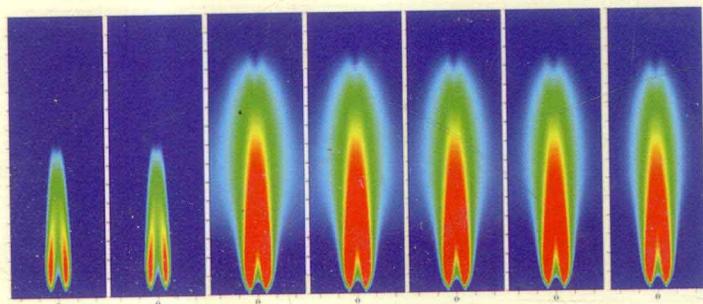


" 十一五 " 国家重点图书出版规划项目

蒋绍坚 艾元方 彭好义 蒋受宝 著

高温低氧 燃烧技术与应用



中南大学出版社
www.csupress.com.cn

图书在版编目(CIP)数据

高温低氧燃烧技术与应用/蒋绍坚,艾元方,彭好义,蒋受宝著.
—长沙:中南大学出版社,2010.12
ISBN 978-7-5487-0149-1

I. 高... II. ①蒋...②艾...③彭...④蒋... III. 高温 -
低氧燃烧 - 研究 IV. TQ038.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 251920 号

高温低氧燃烧技术与应用

蒋绍坚 艾元方 著
彭好义 蒋受宝

☐责任编辑 邓立荣

☐责任印制 文桂武

☐出版发行 中南大学出版社

社址:长沙市麓山南路

邮编:410083

发行科电话:0731-88876770

传真:0731-88710482

☐印 装 长沙市华中印刷厂

☐开 本 787 × 1092 1/16 ☐印张 14.75 ☐字数 283 千字 ☐彩页 4

☐版 次 2010 年 12 月第 1 版 ☐2010 年 12 月第 1 次印刷

☐书 号 ISBN 978-7-5487-0149-1

☐定 价 48.00 元

图书出现印装问题,请与出版社调换

序 言

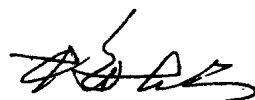
20 世纪 90 年代,人们发现采用高温低氧空气作为助燃剂的燃烧或作为气化剂的气化反应呈现出一些新的特性,如无焰化、温度均匀化、气相产物低污染化和气化合成气高质化(热值升高),等等。大量的应用已经证明高温低氧空气燃烧和气化技术具有显著的节能和环保效果。我国是能源消耗大国,大力研究和开发利用高温低氧空气燃烧和气化(HTLOAC/HTAG)技术,对提高我国能源利用率、改善环境污染、降低企业的生产成本以及提高企业的竞争力具有重大意义。

本书四位作者长期从事高效低污染燃烧研究,自 1999 年起开展高温低氧空气燃烧和气化(HTLOAC/HTAG)技术的相关研究,是国内最早对此技术开展研究的学术团队之一。10 余年来他们在反应过程机理、火焰特性、数值模拟、关键技术和工程应用等方面开展了一系列研究。

高温低氧空气燃烧与气化过程的本质特征究竟是怎样的,如何进一步发挥其技术优势,如何更广泛地在工业中应用,一直是研究的焦点。作者组织了高温低氧空气燃烧火焰特性实验,剖析了反应区热物理性质分布特性,提出了“低氧弥散燃烧”的概念,归纳了燃烧过程的热力学与动力学特征。作者又采用涡耗散燃烧模型,结合“等效比热容”,对高温低氧燃烧过程进行了数值模拟研究,并通过实验检验了所用方法与研究结果的可靠性。蓄热式换热系统是工业化应用的关键技术,其特性直接影响使用效果,作者提出了一种计算薄壁蓄热体传热过程摄动解析与数值计算组合的新算法,并据此建立了相应的仿真计算系统,对薄壁蓄热式换热系统的温度效率、热效率与切换周期间的关系进行了研究。采用高温空气作为气化剂是一种新的趋势,作者建立了一种气化数学模型,以木屑、秸秆和稻壳等生物质燃料为原料,利

用该模型系统地研究了气化剂温度和水蒸气添加率对气化结果的影响，并与实验结果进行了对比研究。高温低氧燃烧技术在有色冶金工业中的推广和应用远远不如其在钢铁冶金工业中广泛。作者于2008年研发成功世界上首台基于高温低氧燃烧技术的熔铅炉，取得了显著的节能和环保效益，目前已在国内多家企业推广，大大提升了我国的熔铅过程的节能减排水平。

本书是一本全面系统又较深入研究高温低氧空气燃烧与气化技术的专著。我想，此书的出版对深化弥散燃烧反应的认识，促进HTLOAC/HTAG研究开展、加速其推广应用等具有重要的学术价值和应用参考价值。

A stylized handwritten signature in black ink, consisting of several fluid, connected strokes.

