

自蓄热式高温空气燃烧技术的开发

张建军^{1,2}, 邹得球^{1,2}, 肖睿¹, 高日新¹, 冯自平¹

(¹中科院广州能源研究所, 广州 510640 ²中科院研究生院, 北京 100039)

(Tel: 020-87057795, Email: fengzp@ms.giec.ac.cn)

摘要

分析了切换式蓄热燃烧系统的优点与不足, 提出了有效补偿这些不足的可实现蓄热连续燃烧的高温空气燃烧技术。并以此技术为基础开发出了可连续燃烧的自蓄热高温空气燃烧器。该燃烧器依据蓄热连续燃烧的高温空气燃烧技术, 采用陶瓷—金属蜂窝蓄热体作为蓄热介质, 并采用了笔者正在申请专利的蓄热燃烧专用高温切换阀技术, 可以实现高温烟气余热的“极限稳定回收”以及高温贫氧空气的“连续燃烧”。

关键词 高温空气燃烧 切换式 连续式 自蓄热式燃烧器

Development of High temperature air combustion of self-regenerator

Zhang jianjun^{1,2}, Zou deqiu^{1,2}, Xiaorui¹, Gao rixin¹, Feng zipping¹

(1. Guangzhou Institute of Energy Conversion, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China;

2. Graduate School, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

(Tel: 020-87057795, Email: fengzp@ms.giec.ac.cn)

Abstract This work is concerned with consecutive combustion in the field of high temperature air combustion on the basis of analyzing the advantages and shortcomings of alternative HTAC systems. The attention is focused on the technology of consecutive combustion which overcomes the shortcomings of alternative HTAC system. A new consecutive combustion form has been proposed here and a new self-regenerative burner invented by us has been introduced too. A new kind of regenerative honeycomb material and our patent valve are used in this new burner. It can burn continually in the HTAC mode with the low NO_x result.

Keywords high temperature air combustion; alternative form; consecutive form; self-regenerative burner

前言

伴随经济的高速发展能源的消耗量一定相应的快速增加, 这必然导致能源的紧张, 环境污染的加剧。选用先进的燃烧方式和燃烧设备做到提高燃烧效率、降低对环境的污染已经引起各国政府与热工工作者的高度重视。高温空气低氧燃烧技术是从上世纪末就开始在国内外得到推广具有节能减排双重优点的先进燃烧技术。这项燃烧技术的节能效果良好, NO_x 的排放达到环保要求, 还可以缩小设备尺寸或提高产量^[1]。因此, 目前该项技术各行业工业炉窑上得到广泛应用。十多年的实践证明, 有些蓄热式加热炉的综合经济效益跟常规连续式加热炉差不多, 节能优势不明显。也就是说对于目前的切换式蓄热燃烧系统还存在某些不足。通过对蓄热式加热炉和一般连续式加热炉热效率、加热质量、运行维护成本、环境污染等多个方面的比较, 认为蓄热换热技术可以把高炉煤气用于轧钢加热炉, 这对于节能、环保都很有意义, 但当燃料热值达到生产要求时, 采用蓄热燃烧技术得不偿失^[2]。原因在于目前的切换式蓄热燃烧系统在工作过程中频繁的切换造成炉温、炉压的波动, 换向瞬间燃烧的不连续, 加热质

基金项目: 中国科学院广州能源研究所所长基金 (0807z3)

张建军 (1973-) 工程师, 硕士生, 主要从事高温空气燃烧及连续式自蓄热燃烧器的开发与研究

工艺(尤其是开始需缓慢量的降低,钢料加热加热的钢种)制度无法实现,此外还有容积效应以及高昂的运行维护成本,所以综合考虑这些因素会发现常规切换式高温空气燃烧技术的优势很小^[3]。笔者结合目前国内外关于蓄热燃烧技术的研究结果和生产反馈的基础上提出了一种可以有效克服切换式蓄热燃烧系统不足的可实现蓄热连续燃烧的高温空气燃烧技术。并以此技术为基础开发出了可连续燃烧的自蓄热高温空气燃烧器。该燃烧器依据蓄热连续燃烧的高温空气燃烧技术,采用陶瓷—金属蜂窝蓄热体作为蓄热介质,并采用了笔者正在申请专利的蓄热燃烧专用高温切换阀技术,可以实现高温烟气余热的“极限稳定回收”以及高温贫氧空气的“连续燃烧”。

