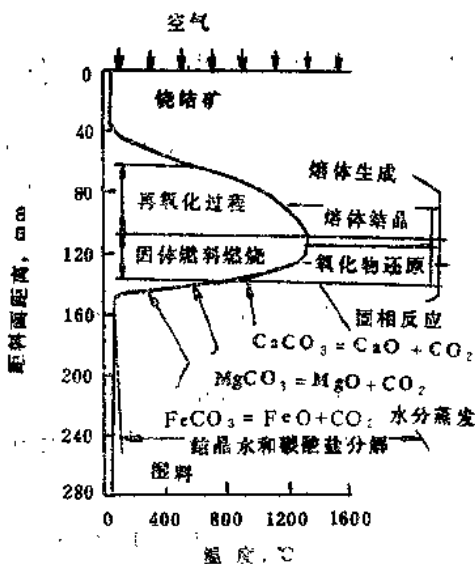


图1.1 自熔性铁矿石混合料烧结时活化带中各种反应过程示意图

段称为活化带（高温区）。随着烧结料层烧结过程的进展，活化带紧跟在点火阶段于上层料中形成的热波后面沿料层厚度推移，其推移方向与气流方向相同。外部热能输入料层（点火）是靠气体、液体或固体燃料在点火器内燃烧释放出的能量来实现的。热能主要靠对流和辐射传递给料层。在点火期间当燃烧产物（点火烟气）中含有足够自由氧气时，混合料中的固体燃料燃烧过程开始。

一、点火强度

1m^2 烧结料层所能得到的热量 q ，即外部热能单位消耗量决定于两个因素：第一，点火时间 t_n （该段烧结料层在点火器下的停留时间）；第二，点火强度 I ，即单位时间（1分钟）内点火器加热面①单位面积（ 1m^2 ）经对流和辐射传递给烧结料层的热量^{①②}：

$$q = t_n I \quad (\text{kJ}/\text{m}^2) \quad (1.1)$$

第一相乘数决定于点火器加热面的长度 L_r 和台车移动速度 V_n ，即：

$$t_n = L_r / V_n \quad (\text{min}) \quad (1.2)$$

第二相乘数是点火器的热工特性（表示其加热能力），可按下列式计算：

$$I = Q_n / 60 S_r t_n = (\eta_r Q_n^0 V_r) / (60 L_r B_r [\text{kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{min})]) \quad (1.3)$$

式中 Q_n ——点火时间内点火器传递给烧结料层的热量，kJ；

①点火器加热面系点火器内空间在水平面上的投影。

Q' ——点火器所用燃料的低热值, kJ/m^3 ; $V_{\text{点}}$ ——每小时燃料耗量, m^3/h 或 kg/h ; B_r ——点火器加热面宽度, m ; S_r ——点火器加热面面积, m^2 ; η_r ——点火器热效率 $\%$ 。

根据(1.2)式, 可从等式(1.1)中得出:

$$I = (q/L_r) V_{\text{点}} \quad (1.4)$$

单位耗热量应与烧结料层的最佳外部热能需要量 q' 一致, 该需要量是由混合料的物质组成和物理-化学性质所确定的。用等值的 q' 代替 q 代入(1.4)式, 得出下式:

$$I = (q' L_r) V_{\text{点}} \quad (1.5)$$

将(1.3)式和(1.5)式的右侧列成等式, 则得出料层点火时, 每小时的耗热量和气体燃料消耗量:

$$Q_{\text{点}} = 60 B_r q' V_{\text{点}} \quad (\text{kJ/h}) \quad (1.6)$$

和

$$V_{\text{点}} = \frac{60 B_r q' V_{\text{点}}}{\eta_r Q_{\text{点}}} \quad (\text{m}^3/\text{h}) \quad (1.7)$$

由式(1.6)和(1.7)得出: 单位时间内点火器应传递给烧结料层的热量 $Q_{\text{点}}$ 及相应的燃料耗量 $V_{\text{点}}$, 一方面决定于烧结料层的外部热能单位需要量; 另一方面决定于台车移动速度 $V_{\text{点}}$ 。为使每 m^2 烧结料层在点火器下通过的时间内得到所需的热量 q' , 必须保证足够的点火强度 I 。