2010. 12

作者的话

高温空气燃烧 (High Temperature Air Combustion, HTAC) 和高温空气气化 (High Temperature Air Gasification, HTAG) 技术是 20 世纪 90 年代工业加热和固体可燃物气化领域里的重大创新成果, 是名副其实的低碳低硝技术, 已在许多国家得到了推广应用, 应用范围遍布冶金、建材、金属加工、汽车、机械、化工、垃圾处理、生物质利用、发电等行业。

本书作者于 1999 年开始研究 HTAC/ HTAG 技术, 十余年来, 在 HTAC/ HTAG 理论、技术及应用方面开展了深入的研究, 期间还承担完成了国家 863 计划项目和欧盟 ASIA - LINK 计划项目。本书是作者在这一方向的研究成果和心得体会的总结。

当前, 节能减排已成为我国的基本国策, HTAC/HTAG 的低碳低硝特点正好可以满足这种需要。本书结合当代社会和科技发展的背景介绍了 HTAC/HTAG 的发展过程、主要技术特点和未来的发展方向, 特别是结合中国国情论证了这项技术的优势和潜力。

HTAC 技术被发现虽已十余年, 但对其反应过程的认识直到现在都还没有形成共识。其命名至今仍未统一, 就是一个例子。现有的命名都只突出了 HTAC 某一个方面的特性, 而且这些特性都是外在性质, 还没有一个命名能反映出 HTAC 过程自身所独有的性质。其主要原因就是人们对它的认识还不够透彻。本书对 HTAC 过程动态特性进行分析, 提出弥散燃烧概念, 引入弥散性能特征指标来描述弥散燃烧, 对 HTAC 过程进行了剖析, 并运用实验和数值模拟两种方法探讨了弥散燃烧特性。尝试着从一个新的角度来审视这种反应方式, 以深化和丰富人们对它的认识。

蓄热式换热过去是、现在是、预计近期内仍将是 HTAC/HTAG 工业化不得不依赖的关键技术, 对其换热特性进行研究对充分发挥 HTAC/HTAG 的节能环保效益具有重要意义。书中采用摄动法对薄壁蓄热体换热过程进行了探讨, 并介绍了所开发的薄壁蓄热体周期传热数值仿真系统。

冶金加热炉和低热值燃料的高值化利用一直是 HTAC/HTAG 的重点应用领域, 书中介绍了作者在熔铅炉新技术和生物质气化新技术方面的研发成果。

在本书出版之际, 作者要特别感谢萧泽强教授, 是他最先将 HTAC/HTAG 技术介绍到国内, 正是在他的倡导下, 作者才组成课题组开始这项研究。开始时既无经

费,也无实验室,他不顾年近七十且身患重病等诸多不便,奔走各方为课题组筹集启动经费,并经常从北京来到长沙指导课题组的研究活动,没有他的引领、推动和直接参与,我们的研究是难以开展并持续下来的。

作者也要特别感谢梅炽教授,他和萧泽强教授都是本课题组的学术指导,他也是本书作者之一艾元方的博士学位论文第一指导教师,为课题组的研究和本书的写作提供了许多宝贵意见和建议。

作者还要特别感谢时章明教授和周子民教授,他们不仅在研究条件上,也在学术思想上都给了课题组直接的帮助和支持。

十余年来,先后有柳楷玲、曹小玲、郑彦民、黄晓波、林竹、赵颖等研究生参加了 HTAC/HTAG 研究活动,本书的一些内容也反映了他们的研究成果。写作过程中,轩俭勇、姬亚、彭锐、张常亮、魏烈旭、黄涛、钟伟、黄传余等研究生也为本书出版做了一些不可或缺的工作,在职研究生汪洋洋参加了大部分的实验研究和工业应用研究工作。在此,谨向他们表示衷心感谢!