1 切换式高温空气燃烧技术的优点与不足

高温空气燃烧技术在国内工业炉上得到广泛应用。目前主要是切换式蓄热燃烧系统。它是由燃烧器、换向阀、蓄热器与控制系统构成。燃烧器成对布置,当其中一个燃烧器工作时,另一个燃烧器作为排气装置,同时用烟气的余热来加热与该燃烧器相连的蓄热体。根据设定的时间换向阀换向后,两个燃烧器更换工作状态,原来处于燃烧状态的燃烧器改为排放烟气,另一个燃烧器开始点火。这种成对布置的燃烧器交替工作的方式使得两组蓄热体可以实现交替吸热放热的热工过程^[4]。与传统的燃烧技术相比,切换式蓄热燃烧系统可以最大限度地回收高温烟气的余热。极大程度地降低了加热炉的排烟损失,达到了有效利用能源的目的。可使预热空气温度达到800℃—1200℃。由于高温预热空气所具有的物理热增加提高了炉内的理论燃烧温度,使得原来不能用于高温工业炉窑的低发热值发生炉煤气和高炉煤气,转化为可用于轧钢和炼钢等工业炉用的燃气,扩展了燃料的范围。可减少NO_x生成量,减轻环境污染。可使沿火焰长度方向上温度分布均匀,提高产品质量,在高温空气燃烧技术中,空气喷口和燃料喷口之间有一间隔,在空气与燃气混合前,高速的空气射流卷吸一定量的炉内烟气,使助燃空气中的含氧量降低到15%或更低。这样,燃气与低含氧浓度的助燃空气混合,使得火焰的峰值温度降低并滞后,火焰拉长,炉内的温度分布均匀,有利于提高被加热产品的质量^[5]。按照蓄热燃烧的理论,在满足高温与贫氧两个条件时,通过合理组织炉的燃烧,蓄热式燃烧系统可以节约燃料,降低二氧化碳的总的排放量;使加热空间温度更加均匀;降低氮氧化物的排放浓度等^[6]。

实际的生产实践证明,在绝大多数的工业炉上应用蓄热燃烧系统都能不同程度的实现上述的节能减排效果,如台车炉、熔铝炉等。系统本身已经比较成熟。但对不用高炉煤气为燃料的连续式加热炉,则节能效果并不明显。相同的工况条件下,当采用单预热蓄热燃烧时,在轧钢连续加热炉的上热效率较连续式加热炉稍低^[2]。国内十多年的使用经验表明,切换式蓄热燃烧技术以下不足需要改进:(1)蓄热室与燃烧器必须成对配置;(2)蓄热室在换向时,存在容积效应,造成了能量和燃料的浪费。当蓄热室内蓄热体由放热状态切换到吸热状态时,原本向炉内通入经过预热的空气或煤气,随排放的烟气一起排放到炉外。(3)换向阀在蓄热系统对于空气和烟气换向的同时,燃烧系统也进行换向,增加了不安全的因素。(4)由于频繁的换向会引起燃烧的波动,压力场的波动。蓄热式换向燃烧技术是间歇式排烟、脉冲式燃烧,换向时间约为3~8 s。蓄热式燃烧器既是燃烧介质(煤气、空气)的通道,又是烟气放热强制排放的通道。在同一烧嘴煤气、空气燃烧和排烟的间隙,炉膛压力会产生很大波动^[7]。同时由于燃料是换向式燃烧,致使烧嘴造成堵塞、结焦、断火、不燃、爆鸣、爆燃等问题^[3]。

2 连续式蓄热燃烧技术

2.1 连续式蓄热燃烧技术的研究

连续式蓄热燃烧技术的研究稍后于切换式蓄热燃烧系统的研究。早在1995年,德国WS公司和Asper就开始了连续式蓄热燃烧技术的研究。国内在2002年也开始了这方面的研究工作,取得了成果,并且申请了国家实用新型专利高温蓄热式燃烧装置,专利号:ZL01260268.X。在晋能集团铝材公司的熔铝炉上首先使用了连续式蓄热燃烧技术,取得了理想的效果^[8]。

