

加热炉蓄热式燃烧技术用蜂窝体的研究与应用

杨彬 陶绍平 胡雄光

孙茂林

(首钢技术研究院,北京 100041) (首钢中厚板厂,北京 100041)

摘要:蓄热式高温空气燃烧技术(HTAC)是新一代高效节能、环保技术,而其中的蓄热式蜂窝体是该项技术的关键。本文介绍了首钢中厚板轧钢厂2号加热炉蓄热式改造用蜂窝体的材料、性能及其传热、阻力性能研究和实际应用情况。

关键词:蓄热式;蜂窝体;热震;加热炉

蓄热式高温空气燃烧技术 (high temperature air combustion,简称 HTAC 或 HiTAC) 是继 80 年代的“第 1 代再生燃烧技术”后在 90 年代继承原有高效节能技术基础上通过实现低 NO_x 排放而开发成功的“第 2 代再生燃烧技术”,它是一项效果显著的节能、环保新技术,也是国内外专家公认的 21 世纪工业炉节能、环保的关键性技术,近几年在发达国家开始普遍推广应用,国内也先后在各个钢铁企业得到应用^[1]。

从目前国内应用实例上看,蓄热式燃烧技术主要有两种形式:(1)以北岛公司的蓄热式炉为主要代表。该项技术将燃烧器与炉子一体化,内置蓄热球,采用集中换向的方式;(2)改进型蓄热燃烧技术,即蓄热式烧嘴技术。这种技术将蓄热体外置并单独形成一个燃烧器,控制方式上同样分为了集中控制与分散控制 2 种形式。蓄热体外置后带来了结构布置灵活,维护检修方便等优点,同时无需增大炉墙的厚度,与传统炉墙结构基本相同,适合于旧炉改造及场地布置空间紧张的情况。尤其是分散控制,基本避免了集中换向的缺陷,提高了加热炉热工操作的灵活性^[2]。

首钢中厚板轧钢厂 2 号加热炉 2002 年 4 月开始进行蓄热式、全长热滑轨及汽化冷却技术改造,其中蓄热式改造采用第 2 种蓄热式燃烧技术,蓄热体为蜂窝体。为适应蜂窝体在使用过程中频繁的急冷急热(约 30~60 s 进行一次冷热换向),对蓄热体材质、性能及其传热、阻力性能进行了试验研究。

1 试验

蓄热式燃烧技术的关键是蓄热体,它主要有蜂窝

体、蓄热球和蓄热管等方式。其中蜂窝体的体积小,比表面积相比蓄热球要大得多,其通道呈直线,压力损失低,不易发生粉尘堵塞。在使用过程中要求耐高温、耐腐蚀且热震性好,我们在结合实际应用条件的前提下,开展了对蜂窝体材质选择配方和加工工艺等方面的研究。

1.1 原材料

蜂窝体做为蓄热和换热的媒介,由于单位面积大、蓄热量大、换热速度快,要求高温结构强度好,可承受巨大的温差即热震稳定性好,使用中无脆裂、脱落和变形。

堇青石材料线胀系数小,有良好的热震稳定性,但其耐火度不高,实际使用过程中高温烟气的腐蚀,特别是当烟气温度高于 1250 ℃时,SO₂、CO、CO₂ 和 NO_x 等气体成分对堇青石的熔蚀作用,会导致堇青石质蜂窝体的变形、软化,从而阻塞通道影响换热效果。而莫来石材料韧性好,熔点高,在热容、抗热震稳定性、耐化学腐蚀、导热率等方面能适应加热炉的使用条件。

试验时采用莫来石和一定量的堇青石做为蜂窝体的主要原料,通过不同的配比试验,确定了最佳的原料组合,原料化学成分如表 1。

表 1 原料化学成分

| 原料 | SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | MgO |
|-----|------------------|--------------------------------|-------|
| 莫来石 | 20.26 | 78.51 | — |
| 堇青石 | 47.71 | 34.83 | 14.57 |