株洲火炬工业炉有限责任公司为研究工作的开展提供了大量的便利和支持,在此表示衷心感谢。令人欣慰的是,我们以 HTAC 为核心技术而共同开发的新型熔铅炉终于获得成功并得到推广。为此,也要感谢为新型熔铅炉技术开发作出贡献的中冶长天国际工程有限责任公司工业炉所。

作者的研究也得到了长沙天地绿色能源研究所的程树棋先生、广州能源研究所吴创之所长和袁振宏研究员、首都钢铁公司白旭高级工程师、河南东大高温节能材料有限公司樊国栋董事长等的帮助,在此也一并向他们表示衷心感谢。

本课题组的研究得到了国家科技部 863 计划经费的支持,在此表示感谢。

本书参考了大量国内外同行的相关论著,在此向他们表示感谢。由于参考文献篇数很多,可能会有误标或漏标之处,恳请相关作者指出和谅解。

虽然十余年过去了,HTAC/HTAG 研究仍是燃烧领域里的新课题和新方法,书中所提观点,仅为一家之言,不妥之处在所难免,谨请读者批评指正。

目 录

第1章 概 述	(1)
1.1 高温空气燃烧技术发展的社会背景	(1)
1.2 高温空气燃烧技术发展的技术背景	(2)
1.3 高温空气燃烧工作原理与技术优势	(4)
1.4 高温空气燃烧烧嘴型式	(5)
1.5 高温空气燃烧的研究焦点	(7)
1.5.1 关键部件	(7)
1.5.2 燃烧机理	(8)
1.5.3 燃料适用性	(11)
1.6 高温空气燃烧的数值研究	(12)
1.6.1 计算模型的选用	(12)
1.6.2 高温空气燃烧特性数值模拟方法	(13)
1.6.3 商业软件的缺点及自主开发数值模拟计算程序的重要性	(16)
1.6.4 未来高温空气燃烧数值模拟的发展方向	(16)
1.7 高温空气燃烧的应用	(16)
1.7.1 HTAC 技术的应用范围	(16)
1.7.2 HTAC 技术的工艺应用	(17)
1.7.3 HTAC 技术在企业的应用	(17)
1.8 高温空气气化	(21)
1.8.1 高温空气气化与传统气化对比	(21)
1.8.2 高温空气气化优越性	(26)
1.8.3 高温空气气化应用前景	(27)
第2章 低氧弥散燃烧过程物理化学特征	(31)
2.1 高温空气燃烧火焰特性	(31)
2.1.1 火焰外观特征	(31)
2.1.2 火焰稳定曲线	(33)
2.1.3 火焰温度特征	(33)
2.1.4 燃烧噪音	(34)

2.2	低氧弥散燃烧概念	(34)
2.3	低氧弥散燃烧热力学特征	(36)
2.3.1	稳定燃烧机理	(36)
2.3.2	燃烧温度	(37)
2.4	低氧弥散燃烧动力学特征	(38)
2.4.1	Arrhenius 燃烧反应速率	(38)
2.4.2	燃烧分区	(39)
2.5	弥散性能特征指标	(42)
2.5.1	弥散度	(42)
2.5.2	炉温不均匀度	(43)
2.6	燃烧性能强化	(44)
2.6.1	燃烧过程速度	(44)
2.6.2	燃烧功率	(46)
2.6.3	弥散性能	(46)
第3章	低氧弥散燃烧数值模拟研究	(50)
3.1	高温空气燃烧数值模拟研究现状	(50)
3.2	流动、传热与燃烧数值模拟建立	(53)
3.3	EDM 速度系数 A 对低氧空气燃烧数值模拟的影响	(55)
3.4	燃烧温度对燃烧数值模拟的影响	(60)
3.4.1	比定压热容等效系数	(60)
3.4.2	浓度场与温度场	(61)
3.4.3	弥散性能指标	(63)
3.5	EDM 速度系数 A 对燃烧数值模拟的影响	(65)
3.6	低氧弥散燃烧动力学条件	(67)
第4章	低氧弥散燃烧实验	(70)
4.1	低氧弥散燃烧实验系统	(70)
4.1.1	实验系统原理及组成	(70)
4.1.2	热工参数检测	(72)
4.2	实验操作与数据整理	(74)
4.3	低氧弥散燃烧温度均匀性能	(74)
4.3.1	反应区弥散特征	(75)
4.3.2	变化 EDM 速度系数 A 的燃烧数值模拟准确性	(76)
4.3.3	引用等效比定压热容的燃烧数值模拟准确性	(78)

