

高炉热风炉格子砖孔黑度对鼓风加热的影响

作者：亚·普·卡卢金，格·科·马力科夫，伏·格·里西耶科；

翻译：贾冰（中国翻译协会会员）

论文概要： 本文对一种使用含有 SiO_2 , Al_2O_3 , Cr_2O_3 , P_2O_5 成分的乳浊液（涂料）浸泡高炉热风炉上部格子砖来提高格子砖孔间壁黑度从而提高风温的方法进行了探讨研究。计算结果表明，采有这种措施处理格子砖之后，最多只能提高风温约 1.0°C 。

关键词： 热风炉，格子砖，黑度，热风温度，乳浊液。Hot blast stove, checker, blackness, blast temperature, radiative suspension coating

0 前言

提高入炉风温，是强化高炉运行、降低焦比的重要因素之一。因此，为了获得高风温，必须研究和考虑所有可能的因素。最近，随着卡卢金顶燃式热风炉[1] 在世界范围内的广泛推广，与之相关的高炉热风炉结构和热处理等方面的研究，均初步呈现出明显的进步。

在现有的高炉热风炉诸多的计算方法中，仅考虑热辐射因素是不够完整的，这是因为热风炉炉体内并非空腔，实际上热风炉蓄热室内被格子砖填充。因此，诸如热辐射、以及热风炉格子砖孔内的热对流等，都是与热交换相关、影响鼓风温度的因素，在计算中都需要予以充分考虑。

我们注意到中国出现了一种提高格子砖的砖孔间壁黑度的方法（简称“热风炉高辐射覆层技术”）[2]，即用含有 SiO_2 , Al_2O_3 , Cr_2O_3 , P_2O_5 成分的乳浊液（涂料）对格子砖进行浸泡或刷涂。据说采用这种方法可以提高热风风温 $15\text{-}20^\circ\text{C}$ 。但是，无论是在对此方法[2]的论述中，还是在其他的出版物之中，包括相关的宣传材料里，均未见到重要的计算细节。也就是说，在提高格子砖孔间壁黑度的情况下，上述资料没有对燃烧产物引起辐射热交换系数的变化给出计算细节的描述。

为了揭示强化高炉热风炉运行潜力的必要因素，我们尝试根据现有的蓄热换热设备的热交换计算方法，对这种“高辐射覆层技术”[2]提高鼓风风温的效果进行评估，同时评估热辐射在换热过程中的作用。

1 提高格子砖孔间壁黑度对辐射热交换系数产生的影响

按照“热风炉高辐射覆层技术”[2]的论述，经过该方法浸渍的格子砖，格子砖孔间壁黑度（即按照“热风炉高辐射覆层技术”[2]所说的发射率）从 0.5 提高到 0.9。

根据“热风炉高辐射覆层技术”[2]的论述，这种黑度的提高，本质上应该指提高了烧炉期的辐射热交换系数，从而可以通过把格子砖加热到最高温度，来提高加热鼓风的温度。我们注意到，热风炉体内并非空腔，主要的填充物是格子砖，而目前使用比较普遍的格子砖为孔径 30mm 的格子砖，在此我们就以这种常用的格子砖为基础来做计算和分析。

在蓄热换热设备的热交换计算当中，我们使用了下述公式[参考文献 3, 4, 5]计算辐射热交换系数并评估其在总换热系数中的作用：

$$(1) \quad \alpha_{\text{r}} = \sigma_0 \varepsilon_{\text{np}} \frac{\left(\frac{\varepsilon_z}{\varepsilon_z^c} T_r^4 - T_c^4 \right)}{T_r - T_c}$$

其中 α_{r} —气体到格子砖间壁的总辐射热交换系数

T_r и T_c —辐射气体（燃烧生成物）的温度和砖孔间壁的温度；

$\sigma_0=5.67\text{e-}8$ —绝对黑体的辐射系数；

ε_z , ε_z^c —本身温度下气体黑度和间壁温度下的气体黑度；

ε_{np} —气体到格子砖间壁的总黑度值(包括了砖孔内和间壁内的黑度值)

在气体和间壁温度差相对较小的情况下，可以使用下列公式计算：

$$(2) \quad \alpha_{\text{r}} = 4\sigma_0 \varepsilon_{\text{np}} \left(\frac{T_r - T_c}{2} \right)^3$$

$$(3) \quad \varepsilon_{\text{np}} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_z} + \frac{1}{\varepsilon_c} - 1}$$

