

⑦
35-41

金属冲击加热过程传热机构的研究

A STUDY OF THE MECHANISM OF HEAT-TRANSFER DURING METAL HEATING WITH IMPINGING JET

郑忠 高家锐
Zheng Zhong Gao Jiarui
(重庆大学冶金及材料工程系)

TF 061.1

摘要 本文采用热态试验和数学模拟的方法,研究了金属板坯在快速冲击加热炉内被射流冲击加热时的内外部传热机构。结果表明炉内的热交换主要集中在炉膛下部并以对流换热为主,在传给金属的热量中,对流换热量可高达80%。研究还发现了冲击加热后期出现金属向炉膛的反向辐射这一新的传热特征,反向辐射出现的时间主要取决于对流传热率的大小。

关键词 金属;快速加热炉;热交换/冲击加热

中国图书资料分类法分类号 TF061.1

ABSTRACT The mechanism of heat transfer during sheet metals heating with impinging jet in a rapid heating furnace is studied with experiments and mathematical simulating methods. It is shown that the heat exchange between metals and impinging jet occurs mainly in the lower region of the hearth, most of which is carried out in the manner of convective heat transfer, and the convective portion of the total heat fluxing to metal is up to 80%. Furthermore, it is also found that the reverse heat flux from metals to the wall, which is a new heat transfer phenomenon, takes place in the late heating period, and the intenser the convective heat transfer in the furnace is, the earlier the reverse radiation occurs.

KEY WORDS metal; rapid heating furnace; heat exchange / jet impingement heating

0 概 述

火焰炉内加热金属,金属所获得的热量是由炉膛内炉气与炉壁以辐射和对流方式传递来的,即炉气对金属表面的辐射和对流传热,以及炉气传递给炉壁的热量再由炉壁以辐射方式传给金属。传统的加热炉是以炉气和炉壁对金属的辐射传热为主,炉气对金属的对流传热作用很小,约占总传热量的5~10%。

金属冲击加热,由于高温高速气流直接喷向被加热表面,这种强制运动有效地削减了金属表面附面层对传热的阻碍,强化了加热过程,使对流传热占有相当比例,因此冲击加热具

有加热迅速热效率高的特点^[1-3]。

研究表明^[4,5]射流冲击加热时,炉内温度和热流分布明显受冲击流股运动的影响,并与烧咀位置有关。在一定的烧咀高度下,气流垂直冲击加热时,气流的放热在冲击加热炉炉膛下部料坯、炉底及侧墙部分。由模拟实验^[5,6]还得到了冲击加热时沿料坯表面的对流传热系数的变化规律,在临界点处冲击气流对金属料坯具有最大的对流传热系数,沿气流铺展半径方向,对流传热系数减小^[6,7]。

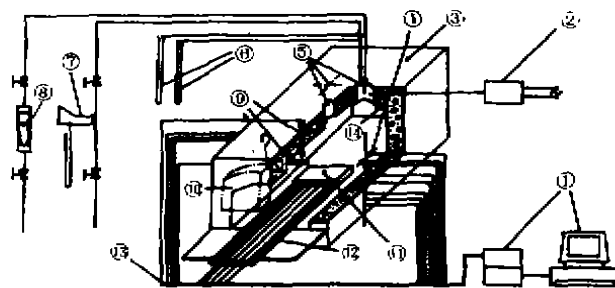
目前,关于金属冲击加热的初步研究及工业应用均表明这种加热方式与传统的相比有明显不同的热工特点。为了使该项新技术得以完善和发展,本文采用热态试验与数学模拟相结合的方法,对金属在冲击加热炉内的加热过程进行研究,并通过金属冲击加热过程传热规律和影响因素的分析来揭示其传热机理以及冲击加热炉内对流和辐射传热的动态特征。