4.4 低氧弥散燃烧动力学条件	(81)
4.4.1 一氧化碳排放浓度	(81)
4.4.2 低氧弥散燃烧动力学条件	(82)
第5章 薄壁蓄热体热过程数学模型及摄动法求解	(87)
5.1 薄壁蓄热研究现状	(88)
5.2 蓄热过程传热分析	(90)
5.3 放热过程传热分析	(94)
5.4 蓄热过程气固温度分布渐近解	(95)
5.4.1 导热项系数的小参数特征	(96)
5.4.2 弱导热一阶渐近解	(98)
第6章 薄壁蓄热体热过程数值仿真系统开发与应用	(106)
6.1 薄壁蓄热传热数值仿真系统开发	(106)
6.2 薄壁蓄热解析准确性验证	(108)
6.2.1 实验对比	(108)
6.2.2 数值计算对比	(111)
6.3 气固传热过程分析	(112)
6.3.1 计算参数选取	(112)
6.3.2 仿真结果及分析	(112)
6.4 弥散燃烧切换周期优化设计	(115)
6.4.1 设计约束条件	(115)
6.4.2 切换周期取值范围	(116)
第7章 薄壁蓄热体传热特性摄动解析	(119)
7.1 最佳切换周期	(120)
7.2 预热空气型薄壁蓄热系统温度效率	(121)
7.2.1 气体水当量对温度效率的影响	(121)
7.2.2 结构参数对温度效率的影响	(122)
7.2.3 固体热物性参数对温度效率的影响	(125)
7.2.4 薄壁蓄热最大温度效率和最佳切换周期验证	(128)
7.3 单预热燃气型薄壁蓄热系统热效率	(129)
7.3.1 热效率	(130)
7.3.2 热效率分析	(131)
7.4 双预热型薄壁蓄热系统热效率	(132)

7.4.1	热效率	(133)
7.4.2	热效率分析	(133)
第8章	基于高温空气燃烧的熔铅炉	(135)
8.1	国内铅冶炼背景	(135)
8.2	基于高温空气燃烧的熔铅炉技术方案	(136)
8.3	工程应用实例	(137)
8.3.1	熔铅炉热平衡计算	(138)
8.3.2	熔铅炉系统结构设计	(145)
8.3.3	蓄热式燃烧系统的控制系统的设计	(148)
8.3.4	改造后熔铅炉的节能和环保效益	(150)
第9章	生物质燃料气化数学模型及其应用	(152)
9.1	固体燃料气化研究现状	(152)
9.2	模型假设	(153)
9.3	气化数学模型	(153)
9.3.1	物料平衡条件	(153)
9.3.2	化学平衡条件	(154)
9.3.3	能量平衡条件	(156)
9.3.4	模型的求解	(159)
9.4	高温空气气化性能探讨	(160)
9.4.1	高温空气气化指标分析	(160)
9.4.2	高温空气/水蒸气气化指标分析	(168)
9.4.3	高温氧气气化指标分析	(175)
9.5	模型应用	(176)
9.5.1	木屑气化	(176)
9.5.2	秸秆气化	(180)
9.5.3	稻壳气化	(182)
9.5.4	棉柴气化	(183)
9.5.5	煤粉气化	(184)
第10章	木屑高温空气气化试验研究	(187)
10.1	高温空气气化试验系统	(187)
10.1.1	系统组成及工作流程	(187)
10.1.2	测试系统组成	(189)

10.1.3 高温空气流量测量	(189)
10.2 木屑高温空气气化试验操作过程	(190)
10.3 木屑高温空气气化试验结果及分析	(191)
第 11 章 研究总结	(198)
参考文献	(201)
附录 1 实验装置图	(223)
附录 2 部分彩图	(223)

