

高温空气燃烧技术的研究进展*

祁海鹰，李宇红，由长福，徐旭常

(清华大学热能工程研究所，北京 100084)

摘要：本文通过介绍高温空气燃烧技术在国内外的研究进展和成果，着重分析了一些关键问题如燃烧组织、低氮氧化物生成与排放、蜂巢蓄热体性能等，讨论了工业窑炉污染排放标准问题，还结合企业的实际情况进行了高温空气燃烧技术应用的经济性分析，最后探讨了该技术在其它领域的应用前景。

关键词：高温空气燃烧技术，燃烧组织，蜂巢蓄热体，污染排放，经济性分析

一. 概述

自从 1999 年在北京召开了高温空气燃烧技术国际研讨会以后，我国对这项技术的研究和应用得到了迅速发展。高等院校如北京工业大学、北京理工大学，清华大学、同济大学、东北大学、中南工业大学等都开展了应用基础研究，主要是建立了小型燃烧试验装置，参照国际上采用的燃烧器模式，用自己开发的蜂巢蓄热体，对换热效率、余热回收率、燃烧性能和 NO_x 排放进行了研究，得到了一些初步的结果^[1, 2]。同时也提出一些新的改进设想，如试图将通常的 150℃ 排烟温度进一步降低，以获得更高的节能效果。许多企业公司开发出多种具有自主知识产权的蓄热燃烧技术，设计应用了自己的换向阀机构，并在降低 NO_x 方面取得一定成果。其中以大连北岛能源技术公司为代表，在蓄热燃烧和低热值煤气燃烧方面取得了相当的成绩。北京神雾公司、武汉钢铁公司、上海宝山钢铁公司等都积极参与了新技术的研发和推广。在一年多时间内，在全国呈现出方兴未艾的趋势。

国际上的研究依然是朝着高温空气燃烧技术在不同领域中应用的方向发展，多级焓提取煤气化技术 (MEET System) 已经进入了大型示范实验研究阶段，直接煤燃烧、垃圾焚烧和炼油工艺的改进等

研究也已开始概念研究，并取得部分成果。对燃烧的基础研究方面也取得了重要进展。在过去十年中，国际上的研究主要集中在：(1) 提高工业炉和锅炉热效率；(2) 降低 NO_x 污染排放和 (3) 缩小工业设备尺寸三方面，并已经成功达到该技术的最初目的，开创了革命性的燃烧器和炉窑设计，尤其是在钢铁加热领域，所积累的具有示范性的经验和全尺寸装置以及高效低 NO_x 排放的成果，为该技术在其他领域的应用提供了新的机会和挑战，这也是国际燃烧领域里的工程师和科学家所面临的。在这方面，众所周知，日本和德国做出了开创性的贡献。由于日本政府的积极支持，使得新技术在日本以及一些亚洲国际得到了很好的传播。在 2000 年 1 月和 3 月国际上连续在瑞典的斯德哥尔摩和日本横滨召开两届国际会议，今年 11 月又将在意大利罗马召开第四届高温空气燃烧和气化技术国际会议。因为高温空气燃烧技术的潜力还远未开发出来，因此，本届国际会议的目的是提供机会交流最新研究成果和交换对该技术潜在应用前景的看法，会上将通过邀请报告，专门介绍由日本科学技术振兴会 (JST) 资助的气化技术示范项目，以及由意大利新技术、能源环境署 (ENEA) 资助的先进计算和模拟结果，介绍可再生燃烧器在陶瓷、石油工业和燃气轮机应用的可能性。届时我们将会看到引人注目的最新成果。

* 本文由清华大学机械工程学院基金项目资助

第一作者：电话、传真：010-62781740，

qihy@te.tsinghua.edu.cn

纵观国内外研究进展，深感我国不仅在高温空气燃烧技术的开发和应用方面，在燃烧过程的基础研究方面以及在该技术在其他领域里应用的探索方面都与国际具有很大差距。更重要的是我们尚未对该技术的关键和核心问题——燃烧过程和组织没有引起足够的重视，而更多地集中在蓄热问题上，对我国工业炉窑领域 NO_x 的污染排放现状缺乏足够的整体的认识，一些研发工作出现急功近利的趋势，因此，就不可能对该技术在其它领域里的应用区的具有前瞻性的认识，而在研究及思路研究力量方面采取相应的战略配备和调整措施。本文将针对以上问题，通过介绍国内外研究进展，并对燃烧组织、低氮氧化物生成与排放、蜂巢蓄热体性能等关键性问题进一步分析，讨论了工业窑炉污染排放标准，还结合企业的实际情况进行了高温空气燃烧技术应用的经济性分析，最后探讨了该技术在其它领域的应用前景。

二. 蜂巢蓄热体的全性能研究

众所周知，高温空气燃烧技术由高效余热回收技术和高温低氧燃烧技术两个关键环节组成。前者的实现是依赖了高效蜂巢蓄热体，才使得 HiTAC 燃烧技术具有可再生性。由于蓄热体的结构简单，采用陶瓷材料，对于天然气等清洁气体燃料，发达国家基本上采用了经过结构和尺寸优化的蓄热体，即横截面上的蜂巢孔数为 100 目，孔尺寸均为 2.5 × 2.5 mm，壁厚 0.4 mm，比表面积为 1344 m²/m³，取得最佳余热回收率。

在我国，尚需要针对我国的具体情况对蜂巢蓄热体的性能进行必要地研究，主要因为：

(1) 我国工业燃料种类变化范围大，除天然气外，需要用到高炉煤气等低热值煤气、油（包括重油）等燃料，甚至煤或垃圾等固体燃料；热值与成分都可能影响蓄热体的换热性能；

(2) 燃料含尘量、燃烧不完全生成的炭黑或高温裂解后的轻质燃料质点，以及其它气态物质在蓄热体内部降温过程中可能因相变结晶，形成固体颗粒，都可能对蓄热体安全工作和换热性能造成损害。

为此，在特定的燃料和运行条件下，需要改变蓄热体结构尺寸，例如加大孔尺寸，增加壁厚，降低孔的数目等，而必然导致换热性能的变化。为在保证运行的可靠性和安全性的前提下，维持较高的余热回收率，就必须探明最佳换向时间随各种条件的变化。

从图 1 可见，在其它条件不变时，余热回收率的大小完全取决于换向时间，不仅如此，其它参数如压力损失、出口烟温以及蓄热体达到稳定工作状态的换热周期次数都受制于换向时间。显然它们之间的关系将随着其它条件变化而变化(图 2、3、4^[6])。从根本上说，就是要通过研究，建立一个反映蓄热体几何结构、材料物性、换向时间、流动参数和传热系数之间的关系，综合出一个无量纲经验公式或曲线族。这样，在进行工业设计时就能够对某种特定材料和结构尺寸的蜂巢蓄热体方便地确定其最

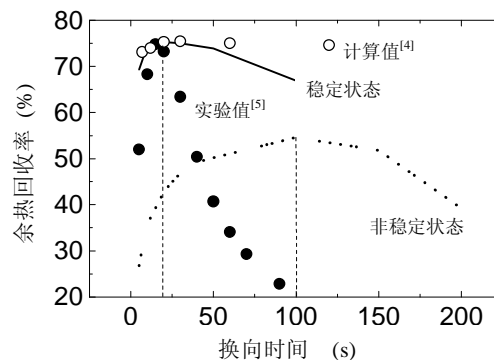


图 1：不同的换向时间条件下，蓄热体余热回收率的变化（烟气进口速度：7 m/s）^[7]

佳换向时间。

这些研究即将通过数值计算和实验验证完成。

最近，日本石川岛播磨公司（IHI）提出了高温空气燃烧技术直接应用于煤燃烧的概念，准备采

用高温热除尘的方法，部分解决烟气中含尘量大问题。可以预见，烟气中的含尘量将比燃烧天然气等清洁燃料者多得多。自然就提出一个问题，在这种情况下，蜂巢蓄热体对含尘烟气的耐受能力如何。这是关于蜂巢蓄热体的新研究课题之一。目前已经立项并开展了研究。