通过耐火度和热震稳定性试验及制品密度和耐压强度的测试,确定了以莫来石为主,添入一定量堇青石做为蜂窝体的原料。

1.2 热震试验

以保证蜂窝体制品热震稳定性和耐高温使用性能

为目标,我们配制了以堇青石、粘土和莫来石等为主要原料、不同加入比例的试样并进行了物理性能检测。测数据见表2。试验共成型了7组试样(1号~7号),试样成型、定位后置于烘箱保温8 h,随后经1400 ℃烧成然后进行热震试验。热震试验是把蜂窝体置于1100 ℃的高温炉中,保温20 min,然后放入水中,如此反复,直至达到试验要求。

表2 蜂窝体热震试验

| 热震次数 | 试验结果 |
|------|--|
| 1 | 1号、3号试样烧后纵向开裂,4号试样横向裂 |
| 2 | 1号试样裂缝加大,3号、4号试样裂缝没扩大,其余试样保持原样 |
| 3 | 7号试样稍有裂,其它试样无变化 |
| 4 | 把所有试样自然冷却后电扇吹3 min,1号掉大角后放入水中没明显变化,其它试样无变化 |
| 5 | 所有试样放入水中没变化 |
| 6 | 所有试样放入水中没变化 |
| 7 | 4号、5号试样表面掉渣,7号试样小角掉,2号、6号试样始终变化不大 |

1.3 蜂窝体传热及阻力性能研究

在确定材料比例及制造工艺后应用CFD软件中的多孔介质模型建立了蜂窝体的数学模型,模拟其在生产条件下的运行情况,计算出蜂窝体温度分布随时间的变化规律,并利用实测的数据对模型进行修正,获得了丰富可靠的温度、压力数据,为蜂窝体的进一步研制打下了良好的基础,蓄热式烧嘴模型如图1所示。

烧嘴排烟期高温空气进口流量取现场烧嘴流量的平均值0.34 kg/m³,出口引风压力为150 mmH₂O,送风期空气温度为常温,流量0.38 kg/m³。计算采用非定常模型,换向时间为30 s。



图1 蜂窝式烧嘴网格模型

从蜂窝体和流体的温度分布可以看出,蜂窝体的温度分布梯度较大,高温区集中在蓄热箱的前半段即第1,2层蜂窝体,温度在800 ℃以上;其中1000 ℃以上的高温则集中在前1/5段,表明蓄热体有很大的蓄热潜力。烟气出口温度为130 ℃左右,现场实测烟气出口温度为137 ℃,模型与实际情况相符不用修正。烟气

出口温度下降很大,说明蜂窝体蓄热能力强,烟气的热量基本被蓄热体吸收,但前端的高温会影响蓄热体的使用寿命,蓄热体箱中的前1/5段应该是较易耗损的部分。

图2为蓄热体温度沿轴向的分布曲线,前排蜂窝体内侧温度仍维持在1000 ℃左右,风温接近1000 ℃,表明在送风期过程中,风温被预热温度基本可以保持在1000 ℃左右,蜂窝体的热量得到了有效的利用,大大提高了烧嘴的燃烧效率。