第1章 概述

高温空气燃烧技术, 英文为: High Temperature Air Combustion (缩写为 HTAC), 是 20 世纪 90 年代以来在工业炉领域内得到大力推广应用的一项全新燃烧技术。它通过极限回收烟气余热并高效预热助燃空气, 实现了高温(1000℃以上)和低氧浓度(2%~5%)条件下的弥散燃烧, 具有大幅度节能和大幅度降低烟气中 CO_x 、 NO_x 等有害物质的双重优越性^[1]。这项技术所产生的节能和环保的效果是划时代的。它被国际权威专家誉为“21 世纪的关键技术之一”, 对解决人类面临的能源过度消耗和环境污染两大问题具有重大意义。我国是能源消耗大国, 据国家能源局称, 截至 2009 年我国的整体能源利用效率为 33% 左右, 比发达国家约低 10 个百分点^[2], CO_2 排放量为 27 亿吨, 仅次于美国^[3]。因此开发利用高温空气燃烧技术, 对提高我国能源利用率、改善环境污染、降低企业的生产成本以及提高企业的竞争力, 同样具有不可低估的作用。

1.1 高温空气燃烧技术发展的社会背景

重大技术的问世往往以重大社会需求为动力, 高温空气燃烧技术也不例外。当今世界经济处于高速发展状态, 全球能源消耗持续增长, 能源危机摆在了人类面前。不仅如此, 增长的能源消耗导致排入大气环境的二氧化碳和氮氧化物(NO_x)也不断地增加, 地球环境的恶化也逐渐显现出来, 空气污染、温室效应都对人类的生存构成了严重的威胁。能源和环境问题已经成为全世界关注的焦点。1992 年, 关于环境和发展的联合国会议(也称地球峰会)在巴西举行, 会议的目标旨在发起全球性环境保护的国际行动倡议。1997 年 12 月, 关于全球气候变化的《京都议定书》于第三次缔约国会议(COP3)上被确认为《联合国框架公约》。在会议上, 规定发达国家应在 2008 年和 2012 年间将其温室气体排放量从 1990 年的水平至少减少 5%。2009 年 12 月, 在哥本哈根会议上, 重申了《联合国气候变化框架公约》和《京都议定书》中确立的对发达国家和发展中国家实行“共同但有区别的责任”原则。以上这些国际会议都说明了能源和环境问题受到了各国政府的普遍重视。因此降低燃料的消耗和 CO_2 、 NO_x 等有害气体的排放, 是保护环境、实现可持续发展战略的必然要求。在全球范围及更长的时期内解决能源危机 and 环境保护问题是极为迫切的。

这种持续的能源消耗与环境污染的双重压力催生了许多低碳能源技术，高温空气燃烧技术就是其中的一例。

1.2 高温空气燃烧技术发展的技术背景

将现象的主控因素极端化予以研究，往往能获得新的发现和认识。高温空气燃烧方式的被发现，正是人们将燃烧主控参数向极端化推进的结果。这种极端化表现为氧化剂初始温度的提高和初始含氧体积浓度的降低。而新型蓄热式换热技术的出现则为这种新型燃烧方式的工业化提供了技术支持。早期的高温空气燃烧源于单纯追求低能耗，因为节能可以减少 CO_2 排放，因此也可以溯源于追求低碳。但高 NO_x 排放却是早期高温空气燃烧未能解决的问题，即低碳不低硝。当代的高温空气燃烧则源于追求两低——低碳和低硝。

纵观国内外燃烧技术发展的历史，可以发现各种工业炉和锅炉的节能技术发展都经过了不回收烟气余热和回收烟气余热两个时期，其中回收烟气余热时期主要包括两个阶段：一是换热式回收烟气余热阶段，即将助燃空气直接在通过烟道中的换热器进行预热；另一个是蓄热式回收烟气余热阶段，这一阶段也是高温空气燃烧技术发展的主要阶段。

“不回收烟气余热”时期出现在大工业生产的初期，燃烧产生的高温烟气（ 1000°C 左右）直接对空排放，导致了大量的热损失，炉子的热效率极低，浪费了大量的能源^[4]。图 1-1 为不回收烟气余热时期的工业炉示意图。

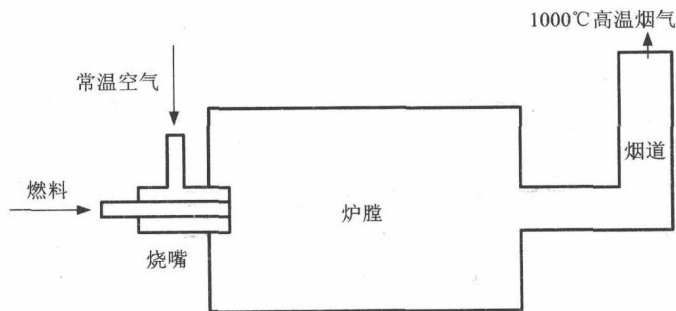


图 1-1 不回收烟气余热工业炉示意图

从 20 世纪六、七十年代开始，人们开始意识到有必要回收高温烟气的余热，并用来加热助燃空气，于是工业界纷纷在炉子烟道上安装了空气预热器来回收烟气带走的热量^[4]，这就是所谓的“换热式回收烟气余热阶段”，其示意图如图 1-2 所示。