其中 ε_c —格子砖孔间壁黑度。

当 CO_2 最大体积含量为 40%时，根据相关的全苏热工研究院（ВТИ）线解图 [8]，在气体层厚度（辐射长度系数）等于 3 0 m m 的状态下进行燃烧产物黑度水平的计算。在这种情况下，由温度水平决定的 ε_z 值为 0.03-0.05；也就是说，当格子砖孔间壁黑度值从

$\varepsilon_c = 0.5$ 增加到 0.9 时，燃烧产物的总黑度值在从 0.0291 到 0.0299 ($\varepsilon_c = 0.03$ 时) 以及从 0.0476 到 0.0497 ($\varepsilon_c = 0.05$ 时) 的范围内变化。

上述计算结果表明，“热风炉高辐射覆层技术” [2] 本质上应该可能对烧炉期内的辐射热交换系数产生影响，但是影响幅度很小。下面我们将在此计算结果基础上，继续探讨将格子砖加热到最高温度时，鼓风温度相应地被提高的数值。

在格子砖孔间壁黑度为 0.5 和 0.9 这两种状况下，烧炉期、送风期、以及格子转冷却期的计算如下（使用几个典型的正在运行中的卡卢金热风炉的数据）。

表格中引用了典型的正在运行中的卡卢金热风炉中的一组计算原始数据：

热风炉数据	数 值
格子砖室的直径, m	8.8
格子砖上部分的高度（硅砖），m	9.4
格子砖下部分的高度（粘土砖），m	12.7
砖孔直径, mm	30
燃烧生成物流量, 标立 / 小时	105160
拱顶下方燃烧生成物温度, °C	1400
鼓风量, 标立 / 小时	324000
鼓风初始温度, °C	150
烧炉时间, 小时	2.83
送风时间, 小时	1
换炉时间, 小时	0.17

根据公式（3）计算出烧炉末期相关的热辐射和热对流方式的热交换系数值见图 1。

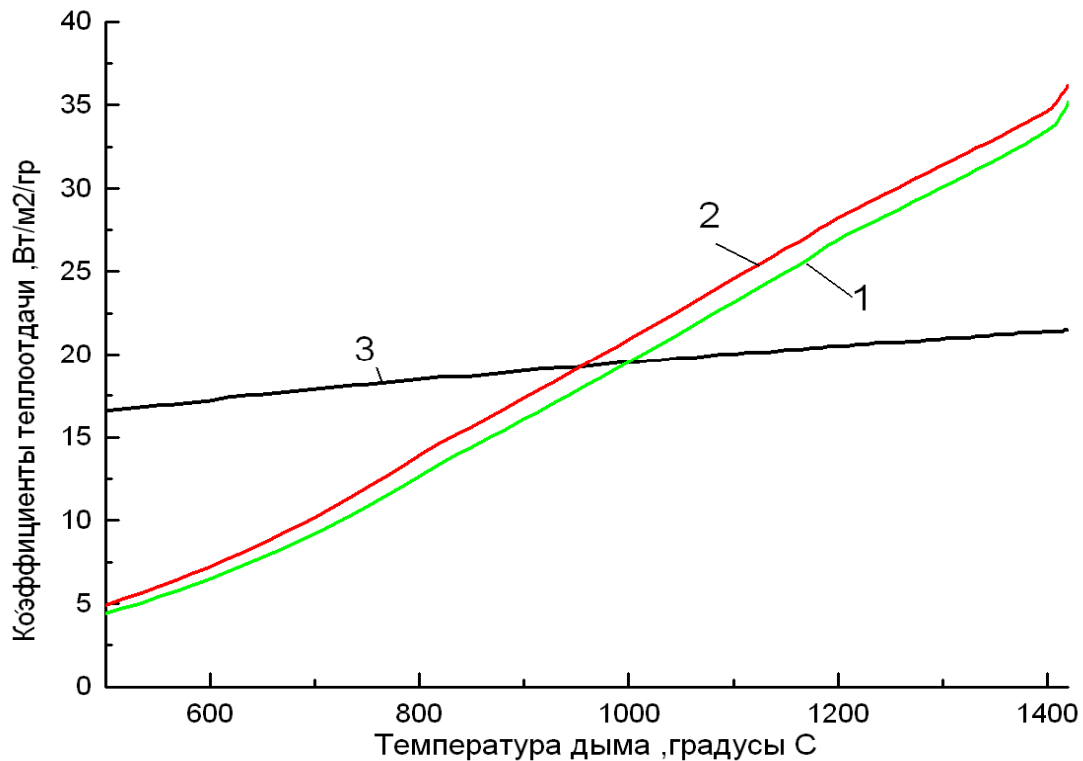


图 1: 烧炉期格子砖孔内辐射 (1, 2) 和对流 (3) 热交换系数; (1, 2) 格孔间壁黑度分别为 0.5 和 0.9 时
横轴: 烟气温度, °C; 纵轴: 热交换系数, Вт/м²/гр