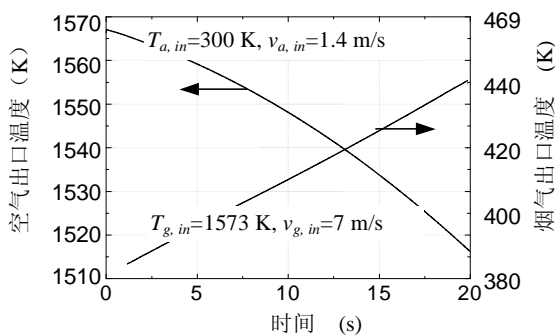


图2：在放热阶段和蓄热阶段，空气与烟气出口温度随时间的变化

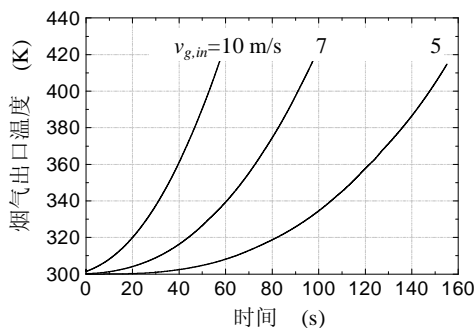


图3 烟气进口流速对其在蓄热过程的出口温度的影响

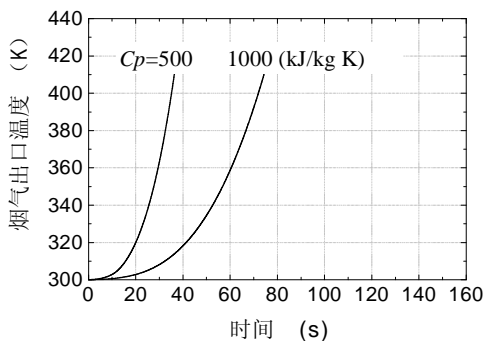


图4 蓄热体材料的比热对蓄热过程烟气出口温度的影响

3.1 对高温低氧燃烧过程的分析

研究和发展高温空气燃烧技术的关键，是在实现了余热回收和高效预热空气的基础上，有效的组织燃烧过程。在保证燃烧效率的前提下，达到超低氮氧化物（NO_x）排放的目的。

但是，目前我国在这方面的研究还很欠缺，并缺乏正确的认识。人们比较重视蓄热燃烧和余热回收，而忽略 NO_x 的排放问题，甚至认为，实现了高温空气预热，就会自动降低 NO_x 生成。在这种认识下，人们的注意力更多地集中在自行设计换向阀和节能问题上，较少涉及如何深入认识这种技术的燃烧过程和燃烧组织问题。同时，由于经济利益的驱使，也影响了人们对技术本身的深入研究。这样在技术的国产化进程中，它的进一步发展受到了限制，更谈不上在其它领域里的广泛应用，只能在形式上追踪国外发展，成为简单的技术开发，不可能对燃烧科学的发展作出真正的贡献，和真正形成具有我国自主知识产权的高新技术。

事实上，在炉膛中发生的高温低氧燃烧过程是相当复杂的。因此需要对如下几方面有清楚的认识：

- (1) 通过蓄热技术产生高温空气对燃烧过程的意义在于：改善全场温度均匀性；大大提高燃烧化学反应速度；超过燃料自燃温度，提高燃烧稳定性。如果不采取任何措施，将燃料直接喷入新鲜的高温空气中，就会因大量和迅速燃烧，产生超高温，而大量生成 NO_x。
- (2) 降低局部氧气浓度不能以损失整体设备的燃烧效率为代价。这就是说，从量上而言，对于燃烧一定量的燃料而言，所需供应的空气量总体上必须等于或超过化学当量比，即总过量空气系数 $a_s \geq 1$ ，否则必然有一部分燃料不能完全燃烧，而造成化学不完全燃烧损失。这时，无论空气温度和余热回收率多高，都不可能避免这部分损失。

三. 空气燃烧技术的超常规燃烧过程和燃烧组织问题

(3) 高温低氧燃烧是通过降低局部氧浓度实现的, 实质上是使局部的过量空气系数远低于化学当量比 ($\alpha < 1$), 而呈富燃料状态。氧浓度仅是指单位空间体积中或单位体积的气体中的含氧量, 并不表征氧气量与燃料量的比例关系。因此, 即使在某处氧浓度很低, 但那里实际的氧气量与那里的燃料量相比, 仍然富足, 即当地的过量空气系数仍然可能大于 1。这时的燃烧状况依然是常规的高温燃烧。但是否导致大量的 NO_x 生成取决于当地的燃烧强度。由此可见, 分析和组织高温低氧燃烧过程, 要从当地的过量空气系数入手, 并测量燃料浓度场时测定它的数值大小, 而不能仅仅测量氧气浓度。实际上, 氧浓度的说法不过是一个表征过量空气系数变化的指标而已。如果要把燃烧过程与燃烧效率相联系, 就应该仔细考察过量空气系数。

(4) NO_x 随氧气浓度降低而降低的原因, 是能够被燃烧掉的燃料量越来越少所造成的, 这样燃烧放热量就低, 所导致的温升也小, 燃烧火焰的辉度就逐渐消失。因为在小型实验装置上, 往往是保持燃料供应量不变, 通过增加掺入空气中的惰性气体的量来降低氧气浓度。显然, 当地过量空气系数越小, 就必然有越来越多的燃料剩余。在大型炉窑内部, 为了保证整体的燃烧效率, 在一个地方剩余的燃料就要在其它地方燃尽。高温空气燃烧技术的燃烧过程的实质就是, 把原来常规燃烧中集中在燃烧器附近区域里进行的扩散燃烧, 扩展到更广大的燃烧空间中去进行。一方面, 使局部形成低氧富燃料状态; 另一方面, 降低了局部容积燃烧热强度。这样, 就使全场温度均匀, NO_x 的生成得到抑制。现有的空气分级燃烧技术的原理, 也与此相类似, 目的都是通过控制过量空气系数, 使燃料分阶段完成燃烧。

(5) 由低氧富燃料燃烧进一步派生出这样一个结果: 燃料的裂解过程得到了强化。这个过程在常规富氧燃烧中几乎与燃烧反应同时进行。但在高温低

氧的条件下, 把裂解与反应过程在一定程度上分离, 裂解产生大量的 C_2 、 CH 、 OH 等原子基团, 构成了作为连锁反应中链载体的“自由基”, 而具有很高的化学活性, C_2 原子团也产生很强的辐射。这就为强化后续的燃烧过程创造了便利条件, 也对温度均匀性作出了贡献。

(2) 高温低氧燃烧实质上还是一种扩散燃烧的形式。因为燃料与空气是分别供入燃烧空间, 因此就存在一个边扩散边燃烧的过程。不同的是, 燃烧空间中不存在可燃混合物相对集中而形成的 $\alpha=1$ 的区域, 因此, 不能象常规燃烧那样用这个条件来判断火焰峰面的位置。燃料在低氧区的扩散和混合相当于在燃料中掺入了一定比例的惰性气体, 随后发生的燃烧过程就类似于低热值燃料燃烧的过程。这就是为什么高温空气燃烧技术能够用来解决高炉煤气等一类低热值气体燃料再利用的道理。我国已经用蓄热的原理成功地开发出低热值煤气高温燃烧的技术, 已经在工程上获得应用, 并取得了良好的经济效益^[10]。

3.2 高温低氧燃烧过程的组织

为了实现高温低氧燃烧的目的, 在燃烧的组织上必须改变思路。常规燃烧的思路讲究空气的充分供应和与燃料的良好配合, 以在燃烧器附近区域尽快形成过量空气系数接近于 1 的可燃混合物。因此, 在组织燃烧时, 注重空气与燃料喷射的流动结构, 使之有利于燃料的扩散过程。一个常规燃烧器的作用在很大程度上就是要实现这个目的。并且要适当提高总的过量空气系数以保证燃烧效率, 因为如果燃料与空气混合不好, 就可能形成不完全燃烧。空气配比的增加对燃烧过程有掺冷作用, 使得热能利用率对过量空气系数的变化很敏感, 会因后者从 1 增加到 2 时, 降低约 30 个百分点。高温低氧燃烧的组织思路则相反, 是在保证空气总量足够的前提下, 控制它与燃料的初期扩散混合, 使燃料从低氧

