

doi:10.3969/j.issn.1671-5152.2016.02.002

天然气加热炉的节能分析

□ 同济大学机械与能源工程学院 (201804) 杨程 秦朝葵 周宇

摘要: 天然气加热炉是工业中重要的加热设备,因成本、技术等原因导致目前普遍存在加热方式落后、效率低、浪费严重等问题,如何节能是一个亟待解决的问题。本文综述了目前加热炉在燃烧器、炉衬材料、余热回收等方面采取的节能方法,炉内传热进行分析的基础,提出了一些小型加热炉的节能措施,对于加热炉的优化设计和应用推广有一定参考价值。

关键词: 天然气 加热炉 节能

Analysis of Energy Conservation of Natural Gas-Fired Furnace

College of Mechanical Engineering, Tongji University, Shanghai

Yang Cheng, Qin Chaokui, Zhou Yu

Abstract: As an indispensable heating equipment, gas-fired furnace is commonly faced up with low efficiency and energy wastage due to cost limitation and technology issues. Energy conservation is a serious problem remaining to be solved. In this paper some technical measures to save energy was discussed, including burners, linings, waste heat recovery, etc. Based upon heat transfer analysis, energy conservation methods was put forward for small-size furnace. The conclusion was helpful for optimum design and utilization of natural gas in furnaces.

Keywords: natural gas industrial furnace energy conservation

5.2 结论

通过对城市燃气钢制管网防腐层检测方法的比较,认定目前比较实用的检测方法是人体电容法;将此技术应用于惠州城市燃气管网的外防腐层检测并结合开挖验证了此技术的科学性和实用性;通过此次检测和挖坑发现有以下问题存在:燃气管线与其他管线间距不合理、燃气管线敷设埋深不合理、管道阴极保护安装的牺牲阳极不合理,部分管道欠阴极保护效果等,并对于以上问题提出合理建议。

参考文献

- 1 任峰,何仁洋等.城市燃气管网检测技术研究[J],管道技术与设备,2014;16-23
- 2 袁厚明.地下管道腐蚀与漏损控制[M].北京:2014:38-39
- 3 GB 50028-2006.《城市燃气设计规范》[S]
- 4 GB/T 21448-2008.《埋地钢质管道阴极保护技术规范》[S]

1 前言

加热炉是工业生产中非常重要的加热设备,根据金属加热工艺和金属加热制度的要求,把需要通过轧制、锻造、冲压等操作的物料加热到一定温度,有尽量高的塑性和尽量低的变形抗力并保持一定温度均匀性。我国工业炉的整体利用水平不高,大致与发达国家20世纪70、80年代的水平相当,工业炉的热效率平均值低于36%,轧钢加热炉热效率39%,锻造炉33%,均热炉35%,而全球工业炉的热效率平均值在50%以上^[1-2]。从节约燃料、减少生产成本的角度出发,对加热炉能耗进行分析并进行节能改造很有必要。

我国目前加热炉仍以煤为主要燃料。以锻造加热炉为例,锻造加热炉全国约有1万台左右,燃煤炉占总量的60%,燃气炉约占35%^[3]。加热炉采用煤做燃料易燃烧不完全,同时产生大量气体污染物和粉尘,造成环境污染严重。

天然气是一种高热值的清洁能源,天然气不仅可以达到很高的燃烧温度,且易完全燃烧。2014年中国天然气消费量达1 855亿m³,相比2013年增长8.6%,占世界天然气消费总量的5.4%^[4]。天然气将在我国能源消费结构中占越来越大的比重。与以电、煤、油等为燃料的加热炉相比,天然气加热炉投资成本最低,采用以天然气为燃料的加热炉技术开发前景广阔。本文主要介绍了天然气加热炉在烧嘴选择、余热回收、耐火材料及强化炉内传热等方面的节能现状,并特别针对小型天然气加热炉节能进行分析。