从本图可以看出:

- 当格子砖孔间壁黑度从 0.5 增加到 0.9 的时候, 辐射值 ϵ_{np} 的变化导致的烧炉期格子砖辐射热交换系数只增加了 2.7~4.4 %。
- 当格子砖孔间壁黑度为 0.9 时, 与格子砖孔间壁黑度为 0.5 时相比, 烟气到间壁的热交换总系数仅提高了 1~2%。

如果考虑燃烧生成物辐射的光谱选择特性, 则可以对上述辐射系数值进行进一步修正 [依据引用文献 4,5,6]。比如在所谓的辐射双频带光谱模型框架中, 计算辐射选择性时, 辐射值 ϵ_{np} 按照伏.格.里西耶科 (В.Г. Лисиенко) 公式[参考文献 6]取不同的值:

$$(4) \quad \varepsilon_{np} = \frac{\alpha_c''}{\frac{1}{\varepsilon_z''} + \frac{1}{\varepsilon_c''} - 1}$$

$$\text{Где } \alpha_z'' = 0.7 \text{ [4-6];}$$

其中 α_c'' —在气体温度下的气体辐射光谱吸收带范围的绝对黑体辐射量;

ε_z'' и ε_c'' —气体吸收带范围内的气体和间壁的黑度。

此时:

$$(5) \quad \varepsilon_z'' = \frac{\varepsilon_r}{\alpha_r''}$$

$$\text{其中: } \alpha_z'' = 0.7 \text{ [4-6];}$$

根据公式(5) 计算, ε_z'' 的数值确实相应地有所提高(与 ε_z 的值比较), 并且, 当 ε_{np} 确定时, 值 ε_c 也有所增加, 然而, 这种增加非常小。即使当 $\varepsilon_z=0.04$ 、 ε_c 值从 0.5 提高到 0.9 时, ε_{np} 值也仅仅提高了 5%。

2 提高格子砖孔间壁黑度对鼓风温度产生的影响

根据上述对辐射热交换系数的计算结果, 我们根据参考文献[7]所描述的方法, 进行了鼓风温度的计算。计算结果表明, 在烧炉最后一小时的末期时, 当格子砖孔间壁黑度为 $\varepsilon_c=0.9$ 时, 热风温度为 **1232.3 °C**; 而当格子砖孔间壁黑度为 $\varepsilon_c=0.5$ 时, 热风温度为 **1231.7 °C**, 也就是说, 温度只提高了 0.6 °C。

利用公式(4)进行分析, 并考虑了气体辐射的光谱选择特性, 得出的结论是: 即使与计算结果(近似值)的平均值相比, ε_{np} 值提高程度也是非常有限的。

3 结论

上述计算结果表明,对于孔径 30mm 的格子砖,利用高辐射覆层技术[2]处理之后,其格子砖孔间壁黑度的提高对鼓风风温的影响是相当有限的(在卡卢金热风炉中,仅仅为鼓风温度数值的零头)。

上述计算结果还验证了这样的结论,即:在被格子砖填满的热风炉炉体内,针对蓄热体格子砖来说,辐射长度系数并不大(因为格子砖孔的通径较小),在这种情况下气体辐射黑度值相对较小。因此,当格子砖孔间壁黑度小幅增加时,仅仅会引起该黑度在“气体-格子砖间壁”的系统内的小量增长,相应的辐射热交换系数增长也非常有限,而对热风炉总热交换系数的影响则更是很小,鼓风温度也仅可提高约 1.0°C。

参考文献:

1. **Калугин Я.П.** High Temperature Hot Air Stoves with long service Life // Proceedings of the Iron & Steel Technology Conference. Indianapolis, Indiana, USA. 2007. vol.P. 405-411.
卡卢金. 亚. 普 (Калугин Я.П.) High Temperature Hot Air Stoves with long service Life // Proceedings of the Iron & Steel Technology Conference. Indianapolis, Indiana, USA. 2007. vol.P. 405-411.
2. **ZHOU Hui-min, ZHANG Hao, CANGDa-qiang,BAI Hao, WANG Yuan-cheng.** Numerical Simulating the Effects of high Radiative Coating on Heat transfer Process in regenerator of BF Hot Stove. Proceedings of the 5th International Congress on the Science and Technology of Ironmaking., China, 2009. P. 1062-1066.
周慧敏, 张皓 (音译), 苍大强, 白皓, 王元臣 (音译) Numerical Simulating the Effects of high Radiative Coating on Heat transfer Process in regenerator of BF Hot Stove. Proceedings of the 5th International Congress on the Science and Technology of Ironmaking., China, 2009. P. 1062-1066.
3. **Лисненко В.Г., Кушвин В.Б.** Теплотехника. Теплообменные аппараты металлургических печей. // Учебное пособие, Свердловск: УПИ им. С.М.Кирова, 1982. С. 76.
里西耶科.伏.格. (Лисненко В.Г.), 古什维.伏. 鲍 (Кушвин В.Б.) 热工学。冶金炉热交换设备。教学参考书, 斯韦尔德洛夫斯克: 基洛夫乌拉尔工学院, 1982, 第76页。
4. **Гордон Я.М., Зобнин Б.Ф., Казяев М.Д** и др. Теплотехнические расчеты металлургических печей под редакцией А.С.Телегина // Учебник для ВУЗов М.: Металлургия. 1993. С. 368.

高尔东.雅. 马. (Гордон Я.М.), 左布尼恩.鲍. 夫. (Зобнин Б.Ф.), 卡吉扬耶夫
马. 吉. (Зобнин Б.Ф.) 等。А.С.Телегина版本冶金炉热工计算//高等学校教材: 冶金学1993. 第
368页。

5. **Лисиенко В.Г.** Совершенствование и повышение эффективности энерготехнологий и производств,
в двух томах. // Том. №1-М:Теплотехника. 2010. С. 688.

里西耶科.伏.格. (Лисиенко В.Г.) 能源工程学系数和生产效率的改善和提高, 二卷//卷. №1-热工学
2010第688页

6. **Лисиенко В.Г.** Интенсификация теплообмена в пламенных печах. // М.:Металлургия. 1979. С. 224.

里西耶科.伏.格. (Лисиенко В.Г.) 火焰炉热交换的强化//冶金学1979第224页

7. **Шкляр Ф.Р., Малкин В.М., Каштанова С.П., Калугин Я.П., Советкин В.П.** Доменные
воздухонагреватели.//Металлургия.1982.с.176

什科利扬尔 夫. 理. (Шкляр Ф.Р.), 马尔金 伏. 马 (Малкин В.М.), 卡什丹诺夫 西.
普. (Каштанова С.П.),卡卢金 亚. 普. (Калугин Я.П.),, 萨维特金 瓦. 普. (Советкин В.П.), 高炉
热风炉// 冶金学 1982 第 176 页

8. **Невский А.С.** Лучистый теплообмен в печах и топках. // Металлургия. 1971. с.440 ,
涅夫斯基 阿.谢. (Невский А.С), 炉内及燃烧室内辐射热交换//冶金学1971第440页

作者简介:

1. 主要作者: 亚.普.卡卢金 (Я.П. К а л у г и н), 工程科学博士, 卡卢金联和股份公司总裁
叶卡捷琳堡市, 和平大街33号, 电话007-343-216- 50-56;
m ail@ kalugin.biz
2. 联合作者: 伏.格.里西耶科 (В. Г. Л и с и е н к о), 工程科学博士, 乌拉尔联邦大学教授
叶卡捷琳堡市32号, 电话: 007- 343-374-76-85;
lisienko@ m ail.ru
3. 联合作者: 格.科.马力科夫 (Г.К. М а л и к о в), , 工程科学博士, 乌拉尔联邦大学教授
叶卡捷琳堡市32号, 电话: 007- 343-355-38-62; germ an@ 2-u.ru



翻译简介

贾冰: 二级翻译, 中华人民共和国翻译专业(资格)水平证书
№08000726

北京卡卢金. 李科贸有限公司、北京天启金桥冶金设备技术有限公司副总经理。