1 研究方法

1.1 热态试验研究

热态试验在炉膛为 $1800 \times 800 \times 600$ (mm)的冲击加热炉中进行。天然气高速烧咀安装于炉顶,烧咀口直径 $d=55$ mm,能力 $10 \sim 30 \text{Nm}^3/\text{h}$,被加热金属试样置于耐火材料实炉底上,试样采用 $456 \times 195 \times 50$ 的3Cr24Ni7SiRe的耐热不锈钢,沿试样长度方向以驻点为准直至端部分别均布测量接近上下表面处温度及中心温度的测温孔,孔深约为试样宽度之半,金属温度用镍铬—镍硅热电偶测量。炉膛上下分别装有铂铑热电偶以测量上下部的炉温,炉底和炉壁不同位置的内表面温度亦由插入的热电偶测量。所有温度均由温度巡检仪自动采样,显示并打印记录。试验时烧咀气流的喷出速度和烟气温度以燃烧计算(按当时空煤气量)和铂铑热电偶测量来确定。必要时取样分析烟气成分。

为模拟生产条件,保证一定的辐射作用,试样入炉条件为:炉温 $t_{\text{炉}}=1050 \sim 1100^\circ\text{C}$,炉壁内表面温度 $t_{\text{壁}}=950 \sim 1000^\circ\text{C}$ 。



- | | | | |
|-----------|-----------|----------|----------|
| ① 温度巡检仪; | ② 点火器; | ③ 冲击加热炉; | ④ 炉壁测温点; |
| ⑤ 烧嘴安装位置; | ⑥ 烧嘴压力测量; | ⑦ 皮托管; | ⑧ 转子流量计; |
| ⑨ 炉膛测温点; | ⑩ 炉门; | ⑪ 钢样; | ⑫ 钢样支架; |
| ⑬ 热电偶引线; | ⑭ 排烟口 | | |

图1 试验装置及流程

试验装置及流程如图1所示。对金属试样进行了改变烧咀喷口距冲击表面的相对高度 H/d 、高温烟气喷出速度的试验。 H/d 的变化用炉底垫耐火砖来实现。改变烧咀负荷即可改变气流喷出速度。

1.2 数学模拟

钢坯在炉内的冲击加热可以认为是由钢坯表面以外的外部传热及其内部传热的综合作用过程。内部传热为非稳态导热,外部传热为复杂的综合传热。

在炉顶安装烧咀对板坯进行垂直冲击射流加热的条件下,将板坯导热作为二维问题处理,即只考虑过烧咀中心线的炉膛横截面上沿料长 l 和料厚 h (或 x 和 y) 两个方向的传热。

因此,作为数学模拟理论基础的传热方程可描述如下:

变物性条件下的二维非稳态导热方程为:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[\lambda(x, y, \tau) \frac{\partial t}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\lambda(x, y, \tau) \frac{\partial t}{\partial y} \right] = \rho \cdot c \frac{\partial t}{\partial \tau} \quad (1)$$

此为非线性导热微分方程。其定解的初始条件为:

$$t(x, y, \tau) |_{\tau=0} = t_0(x, y) \quad (2)$$

边界条件由外部传热给出。金属料坯上表面受到炉气的对流和辐射以及炉墙通过炉气的辐射作用;侧表面受炉墙的辐射作用;而下表面在实炉底温度高于它时,考虑炉底的导热影响,炉底温度低于下表面温度时作绝热处理。

上述条件可按第三类边界条件形式表述为:

上表面: $\lambda(x, y, \tau) \frac{\partial t}{\partial y} \Big|_{y=0} = q_1(x, \tau) \quad (3)$

$$q_1(x, \tau) = c_1 \left[\left(\frac{T_f}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_m}{100} \right)^4 \right] + a_c (t_f - t_m) \\ = a_1 (t_f - t_m) \quad (4)$$

侧表面: $\lambda(x, y, \tau) \frac{\partial t}{\partial x} \Big|_{x=l/2} = q_2(\tau) \quad (5)$

$$q_2(\tau) = c_2 \left[\left(\frac{T_w}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_m}{100} \right)^4 \right] = a_2 (t_w - t_m) \quad (6)$$