2 烧嘴选择

烧嘴的主要作用是组织燃料在炉内良好燃烧,保证工件的加热效果达到标准并且加热炉经济合理。烧嘴的选型需要通过炉子尺寸和生产工艺确定。不同的烧嘴选型直接影响炉温分布和工件的加热效果。当烧嘴选择不合适时,容易造成燃料的浪费,影响工件加热质量。目前加热炉上常用的烧嘴包括高速烧嘴、平焰烧嘴、自身预热式烧嘴、蓄热式烧嘴等。

2.1 高速烧嘴

高速烧嘴通过在燃气和空气混合处设有燃烧室,使两者在燃烧室内强烈混合和燃烧,生成的烟气在

燃烧室内膨胀,完全燃烧的高温烟气以很高的流速从喷口喷出,速度最高可达300m/s。从喷口喷出的高温烟气卷吸周围烟气并进行强烈混合,使得炉温非常均匀。既可减少烧嘴数量,又便于控制、简化炉体结构。高速烧嘴的优点还包括:负荷调节比大,可达1:50;使用低热值燃气也能稳定燃烧;炉内气氛可调成氧化性或还原性;抑制NO_x的生成等等。工业中利用高速烧嘴喷出烟气高速高温的特点,对物料实行冲击加热,达到快速加热的目的。当高速烟气直接作用于被加热物料表面时,对流换热作用大大加强,甚至可达到对流换热为主的程度。由于加热时间短,换热效率高,与普通加热炉相比,燃气耗量可减少40%~50%^[5]。并且能实现少脱碳和低氧化加热,物料加热质量高。利用高速烧嘴对物料快速加热有着很高的经济效益。

2.2 自身预热式烧嘴

自身预热式烧嘴是将烧嘴、换热器、引射器、烟道等结合成一个整体的装置,引射器吸出烟气并控制压力,烟气和助燃空气在环缝换热器中热交换,经过预热后的助燃空气在喷口与燃气混合并燃烧,烟气高速喷出和引射回流。预热后的空气几乎没有散热损失就和空气混合燃烧,减少了燃料消耗。换热器和烧嘴结合为一体,结构紧凑,管道系统简单,和同类的换热器加上烧嘴相比投资少。自身预热式烧嘴从国内外使用情况看,适用于周期式操作的室式加热炉,结构紧凑、操作方便、燃料消耗少。当用于连续式加热炉时,由于连续式加热炉一般设有预热段,利用烟气余热来预热物料,采用自身预热式烧嘴将减弱烟气对物料的预热作用。如果取消连续式加热炉的预热段,物料进入炉内直接进入高温段,此时升温速度最快。同时采用自身预热式烧嘴来提高余热回收率,不仅可以提高生产率,还能降低燃料消耗。在各类加热炉中采用自身预热式烧嘴有助于达到高产低耗的目的^[6]。

2.3 平焰烧嘴

平焰烧嘴是目前广泛应用于大中型连续式加热炉的炉顶烧嘴。原理是空气沿着切线方向在烧嘴燃烧通道高速旋转,产生离心力使气流获得较大的径向速度,与低速进入的燃气形成旋转气流强烈混合通过喇叭形通道燃烧形成平火焰。平焰燃烧器喷出的是紧贴炉墙或炉顶向四周均匀伸展的圆盘状火焰,以对流形

式与炉衬换热,高温炉衬向被加热物料辐射换热,比用炉气、火焰加热物料效率更高。由于在平焰下方会出现回流区,部分高温燃烧产物会与未燃燃料混合,不仅可以稳定火焰,还能加强炉气气流流动,让炉膛内温度更加均匀,可以实现均匀加热,避免物料过烧,起到提高热效率和节能的作用。由于平焰烧嘴能形成一定范围的均匀温度场,适用于炉膛高度较低的加热炉。如果炉子高度过高,会在火焰与物料之间形成低温层,影响炉内换热。采用平焰烧嘴可以改善炉压分布,减小出料端吸入冷风,入料口冒火的现象,对加热工艺稳定的中小型加热炉作为炉顶烧嘴非常适用。