富燃料区域边燃烧，边随气流运动向全场扩散。全场的高温氛围为燃料的裂解和化学反应创造了有利条件，只要与氧混合，就能立即燃烬。同时也大大降低了热能利用率对过量空气系数的敏感度。由于燃烧器不需要去实现燃料与空气的扩散混合，其结构就变得不重要了，而被大大简化。这就是为什么日本工业炉公司开发的燃烧器将燃料喷嘴与空气喷管分离的道理。

至于如何控制空气与燃料的初期混合，如何利用燃烧产物对它们的稀释，形成高温低氧环境，如何保证燃烧效率，才使真正需要深入研究的。只有确定各种几何参数和流动参数对 NOx 和燃烧效率的影响关系，才能在高效节能和超低 NOx 排放之间取得最优化的平衡。日本在这个领域里的 70 多项专利所要保护的就是这方面的技术参数和诀窍。

3.3 高温低氧燃烧过程的数值模拟

运用现代燃烧理论、湍流理论以及污染物生成理论研究的最新成果，可以对高温低氧燃烧过程和 NOx 排放进行比较准确的数值模拟，其优越性在于可以在各种不同的条件下，获得燃烧特性变化的趋势和 NOx 排放的数据，从而为进一步的实验研究和验证提供指导性依据。

图 5 给出了计算几何模型，用于研究预热温度甲烷高温空气燃烧特性的影响^[8]。燃烧空间尺寸为 200×80×260 mm，进气道和出气道横截面积均为 90×40 mm，长度分别为 20 和 140 mm。燃料喷嘴直径 φ1.0 mm，位于进气道根部。纯度为 97%的甲烷通

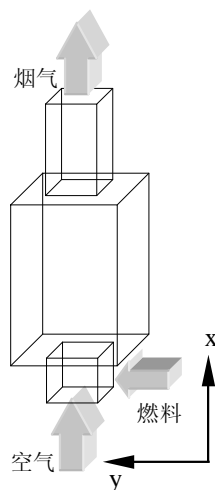
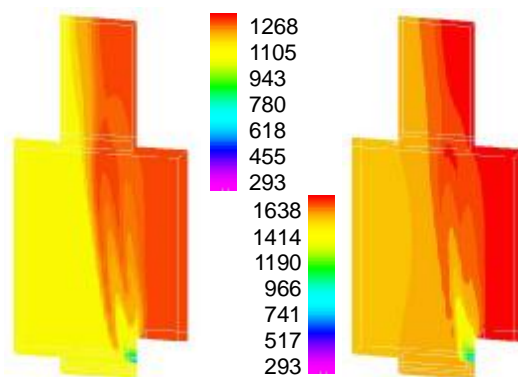


图 5 计算几何模型

过喷嘴与燃烧空气流动方向成 90° 夹角匀速射入燃烧室，流量恒为 0.053 Nm³/h。预热空气（氧、氮混合气体）以 Re=6000 匀速流入，流量保持在 15 Nm³/h，以保证把氧浓度降低到 2%时，燃烧空间的总过量空气系数 α>1，保证完全燃烧。流场出口设为等压边界条件 p=1.013×10⁵ Pa，壁面采用绝热边界条件。计算工况见表 1。

图 6 给出进口空气预热温度对燃烧状态的影响。可见，随着空气预热温度提高，火焰形状更加不规则，全场呈弥漫燃烧状。最高温度水平提高，平均温差略有减少。气流速度的升高使燃烧高温区进一步向右侧收缩。

图 7、8 分别绘出了流场最高温度 T_{max}、平均温差 ΔT=T_{max}-T_{in} 随进口空气预热温度的变化。可见，在相同的进口氧浓度条件下，T_{max} 随 T_{in} 线性递增，增加的幅度接近 T_{in} 的增加值。全场 ΔT 则与 T_{in} 呈



(a) 工况 1, T_{in}=1073 K (b) 工况 5, T_{in}=1473 K

图 6 不同空气预热温度下的温度场分布 (C_{O₂}=2%) 线性递减的关系，其递减量约为 T_{in} 增加量的 5%，这时因为燃料燃烧放热占空气所带入的总热量的比例越来越小的缘故。

3.4 高温空气燃烧技术原理的扩展

从高温空气预热和超低 NO_x 排放的角度来看，高温空气燃烧技术的原理并不等同于高温低氧燃

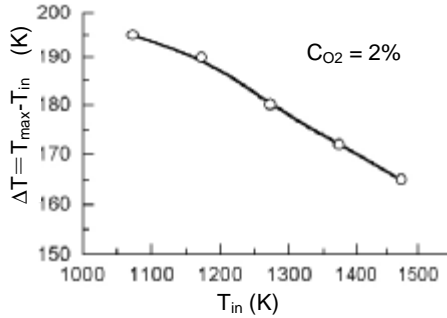


图 8 平均温差随空气预热温度的变化

烧。这就是说，除了高温低氧燃烧可以实现超低氮氧化物排放外，在局部富氧的条件下，同样可以控制 NO_x 的生成。

在图 9 所示的实验

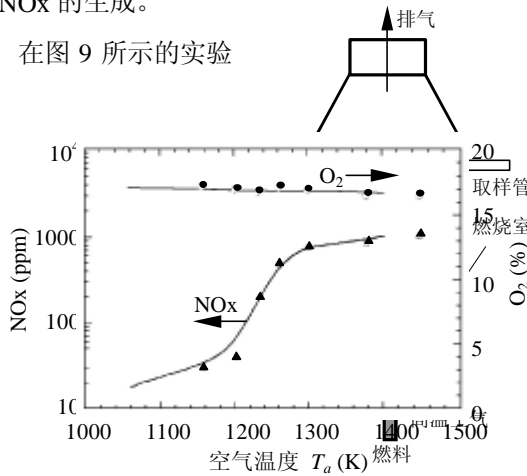


图 10 NO_x 随空气预热温度的变化关系装置上的研究结果表

明，将燃料喷入正常含氧量的高温空气中，通过一定的流动组织，依然可以实现低 NO_x 的生成和排放（如图 10 所示）。实验研究了附着湍流火焰（靠近喷口）和脱体湍流火焰（远离喷口）两种火焰。发现随着空气温度的降低，火焰会逐渐远离喷口，高度增加到一定时候，NO_x 排放量会突然降低，甚至降低到在相同的空气温度条件下附着火焰的 10%。

这种火焰可以脱体并远离喷口而保持稳定燃烧，同时 NO_x 排放很低的原因是：（1）当然料气

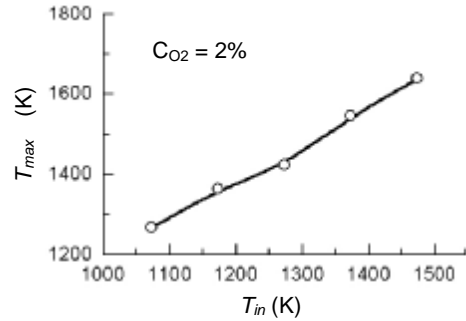


图 7 最高燃烧温度随空气预热温度的变化

流速度很高的时候，常温空气温度下扩散燃烧可能发生吹熄的情况在高温预热空气条件下就会改善得多；（2）火焰脱体意味着着火延迟。在从喷口到达火焰根部之间的距离内，高速燃料湍流射流大大提高了周围空气的卷吸量，加速了与空气扩散混合过程。在燃烧发生的时候，已经形成了局部的均相预混可燃气体的条件，而且预混区内的过量空气系数 $a >> 1$ ，远远偏离了化学当量比。这时的燃烧过程是按照“富氧预混燃烧”原理进行的，自然 NO_x 的浓度就降低了。