2005年5月, 北京科技大学张欣茹提出了档位式蓄热器的蓄热方案, 档位蓄热器吸收了回转式蓄热器的思想, 结合了切换式蓄热器的特点, 将二者的优势融合在一起, 其外观类似于回转式蓄热器, 但运动型式却由回转式蓄热器的连续运动变为间歇转动, 且具有了新型的密封结构^[9]。可实现对炉窑的连续供气, 保证了炉内火焰的稳定性, 从而使炉内工况不易波动; 另外系统的漏风率较低, 阻力损失也较低, 并且设备紧凑、操作安全可靠, 易于实现标准化生产。在2008年9月, 北京科技大学夏德宏教授提出了可实现连续燃烧的集中式蓄热燃烧技术, 开发出了一种连续式的高温烟气余热回收装置, 该装置换热元件里的气体通道被隔成相互独立的多层空间, 烟气和空气间隔经过各层空间^[10]。

2.2 连续式蓄热燃烧技术的优点

与切换式蓄热燃烧系统相比, 连续式蓄热燃烧系统保持了切换式燃烧系统的优点, 同时克服了它的某些不足^[11]。概括起来有以下优点:

- 1) 连续、稳定火焰的蓄热式高温空气燃烧系统不用再另外设置传统燃烧器先将炉温提高到 800°C 以上再开启蓄热系统的方法, 或者采用长明灯或值班烧嘴连续点燃换向燃烧的烧嘴的方法。由于燃料供应是连续的, 可以连续调节火焰的大小, 所以刚刚装完冷料的炉子或烘炉也可以正常使用蓄热式系统。这样简化了系统, 又降低了工人的劳动强度。
- 2) 燃气管道与烟气/空气供应管道分离, 所以蓄热系统出现问题不会影响正常生产。
- 3) 燃气不需自动切换装置, 解决了切换式高温空气燃烧技术中的烧嘴堵塞、结焦、断火、不燃、爆鸣、爆燃等问题。
- 4) 在炉体建设上保持原有炉型不变, 对于燃烧系统来讲, 保持原有烧嘴或减少烧嘴的数量, 不改变原有的燃烧方式。既适于新炉, 也可用于旧炉节能改造。
- 5) 占地少、安装简便、全自动控制。这种不改变原有燃烧系统的, 连续、稳定火焰蓄热式高温空气燃烧技术的发明, 为蓄热式燃烧技术的推广提供了更大的支持^[11]。

2.3 连续式蓄热燃烧技术的方案

结合国内外关于蓄热燃烧技术的科研成果与我国工业炉上应用过程中遇到的问题, 笔者提出一套可实现连续燃烧的高温空气燃烧技术方案。首先笔者研制出专用于蓄热燃烧系统的四通换向阀, 专利(申请)号 ZL200910037593.8^[12]。这种换向阀可以用在高温环境中保持良好的密封性能和较小的阻力。笔者提出了一种连续式蓄热燃烧技术, 已成功用于梭式窑的生产并取得良好的节能效果。其原理如图 1 和图 2。该套系统由燃烧器、换向阀、蓄热体、风机与控制系统组成。图 1 所示为连续式蓄热燃烧系统的第一种工作状态。在这种工作状态下, 高温烟气经过高温换向阀到蓄热体 B, 蓄热室 B 内蓄热体被加热, 同时高温烟气被冷却到 200°C 以下经低温换向阀、引风机排出, 烟气的显热被蓄热体 B 吸收并贮存; 来自鼓风机的常温空气经过上一周期已经加热的高温蓄热体 A 后被预热为高温助燃空气, 同时蓄热体 A 被冷却, 经高温换向阀到燃烧器。