3 耐火材料

加热炉中,炉子砌体是承受热负荷的主要部分,同时炉体的散热损失是炉子的主要热损失之一,约占炉体热量损失的4%~8%^[7]。若炉体保温性能不好,散热损失大,炉子的热效率低、燃料消耗高。炉体的热损失包括散热损失和蓄热损失两部分,评价加热炉热损失的公式为:

$$q = \frac{(t_{in} - t_r)}{\sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha}} + \frac{c\rho\delta_i t}{3.6\tau} \quad (1)$$

式中: t_{in} —炉墙内壁温度, °C; t_r —外界环境温度, °C; δ_i —第*i*层炉衬材料的厚度, m; λ_i —第*i*层炉衬材料的导热系数, W/(m·K); α —炉墙综合换热系数, W/(m²·K); c —炉衬材料比热容, kJ/(kg·K); ρ —炉衬材料密度, kg/m³; t —炉墙平均温度, °C, τ —加热时间, h。

从(1)式可知容重和导热性是耐火材料的重要指标。导热系数越小,则炉体的散热损失越小,比热容和密度越小,则蓄热损失越小。以工业中常见的130kg/m³的耐火纤维和2100kg/m³的耐火粘土砖比较。当铺成炉墙时,每1平方米的耐火粘土砖的重量是耐火纤维的16倍左右。当使用温度为900°C时,耐火纤维毡的导热系数为0.274W/(m²·K),比热容为1.073kJ/(kg·K),耐火粘土砖的导热系数为1.35W/(m²·K),比热容2.95kJ/(kg·K),导热系数约为耐火纤维毡的5倍,比热容为其3倍^[8]。由此可见筑炉材料选择耐火纤维时,可极大减轻炉体重量。由于炉衬热容量小,炉温升

温快,有利于缩短生产周期,提高热效率,降低能耗。我国在20世纪70年代开始研制全纤维炉墙,80年代初推广使用,80年代后期技术成熟可靠,已广泛使用^[9]。当需要考虑加热炉成本时,由于全纤维炉衬价格较高,可通过设计与温度相适应的多层耐火材料炉墙,既能有效降低炉壁温度,减小蓄热损失和散热损失,又能节约成本,使不同材质的耐火材料性能得到最大发挥,达到事半功倍的效果。经计算,400mm厚的低水泥浇注料加贴50mm的耐火纤维后,散热损失仅为450mm厚的全浇注料炉衬的50%。在考虑炉墙成本、炉墙散热损失和蓄热损失的情况下,确定合理的炉墙经济厚度。

4 余热回收

燃气在加热炉内燃烧后,产生的烟气与炉内工件换热后从烟道排出,烟气带走的热量对整个炉子的热效率影响很大,是影响加热炉热效率最重要的因素。对202座加热炉的余热利用资料调查发现,烟气温度小于700°C的占40%,在700°C~900°C的占51%,平均烟气余热损失为32%^[10]。如何有效回收这部分烟气的热量,成为节约能源,提高热效率的关键。预热空气可提高燃料的理论燃烧温度,增强火焰辐射能力,提高加热质量。对燃料为天然气的加热炉来说,天然气的火焰传播速度很低,着火范围小,当流速较高时,易产生脱火现象。当预热的高温助燃空气和天然气混合,可以扩大着火范围和火焰传播速度,因此可以使火焰更稳定,燃烧更充分,最终达到节约燃料、降低能耗的目的。

目前回收烟气余热的方法有几种:

(1) 烟气和空气、燃气在换热器内进行热交换,空气温度可预热至500°C~600°C。常用的换热器有管式、热管式、板式等,管式换热器是最常用的换热器,允许入口烟气温度1000°C以上,出口烟气温度600°C,是加热炉余热回收中利用最广泛的换热器^[11]。板式换热器结构紧凑,换热效率更高,不过使用温度范围较窄。采用换热器的形式来预热空气是最常用并且效率较高的办法。缺点是长期使用后容易造成积灰,增加受热面热阻,降低换热效率。

