

强对流间歇式炉热工特征的研究

A STUDY OF THERMOTECNICAL CHARACTERISTICS IN FORCED CONVECTION BATCH FURNACE

文 光 华

Wen Guanghua

高 家 锐

Gao jiarui

(重庆大学冶金及材料工程系)

摘 要 针对使用高速燃烧器的间歇式热处理炉,进行了在高速气流循环下的炉内热交换机构与特征的试验研究,得到了传给堆料金属总热流、对流热流以及辐射热流随加热进程的变化规律。根据实验与计算结果,还揭示了金属辐射反向热流是强对流间歇式炉内不可避免的新型传热特征。

关键词 高速烧咀; 间歇炉; 传热机构

中国图书资料分类法分类号 TF 061.2

ABSTRACT An experimental study of heat transfer mechanism and characteristics of high velocity circulation combustion gas in a batch heat treatment furnace with high velocity burner was presented. The regular patterns of variation of total heat flux, heat convection and radiation heat fluxes given heating materials with heating time were obtained. It was revealed from the results of experiment and calculation that inverse heat flux of metal radiation is an unavoidable heat transfer characteristic.

KEY WORDS high speed burner; batch furnace; heat transfer mechanism

0 前 言

传统的车底式热处理炉的热工特点是依靠加热炉壁再辐射给料堆的加热方式。即是通过炉壁加热温度来控制料堆加热温度,为了使料堆温度均匀必须先使炉壁温度达到均匀化。毫无疑问,这种炉型的热效率和生产能力是很低的。为此,随着高速燃烧技术的发展而出现的各种高速燃烧器应用在金属加热和热处理上,在国外已较为普遍,取得了明显的经济效益[1][2]。高速烧咀成功地应用在热处理炉上,这是与它强化炉内对流传热,改变物料受热机理和特征分不开的。但过去的研究表明,人们只注重了高速烧咀在工业炉上应用的研究,而忽视了应用后对炉子传热机构和特征的理论研究。因此,本文将利用理论计算与热态试验相结合的方法,研究堆料在高速循环气流下炉内对流与辐射热交换随加热进程的变化

规律,分析炉内传热机构与特征。

1 强对流间歇式炉内热交换计算

对于使用高速燃烧器的热处理炉,由于高速气流带动炉内烟气的强烈循环作用,大大强化了炉内对流传热。因此在描述炉子外部传热过程中,对流传热与辐射传热同等重要,这与一般的高温火焰炉以及传统的以炉壁辐射为主的中、低温炉具有显著不同的特点。

1.1 辐射热交换

在火焰炉膛里的辐射热交换过程,首先是由苏联热工专家 B. H. 齐莫也夫进行了详细的理论分析,并第一个推导出炉气与金属间的热交换计算公式^[1]:

$$q = c_{\Sigma} \left[\left(\frac{T_g}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_m}{100} \right)^4 \right] - \frac{\varepsilon_m (1 - \varepsilon_g) (q_{wr} - q_{mc})}{\varphi_{wm}^2 (1 - \varepsilon_g) [\varepsilon_m + \varepsilon_g (1 - \varepsilon_m)] + \varphi_{wm} \varepsilon_g} \quad (1)$$

式中 q ——金属获得的净辐射热流 (w/m^2)

c_{Σ} ——炉气对金属的导来辐射系数 ($\text{w}/\text{m}^2\text{k}^4$)

$\varepsilon_g, \varepsilon_m$ ——炉气和金属的黑度

T_g, T_m ——炉气和金属料表面温度 (k)

φ_{wm} ——炉壁对金属的辐射角度系数

q_{wr}, q_{mc} ——炉壁的散热和炉气以对流方式传给炉壁的热流 (w/m^2)

上式中尽管考虑了炉内对流传热、炉壁的热损失等因素对炉内热交换的影响,但在实际应用中,由于炉气以对流方式传给炉壁的热流 q_{mc} 难以确定,从而限制了该式的应用。因此,笔者基于炉气、金属及炉壁有效辐射及差额热流概念下的热平衡关系,推导出炉壁差额热流不为零情况下的换热公式^[2]:

$$q = \varepsilon_m c_0 \left[b_1 \varepsilon_g \left(\frac{T_g}{100} \right)^4 + b_2 (1 - \varepsilon_g) \left(\frac{T_w}{100} \right)^4 - b_3 \left(\frac{T_m}{100} \right)^4 \right] \quad (2)$$