下表面: $t_m < t_s$ 时 $\lambda(x, y, \tau) \frac{\partial t}{\partial y} \Big|_{y=s} = \lambda_s (t_s - t_m) / \Delta s \quad (7)$

$$t_m \geq t_s \text{ 时 } \lambda(x, y, \tau) \frac{\partial t}{\partial y} \Big|_{y=s} = 0 \quad (8)$$

式(3)~(8)中各符号意义为:

c_1, c_2 ——分别为料坯上表面和侧表面得到的综合辐射传热系数;

a_c, a_1, a_2 ——分别为对流传热系数、综合传热系数和当量辐射传热系数;

$t_f(T_f), t_m(T_m), t_w, t_s$ ——分别为炉气、料坯表面、侧墙和炉底温度;

$\lambda(x, y, \tau), \lambda_s$ ——料坯和炉底耐火材料的导热系数。

依据金属冲击加热过程的传热基本方程及特点分析,作者在文献[7]中建立了用ADI法求解料坯内部二维变物性稳态导热的计算模型和具有传热系数分布特征的外部对流与辐射传热数学模型。运用该模型可对金属在炉内的冲击加热过程进行数学模拟,通过模拟计算可考察不同加热条件下外部对流和辐射传热的强弱对金属温度场的影响。模拟还可以得出金属表面的对流和辐射传热随加热进程的变化规律,以及获得在金属实际加热过程中不易