(2) 蓄热式燃烧技术是目前国内外流行的余热

回收技术。蓄热式燃烧系统由烧嘴、蓄热体、换向阀、燃料通道、空气通道等组成。通过成对的烧嘴交替蓄热排烟和燃烧的方式，空气经烧嘴高速喷入炉膛，抽吸周围烟气，燃料在贫氧状态下燃烧。蓄热体周期性的存储烟气的热量，并用存储的热量对助燃空气加热，可将空气预热到1 000℃以上，排烟温度150℃以下，实现极限余热回收。烟气的余热回收率可达80%，节约燃料20%~50%，有着很高的经济效益。优点包括：提高了燃烧温度，强化炉内传热，大大提高了燃烧效率；改善炉内温度分布，使得炉内温度分布均匀；由于炉内烟气与物料换热得到强化，单位面积换热强度增加，可相应减小炉体尺寸；炉膛内为贫氧燃烧，工件氧化烧损小，经济效益显著。

适用于蓄热式烧嘴的炉型较多，包括推钢式加热炉、步进式加热炉、热处理炉、均热炉、台车炉等，由于蓄热式烧嘴对工艺稳定性要求较高，实际应用中以推钢式和步进式为主，截止到2007年11月国内已有270余座此类加热炉投入生产。使用燃料包括高炉煤气、发生炉煤气、天然气等，所占比例如表1^[12]。

表1 蓄热式加热炉各类燃料应用比例

燃气种类	高炉煤气	混合煤气	发生炉煤气	转炉煤气	重油	焦炉煤气	天然气
所占比例 (%)	60.1	19.2	13.1	3.5	2.0	1.0	1.0

可见蓄热式加热炉中燃料主要以高炉煤气和混合煤气为主，由于热值低，燃烧温度不高，需空气、燃气双预热。而天然气是热值高的清洁能源，只需预热空气，不易对蓄热体产生堵塞，减少维修次数。在生产中天然气作为燃料的蓄热式加热炉只占1%，有很大的提升空间。

(3) 通过余热锅炉生产蒸汽和热水，回收烟气余热是提高能源利用率的重要手段。优点是传热效率高，设备紧凑，余热利用充分。不过这并不能将余热回收炉内提高加热炉的热效率，只是提高了热量的利用率，间接提高炉子热效率。现在的余热锅炉热回收通常是烟气经过换热器后再安装锅炉，实现余热梯级利用。2010年鞍钢在2150生产线上改造烟气余热发电，烟气首先通过换热器排烟温度降至370℃，再通过余热锅炉，排烟温度降至170℃。余热锅炉蒸汽温

度330℃，蒸汽压力1.1MPa，产生的蒸汽并入鞍钢蒸汽管网，产生效益3 730万元/a^[13]。

5 强化炉内换热

各项节能措施的目的在于将燃料燃烧放出的热量更多地留在炉内。炉内热交换是一个复杂的过程，炉气、物料、炉壁三者进行热量交换。炉内物料接受来自炉气和炉壁的热量，炉壁接受炉气的热量后又通过辐射的方式传给物料，起到中间体的作用。通过强化物料与炉气、炉壁之间的对流、辐射换热，可提高生产率，降低燃料消耗。

5.1 增强辐射换热

$$Q_1 = c \cdot \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right] \cdot F_2 \quad (2)$$

(2) 式中 Q_1 —辐射换热量, W; c —炉气和炉壁对物料的导来辐射系数, $\text{kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{K}^4)$; T_1 —炉气温度, K; T_2 —物料表面温度, K; F_2 —物料受热面积, m^2 。