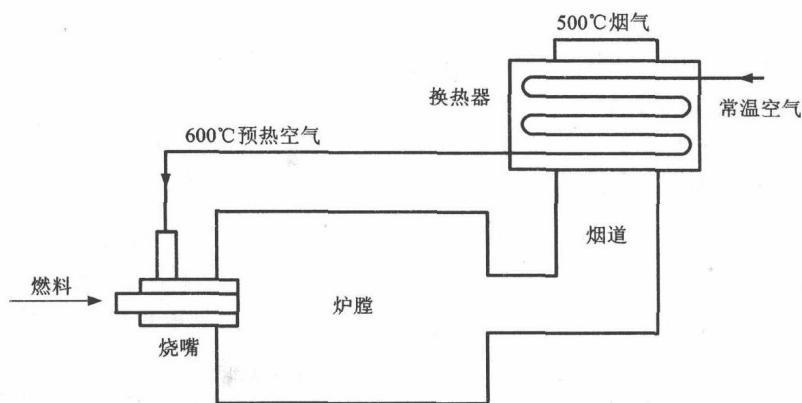


图 1-2 换热式回收烟气余热工业炉示意图

通过这种方式,不仅降低了烟气的温度,而且提高了进入炉膛的助燃空气的温度,促成了良好的燃烧性能,起到了一定的节能作用。尽管如此,这种方式依然存在很多问题:①其回收热量的数量有限,助燃空气的预热温度一般不超过 600°C ,而烟气温度仍有 500°C 之高;②烟道中的换热器使用寿命短、设备庞大、投资成本高且维修困难;③助燃空气的温度提高以后,火焰中心的温度也大幅度提高,造成了炉膛局部高温区的存在,不仅影响炉膛局部耐火材料和炉内金属构件的寿命,而且使产品质量下降;④助燃空气温度的增高导致火焰温度增高, NO_x 的排放量大大增加(甚至可以达到 0.1% 以上),对大气环境仍然造成了严重的污染^[4]。

为了得到更加可观的节能效果,科研领域与工业应用领域的相关人士认为需要更彻底地回收烟气余热,于是燃烧节能技术进入到了“蓄热式回收烟气余热阶段”,即高温空气燃烧从无到有的发展阶段。

从20世纪80年代初开始,在英国天然气公司(British Gas)与Hot Work公司共同努力下,开发出了一种装备有陶瓷球的蓄热式高温空气燃烧器。该燃烧器可以称为是高温空气燃烧技术的雏形,其工作原理与本书所介绍的高温空气燃烧技术是一样的(可参见本章1.3节高温空气燃烧工作原理与技术优势)。与换热式空气预热方式相比,该燃烧器在一个循环周期内可将助燃空气预热到 1000°C 的水平,使烟气余热利用达到接近极限的水平。

应用蓄热式燃烧,燃烧产生的热量不是白白排掉,而是有效地回收。因而,已实现大幅节能(大约 30%),并能阻缓全球变暖的趋势。然而, NO_x 的排放量随着助燃空气温度的升高而增加,因此,在节能的同时却没有达到环保的目的,如何在节能与环保之间找到一个平衡点,成为后来国内外学术界对蓄热式高温空气

燃烧技术研究的重点。

20 世纪 90 年代以后,人们对蓄热式燃烧技术进行了深入的研究,旨在同时达到节能和降低 CO_2 、 NO_x 排放的双重目标。日本工业炉株式会社(NFK)田中良一领导的研究小组采用热惰性小的蜂窝式陶瓷蓄热器,并使用高频换向设备后,检测到 NO_x 排放量减少。当通入炉内的空气流速增大时, NO_x 量会进一步地减少。同时,由于助燃空气温度很高,这使得低氧气氛的燃烧成为可能,因此,在助燃空气中添加惰性气体制造出低氧气氛后再通入炉膛参与燃烧反应,炉内火焰透明无色,炉内温度分布几乎均匀,不存在局部高温区,破坏了 NO_x 的生成条件,这也使得 NO_x 的生成量大大降低,达到了节能和环保的双重目标。于是,高温低氧条件下的蓄热式燃烧技术诞生了,即现在所谓的“高温空气燃烧技术”,它可将助燃空气预热到 1200°C ,不仅解决了 NO_x 排放的问题,而且更进一步地提高了炉子的热效率。