测定的对流和辐射传热沿金属表面的变化规律。

需要说明一点,模拟计算时辐射传热的炉气、炉墙及炉底温度是根据相应条件下热态试验的测定值而确定的。

综合热态试验和数学模拟结果,可分析金属冲击加热过程的传热特征。

2 金属冲击加热过程的传热特征

2.1 金属温度场的变化规律

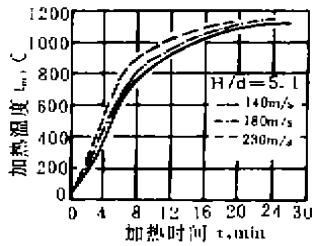


图 2(a) 改变气流喷出速度的金属升温过程

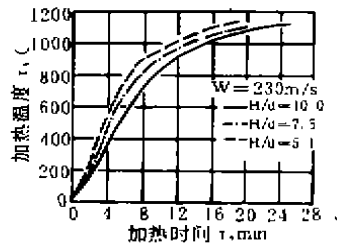


图 2(b) 改变相对高度的金属升温过程

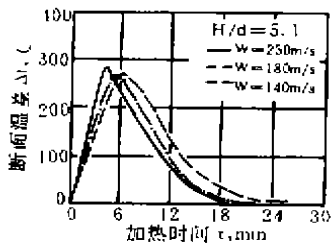


图 3(a) 加热过程金属断面温度差随喷出速度变化

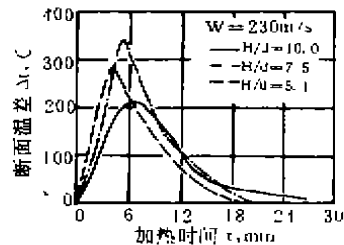


图 3(b) 加热过程金属断面温度差相应于高度的变化

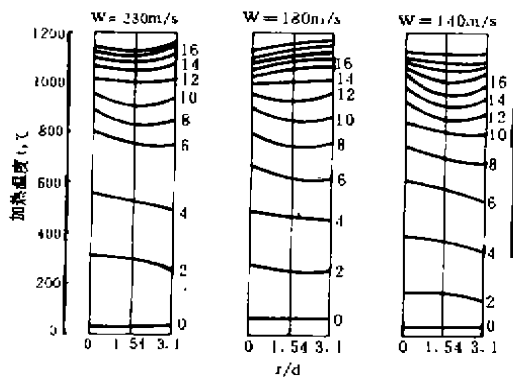


图 4(a) 加热过程金属径向温度分布随喷出速度的变化关系

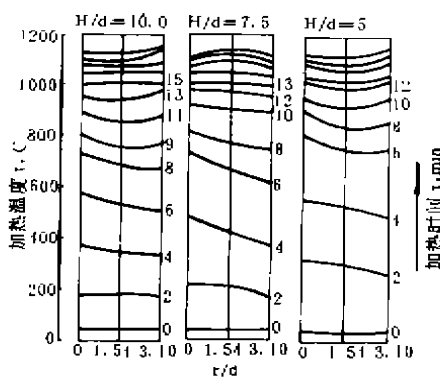


图 4(b) 加热过程金属径向温度分布随相对高度的变化关系

金属料坯在实炉底上单烧咀冲击加热时,可将上表面临界点温度作为加热温度的代表

值,断面温差则以过临界点的上下表面温差来表示。由试验得到的温度场变化关系如图2~图4。相应模拟计算也有与此基本一致的变化规律。

由图可知中低温阶段,金属加热速度较快,到大约800℃以后速度减缓。当加热过程进行到5~6分钟,金属表面温度达600~800℃时,金属温度场最不均匀,具有最大的断面温差和径向温差。随气流喷出速度增加,对流传热强化,同时由于相应热负荷的增加使辐射传热也增加,因此升温速度加快,加热时间缩短,其效果在高速且加热温度达600℃以上时较明显。改变气流喷出速度对金属温度分布的均匀性影响不很大。由改变喷出口至被加热金属表面的高度对温度场的影响可知,降低相对高度有利于强化传热过程,但高度由 $H/d = 10$ 减小至 $H/d = 7.5$ 时,金属内部的温差增大。 H/d 减小,即缩短冲击距离,可有效增强对金属的对流传热和直接定向辐射。

2.2 炉内温度变化特性

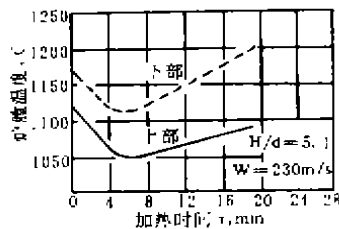


图5 金属加热过程中上下部炉温的变化

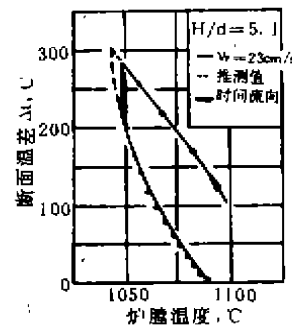


图6 加热过程金属断面温差与炉温的变化关系

以炉膛内热电偶测得的温度来表征和分析加热过程中炉内综合传热效果。图5给出了炉内上下部测点的温度值随加热过程的变化,图6则表示了断面温差相应炉温(上测点)的变化规律。

由图5所示可看出加热过程中炉膛下部温度明显高于上部对应温度,炉壁温度的实测数据也具有此特征,说明在冲击加热炉中,高温气流的供热主要集中于下部。在加热初期,温度降低,当过程进行到5~6分钟时,炉温达最低值,以后又逐渐升高,而且下部温度的升高速度高于上部,也就表明了下部的传热的强化主要是由于高温高速气流的冲击作用增强对流传热所致。参见相同加热条件下的温度场变化规律图还可知炉温与金属温度分布均匀性的变化规律相关,炉温降至最低时,相应金属温差升到最大。对此可认为在炉子供热基本一定的条件下,炉膛存在一定热平衡关系,一旦冷金属试样加入后,原热平衡被破坏,冷金属的吸热使炉温降低。对于被加热的金属料坯,加热初期外部传热速率高于内部导热速率,在金属温度升高的同时,金属内部温差增加。而当加热至一定程度后,金属内部导热性增加的同时,高温气流与金属间的温差降低,外部传热速率 转变成成为限制性环节,此时金属内部温差将开始减小,相应的炉温也因此而逐渐升高。上述相对变化关系的存在,则不难理解试验过程中出现的炉温与金属断面温差的关系(图6)。