导来辐射系数是炉气、炉料和炉壁三者间的总辐射系数, 值为

$$c = \varepsilon_1 \varepsilon_2 \frac{20.51[1 + \varphi(1 - \varepsilon_1)]}{\varepsilon_1 + \varphi(1 - \varepsilon_1)[\varepsilon_2 + \varepsilon_1(1 - \varepsilon_2)]} \quad (3)$$

式中 ε_1 —炉气黑度; ε_2 —物料表面黑度; φ —炉壁对物料的角系数, $\varphi = \frac{F_2}{F_1}$; F_2 —物料受热表面积, m^2 ; F_1 —炉膛内表面积, m^2 。

从公式(2)可以看出, 要想提高工件接受的辐射热, 需要增大导来辐射系数和炉温, 从而增加工件接受的辐射热。由于辐射换热与炉气温度的四次方相关, 提高炉温可显著增强辐射换热。另一方面, 想要增大导来辐射系数, 则需增大炉气黑度和炉围伸展系数。目前工业中大型加热炉普遍采用通过增加炉膛尺寸即增大炉围伸展系数来增强辐射换热, 这些措施有一定作用。该公式有个假定条件是炉壁是光滑平整的, 但实际工程中的炉衬材料表面是粗糙的, 从炉壁反射的热射线是以漫反射的形式充满炉膛, 工件并没有有效吸收。目前国内外关于强化辐射换热的措施包括装强辐射原件, 涂高辐射涂料等^[15]。由于炉内表面黑度越大, 可增加炉内热辐射交换量, 提高炉子产量, 节约燃料。通过在炉内耐火材料表面喷涂红外辐射节能材料, 可延长炉体寿命, 增加炉墙黑度, 强

化炉内辐射换热。炉顶安装黑体辐射原件后,元件可以吸收炉膛内漫射状的热射线,再以高发射特性重新发射热射线,通过元件自身结构将热射线呈束状直接射向工件,大大提高了热射线的到位率,从微观上增加了炉膛的传热面积,从而增强了辐射换热。元件的发射率可达0.96,将漫射状的热射线直接射到加热物料表面,增加物料单位面积吸收的辐射热量。经测试,轧制加热铁锹的连续式加热炉中通过安装黑体元件,燃气消耗由 $0.2314\text{m}^3/\text{把}$ 降至 $0.1795\text{m}^3/\text{把}$,节能22.4%^[16]。通过在炉内衬涂高辐射涂料,可以提高炉内参与辐射换热的物体表面辐射系数。一般情况下被加热物料表面黑度当作常数处理。如果在加热炉内衬涂上高辐射涂料,可以将传到炉壁的热量以电磁波的形式辐射到物料,由于电磁波穿透能力强,使物料更快、更多的吸收热量,增强其与炉气、炉壁的辐射换热。目前的高辐射涂料主要有高温红外辐射涂料和高辐射陶瓷涂料。梅山钢铁厂热轧1422产线加热炉采用HT-1型远红外陶瓷涂料后,节能率达6%~8%^[17]。

5.2 增强对流换热

高温加热炉传热由于炉气流速不高,对流换热小,需要消耗极多的燃料保证高炉气温度和炉墙温度。增大炉气流速对对流换热量的提升效果不明显,主要在于加强炉气扰动,提升炉温均匀性,避免物料过烧。通过采用高速燃烧器,从喷口喷出的高温烟气卷吸炉内低速、温低的炉气,高速气流可以破坏工件表面阻碍换热的边界层增强了炉内对流和辐射换热,并且降低了污染物的生成。

高速气流冲击金属表面金属冲击能有效提高对流换热系数。加热工艺与传统加热工艺相比,生产率和热效率高、燃料消耗低、烧损少、操作灵活。采用带电火花的天然气高速烧嘴在试验炉内对薄板坯进行冲击加热实验,结果表明:用喷嘴直径为55mm的天然气高速烧嘴在喷出速度 $v=150\text{m/s}\sim 180\text{m/s}$ 时,高速气体直接冲击金属表面,在喷口距离钢坯表面 $H/d\leq 5$ 的情况下,金属升温快,加热时间段,断面和径向温度分布均匀^[18]。在高度可调的室式炉试验中,烟气以 230m/s 的喷出速度对正下方的金属冲击加热,直到金属表面温度 $1\ 100^\circ\text{C}$ 时停止。在此过程中对流换热系数高达 $1\ 000\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ ^[19]。锻造加热炉上进行高温烧嘴实验,在同样条件下,对炉顶安装高速烧嘴和