式中 $b_1 = [1 - (1 - \varepsilon_w)(1 - \varepsilon_g)(\varphi_{wr} - \varphi_{mc})]/b_0$

$$b_2 = \varepsilon_w \varphi_{mw} / b_0$$

$$b_3 = \{1 - (1 - \varepsilon_w)(1 - \varepsilon_g)[\varphi_{wr} + (1 - \varepsilon_g)\varphi_{wm}\varphi_{mc}]\} / b_0$$

$$b_0 = 1 - (1 - \varepsilon_w)(1 - \varepsilon_g)[\varphi_{wr} + (1 - \varepsilon_g)(1 - \varepsilon_m)\varphi_{mc}\varphi_{wm}]$$

同时在此基础上推出炉壁辐射计算式:

$$q_w = \varepsilon_w \left[d_1 \left(\frac{T_g}{100} \right)^4 - d_2 q - d_3 \left(\frac{T_m}{100} \right)^4 \right] \quad (3)$$

式中 $d_1 = c_0 \varepsilon_g [1 + (1 - \varepsilon_g)\varphi_{wm}] / d_0$

$$d_2 = (1 - \varepsilon_g)\varphi_{wm} / d_0$$

$$d_3 = c_0 \{1 - (1 - \varepsilon_g)[\varphi_{wr} + (1 - \varepsilon_g)\varphi_{wm}\varphi_{mc}]\} / d_0$$

$$d_0 = 1 - (1 - \varepsilon_w)(1 - \varepsilon_g)[\varphi_{wr} + (1 - \varepsilon_g)\varphi_{wm}\varphi_{mc}]$$

角标 g, w, m ——分别表示炉气、炉壁和金属

当已知炉气、炉壁和金属表面温度,就可利用(2)、(3)式方便地计算出金属和炉壁在炉内得到的辐射传热量。事实上,对炉壁温度的测定与估计要比炉气对炉壁对流传热量的确定容易得多。因此(2)式和(3)式在考虑了炉壁差额辐射热流不为零的条件下,对火焰炉辐射传

热的计算具有广泛的适用性,尤其是适用于强对流间歇式炉内辐射热交换的计算与分析。

1.2 对流传热

由于炉内传热机构复杂,工作温度高,直接测量和计算对流传热是相当困难的。一般采用间接方法得到对流传热,即在试验炉内测得金属堆料随加热时程的断面温度分布,据此可计算出被加热金属任意时间内所吸收的总热量,再减去理论计算的辐射热量,即得炉气流对金属料的对流传热量。热态试验是在实验室内根据模拟某厂退火炉改建的试验炉内完成。炉型结构如图1所示。燃烧装置是45m³/h天然气高速烧咀,喷口速度最大可达210m/s。加热对象为金属棒状散料堆。试验中的温度制度及装料按生产实际模拟,对其炉温、炉壁温度以及堆料纵向、横向断面各点温度随加热进程进行全面测试,结果用32点温度巡检仪记录打印。

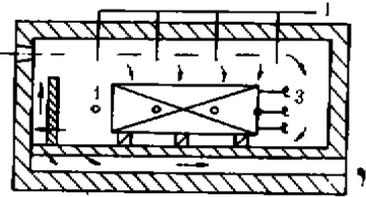


图1 试验炉结构简图

1-炉温 2-烧咀 3-料温 4-壁温
 然气高速烧咀,喷口速度最大可达210m/s。加热对象为金属棒状散料堆。试验中的温度制度及装料按生产实际模拟,对其炉温、炉壁温度以及堆料纵向、横向断面各点温度随加热进程进行全面测试,结果用32点温度巡检仪记录打印。

通过测试计算和回归处理得到散料堆加热在750~950℃内的对流传热准数方程为:

$$Nu = cRe^n Pr^m T^k \quad (4)$$

式中: $T = \frac{T_g}{T_g - T_m}$ 决定于炉气温度 T_g 及金属表面温度 T_m 的校正系数。(4)式中的各回归系数与堆料孔隙度有关,见表1。

表1 回归系数表

孔隙度(%)	c	n	m	k
37.71	1.31×10^{-7}	1.81	1.93	3.19
55.90	1.65×10^{-7}	1.92	1.96	3.02
67.47	1.73×10^{-7}	1.97	2.01	2.98