点火强度本身又决定于料层透气性。因为要避免由外界向点火器内渗入冷空气和由点火器泄出点火烟气, 点火烟气体量(点火器中燃料燃烧产物)应与同一时间内抽过料层的气流量

1. 计算点火器热效率时, 取燃料燃烧产物的温度等于点火器下部风箱内烧结废气温度。

保持相等。换言之，点火器中的烟气静压应保持为0。

令 V_B^0 和 $V_{n,r}^0$ 分别表示在按化学计量条件下，即在氧化剂（空气）消耗系数 $\alpha = 1$ 时燃烧 1m^3 或 1kg 气体或液体燃料的空气用量及其完全燃烧产物生成量。这时，当 $\alpha \neq 1$ 时，

$$V_{n,r} = V_{n,r}^0 + (\alpha - 1) V_B^0 \quad (\text{m}^3/\text{m}^3) \quad (1.8)$$

根据 (1.7) 式，点火器内燃料燃烧产物的小时生成量为：

$$\begin{aligned} V_{n,r} &= V_{n,r} V_T = (V_{n,r}^0 + (\alpha - 1) V_B^0) \frac{60 B_T q' V_n}{\eta_T Q_n^0} \\ &= \frac{60 B_T q' V_n (V_{n,r}^0 + (\alpha - 1) V_B^0)}{\eta_T Q_n^0} \quad (\text{m}^3) \quad (1.9) \end{aligned}$$

但， $q' = q = I t_n$ 将 q' 值代入 (1.9) 式，则

$$V_{n,r} = 60 (V_{n,r}^0 + (\alpha - 1) V_B^0) \frac{B_T V_n I t_n}{\eta_T Q_n^0} \quad (\text{m}^3/\text{h}) \quad (1.10)$$

假定气流速度为 $V'_{o,r}$ ①，则1小时内可能抽过料层的点火烟量等于：

$$V_{r,r} = 3600 \cdot V_n B_n I t_n V'_{o,r} \quad (\text{m}^3) \quad (1.11)$$

令 (1.10) 式和 (1.11) 式的右侧相等，解所得等式求 I ，则可以得到确定点火强度的下式：

$$I = 60 \frac{B_n}{B_T} \eta_T Q_n^0 \frac{V'_{o,r}}{V_{n,r}^0 + (\alpha - 1) V_B^0} \quad (\text{kJ}/\text{m}^2 \cdot \text{min}) \quad (1.12)$$

①指气流进入烧结料层时的速度(入口速度)。

通常，在确定炉子设备的热效率时，都考虑通过缝隙、炉门等处的辐射和对流热损失。因此，在确定点火器热效率时，应将通过点火器侧壁与台车栏板之间的缝隙逸失到外界的热量列入热损失。在这种情况下，取点火器加热面宽度等于台车宽度，即 $B_F = B_A$ ，这样，(1.12)式可写成：

$$I = 60 \eta_p Q_{II}^0 \frac{V_{O, F}'}{V_{A, F}^0 + (\alpha - 1) V_F^0} \quad (\text{kJ/m}^2 \cdot \text{min}) \quad (1.13)$$

$$\text{或 } I = \eta_p Q_{II}^0 \frac{V_{O, F}'}{V_{A, F}^0 + (\alpha - 1) V_F^0} \quad (\text{kW/m}^2) \quad (1.13a)$$

由此可见，点火强度与料层透气性成正比，而与点火器内燃料燃烧烟气体积成反比。该烟气体积取决于氧化剂（空气）消耗系数。

点火的主要作用是使料层表层内形成一定的蓄热量，以保证烧结过程能以最低的固体燃料消耗正常进行并保证整个料层厚度上烧结过程的温度-热工条件稳定。只有在保证足够的点火时间和点火温度的条件下这些要求才能达到。