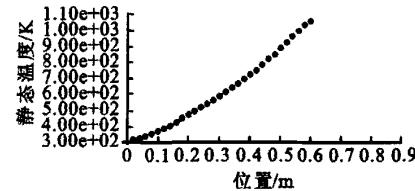


图2 送风期蓄热体温度轴向分布曲线

图3为蓄热体前中后3个截面的温度随时间变化的曲线,曲线变化很有规律表明蜂窝体的蓄热能力较稳定。

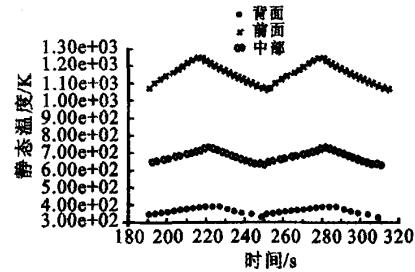


图3 蓄热体各截面温度分布随时间的变化

图4为流体通过蜂窝体的压力分布曲线,流体的压力损失不大,远远小于引风压力。

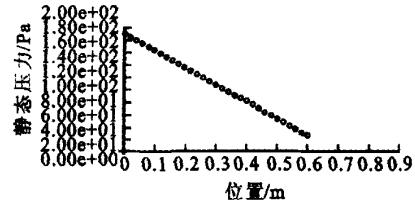


图4 流体通过蓄热体的压力变化

1.4 蜂窝体制作工艺

此次中厚板轧钢厂加热炉改造蓄热式蜂窝体外形的设计制造尺寸是150 mm×150 mm×100 mm,由直通方孔组成,制品见图5。

制作多孔蓄热式蜂窝体必须要能够很好的成型坯体,而且选择适当的干燥方式(保证不出现扭曲)以及合适的烧成温度,这样蜂窝体的尺寸才能工整、符合使

用要求。我们经过研究确定了如下蓄热式蜂窝体的生产工艺：

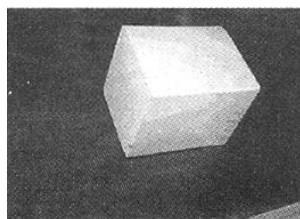
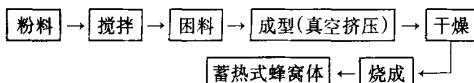


图 5 蓄热式蜂窝体

1.4.1 蓄热式蜂窝体的成型

把莫来石和堇青石等原材料按确定的配方进行混合并加入外加剂,然后加入一定量的水进行搅拌。水分过多或过少对蜂窝体的成型都有很大的影响,水分过少时不易成型;水分过多,蜂窝体的可塑性则变差。经过试验,只有把水分控制在 15%~20% 时,蜂窝体的成型才是最好的。

配好的原材料搅拌均匀后,通过挤泥机——液压挤管机挤出坯体,按要求的高度尺寸切割,不符合尺寸要求的蜂窝体重新挤压。

1.4.2 蓄热式蜂窝体的干燥

一般耐火材料制品的干燥采用传统的方式就能满足要求,但蓄热式蜂窝体采用传统的干燥方式会产生裂纹,主要是由于蜂窝体壁薄、多孔,内部水分不易挥发、干燥收缩慢而外表面的水分又极易挥发产生收缩。因此,合适的干燥方式是蜂窝体生产工艺环节必不可少的。

首先将成型好的蜂窝体进行红外干燥——AD 型远红外加热隧道式烘箱,烘箱中温度保持 150~200 ℃,把蜂窝体表面的水分脱掉。通常为了保证坯体不变形并符合尺寸的要求,蜂窝体一般需经过 2 次红外定位。

经过红外干燥后,再把蜂窝体放入电窑中干燥 8 h,此时温度的控制极为重要,温度过高蜂窝体在干燥过程中会产生严重开裂。经过试验,把温度控制在 60~80 ℃的情况下,进行 24 h 的保温,使蜂窝体的水分排出,蜂窝体的干燥最理想。

1.4.3 蓄热式蜂窝体的烧成

由于制备蜂窝体采用的都是细粉,如果烧成温度过高易造成蜂窝体的过分致密,对它在使用过程中的热震稳定性不利,而且收缩过大,容易造成产品尺寸超过公差。经过试验,在 1350 ℃保温 15~16 h,此时蜂窝体的烧结情况最好。

蓄热式蜂窝体理化性能指标见表 3。

表 3 蜂窝制品性能

| 组成/% | | | | 性 能 | | | | | |
|--------------------------------|------------------|------|------------------------|-----------------------|----------------------------|----------------------------|-------|-------|--------|
| Al ₂ O ₃ | SiO ₃ | MgO | K ₂ O + NaO | 密度/g·cm ⁻³ | 导热系数/W·(m·K) ⁻¹ | 比热容/J·(kg·K) ⁻¹ | 孔径/mm | 孔壁/mm | 开口孔率/% |
| 40~45 | 40~50 | 8~12 | ≤1 | 0.70 | 1.1 | ≥0.9 | 3×3 | 0.68 | 60~70 |

2 工业性试验

中厚板轧钢厂蓄热式烧嘴分上下 2 排且蓄热室的尺寸不同,蓄热室是由不定形耐火材料浇注而成,下排烧嘴的蓄热室尺寸为 600 mm×600 mm×300 mm,按照施工要求安装 48 块蜂窝体;上排烧嘴的蓄热室尺寸为 600 mm×450 mm×300 mm,须安装 36 块蜂窝体。此次工业性试验我们提供了 24 对蓄热式烧嘴的蜂窝体。