炉子侧墙安装平焰烧嘴进行对比热平衡测试,结果表明炉顶安装高速烧嘴较之炉侧墙安装平焰烧嘴,可以提高生产率和节约燃料消耗,节约燃气37.97%,提高小时生产率71.5%^[20]。

6 小型加热炉的节能分析

小型加热炉主要对小尺寸金属如铜、铁等进行锻造、冲压前加热,热效率非常低。主要表现在:大多数加热炉没有设置换热器,排烟温度高;炉墙为砖砌结构,散热损失大;分散式的人工控制,加热炉与轧机不匹配;多数加热炉燃料为煤或油,燃烧不完全,环境污染严重。因此更有必要降低加热炉燃料消耗,提高小型加热炉的热效率,以减少生产成本,提高产品竞争力。

6.1 工件的摆放形式和间距

对于大型加热炉来说,物料基本为单排放置,摆放形式单一。小型加热炉中的工件由于尺寸小,数量多,导致摆放有立式、卧式、交叉等形式,不同的摆放形式影响换热效果,不同的间距影响生产率。合适的摆放形式和间距不仅有利于炉气与物料换热,同时有助于提高生产能力。烟气流过物料与之换热时,可以当作外掠管束对流换热处理,换热情况与 Re 、 Pr 、横向相对间距、纵向相对间距、工件排列方式有关。此时边界层内流体的压强、流速及流向都沿弯曲面发生很大的变化,从而影响换热。当工件以顺排的形式摆放时,烟气流道相对平直,当流速低或者工件之间距离较短时,会在尾部形成滞留区,在雷诺数较高的情况下,叉排的烟气扰动较好,换热可比顺排强。当物料置放间隙在0.45倍的物料宽度时,相应的炉子生产率和生产能力达到最大值,氧化烧损也处于较小值^[21]。在没有增加燃料消耗的条件下就能提高产品质量,适合在连续式加热炉上推广。

6.2 强化预热段余热回收

小型加热炉炉体小,预热段相应很短。若满足生产率的要求,就会加大炉底负荷,燃烧的高温气体得不到有效利用,烟气带走大量余热。通过增加预热段长度,可延长烟气与加热工件的热交换时间,提高预热段的钢坯温度,降低排烟温度,降低单位热耗。有关资料表明,烟气温度每下降 100°C ,加热炉热效率

提高5%。从换热器的角度来说,高温炉炉尾的排烟温度高,对空气预热器提出了很高的要求。目前能对高温烟气进行换热的空气预热器体积大,并不适合与小型加热炉配套使用,所以在烟气温度过高,不宜采用高温空预器时,应考虑延长预热段。

如果受到场地限制,加热炉没有延长改造的空间,可以考虑在加热炉预热段前安装烟气喷流预热装置。高温炉烟气通过换热器后仍会有600℃以上的高温,如果通过喷流预热装置可以把物料预热到180℃~250℃,而烟温降至300℃~400℃,有效的回收了烟气余热,减少燃料消耗^[22]。

6.3 提高热工控制水平

小型加热炉更多的是人工操作和控制,控制水平与大型加热炉差距很大,影响了生产率的提高。由于控制水平低,在出现不可预见的问题时,待轧现象很突出。如果供热制度不相应调整,会造成物料温度过高,造成氧化烧损和燃料浪费。因此,需在正常情况和非正常情况下制定不同的加热炉加热制度,以减少待轧时的氧化烧损和燃料消耗。炉压也是影响是炉子热效率非常重要的一部分,如果炉压控制不当,炉膛压力成正压时,炉门会冒火;当炉膛压力成负压时,会吸入冷空气,降低炉气温度,还需将其加热到与炉气相同的温度再从烟道排出,增加了燃烧器的负担。控制炉压可采取炉内设置隔墙、控制烟道阀门开启度等方法,可将炉内控制在合适的范围,减少炉气外溢或吸冷风。