2 强对流间歇式炉内传热机构

2.1 强烈的对流换热

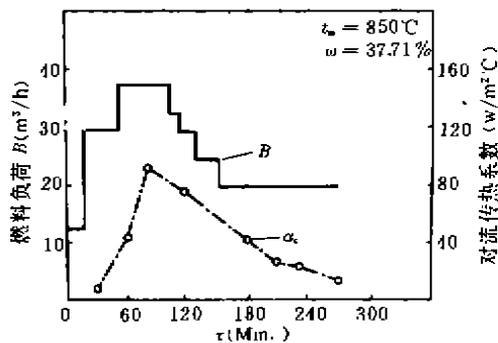


图2 对流传热系数随加热时间的变化

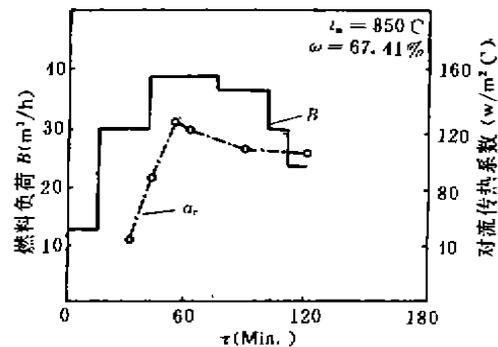


图3 对流传热系数随加热时间的变化

高速烧咀在热处理炉上成功的应用,其显著特点就是高速气流造成炉内烟气的强烈循环,大大地强化了炉内对流传热。笔者通过实验测定与理论计算相结合间接研究对流传热的

方法,得到了对流传热系数随加热时间的变化关系,见图2和图3。

从图可知,在加热初期,随着燃料负荷 B 的加大,烧咀喷出口烟气速度增大,加快了炉内烟气的循环,对流传热作用随之增强。按照给定的加热温度达到最大热负荷时,炉气对金属料的对流传热系数也达最大。在均热期,由于热负荷的减小,对流传热也随之减小。

比较图2和图3,在相同温度和热负荷下,孔隙度对炉气给散料堆金属的对流传热量有重大影响。孔隙度从37.71%提高到67.47%,平均对流传热系数从 $52\text{w}/\text{m}^2\text{C}$ 增加到 $96\text{w}/\text{m}^2\text{C}$ 。这是由于堆料方式的改变,使得循环炉气穿过料堆内部通道,在强化外部传热的同时也强化了堆料的内部传热,缩短了加热和均热时间。

2.2 炉内对流传热的比例

在以往的热处理炉内的热过程,虽然温度低于加热炉但由于炉内气流速度较小,一般仍是以辐射为主体的,对流传热的比例不大。在高速气流循环下,热处理炉内的传热特征亦发生根本的变化,对流传热极大的强化,对中、低温加热过程显示了更重要的作用。

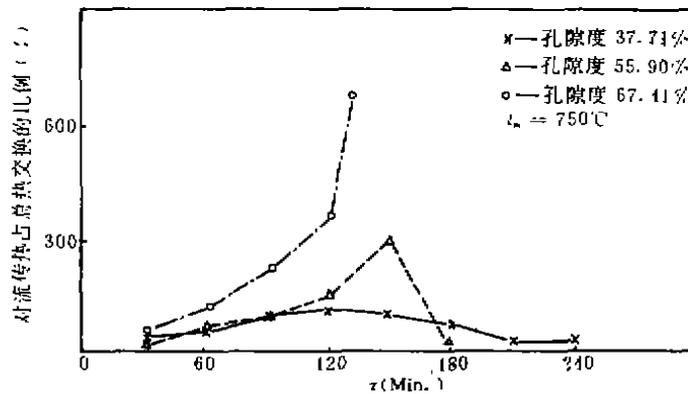


图4 对流传热的比例与时间的关系

图4为加热温度 $t_m = 750\text{C}$ 时的结果。试验中 $t_m = 850\text{C}$ 及 950C 的结果类似。从图可知,在高速气流循环下热处理炉内的对流传热占有绝对优势,而且由于气流穿过料堆内部流动,随料堆孔隙度的增加对流传热比例愈占主体地位。在 750C 孔隙度最小时的对流传热比例最高达120%, (由于出现反向辐射之故),加热周期的平均比例为65%左右。随金属加热温度提高,提供的热负荷增加,炉气循环加剧,对流作用进一步提高, $t_m = 850\text{C}$ 时大于 $t_m = 750\text{C}$,而当 $t_m = 950\text{C}$ 时,在最小孔隙度(37.71%)的情况下,平均对流传热所占的比例也高达180%之多。

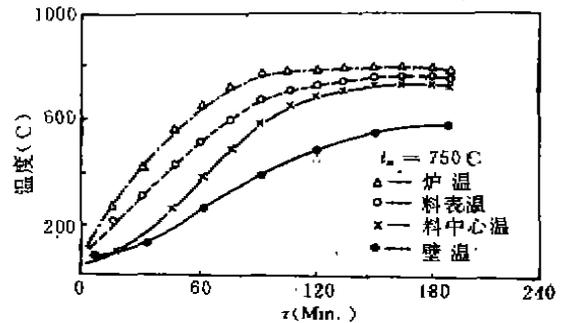


图5 孔隙度55.90%炉内温度与时间的关系

2.3 金属辐射反向热流和炉壁中间作用

在以辐射为主体的火焰炉炉膛综合换热过程中,炉内温度为 $t_1 > t_2 > t_m$,炉壁起着重要的中间作用。按传统的炉膛热交换理论[4],在金属的受热总量中炉壁间接辐射可达40%~