二、点火过程热工制度

参与烧结过程的热能，可以分为两部分：单元料层的烧结过程所消耗的热能和以热波形式沿料层厚度连续移动的热能。后者通常称之为蓄热。Г·文德博恩（Вендеборн）^[12-14]和

A·A·西戈夫^[8, 15]阐明了蓄热在烧结过程中节省燃料方面的重大作用。蓄热是靠烧结饼的热量将抽过烧结料层的空气预热来实现的。在烧结过程的初始阶段, 即点火期间, 当时烧结饼正在形成, 没有蓄热, 应由外部热源将一部分热能输入料层。这部分热量可根据料层表层烧结过程的热平衡来计算。下面举例说明。距料层表面60mm处, 一个厚2.5mm、面积1m²的料层分层的烧结过程热平衡(混合料为库尔斯克磁力异常区铁矿石, 配4.1%可燃碳)^{①[16]}。

热收入(kJ)	
燃烧热	
碳	5485
硫	105
物理热	
混合料	105
空气	4875
其中从烧结饼中获得的热量	4815
化合物生成热	168
总 计	10720
热支出(kJ)	
混合料中水分的加热与蒸发	890
碳酸盐及水合物分解	1215
铁氧化物分解	400
物料的加热和熔化	7890
废气带走热量	335
总 计	10720

①该分层距台车栏板有相当距离, 因此, 对外界无热损失。

从上述数字可见，在该分层烧结所耗总热量（10720kJ）中，蓄热（由烧结饼传递给抽入空气的热量）为4815kJ（占44.9%）。要评价料层点火所需总热量，必须绘制能说明料层厚度方向上热平衡各项热收入变化动态的烧结过程热工曲线图¹⁶。

图1·2a是最优点火制度下烧结过程热工曲线示意图，该曲线图说明：在假定料层厚度上固体燃料分布均匀，而且在活化带形成以后的整个烧结过程中料层透气性保持不变的条件下，随着活化带沿料层厚度移动而输入的热量。图中虚线表示保证整个料层烧成均质烧结饼的最优需热量 Q_{opt} 。图中“1”区表示：碳和硫的燃烧热、混合料各组分相互作用时化合物的生成热；“2”区表示：烧结饼传递给抽入空气并在烧结过程中再次利用的热量（蓄热）；“3”区表示：应由点火器供给烧结料层的热量。热收入应高于最优需热量，高出量等于逸散到外界的热损失。

烧结过程初始阶段蓄热量的增加是由于空气通过不断增厚的高温物料层（烧结饼）时，其预热温度不断提高，这是气相和固相的热交换未完成所致。由于空气预热温度的提高，常常出现活化带内反应过程温度升高。上述情况一直进行到空气预热温度与直接靠近活化带的那一单元分层的温度几乎相等时为止。为使料层厚度方向上温度均匀分布，必须在烧结过程初始阶段使物料加热（获得烧结饼）到保证烧结饼和空气的温差达到最小的深度。图1·2a中的点火时间 t_{max} 便相当于这个深度（高度）。