综上所述，高温空气燃烧的关键在于高温空气条件大大扩展了稳定燃烧的范围。在这个基础上，使组织任何一种远离化学当量比的燃烧过程成为可能。在没有采用任何特殊的措施情况下，就可以实现在燃烧过程中对 NO_x 生成的控制。高温空气燃烧本质上并没有超越燃烧理论的范畴，基本上还是按照扩散燃烧和预混燃烧的原理进行的。但却使燃烧理论在研究高温低氧和富氧所形成的更大区域范围内的燃烧特性得到了丰富和发展。

四. NO_x 排放与其它污染物问题

4.1 NO_x 排放的数值模拟

在上一节，已经部分讨论了通过组织燃烧降低 NO_x 排放的思路和方法。本节进一步论述高温低氧燃烧条件下 NO_x 的生成特性及其它可能的污染物排放问题。

这里给出在图 5 的计算模型上，得到的 NOx 排放特性随着进口空气含氧量的变化在常温和高温下的数值计算结果。计算工况条件见表 2。

图 11 给出了相同空气和燃料流量条件下，高温低氧燃烧（工况 1）和常规燃烧（工况 9）的温度场对比。两者的差异是显而易见的。工况 1 的火焰形状是不完整的，呈弥漫状。全场温度水平都处于 1260-1460K 之间，温差仅为 200 K 左右，没有明显的高温炽热点或区域。说明首先是进口空气的高温提高了全场的温度水平。其次是由于全场局部过量空气系数远小于化学当量比，降低了燃料放热

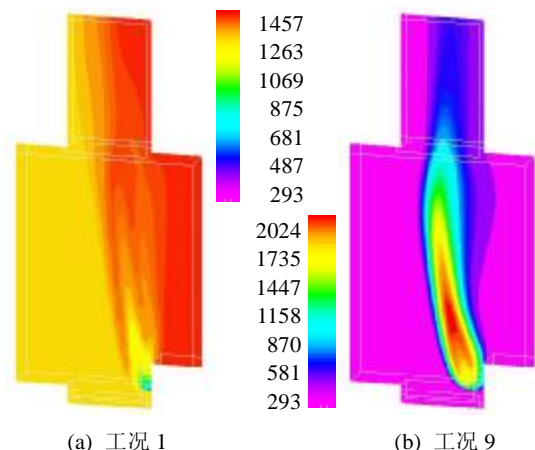


图 11 高温低氧燃烧与常规燃烧的温度分布^[9]

程度。计算结果完全符合实验观察^[11]。

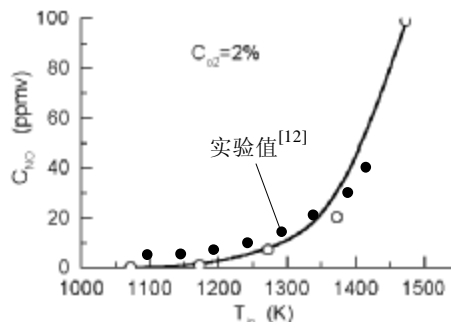
常规燃烧则完全是另一种情形。它属于纯粹的扩散燃烧，因此，会出现过量空气系数 $a=1$ 的区域，而产生局部的炽热高温点（2020℃），全场温差近 1700℃，是工况 1 平均温差的 8 倍。在冷空气的掺混下，出口烟温很快降低到 600 以下。这种状态导致了 NO 的大量生成（664 ppm）。与此相比，高温低氧燃烧的热力 NO 的生成量为下降，约 10 ppm，

表 2 计算的工况条件

工况	1	2	3	4	5	6	7	8	9
进口空气氧浓度 C_{O_2} (Vol. %)	2	4	6	8	10	14	18	21	21
进口空气温度 T_{in} (K)	1273								293

比常规燃烧减少了 60 多倍。同样的结果也在文献 [12] 中得到了验证。

由此可见，高温低氧燃烧是



降低氮氧化物排放的有效途径。但要注意的是，即使是降低了氧化剂浓度，如果进口空气温度过高，还会使氮氧化物生成增加（如图 12 所示），只是它的总量仍然比常规燃烧要小得多^[8]。

图 13 给出了 NO 的排放情况。与图 11 类似， C_{NO} 与进口氧浓度的关系呈指数规律，在 $C_{O_2} > 12\%$ 后已经超过 1000 ppm 并急剧增加，可见 $C_{O_2} = 12\%$ 在整个空气的氧浓度范围内是一个临界转折点。但如果要使 NO 的排放量低于 100 ppm，达到几十、甚至十几的数量级的话，就必须使氧浓度保持在 2-4% 以下（见图 13 下图放大后的情形）。

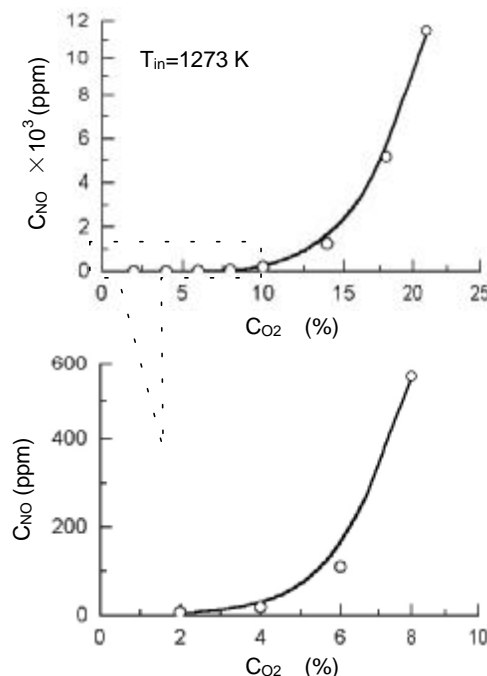


图 13 计算的 NO 浓度随进口氧含量的变化

4.2 其它污染物的排放问题

这里主要是指可吸入颗粒的排放问题。这是目前国际上特别关注的重大课题。

弥散在大气中的所有粒径分布在0.1~200 μm 的范围内的固态和液态物质，统称为“颗粒物”，包括气溶胶、烟尘、烟雾和碳黑等，构成了粉尘污染源。按它们的粒径和在空气中的行为分为降尘和飘尘两类。降尘粒径大于10 μm ，可重力沉降。飘尘则是指粒径小10 μm 的所有颗粒物，可以长期悬浮在空气中。

这些微颗粒物不仅自身由于可以被人体吸入呼吸道内而对健康造成危害，而且还是其它污染物的载体，富集各种有毒重金属元素和有机污染物，而形成毒性更高的烟雾等。此外，它们还会使大气能见度降低，影响太阳光紫外线的照射，妨碍人类和动植物的正常生长。通常认为10 μm 以下的气溶胶类颗粒物（PM10）对人体危害最大，但近期研究表明，2.5 μm 以下的超细颗粒（PM2.5）的危害更加严重。这些超细颗粒称作“可吸入颗粒物”（Inhalable Particulate Matter-IPM），成为国际环境科学的研究焦点之一。很难为目前所使用的各种常规除尘设备所截获，而排入大气中，并且被人体吸入体内后将沉积在肺部深处，不像大尺寸的颗粒那样会随着呼吸排出体外。根据对典型电厂的煤粉炉和工业锅炉所排放的煤烟颗粒测定发现，其质量的中值直径分别为3.8 μm 和7.5 μm ，恰好都处于10 μm 以下，属于可吸入颗粒的范畴。工业过程、机动车、森林火灾、建筑物工地、道路扬尘、民用燃烧以及风蚀等都是PM10和PM2.5超细颗粒的重要来源。

高温空气燃烧技术作为燃烧领域的新技术，创下了高效节能和超低 NO_x 排放的优良业绩。但由于其本身高温低氧的特点，有可能会因燃烧组织不良，形成烟炱污染，或者由于所采用的燃料如低热值煤气不清洁，其中含硫、氮和其它有机物以及固