50%。然而,在高速气流强烈循环的间歇式炉内,通过试验发现,在加热过程中,除加热初期外,炉壁温度始终低于被加热金属表面温度见图5。由于 $t_w < t_m$,炉壁对金属料的间接辐射作用降到极小甚至出现负作用。

根据公式(2)计算炉内被加热金属获得的辐射热流 q ,发现 q 为负值,在这里笔者把金属材料在炉内获得的负值辐射热流称为金属辐射反向热流。这是间歇式热处理炉使用高速燃烧器后,由于炉气流直接对金属料对流传热的极大强化而出现炉内热交换的一种重要特征。为了便于比较,图中以传热系数的形式表示($\alpha = q/(t_w - t_m)$)。根据定义,传热系数恒为正,但负值的出现是由于金属温度大于炉壁温度的结果。图6和图7是在加热温度 $t_w = 850^\circ\text{C}$,孔隙度(55.90%)下的试验计算结果举例。试验结果说明,当金属加热温度愈高,供热负荷愈大时,随金属加热速度的增大,而炉壁惰性升温较慢,则金属的反向辐射愈明显,炉壁的负作用也随之愈大。金属堆料的孔隙度愈大,气体穿透愈强,反向辐射也随之增大。

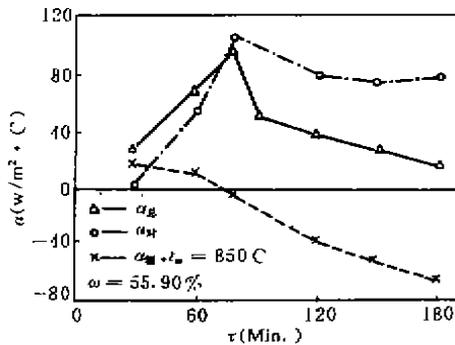


图6 传热系数与加热时间的关系

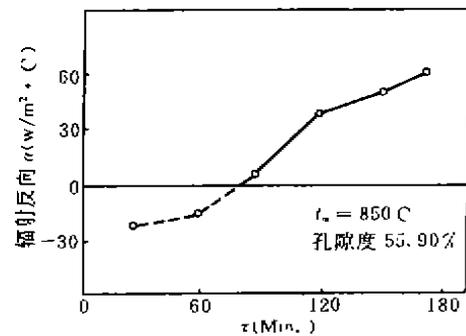


图7 反向热流与时间的关系

由此可知,对于间歇式热处理炉应用高速燃烧器,由于炉壁的直接作用下降,甚而出现反向热流,为了保证炉内对流传热的强化作用,因而对炉型结构和性能提出了新的要求。体现在一方面可认为炉膛的大小对传热的作用意义不大,而重要的是如何降低炉体热惰性,使之适应于炉内快速的换热过程,例如设置无惯性炉体结构,则成为相应解决的课题。

3 结 论

1) 高速燃烧器在热处理炉上的应用,由于炉内气流的强制循环作用,极大地强化了炉气对金属料的直接对流传热。

2) 试验表明,使用高速燃烧器的中温间歇式炉,炉内传热特征是炉气对金属料的直接对流传热占绝对优势,彻底改变了传统的以辐射传热为主的加热方式。对于散料加热,在孔隙度最小(37.71%)下炉气对料的平均对流传热所占比例可达65%,通过改变孔隙度强化堆料内部对流传热,比例提高愈为显著。

3) 通过热态试验和理论计算,发现金属堆料在加热过程中,由于强对流直接换热占主体地位,不可避免地出现金属辐射反向热流,并以对流传热的方式来补偿。这种对流换热比例超过100%的现象是间歇式中温炉使用高速燃烧器炉内传热的一个重要特征;与此相适应,对炉型结构和性能提出了新的要求。

4) 本文所建立的适合高速循环气流的间歇式炉内热交换计算方法和对炉内传热机构

与特征的试验研究,为高速燃烧器在金属加热和热处理炉上的广泛应用提供了理论依据和实验结果。

参 考 文 献

- 1 孙立群. 高速烧咀简介. 工业炉通讯, 1987, (2-3): 1~5
- 2 金贵宾等. 高速烧咀在工业炉的应用. 冶金能源, 1982, (3): 41~46
- 3 文光华. 重庆大学硕士论文, 1989, 12
- 4 北京钢铁学院. 普通冶金炉(下册). 北京: 冶金工业出版社, 1960, 91~98

·简讯·

七五攻关课题“光纤压力传感器”通过鉴定

由我校光机所承担的七五攻关课题“光纤压力传感器”于1991年6月10日通过了由国家教委组织的鉴定。该光纤压力测量系统精度优于0.6级,达国内外同类系统先进水平。