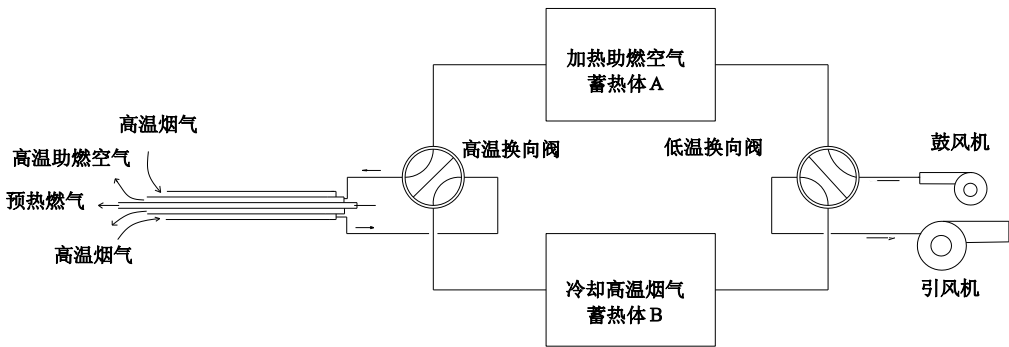


图 1 连续式高温空气燃烧系统（一）

经过半个周期后,高温换向阀与低温换向阀同时换向后,系统进入第二种工作状态。从图1与图2可知,低温换向阀到风机的管道内气流方向保持不变,同时高温换向阀到燃烧器的管道内气流的方向也保持不变。如图2所示,在这种工作状态下,高温烟气经高温换向阀后到蓄热体A,蓄热体A被加热;同时,常温空气经蓄热体B被加热成为高温助燃空气,经高温换向阀进入到燃烧器。由以上分析可知,通过一对蓄热体、一对四通换向阀的组合可以得到连续稳定的高温空气,只要持续供应燃气,便可以得到连续的蓄热式燃烧方式。这种连续稳定的蓄热燃烧方式可以对空气、燃气进行连续控制从而可以实现对火焰的连续控制。当然,实际应用中可以将蓄热室分成几个小的蓄热室,这样可以减小一个蓄热室出现问题而影响整个生产的可能性,也可以做成蓄热模块,便于蓄热体的更换。图1和图2是只预热空气时组合形式,在这种情况下,燃气不再需要频繁的通断,从而提高了燃烧效率,减少了控制燃气的很多阀门,增加了安全系数。当煤气和空气都需要预热时,可以将燃气管道通过蓄热体,与蓄热体形成间壁式换热。在这种情况下,燃气也不需要频繁的通断。对于本套连续式高温空气燃烧系统采用的燃烧器,如图所示,是三套筒式燃烧器。中间管道通燃气,由高温预热空气通过管壁加热,中间是高温助燃空气管道,它一方面加热燃气,另一方面初步冷却高温烟气。最外面管道是高温烟气管道,高温烟气在燃烧器外排出过程中得到初步冷却。通过实践和数值模拟可知,烟气初步冷却可以降低 200°C 以上。高温助燃空气在这一阶段也得到进一步的加热,可升温 200°C 左右。到达高温换向阀的烟气温度的在 1000°C 以下,这有利于高温换向阀的长期正常运行。采用这样的连续式蓄热燃烧方式以后,在高温助燃空气管道上可以接一个燃烧器,也可以根据实际需要,接多个燃烧器。为了将热损失降到最小,每个燃烧器可以配一个高温换向阀,整套燃烧系统只用一个总的低温换向阀。所有这些燃烧器都可以实现连续燃烧,且燃烧的强度也较切换式蓄热燃烧方式容易调节。

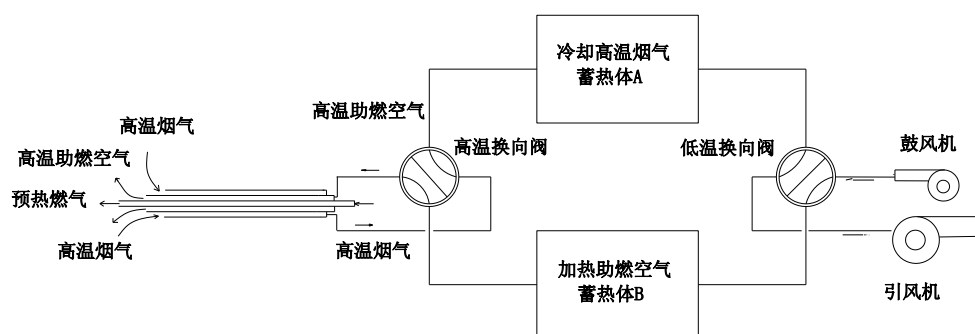


图2 连续式高温空气燃烧系统（二）

在连续式高温空气燃烧系统中,实现了同一个燃烧器的不间断燃烧,克服了炉内温度场、压力场等的波动,提高了燃烧效率,扩大了高温空气燃烧技术的应用范围。连续式蓄热燃烧系统除了具有切换式蓄热燃烧系统的优点以外,还具有以下的特点:蓄热体材料采用新型的陶瓷—金属蜂窝蓄热体,传热速度快,传热效率高,有效克服了蜂窝陶瓷蓄热体在使用过程中的孔壁熔蚀、通孔破裂、蜂窝蓄热体崩塌、蓄热体错位等问题^[13]。采用连续式燃烧,对于炉内的温度场、压力场等扰动很小;本系统中涉及到的高温换向阀为中科院广州能源研究所的专利产品,在高温下还有良好的密封性能和强度。是实现连续蓄热燃烧的关键部件。