体颗粒等，都有可能引起超细颗粒的排放。

烟炱在碳氢化合物在空气中燃烧时常伴随出现，与燃烧温度、氧浓度、燃料种类和燃烧过程有。通常，当空气预热温度越高，氧含量越低，燃料和氧化剂混合越不均匀，生成的烟炱就越多。不同种类的烟炱生成的趋势从小到大依次为：石蜡、单烯烃，二烯、苯、萘等。它不仅影响烟气的黑度和炉内辐射传热，而且向环境排放会对加重可吸入颗粒的污染。对烟炱生成机理的研究提出了“多环芳香烃中间体说”（polycyclic aromatic hydrocarbons-PAHs）、“乙炔中间体说”（polyynes）、“烃离子说”等。多环芳烃本身是生物毒性极强的典型有机致癌物质，具有强挥发性和吸附性。在通过大气进入人体呼吸系统甚至血液系统中，严重时将会导致器官组织发生畸变和突变。燃煤过程在一定条件下可以产生大量的PAHs。

因此，高温空气燃烧系统的超细颗粒排放特性有可能成为下一阶段研究的重点课题之一，尤其是在我国的工业条件下，更值得引起必要的重视。

4.3 关于实际工业炉窑的 NO_x 排放问题

发展高温空气燃烧技术的另一个重要的环节是必须对我国工业炉窑实际的 NO_x 排放状况有一个比较明确的了解。同时还应当根据燃料市场和工业炉行业的发展对 NO_x 排放变化趋势有一个前瞻性的认识。这样才能深刻认识高温空气燃烧技术对改善我国环境污染的重大意义。

由于我国的工业污染主要集中在城市，城市的污染物排放量占全国污染物排放量的 80%。目前 NO_x 的污染已经成为城市中大气污染的主要成分之一。NO_x 的主要排放源分为移动排放源和固定排放源。作为移动源的机动车尾气排放已经得到了控制，而作为固定源的大量工业燃料加热炉则没有得到足够的重视。

表 3 给出近几年对北京近百座大中型工业炉

的初步调查结果，可见 SO₂ 和 NO_x 的排放都很高，全国也基本上都处于这一水平，甚至更差。

表 3 北京市工业炉窑污染物排放情况^[14]

	燃煤炉	燃油炉	燃气炉
热效率 (%)	18.2	30.8	50.5
过量空气系数	2.97	3.56	1.9
粉尘排放浓度超标(mg/m ³)	2331	445.7	321
NO _x (ppm)	404	429	287
SO ₂ (ppm)	345	48	242

我国现行的工业炉窑污染物排放国家标准 (GB9078-1996) 是 1996 年制定的。由于当时城市大气中 NO_x 污染状况还没有引起人们的足够的重视，同日益严格的机动车尾气排放标准相比，工业窑炉的相关标准制定得相对宽松。因此，在这部标准中除了涉及烟(粉)尘和 SO₂ 等污染物的排放外，尚没有关于 NO_x 的规定。这已经无法满足快速发展的城市环境保护的要求了。

因此，有必要对我国目前工业燃料加热炉的 NO_x 排放状况进行一次较为全面的调查研究，为国家尽早制定工业炉窑 NO_x 排放标准提供必要的参考数据，也为在我国全面推广应用高温空气燃烧技术进行前期准备工作。

已经展开的研究思路和方法是，选择具有代表性的企业进行调查和检测。选择不同建造时期、不同行业、不同技术水平的具有代表性的炉型进行 NO_x 排放的实地测量，并对取得的数据进行分析研究；同时还要对进口炉型和国产炉型进行比较，以求对全国工业窑炉的 NO_x 的排放现状有一个较为全面的了解。

研究分阶段、有重点和针对性地进行。在第一阶段，以研究占工业窑炉总数的 20% 的燃气和燃油窑炉的 NO_x 排放为主。由于我国天然气的需求量逐年上升 (图 14)，这将逐渐改变我国工业窑炉煤炭和焦炭消耗量占其能源总消耗量的 71.56%^[14] 的能源结构。据了解，设备大型化和燃用清洁燃料代

表着今后我国炉窑工业的发展方向。燃煤炉窑尽管数量大，但规模小，且大多分散城市边缘，而不占据主导地位。因此，在取得第一阶段研究成果后，是具体情况对燃煤窑炉进行适量研究。

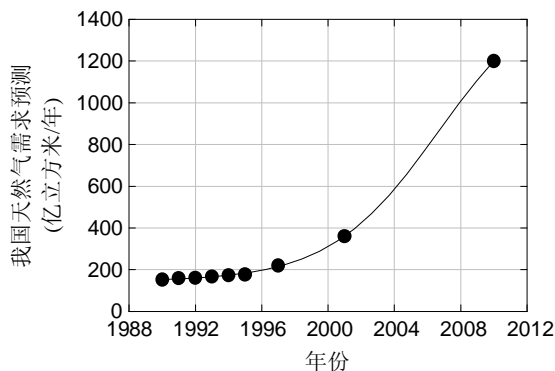


图 14 我国天然气需求预测^[13]

建议无论是高温空气燃烧技术研发单位还是使用部门，都应当注重该技术投入使用前后的 NO_x 排放的变化。从现在起注意积累相关数据，创立具有前瞻性的业绩，必将为企业和社会带来巨大效益。

五. 应用高温空气燃烧技术的经济性分析

5.1 应用实例分析

这里以某钢铁公司的窑炉为例，分析其采用高温空气燃烧技术改造后的经济效果，合理解决高炉煤气再利用的问题。

目前，钢铁企业中普遍存在气体燃料结构不平衡的现象。所用燃料绝大多数都是自产的煤气。按热值高低排列的煤气种类依次为焦炉煤气 (5.694 × 10⁴ kJ/m³)，发生炉煤气 (2.554 × 10⁴ kJ/m³) 和高炉煤气 (1.549 × 10⁴ kJ/m³)。焦炉煤气成本较高和产量远远少于后两种，多用于比较重要的工序中。炉窑炉温大多处于 1100-1200℃ 之间，部分工艺要求的炉温更高，是采用现有燃烧技术单纯燃烧高炉煤气所无法达到的。高炉煤气着火点高，点火困难，炉温要在 900℃ 以上才能稳定地燃烧，因此易于发生熄火，安全可靠性能差，给窑炉热工操作造成很大

困难。人们认定它是一种劣质燃料，使用价值不高，而把它用作辅助燃料^[15]。于是，就出现了品质好、热值高却产量较少的焦炉煤气不够烧，而大量低热值高炉煤气白白放掉的尴尬局面。既造成了很大的能源浪费，又严重污染了周围的环境。

我国目前高炉煤气的发生量已经超过 1570 万吨标准煤/年，占全行业总能耗量的 12% 以上。但放散率居高不下，重点企业平均超过 13%，地方骨干企业为 17%。因此，如果引入高温空气燃烧技术，一方面可以通过对煤气和空气进行双预热，达到高空气预热温度 (>1100℃)，就可以实现高炉煤气的稳定燃烧和在利用；另一方面，对现有燃气燃料炉进行改造，就可以取得巨大的经济效益。

以某公司为例：该公司煤气系统由高炉、焦炉、发生炉三种煤气组成，分别来自 4 座高炉、3 座焦炉和煤气厂及锻钢厂煤气发生炉。其中两座高炉的煤气放散率为 45.83%，约为 55000 Nm³/h，但新投产的快锻环形炉每年却要外购重油 3200 吨，成为公司在能源供应方面最突出的问题。如果将放散的高炉煤气全部利用，所产生的热量相当于 20.3 吨燃料油/h（油的发热量按 41868 kJ/kg 计），可免除每年在重油上的花费。