1.3 高温空气燃烧工作原理与技术优势

HTAC 技术的基本原理如图 1-3 所示。

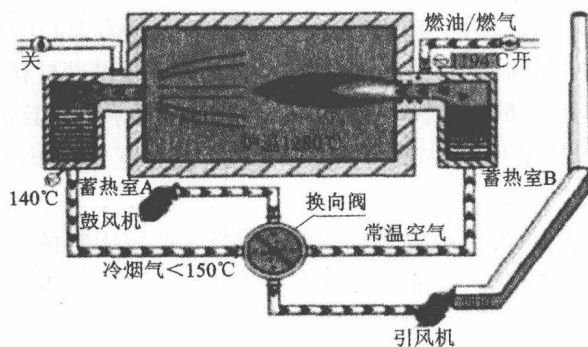


图 1-3 高温空气燃烧示意图

高温空气燃烧装置系统主要由炉膛、蓄热室(内有蓄热体)、换向系统、排烟系统四大部分组成。蓄热室成对布置在炉膛的两侧。切换换向阀,使常温空气或经添加惰性气体稀释过的空气由蓄热室 B 进入,在经过蓄热室 B(陶瓷球或蜂窝体)时,在极短时间内常温空气被加热到接近炉内温度(一般比炉温低 $50^\circ\text{C} \sim 100^\circ\text{C}$),在鼓风机驱动力的作用下,高温空气以较高的速度喷入炉膛内,卷吸周围烟气后使得含氧量进一步降低,形成一股含氧体积浓度极低的高温低氧气流,同时往炉膛内注入燃料(燃油或燃气),燃料在低氧($2\% \sim 20\%$)状态下进行燃

烧。燃烧后的高温烟气在引风机的作用下进入对面的蓄热室 A, 并将烟气余热储存在蓄热室 A 中, 然后以低于 150℃ 的温度经过换向阀排出。这就是完成一次燃烧的全过程, 当换向阀以一定的频率进行切换, 使两个蓄热室处于蓄热与放热交替的循环工作状态, 从而达到节能和降低 NO_x 排放量等目的。常用的换向周期为 30 ~ 200 s。

HTAC 技术的优势主要是:

- (1) 回收烟气余热 85% ~ 95%, 节能效果显著。
- (2) 炉温分布均匀, 有助于提高产品产量和质量, 延长炉膛内相关设备寿命。
- (3) CO_x 和 NO_x 排放量大大减少。
- (4) 扩展了低热值燃料的应用范围。借助高温预热的空气, 可以使低热值的燃料(如高炉煤气、发生炉煤气、低热值的固体燃料、低热值的液体燃料等)点火容易、不脱火, 并且可以获得较高的炉温。

因此, 不仅在工业领域, 而且在研究领域, 高温空气燃烧技术一时被认为是新型的燃烧技术, 成了关注的焦点, 并在世界范围内得到了广泛的发展。

1.4 高温空气燃烧烧嘴型式

经过 20 余年的发展, 高温空气燃烧技术得到国内外研究人员的广泛关注, 相关的研究活动、现场应用等十分活跃。

在国外, 研究单位主要包括:

日本工程技术株式会社(JFE)、工业炉株式会社(NFK)、石川岛播磨重工业有限公司等企业和东京大学、大阪大学、东北大学、关西大学、秋田县立大学、长冈技术科学大学等学术研究机构; 美国马里兰大学等; 英国帝国学院、英国煤气公司米德兰(Midlands)研究所等; 德国克劳斯彻尔工业大学等; 瑞典皇家工学院等; 荷兰火焰研究基金

会等; 还有意大利等国家的相关企业和机构^[5-23]。其中, 几个工业发达国家十分重视高温空气燃烧技术的研究与开发应用工作, 都在高温空气燃烧的原理基础上形成了各自的技术特点。20 世纪 90 年代以来, 日本开发出了 HRS 烧嘴(如图 1-4)和 FDI 烧嘴(如图 1-5), 其原理是利用额外热焓减少 NO_x 的排放; 德国发展的是所谓的“无焰氧化”燃烧技术(FLOX—Flameless Oxidation)(如图 1-6); 意