3 自蓄热式蓄热燃烧器的开发

3.1 自蓄热式燃烧器

自蓄热式燃烧器是通过合理的气流组织与控制方式能实现单台燃烧器的连续低 NO_x 燃烧,又能达到蓄热节能目的燃烧装置。自蓄热式蓄热燃烧器从原理上来说连续式蓄热燃烧系统,但它省去了高温四通换向阀。与换向式蓄热燃烧系统相比,它的布置很灵活,便于炉

内气流的组织^[14]。从气流组织可以分为两种方式，一是蓄热体转动型，二是设置专门的换向阀。

在 1993 年，我国就有了关于开发回转蓄热器的相关资料^[15]。介绍了回转式蓄热器常见的两种方式，转动蓄热体或转动管道，如图 3 所示。由于蓄热体重量大，惯性大控制不容易实现的原因，且漏风问题不能彻底解决，因此，一般采用第二种方式。同时随着 PLC 控制技术和气动、电动元件性能的提高，设置专门的换向阀来控制气流得到了普及，如图 4 所示。通过这套装置可以得到 200 度以下的烟气和 1000 度以上的高温预热空气。转动速度对 NOx 的排放浓度的影响不大。但它的燃料节约率较一般的换热器要高。目前日本在用的回转蓄热燃烧器如图 4 所示^[15]。它是通过四个三通阀来实现对四个通道的控制。根据电磁阀的依次通断，四个通道如图所示依次通过助燃空气。其效果如同四个通气管道按顺时针在转动。这种操作方式的密封性能较原来的回转方式有很大提高。

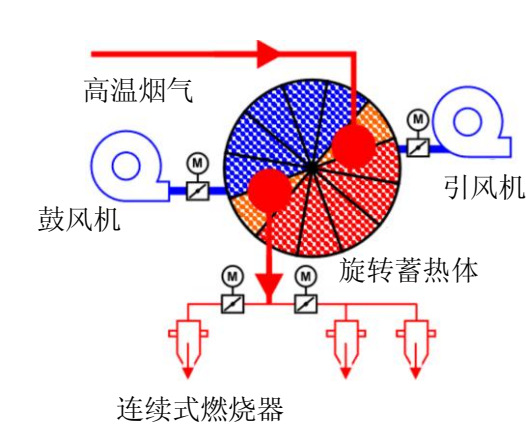


图 3 蓄热体回转式蓄热器

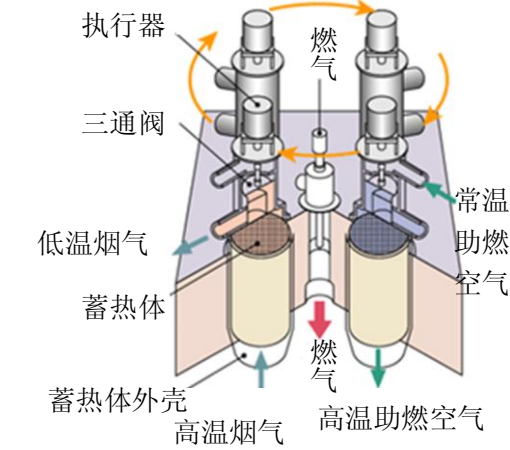


图 4 控制阀通断式蓄热器

德国 WS 公司的自蓄热燃烧器如图 5 所示，中间的黄色管道是燃气管道，周围对称布置了六个蓄热体，其中三个一组，共分为两组。一组用于预热空气，另一组用于冷却烟气。尾部是四个电磁阀来控制与这些蓄热体相连的管道的通断。这是一种紧凑、高效、自蓄热型燃烧器。燃料与助燃空气经预热后高速喷入燃烧室，同时高速的空气卷吸炉内的高温烟气，从而降低了空气中的含氧量。实践证明，这种燃烧器可以实现无火焰燃烧。这种燃烧器可以节约燃料、提高产量，同时还可以将 NOx 的排放浓度降到 100PPM 以下^[16-18]。