该公司拥有各种燃气燃料炉 240 多台（套）。气体燃料主要是焦炉煤气、高炉煤气、发生炉煤气和混合煤气等 4 中。按照公司 1999 年的能耗水平计算，当年总的能源消耗量为 299 万吨标准煤，其中的燃料炉直接燃料消耗量为总能耗的 60%，即 179.4 万吨标准煤。按照 1998 年能源平均价格 491 元/吨标准煤计算，燃料炉所需燃料的费用为 88085.4 万元/年。

若将公司所有燃料炉进行高温空气燃烧技术的全面改造，使燃料节约率达到 50% 以上，将节省燃料 299×60%×50%=89.7 万吨标准煤，所节省的燃料费用为 89.7×491=44042.7 万元人民币，约相

当于公司一年销售收入的 1/5 左右。

以公司的锻钢分厂三号加热炉为例。这是一座实炉底推钢式连续加热炉，这种炉型在全国钢铁行业中应用十分广泛，是目前窑炉技术水平的代表。在国外也有在这种炉型上进行高温空气燃烧技术改造成功的范例。由于整台炉子没有必要的仪表检测和调节系统，采用的燃烧器是喷射式的烧嘴，无烟气的余热回收装置，因而能耗很高。

这台炉子的技术改造费用参照国内外相应的技术改造费用制定。应用高温空气燃烧技术导致在炉体结构方面的施工量与常规技术改造相差不多，故按照常规技改费用的 120% 计算。考虑到新技术改造的不确定性，其它（预备）费用按照常规技改费用的 200% 计算^[16-17]。具体数据见表 4-表 6。

表 4 三号加热炉有关数据

名称	单位	数据
炉型	-	推钢式连续加热炉
加热炉用途	-	钢坯、锭锻造前加热
钢坯、钢锭装炉温度	℃	室温
钢坯、钢锭加热温度	℃	1150-1250
炉子产量	t/h	3.5
炉子有效尺寸	mm	15700×3000
燃料种类和热值	kJ/m ³	发生炉煤气，6100
煤气压力	Pa	2000
燃料消耗量	m ³ /h	约 1700
空气消耗量	m ³ /h	1255
烟气量	m ³ /h	2010
换热器	-	无
烧嘴型号和数量	℃	喷射式烧嘴/10 台
热效率	%	28.3
单位能耗	kg 标准煤/吨钢	102.0

表 5 采用高温空气燃烧技术的改造费用

费用	单位	数值
建筑工程费用*	万元	20
安装工程费用	万元	15
新型燃烧器	对	8
新型燃烧器价格	万元/对	17
新型燃烧器总费用	万元	17×8=136

预备费用	万元	26
投资总计	万元	197

* 依据冶金工业部 1994 年《冶金工业概算定额（指标）》

表 6 窑炉改造前后的数据比较

名称	单位	改造前	改造后
窑炉热效率	%	28.3	70
燃料消耗量	m ³ /h	1700	687 ^①
发生炉煤气价格 ^②	元/GJ	20	20
窑炉运行时间	h/日	20	20
燃料消耗费用	元/日	4148 ^③	1676.3 ^④
燃料节省费用	元/日	-	2471.7 ^⑤
投资回收时间	日	-	797

- ① 1700×0.283/0.7=687 m³/h;
- ② 厂内的价格;
- ③ 1700×6100×10⁻⁶×20(元/GJ)×20 h/日=41480 元/日;
- ④ 687×6100×10⁻⁶×20(元/GJ)×20 h/日=1676.3 元/日;
- ⑤ 4148-1676.3=2471.7 元/日
- ⑥ 197 万元/2471.7=797 日

也就是说，使用高温空气燃烧技术改造锻钢厂的三号加热炉后，仅燃料费用一项每年可节省 90 多万元，约 26 个月收回投资，经济效益十分明显。以上估算，仅仅考虑了应用先进技术提高炉窑热效率所带来的效益。事实上，如果把由此产生的环保效应（如低 NO_x 排放和低热值煤气放散）和炉温均匀对产品品质的提高综合考虑，所产生的效益将更加显著。

5.2 企业的环境保护现状

该钢铁公司几乎全部的燃料炉在设计时都不考虑 NO_x 的排放控制问题。在 240 多台燃用气体燃料的窑炉中，只有一台中板坯加热炉使用的燃烧器注意到了这个问题。据说烟气中 NO_x 的含量可以降到 100ppm 左右，但自从建成投运至今，一直没有进行过实际的测量。热连轧厂的一台步进式加热炉为日本淘汰下来的二手设备，年产量 150 万吨，技术水平相当于目前国际上七八十年代的水平，估计注意到了 NO_x 问题。由于加热炉炉温一般都在 1100~1200℃ 以上，虽然从来没有实地测量过 NO_x

排放大小，但烟气不经任何处理就直接排放到大气中。可以推断 NO_x 污染的严重程度。根据对其它一些钢厂窑炉的 NO_x 排放情况估计，其燃料炉 NO_x 的排放量应该在 2000—3000ppm 以上。每年需要消耗的气体燃料为 179.4 万吨标准煤，这些燃料全部燃烧后将产生 1794 千万立方米的烟气，按其中的 NO_x 浓度为 2500ppm，该厂每年向大气中排放的 NO_x 为 0.4485 亿立方米。

如果用高温空气燃烧技术进行全面改造，使烟气中的 NO_x 含量降低到 100ppm 以下，将产生很好的环保效果。

我国已经对 SO₂ 规定了排放标准，并且对超标排放的企业和单位收排污费。随着我国环保力度的加大，制订合理的 NO_x 排放标准，并像对待 SO₂ 排放那样，对排污单位也将收取排污费，本技术的经济性就更加明显，大大有利于我国工业炉窑的改造和高温空气燃烧技术的推广。

六、应用与研究趋势

目前，高温空气燃烧技术除了继续在工业加热炉领域推广应用外，已经开始向其他领域扩展，显示出方兴未艾的趋势。

在应用领域，提出了新型高温空气燃烧锅炉^[18]、高温空气气化工工艺^[19]等新思路。在研究领域，除了继续深入研究高温低氧燃烧过程的化学反应特性、燃料裂解特性、热辐射特性和 NO_x 排放特性外，进一步提出了开展对高温空气燃烧技术与高温温差发电一体化系统^[20]、蜂巢蓄热体全特性以及抗灰污特性、高温低氧燃烧中痕量污染物与超细颗粒排放等问题的研究目标。这些都是结合我国国情提炼出的课题，有利于高温空气燃烧技术的长远发展。

6.1 新型高温空气燃烧锅炉

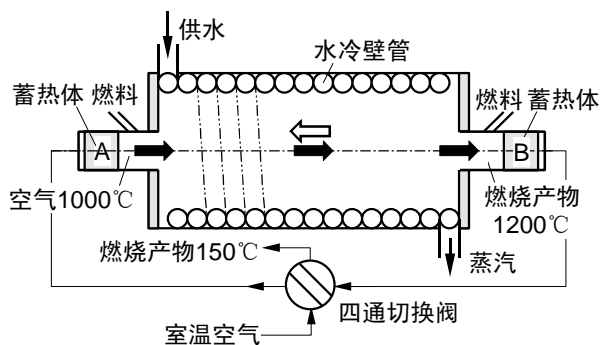


图 15 采用高温空气燃烧技术的新型锅炉原理

这是将高温空气燃烧技术与传统锅炉技术相结合的新思路 (图 15)。利用新型燃烧技术具有火焰体积大、温度场均匀、高效蓄热和空气预热、超低 NO_x 排放的特点, 在类似于直流锅炉上成对安装带有高效蜂巢蓄热体的蓄热式燃烧器 (烧嘴 A 和 B)。锅炉水管采用水冷壁结构均匀密布在炉膛四周。在稳定工况下, 两对燃烧器交替工作和蓄热, 完成燃烧和能量回收的过程。燃烧释放的大部分热量以辐射为主的形式与水冷壁管水换热, 产生高温高压蒸汽。由于蓄热式燃烧器具有类似于燃料分级燃烧的特点, 与炉膛结构相匹配可以实现对 NO_x 排放的有效控制。

与传统锅炉相比, HiTAC-锅炉具有如下特性:

(1) 换热效率提高: 常规锅炉采用空气预热器和省煤器回收烟气余热, 效率比较低, 排烟损失大。新性锅炉采用高效蜂巢蓄热体可使余热回收率达到 80% 以上。高温低氧燃烧形成的火焰体积成倍增

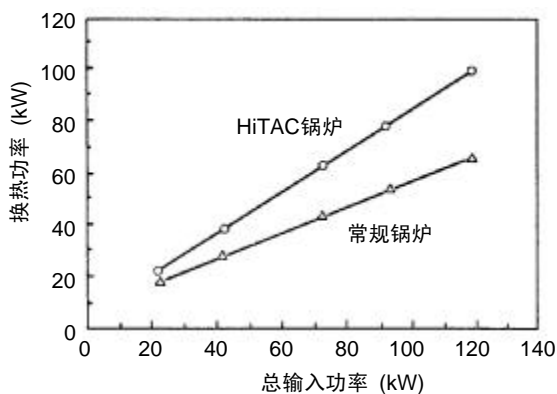


图 16 HiTAC 锅炉与常规锅炉的换热效率比较

大, 炉内温度分布均匀, 温差可以控制在 ±5°C, 辐射能力因燃料裂解而大大增强, 使高温烟气与水冷壁换热得以明显改善, 换热效率显著提高 (图 16)。

(2) 体积大大缩小: 由于烟气平均温度提高, 根据斯蒂芬-波尔茨曼定律 $E_b = \sigma_b T^4$ 可知, 炉内辐射换热因为温度升高和燃料裂解等因素而强化。研究表明, 仅依赖辐射换热就可提供与常规锅炉相当的热输出。此外, 省去了常规锅炉的对流换热段, 因而体积可以缩小很多。

(3) 污染显著降低;

(4) 燃料适应性范围扩大: 能够燃用低热值燃料, 不发生点火困难和熄火问题, 可应用于许多工业部门, 有效地解决生产过程中产生的副产品燃气的利用问题。

(5) 易获得高温高压蒸汽: 由于水冷壁接受辐射传热, 近壁区因高温低氧燃烧呈还原性气氛。因此, 换热效率高, 水管腐蚀小, 发生炸裂的潜在危险大大减少。

综合以上特点, 经济效益提高是显而易见的。

6.2 高温空气气化工艺

作为新型的高温 (>1000°C) 空气煤气化联合工艺, 目的是要发展一个从煤、生物质和垃圾废弃物等各种固体燃料中提取能量和资源的系统, 无论尺寸大小, 都可以同时赢得良好的经济效益和环境效益。新工艺不仅要求有更高的产气率, 合成气热值更高, 污染物排放量低、易于处理, 而且要求具有更高的经济性, 容易为发展中国家所接受。这就是本文在概述中提到的“高温空气气化-多级焓提取技术” (HTAG-MEET)。

我国 65% 的煤被直接燃烧用于发电、产生蒸汽和供热, 已经造成了严重的环境污染。近些年发展起来的垃圾直接焚烧技术, 在无垃圾分类的情况下, 所引起的二恶英一类物质的排放已经成为一个

潜在的污染源。在国外，随着环保法规要求越来越严格，垃圾焚烧和填埋也就变得越来越困难和昂贵。据测算，到 2030 年，我国煤的总消耗量将从现在的 10 亿吨增加到 40 亿吨，其中通过煤的直接燃烧提供能源占绝大部分，而先进的煤气化和液化技术消耗的煤量仅占 12.5%。因此，迫切需要大力发展新的气化工艺来改变煤和其它固体燃料不合理利用的现状，满足经济和环保的双重要求。

虽然目前煤气化技术已经得到广泛使用，如 IGCC 的例子。但除了生产民用燃料煤气和化工合成原料气的常规工艺外，还没有一种生产工业和发电用燃料的高温 (>1000℃) 煤气化工艺具有明显的吸引力，适合在中国推广应用。原因在于其基本思路还局限于常规气化的范围里，因此工艺成本高、经济性低。

新型高温空气煤气化工艺有可能发展成为一项最有前景的新技术。

图 17 给出了这种气化工艺的基本流程。它包含高温空气发生器，气化炉和煤气净化三个主要环节。其主要特征就是将常规工艺中靠部分煤燃烧加热的过程和气化过程分开在高温蒸汽/空气发生器和气化炉两个反应器内进行，用热发生器取代煤的部分燃烧，提供气化所需要的热量。煤或其它固体物料在 1000℃ 以上的高温下气化，生成高温合成气，随后在余热锅炉中冷却并经常规煤气净化技术净化，再分成两部分燃料气，分别用于高温蒸汽/空气预热过程和供给后续动力机械如燃气轮机等进行发电、供热等。余热锅炉提供的蒸汽与空气混合后一道被加热，并用作为气化介质，可以抑制气化过程中烟炱 (soot) 的形成。蒸汽在空气中摩尔分数通常取 10~20%。锅炉产生的高温蒸汽则可以供给其它工业过程使用。这种工艺采用液态排渣方式，易于回收如铁、铜、铝等金属、硫分、氯、重金属等各种成分。

高温空气发生器提供 1000℃ 以上的高温空气 (图 18)，而不是烟气。也采用一对蜂巢蓄热体作为余热回收装置。合成气和空气以大约 30 秒的切换周期交替进入装置内燃烧，所产生的高温烟气通过一侧蓄热体时释放出热量，温度降至 150℃ 以下排放。室温空气是在通过一侧被加热的蓄热体时迅速升温到 1000℃ 以上，并分成两股，一股作为气化介质提供给气化炉使用，另一股则用于合成气燃料的燃烧来加热另一侧的蓄热体。为了取得两侧蓄热体的热平衡，燃烧时还需要附加一部分的空气。

高温空气发生器的显著优点是只需要控制低温部件的运行，而不必为输送预热后的高温空气设置高温阀门系统。除蜂巢蓄热体切换时有 2-3% 的微小波动，其流量基本保持稳定。

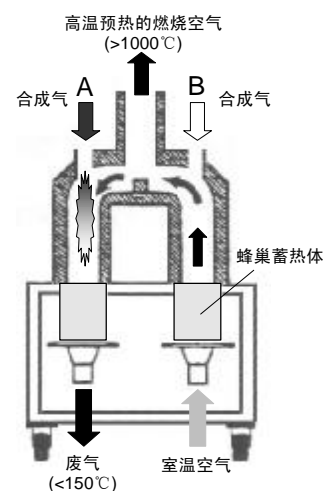


图 18 高温蒸汽/空气发生器

与传统的煤气化工艺相比，由于减少了煤的部分燃烧比例，新工艺产气率高；对于同样的热量需求，空气流量低，因而减少了合成气中的氮一类不

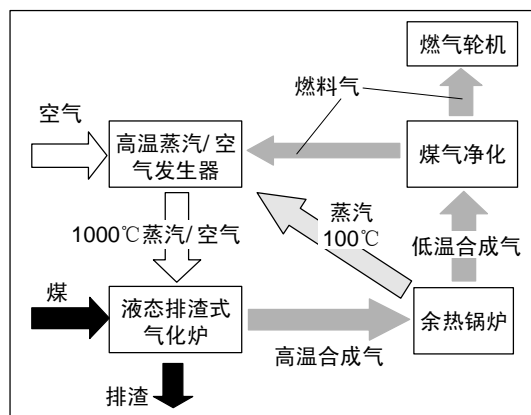


图 17 高温空气煤气化工艺流程图

可燃物质，热值得以提高。

焦油在气化过程中的处理往往比较困难。但在新工艺中，它会在高温条件下分解而转变成甲烷（ CH_4 ），不仅处理环节可以省略，而且提高了合成气的热值。

根据二氧化碳（ CO_2 ）在高温下可以分解为 CO 和 O_2 的特性，新工艺还可以从燃气轮机等后续燃烧设备的排气回送部分烟气，对 CO_2 加以利用并减少总排放量。