7 结束语

随着西气东输、东海天然气、海外LNG等项目开展,工业用户天然气供给充足,对于天然气加热炉普及和改造来说是一大利好。选择合适的燃烧器及合理的燃烧器布置,对于优化加热炉内温度场、流场有着重要作用。对于需要快速加热的工艺,可采用高速烧嘴;对于炉体尺寸不大的加热炉可选平焰烧嘴作为炉顶烧嘴;对工艺稳定,热效率要求高的加热炉可选择蓄热式烧嘴。选择合适的耐火材料比如耐火纤维作为炉衬材料,可以减小加热炉的散热损失和蓄热损失,减少燃料消耗及运行成本。考虑到投资、使用寿命和节能的综合因素,加热炉采用耐火纤维、轻质砖和浇注料的混合结构有很好的节能效果和成本效益。

参考文献

- 1 孔维军,刘瑞钧,吴新忠.工业炉节能与发展趋势[J].天津冶金,2008;1:45-48
- 2 孔先.我国工业炉窑节能发展方向[J].冶金能源,2003;9:22
- 3 宋湛萍,史竟.锻造加热炉的发展[J].锻造与冲压,2005;11:22-24
- 4 BP.2014年BP世界能源统计年鉴[R].2014
- 5 郑忠,高家锐.快速对流加热技术及其应用[C].2001中国钢铁年会论文集,2001:238
- 6 高仲龙,张先焯.关于工业加热炉发展方向的再探讨[J].工业炉,1991;1:18-21
- 7 许景阳.加热炉炉体绝热设计与耐火纤维的应用[J].冶金能源,2001;20(5):38-41
- 8 王秉铨.工业炉设计手册[M].机械工业出版社,2000:4
- 9 马鞍山钢铁设计院.耐火纤维应用技术文集[M].1985
- 10 潘丽华.蓄热式燃烧器的发展应用[J].上海金属,2002;24(4):42-45
- 11 张平亮.新型换热器及其技术进展[J].炼油技术与工程,2007;37(1):25-29
- 12 谢国威.蓄热式连续加热炉内气体流动及热工制度的研究[D].东北大学,2008
- 13 刘常鹏,张宇,李卫东等.加热炉不同余热回收方式下节能效果分析[J].第八届全国能源与热工学术年会
- 14 同济大学等.燃气燃烧与应用[M].中国建筑工业出版社,2011:4
- 15 黄小春,胡明辅,董福生.工业加热炉辐射换热节能方法与发展趋势[J].节能技术,2013;31(3):234-238
- 16 李志岷,魏玉文.工业加热炉窑节能的新途径—黑体强化辐射传热节能的新机理[J].热处理技术及装备,2008;29(2):36-40
- 17 常志明.远红外节能陶瓷涂料在梅钢热轧加热炉上的运用[C].第八届全国能源与热工学术年会
- 18 赵郁芬,钱国堂,朱琼华等.金属冲击加热研究[J].重庆大学学报,1988;6:73-74
- 19 郑忠,高家锐.高速供热下金属冲击加热研究[J].冶金能源,1994;13(3):29-34
- 20 陆伯之.锻造加热炉炉顶安装高速烧嘴的实验研究[J].工业炉,1990;4:9-13
- 21 陆声廷.加热炉内钢坯最佳置放间隙与节能关系的热工研究[J].能源研究与信息,1988;4(2):22-28
- 22 闫文红,张富信.喷流式连续加热炉数学模型的研究[J].工业炉,2000;22(2):54-57