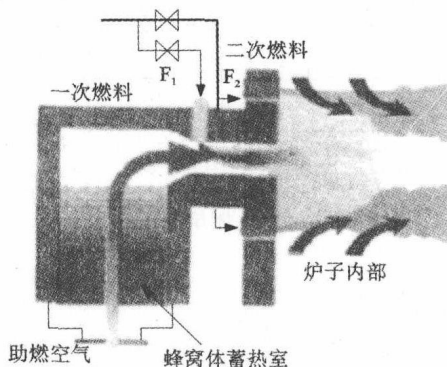


图 1-4 HRS 烧嘴结构示意图

大利具有所谓的“中度与强化的低氧稀释”燃烧技术 (MILD—Moderate and Intensive Low Oxidation Dilution) (如图 1-7); 美国有“低氮氧化物喷射”燃烧技术 (LNI—Low NO_x Injection) (如图 1-8)^[24]。

目前, 这些技术已成功应用于加热炉、热处理炉等工业炉窑, 不仅节能效果明显, 而且降低了污染物排放, 并使产品质量得到提高。

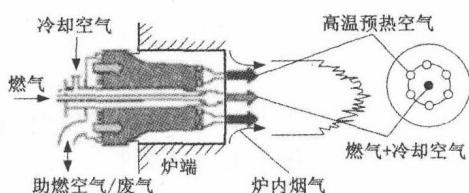


图 1-5 FDI 烧嘴结构示意图

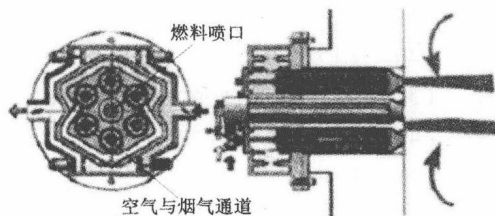


图 1-6 FLOX 烧嘴结构示意图

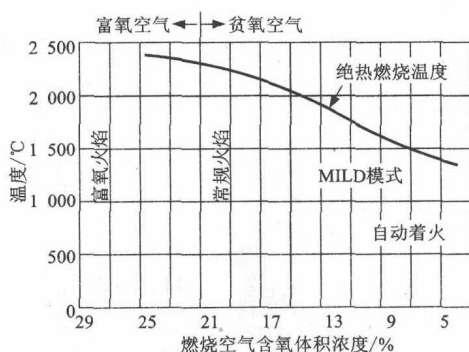


图 1-7 MILD 燃烧原理

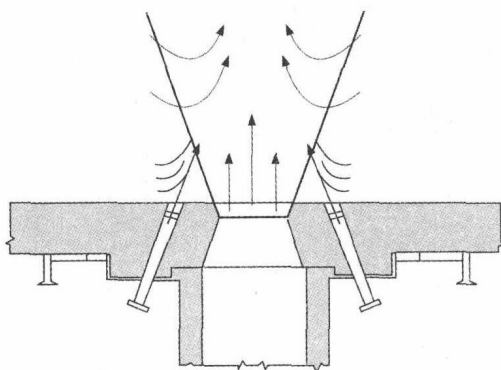


图 1-8 LNI 烧嘴结构示意图

高温空气燃烧技术在 20 世纪 80 年代末、90 年代初就被介绍到我国, 并且应用在一些工业炉窑上, 但当时并没有引起广泛的关注, 直到 1999 年 10 月在北京举办的“高温空气燃烧新技术国际研讨会”后, 高温空气燃烧技术才引起我国科技工作者的高度重视。国内先后有众多科研院校与企业实体对高温空气燃烧的机理、低污染特征与应用技术进行了一系列研究, 如: 台湾工业技术研究院、清华大学、北京科技大学、中南大学、东北大学、北京工业大学、中科院工程热物理研究所、浙江大学、上海交通大学宝钢技术中心、钢铁研究总院冶金工艺研究所、中元国际工程设计研究院(原机械部设计院)、大连北岛能源技术发展有限公司、北京神雾热能技术有限公司, 其关注点主要集中在火焰特性、温度场的均布、氮氧