2.3 金属加热过程的外部传热特征

图7~10是模拟试验条件下,加热过程中金属表面对流和辐射传热计算结果。

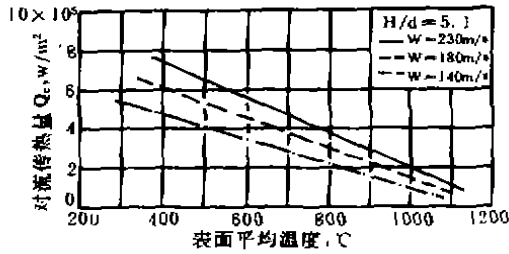


图7 对流传热量随金属表面温度的变化

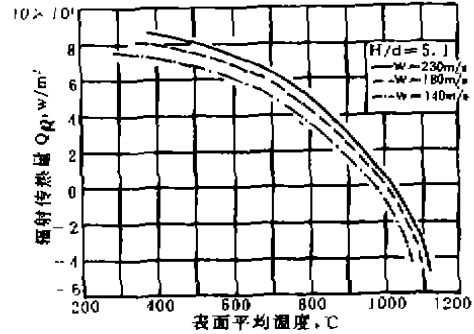


图8 辐射传热量随金属表面温度的变化

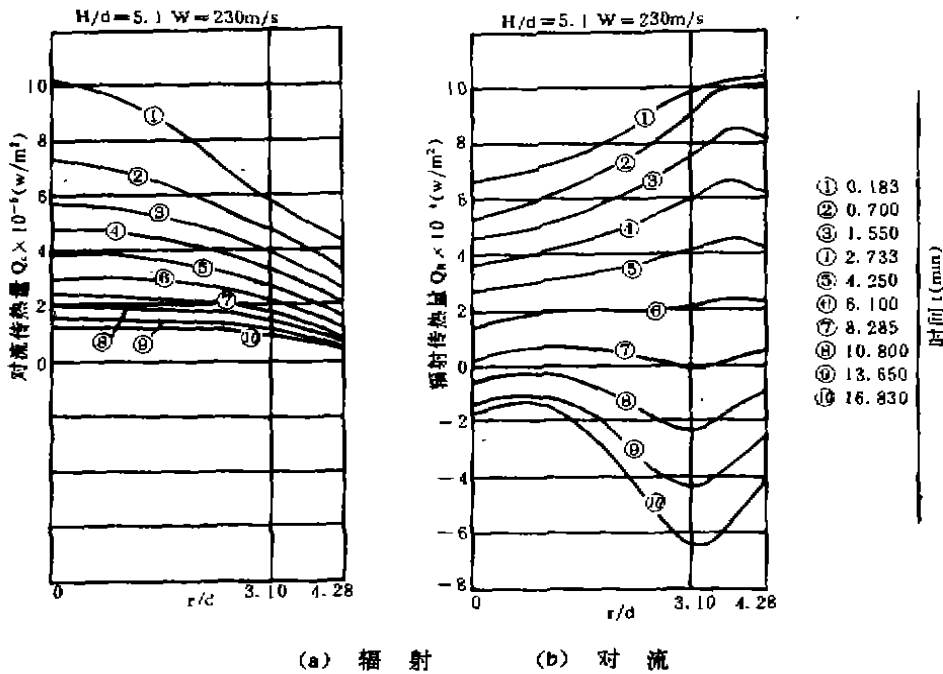


图9 金属加热过程辐射对流传热量的分布

从图上可看出加热进程中,金属表面温度升高,而对流和辐射传热量均相应减少,对流传热呈线性变化,辐射传热为高次方关系。金属表面的对流传热量是从中心到边缘呈衰减趋势,而辐射传热量却是边缘部分高于中心(相应传热系数亦具此特征),随加热时间的推移,表面的对流和辐射传热量均趋向均匀。金属得到的对流传热量占总传热量的比率($Q_c / (Q_c + Q_r)$)在加热初期有所下降以后又逐渐增加。增加气流喷出速度,尤其是降低烧咀的相对高度是提高对流传热比率的有效措施。当金属被加热至一定程度后(加热后期),将出现被加热金属表面向外的反向辐射,此时对被加热表面的辐射传热量为负值,对流传热比率大于1。对流传热所占比例愈大,出现反向辐射的时间就愈提前。对于强对流传热体系,大量的热量可直接传给被加热金属,炉壁温度较低,它在传热过程中所起的作用相对减弱,因此出现被加热金属表面的反向辐射是难以避免的现象。这也就是金属冲击加热炉具有在低炉壁温度下得到高加热件温度的加热特点时的传热特征。若能从冲击加热炉的炉墙结构和材质方面