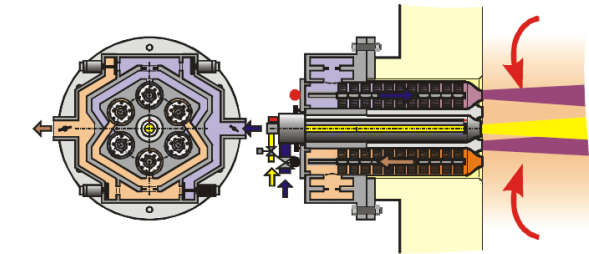


图 5 自蓄热燃烧器

3.2 自蓄热燃烧器的应用与研发

在国内外研究成果的基础上，以连续式高温空气燃烧技术为依据，笔者提出一种新型的自蓄热燃烧器。在蓄热材料、控制方式和换向阀等方面进行了完善。首先在蓄热材料方面提出了陶瓷—金属蜂窝蓄热体^[19]，不但比表面积更大，传热系数是蜂窝陶瓷的几十倍，水当量数较蜂窝陶瓷要高，而且使用寿命长。在控制方面，通过优化控制程序的气流速度，利用

炉内回流的烟气降低了助燃空气的氧含量,实现了贫氧蓄热连续燃烧,使炉室内的温度、压力更稳定,便于调节。第三是换向阀采用了广州能源研究所的专利技术,连续式蓄热燃烧专用四通阀。这种自蓄热式燃烧器还可以和辐射管相配合,安装方式灵活,施工方便。

4 结论

在分析目前国内广泛应用的换向式蓄热燃烧的优缺点的基础上,详细介绍了一种新的连续高温空气燃烧的方式,即连续蓄热式燃烧系统。以此为依据设计出自蓄热式燃烧器。在新型燃烧器设计过程中选用了新型的蓄热材料,优化了控制方法和专用四通换向阀。在自蓄热燃烧领域进行了探索。

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): p. 19-29.
2. 吕以清, 蓄热式燃烧技术在轧钢连续加热炉应用的合理性与适用性. 工业炉, 2007.1. **29**(1): p. 25-30.
3. 黄文革, 高温空气燃烧技术在推广应用中的再认识. 工业炉, 2008.11. **30**(6): p. 8-13.
4. 马宪国, 高温贫氧燃烧技术的研究与应用. 动力工程, 2001. **21**(1): p. 1065-170.
5. 刘敏飞, 高温空气燃烧技术的特点及其应用前景. 能源研究与信息, 2001. **17**(1): p. 27-36.
6. 李朝祥, 蓄热式热交换技术的应用与展望. 冶金能源, 2004.3. **23**(2): p. 45-50.
7. 岳云飞, 蓄热式推钢加热炉的设计实践. 工业炉, 2008.3. **30**(2): p. 27-30.
8. 窦松筠, 连续稳定火焰蓄热式高温空气燃烧装置的研究. 铝加工, 2004. **155**(2): p. 31-35.
9. 张欣茹, 新型档位蓄热器的开发与研究. 工业加热, 2005. **34**(5): p. 26-29.
10. 夏德宏, 连续式高温空气燃烧技术的开发. 冶金能源, 2008. **27**(5): p. 46-50.
11. 梁志刚, 不换向蓄热式燃烧技术在环形熔铝炉上的应用. 科技, 2008. **1**(1): p. 44-47.
12. 冯自平张建军, 连续式蓄热燃烧专用四通阀, 中国专利局, Editor. 2009: 中国. p. 1-5.
13. 张建军, 蓄热燃烧蓄热体的应用现状与发展趋势. 冶金能源, 2009. **28**(4): p. 15-20.
14. 户松三男, 自身蓄热烧嘴的开发. 冶金能源, 1997. **19**(3): p. 37-43.
15. 刘宗炎译, 日本开发回转蓄热式燃烧器. 节能技术. 1993. 321-325.
16. Pesenti, B., NO_x production and heat transfer from a self-regenerative flameless oxidation burner. Proceedings of the European Combustion Meeting, 2003. **1**(1): p. 1-5.
17. Lupant, D. *Numerical and Experimental Characterization of a Self-Regenerative Flameless Oxidation Burner Operation in a Pilot-Scale Furnace*. in *Proceedings of the European Combustion Meeting 2005*. 2005.
18. Yang, W., Numerical study of fuel temperature influence on single gas jet combustion in highly preheated and oxygen deficient air. Energy, 2005.1. **2005**(30): p. 385-399.
19. J.G. Chełmanowski, High temperature oxidation resistance of FeCrAl alloys covered with ceramic SiO₂-Al₂O₃ coatings deposited by sol-gel method. Corrosion Science, 2008.9. **2008**(50): p. 3581-390.