综上所述，新气化工艺的显著优点如下：

(1) 使生产中高热值合成气成为可能，而在常规 IGCC 过程中只有用纯氧才能达到同样的热值水平。

(2) 同样的气化温度条件下过量空气量低。使需要净化的合成气量不足完全燃烧的一半，就可以有效地减小煤气净化设备的尺寸，降低净化费用。

(3) 易于在空气加入蒸汽或其它气体，形成混合气化介质。

(4) 可处理劣质煤、城市垃圾、生物质以及其它劣质燃料。

(5) 热力 NO_x 的生成得到有效抑制，合成气中的燃料 NO_x 如 NH_3 和 HCN 可以通过湿法净化工艺脱除，环保效益很好。

(6) 灰分可转变成无害的熔融灰渣。

(7) 高温燃烧和高温气化可大大减少二恶英生成，烟气在蜂巢蓄热体中的快速冷却也有利于降低其排放水平。

(8) 新型高温煤气化工艺应用到燃气-蒸汽联合循环技术中，可实现电厂高效、可靠和低费用运行。据初步估计，这种系统的总体热效率在 40—50% 之间。

6.3 高温空气燃烧技术与高温温差发电一体化系统

这是我国学者首次提出了一种高温空气燃烧技术应用的新课题。

高温温差发电的原理是利用固体半导体材料的热电效应，将高温热源的热量直接转化为电能。因此，这种发电系统的关键首先是高温热电材料，其次是高温热源品质及其与热电材料之间优良的换热性能。解决了这三方面的问题，将形成具有我国自主知识产权的重要成果，填补我国在这个领域的空白。

该系统的特点是利用了高温温差，来大幅度提高它的热电转化效率；并以静态方式运行，具有高效、清洁、低污染、低噪音、寿命长、少维护的优越性。目前成熟的应用范例有，利用系统的小型化和优良的隐蔽性能，制成了军事通讯装置电源；利用放射性热源制成超小型超稳定永久电源，与心脏起搏器一道植入人体，保证了起搏器长期可靠的运行，解决了因供电故障而危及生命的问题。类似的装置还用作航天器内部仪表的电源，替代太阳能电池板，避免了宇宙尘埃的破坏。在工业领域，这项技术还被用作垃圾焚烧炉中的热能利用。由于温差发电系统的优越性，国际上积极开展了这项技术在许多领域里的应用研究和开发，普遍认为该技术本身以及材料的研究具有十分广阔的前景。

高温热电材料一直是国际研究的热点，并不断取得突破。研究的目的是寻求材料优值高、发电效率高、经济性好的热电介质。因此，发展热电材料被认为具有类似于研究高温超导材料的重要意义。

利用高温空气燃烧技术的高温和低污染的特征，作为新型高温温差发电系统的热源，通过一体化和优化研究设计，可以使该系统成为较理想的电源。HiTAC 系统的均匀温度场特性恰恰适应了温差发电系统对热源温度分布的特殊要求。为了以上目的，要求在深入认识高温低氧燃烧机理的基础上，针对温差发电系统的高温、小型的特殊性和对优良传热性能的严格要求，研究高温热源的特性以及如何与高温温差发电系统进行一体化集成的问题。其

研究结果必将为具有高温过程的众多工业领域开辟新的节能途径产生极大的促进作用，还可将这种发电系统发展成高效利用太阳能资源的一项新型可再生能源应用技术。

七、结论

在过去的两年中，高温空气燃烧技术在我国的应用与发展已经取得了初步成果。为了跟上国际发

展步伐，开创适合我国国情的发展方向和道路，必须注重技术应用的前瞻性和战略性，避免急功近利的行为。要在节能、能源综合利用和环境保护密切结合的基础上，针对我国的特殊情况和问题，开展基础和应用研究。这就要求我国的政府部门、工业设计和应用部门以及高等院校更加密切地进行合作，使高温空气燃烧技术在我国得到健康长久的发展和更加广泛的应用。

参 考 文 献

1. 杨永军, 武立云, 薛海涛, 王磊, 张益钊: “新型蓄热燃烧系统的实验研究”, 工业加热, 2000年第4期, 第16-19页
2. T.Fujimori, D. Riechelmann, J. Sato: Effect of Liftoff on NOx Emission of Turbulent Jet Flame in High-Temperature Co-flowing Air, Proceedings of the 27th International Symposium on Combustion, 1998/pp1149-1155
3. T.Fujimori, Y. Hamano, J. Sato: Radiative Heat Loss and NOx Emission of Turbulent Jet Flames in Preheated Air up to 1230K, Proceedings of the 28th International Symposium on Combustion, Edinburgh, UK, 2000
4. NKK: “蓄热式烧嘴加热系统概要及其在钢铁设备上的应用”, 中日钢铁节能技术研讨会发言稿资料集, 1999年7月
5. 须藤淳、多田健: “蜂窝型蓄热式燃烧系统的开发和应用”(译文), 《工业炉》, 1999年第2期, 第50页
6. 李伟, 祁海鹰, 由长福, 李宇红, 梁栋, 徐旭常: “蜂巢蓄热体传热性能的数值研究”, 已为2001年《工程热物理学报》接受, 待发表
7. 李伟, 祁海鹰, 李宇红, 由长福, 梁栋, 徐旭常: “蜂巢蓄热体的稳态传热特性和最佳换向时间”, 2000年全国工业炉及热电学术会议论文集, 大连, 第366-372页,
8. 李宇红, 祁海鹰, 苑皎, 徐旭常: “预热温度影响甲烷高温空气燃烧特性的数值分析”, 《工程热物理学报》, 第22卷第2期, 2001年3月, 第257-260页
9. 祁海鹰, 李宇红, 由长福, 苑皎, 徐旭常, “高温低氧燃烧条件下氮氧化物的生成特性”, 已为2001年《燃烧科学与技术》接受, 待发表
10. 侯长连, 胡和平, 董为民, 杨晓音, 巫嘉谋, 彭和跃, 王均: “我国高效蓄热式工业炉的现状及其发展”, 2000年全国工业炉及热电学术会议论文集, 大连, 第78-83页,
11. Hsiao T, Yang W, Jiang S, Zhou J. Experimental Investigation and Numerical Simulation of HiTAC Flames and Flow Phenomenon at its Switching Moment. Proceedings of 2nd International Seminar on High Temperature Combustion in Industrial Furnaces. January 17-18, 2000, Stockholm, Sweden
12. Gupta A K. Flame Characteristics and Challenges with High Temperature Air Combustion. Proceedings of 2nd International Seminar on High temperature Combustion in Industrial Furnaces. January 17-18, 2000, Stockholm, Sweden
13. 宋武成: “中国在21世纪开发利用天然气的发展战略”, 《天然气工业》, 第19卷第4期
14. 梁栋: 《高温空气燃烧技术在中国的可行性研究》, 清华大学毕业论文, 2000年
15. 李树德: “中国钢铁企业工业气体的现状和发展趋势”, 《低温与特气》, 1999年3月
16. 张先棹, 尹丹模: “工业炉的节能技术及其计算(上)”, 《工业炉》, 1999年2月。
17. 张先棹, 尹丹模: “工业炉的节能技术及其计算(下)”, 《工业炉》, 1999年5月。
18. H. Kobayashi, K. Kawai, K. Yoshikawa: Numerical Simulation of High Temperature Air Combustion Boiler, CREST, Proceedings of the 3rd International Symposium on High Temperature Air Combustion and Gasification, Yakohama, Japan, March 7-9, 2000, pp A5-1-7
19. K. Yoshikawa: Recent Progress and Future Prospect of the CREST MEET Project, CREST, Proceedings of the 3rd International Symposium on High Temperature Air Combustion and Gasification, Yakohama, Japan, March 7-9, 2000, pp A1-1-9
20. 祁海鹰: 高温空气燃烧技术与高温温差发电一体化系统, 清华大学基础研究基金项目, 2001年
21. 2000年全国工业炉及热电学术会议论文集, 大连.