2.1 蓄热式蜂窝体的使用情况

蓄热式燃烧技术用蜂窝体作为加热炉烧嘴的蓄热体始终处于蓄热和换热交替的工作状态,承受着剧烈的热冲击,蜂窝体极易出现粉化、开裂和堵塞现象。试验用蜂窝体外形尺寸为 150 mm×150 mm×100 mm,于 2002 年 8 月投入使用,使用部位见图 6。经使用半年

后检查发现烧嘴中蜂窝体的后 4 排基本完好,紧密连结在一起,靠近炉内第 2 排蜂窝体有些裂纹,第 1 排有部分蜂窝体开裂。从观察情况看,蜂窝体没有熔化变形现象,孔中没有异物,说明蜂窝体的抗热震性和耐火度能满足生产要求。

第 1 排的蜂窝体有的开裂,原因之一是蜂窝体内孔壁强度不够。同时,由于冷热空气换向频繁,使蜂窝体的热震稳定性受到了极大的考验。实际使用中,蜂窝体的耐火度 1400 ℃完全能满足生产要求,同时适当降低耐火度可使热震稳定性进一步提高;原因之一是由

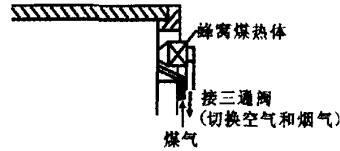


图 6 加热炉蜂窝体应用示意图

于蜂窝体安装不一定能使每个蜂窝体孔径对齐,从而有可能加大风阻,也容易使蜂窝体碎裂。根据目前的使用情况来看,随着2号加热炉使用情况趋于稳定,蓄热式蜂窝体的使用也趋于正常。

为防止蜂窝体在使用中由于风力过大造成的问题,蓄热箱体前部加装了格孔挡板(见图7),使用至今没有发现挡板损坏,效果良好。

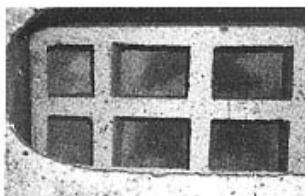


图7 蜂窝体格孔挡板

3 结语

(1) 实践证明,自行研发的蜂窝体配方及结构满足了生产要求,耐火度高,抗急冷急热性较好,长期使用没有发现融结及粉化现象。

(2) 成功利用了CFD仿真技术来模拟蜂窝体的数学模型,获得了丰富可靠的温度、压力数据,证明此次加热炉蓄热式燃烧技术蜂窝体的选择是合理的。

参考文献

- 1 周怀春. 高温空气燃烧技术——21世纪关键技术之一. 工业炉, 1998(1):19-31
- 2 张光耀. 蓄热式新型蓄热体的选用. 工业炉, 1998(3):9-12

Investigation and Application of Honeycombs for Heating Furnace Regenerative Combustion Technology

Yang Bin Tao Shaoping Hu Xiongguang

Sun Maolin

(Technology and Research Institute of Shougang, Beijing 100041) (Thick Board Plant of Shougang, Beijing 100041)

Abstract: The regenerative HTAC is a new generation technology for high efficient energy - saving and environment protection, in which the regenerative honeycomb is the key one. The investigation and practical application of the materials, properties, heat transfer and resistance performance of the honeycombs for modifying the regenerative heating furnace in Thick Board Plant of Shougang were introduced in this paper.

Keywords: regenerative type; honeycomb; thermal shock resistance; heating furance

(上接第34页)

5 Lyons J S, Starr T L. Strength and toughness of slip - cast fused - silica composites. *J Am Ceram Soc*, 1994, 77(6):1673 - 1675

6 Wen G, Wu G L, Lei T Q, et al. Co - enhanced SiO_2 - BN ceramics for high - temperature dielectric applications. *J Euro Ceram Soc*, 2000, 20:1923 - 1928

Methods for Improving the Mechanical Properties of Fused Silica Ceramics

Gao Dongyun^{1,2} Pan Wei¹

¹Dept. of Materials Sci. & Eng., Tsinghua University, Beijing 100084;

²Shandong Research & Design Institute of Industrial Ceramics, Zibo 255031)

Abstract: This paper described the methods for improving the mechanical properties of fused silica ceramics, i. e. the incorporation of fiber, whisker, second phase powder and pressing stress on the surface.

Keywords: fused silica ceramics; mechanical property; improvement