加以改善,尽可能提高炉墙内表面温度,又减少炉墙砌体的蓄热,则可以充分发挥冲击加热过程的强对流传热优越性。

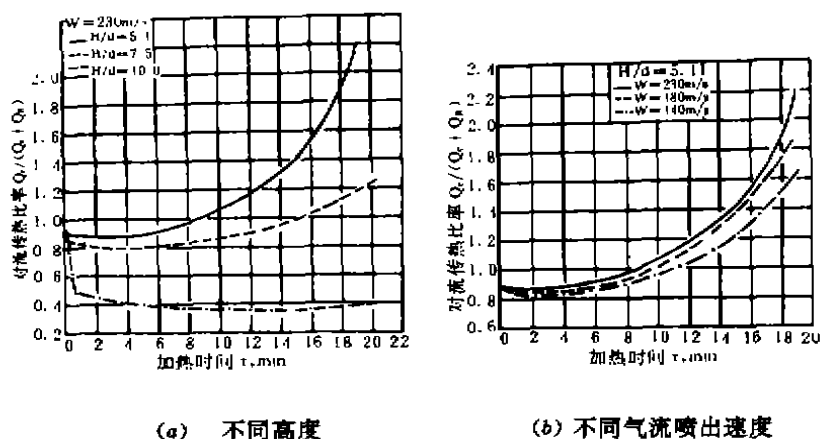


图 10 金属冲击加热过程对流传热率的变化

3 结 论

通过对金属冲击加热过程的热态试验和数学模拟结果的分析可得如下结论:

1) 金属冲击加热过程的快速加热特征主要表现在加热初期的中低温阶段。降低烧咀高度、增大气流喷出速度均有利于加热过程的强化。试验条件下,高度变化对传热过程和加热效果的影响大于喷出速度的影响,尤其在高度由 $H/d = 10$ 降至 $H/d = 7.5$ 时,强化传热的效果明显。当喷出速度为 230m/s 时,相应上述高度的变化,对流传热所占比率由 40% 增加到 80% 。

2) 冲击加热炉内以对流传热为主(对流传热率高达 80%) 的强烈换热集中于炉膛下部,大量的热量可直接传给金属。加热过程中金属温度分布的均匀程度与炉温变化有一定的对应关系。金属温差出现最大值时对应炉温降至最低点。

3) 随加热表面温度升高,对流和辐射传热均降低,对流传热率在加热初期有所下降,以后又逐渐增大,其变化与金属温度均匀性变化基本同步。

4) 强对流条件下在加热后期出现被加热金属表面的反向辐射,反向辐射期对流传热率大于 1,反向辐射出现的时间取决于对流传热率的大小。

参 考 文 献

- 1 吴德荣. 高速烧咀及其应用浅介. 工业炉通讯, 1978(1), 39~48
- 2 A. Л. Верная 等. 快速对流加热炉. 工业炉通讯, 1978(4), 56~58
- 3 英国快速加热炉简介(赴英考察报告). 工业炉通讯, 1979(1), 54~62
- 4 吕克勤等. 喷流火焰加热技术的试验研究. 冶金能源, 1986, 5(5), 51~54
- 5 高家锐. 苏联冲击加热研究选译文集. 重庆大学资料, 1988
- 6 Aralov A D. Heat Transfer Coefficient in the Accelerating Flow Zone of an Axisymmetric Imping Jet. J. Heat Transfer-Soviet Research, 1987, 19(4), 102~109
- 7 郑忠. 金属冲击加热过程传热机理研究. 重庆大学硕士学位论文, 1989