从图1·2a可以看出，当活化带的移动距离到 Z_{max} 后，最优需热量便完全靠放热反应和蓄热来满足。因此，增大料层点火

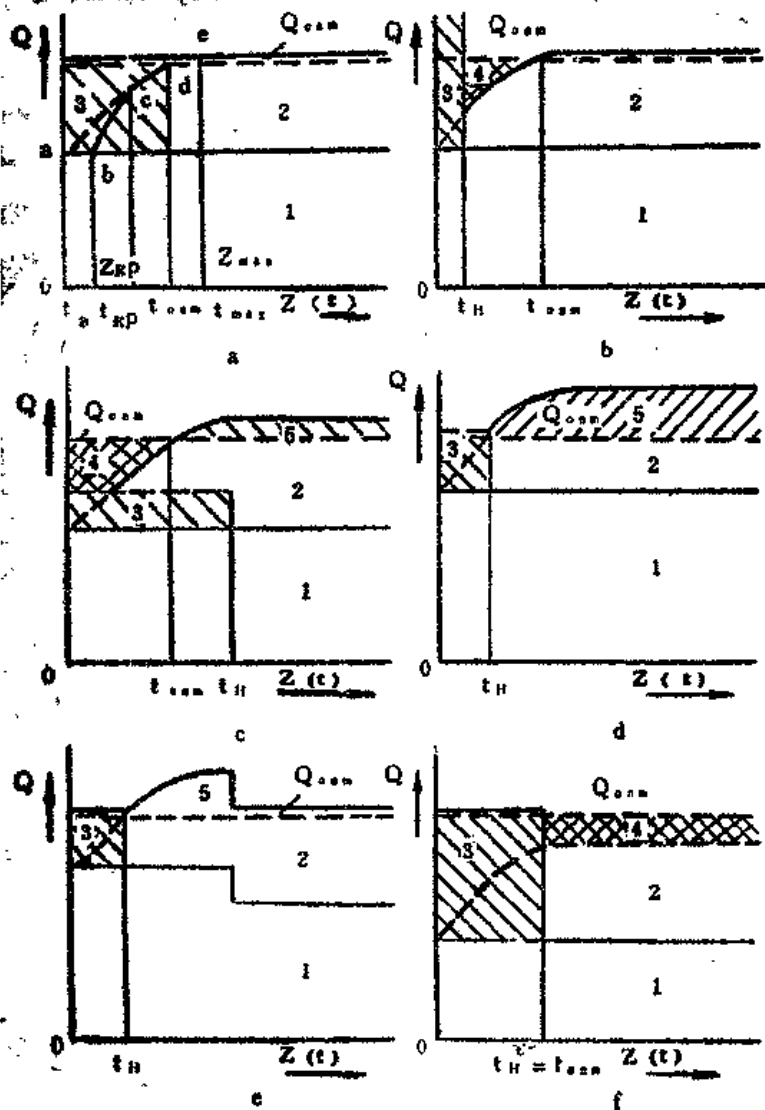


图1.2 烧结过程热工曲线图

(图注见下页)

- a) $I = I_{opt}$, $t_n = t_{n, opt}$ ——最优点火制度;
- b) $I > I_{opt}$, $t_n < t_{n, opt}$ ——瞬时点火;
- c) $I < I_{opt}$, $t_n > t_{n, opt}$ ——瞬时点火;
- d) $I = I_{opt}$, $t_n < t_{n, opt}$ ——增大固体燃料消耗;
- e) $I = I_{opt}$, $t_n = t_{n, opt}$ ——双层布料;
- f) $I = I_{opt}$, $t_n = t_{n, opt}$ ——降低固体燃料消耗

时间超过 t_{max} 是不合理的, 因为这会造成气体燃料的浪费。另外, 由于高温带扩大和料层透气性下降, 还会降低烧结机的利用系数。

从图1·2a中还可以看出, 当活化带由料面移动到 Z_{crit} 时, 由预热空气输入的热量强度会大大降低。与该距离 Z_{crit} 相对应的时间 t_{crit} , 便是最小(临界)点火时间, 此点火时间能保证料层表层的烧结过程稳定进行, 并能保证烧结过程的温度-热工状态的稳定性。如点火时间小于 t_{crit} 时, 预热空气输入的热量开始急剧减少, 即蓄热减小, 为保证烧结过程的温度-热工状态的稳定性, 最优点火时间 t_{opt} 应略高于 t_{crit} 。可近似地按 t_{crit} 和 t_{max} 的算术平均值确定 t_{opt} 。

从热工角度来看, 使外部输入热量与蓄热量的总和保持不变的那种料层点火制度, 是最为经济的(如图1·2a上划斜阴影线区段)。在烧结过程初始阶段, 在混合料团加热深度等于烧结带厚度之前, 点火强度应保持不变。该点火强度应保证输入料层的热量与图中横坐标 $0 \sim b$ (点a和b)所限定区段的面积成正比。之后, 点火强度便沿bede线而减弱。

在目前生产条件下, 见到有下列几种有代表性的点火制度:

①原文为“Z”。——总校订。

1. 正常（或高）强度点火（ $I_n \geq I_{\text{优}}$ ），但点火时间不够（ $t_n < t_{\text{opt}}$ ），因此，外部热能单耗不够（图1.2b）。在这种情况下，料层表层形成一个正常烧结饼外壳，壳下是未烧透的烧结料。从烧结台车上卸下时，上层烧结饼实际上完全变成了返矿。对于烧结过程的正常进行来说，不足的那部分热量与图1.2中划交叉阴影线的“4”区面积成比例。

2. 点火时间大于最优值，热量输入强度不够（ $I_n < I_{\text{opt}}$ ，见图1.2c）。烧结过程初始阶段，供给的热量低于最优需热量。与第一种情况相同，上层烧结饼强度不够。同时有一部分外部热能被无效消耗了，因为，产生了大于最优需热量的过剩热量（图上“5”区）。

3. 短时间点火，不足的热量靠增加混合料中燃料用量的方法来弥补。但是，从图1.2d看出，无论从烧结过程的经济效果，还是从整个烧结饼厚度上烧结矿质量特性的均一性来看，这样做都是不合理的。只是在烧结过程初始阶段能保证达到接近最优值的耗热量。采用双层布料可避免燃料浪费，因为双层布料时，可减少料层下层的燃料用量（见图1.2e）。

图1.2f示出了一种值得注意的烧结过程热工制度。在初始阶段，放热反应过程放出的热量和外部热源带入的热量之总和等于最优需热量。但后来，由于混合料的燃料配入量降低，总热收入低于最优需热量。在这种情况下，为获得均质的烧结饼，在整个烧结过程中，都能从外部输入热量。因为这时，烧结饼的热量利用得很少，这样一来，点火强度应该相当大，以抵消与最优需热量的差值（图上“4”区）和弥补未能利用到的那部分烧结饼热量。如果在该企业的条件下，用较少的（按热当量计）气体燃料在料层上方燃烧以取代部分固体燃料

更为经济的话，这种热工制度可在薄料层烧结时采用。

目前，在烧结工作者当中，常将烧结料层点火过程分为点火（高温加热）和保温（低温加热）两个阶段。最初，点火的主要任务是将料层表层预热到固体燃料的着火温度。目前，对点火提出了更高要求。点火的目的是：为固体燃料的强烈燃烧和把表层烧结料加热至烧结过程所需的温度创造条件。在强度足够的条件下，点火过程第一阶段（即点火）的时间应等于将表层料团加热到固体燃料的着火温度和将料层中燃料颗粒加热到燃烧温度的总时间。该表层厚度大约等于燃烧带的厚度。参考文献[17]的作者们认为：在点火过程第一阶段（即点火阶段）应将烧结料层加热到等于燃烧带厚度的50~100%的深度。换句话说，点火时间是燃烧带厚度的函数。

按参考文献[18]的作者们的观点，点火时间应占整个料层厚度的烧结过程时间的12~15%^①。

保温的目的是保证表层烧结矿的冷却制度与烧结过程基本阶段内的烧结饼冷却制度相类似。保温阶段的时间决定于烧结过程的特性（如烧结用铁矿石物料的类型，混合料中燃料配入量，抽入风流中游离氧浓度，料层透气性等）。

在参考文献[19]和[20~22]中，关于保温对烧结机生产技术经济指标以及对保温装置结构特点的影响均作了详尽分析。

H·劳什（Rausch）和K·梅耶尔（Meyer）进行了十分详尽的研究^[5]。在两台60m²烧结机的点火器后面，安装了烧高炉煤气的长12m保温炉。从图1·3可以看出，在用气体燃料代替焦粉后，烧结机利用系数先是缓慢降低，然后，急剧下降（曲

①包括烧结机上用低温热载体预热混合料的时间，目的是减少或完全避免烧结过程初始阶段水蒸汽冷凝和料层过湿。