

[19] 中华人民共和国国家知识产权局

[51] Int. Cl.

F23C 5/32 (2006.01)

F23C 6/04 (2006.01)

F23L 7/00 (2006.01)



[12] 发明专利说明书

专利号 ZL 03815931.7

[45] 授权公告日 2007 年 10 月 17 日

[11] 授权公告号 CN 100343574C

[22] 申请日 2003.5.13 [21] 申请号 03815931.7

[30] 优先权

[32] 2002. 5. 15 [33] US [31] 60/380,818

[86] 国际申请 PCT/US2003/014751 2003. 5. 13

[87] 国际公布 WO2003/098024 英 2003. 11. 27

[85] 进入国家阶段日期 2005. 1. 5

[73] 专利权人 普莱克斯技术有限公司

地址 美国康涅狄格州

[72] 发明人 H·科巴亚施 L·E·布尔三世

D·R·汤姆普森

[56] 参考文献

CN1151002A 1997. 6. 4

CN1324999A 2001. 12. 5

US5291841A 1994. 3. 8

US6030204A 2000. 2. 29

US6357367B1 2002. 3. 19

审查员 钟德惠

[74] 专利代理机构 中国专利代理(香港)有限公司

代理人 郭广迅 段晓玲

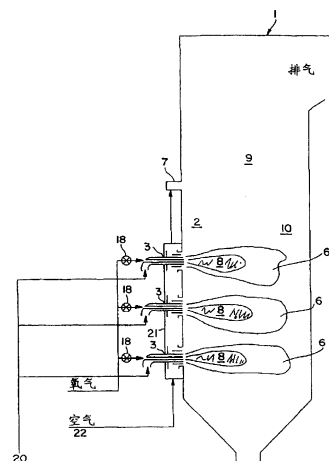
权利要求书 4 页 说明书 19 页 附图 8 页

[54] 发明名称

低 NO_x 燃烧

[57] 摘要

通过将少量的氧气加入燃料料流中而形成较少的 NO_x 来实现烃液体和固体的燃烧。



1. 一种降低 NO_x 释放量的燃烧方法，包括：

提供燃烧装置（1），该装置具有初级燃烧区（10）和烧除区（9）；
经由燃烧器（3）将空气和含有键合氮的无水燃料加入所述初级燃烧区（10）中，其中该无水燃料选自雾化烃液和粉末烃固体；和
在具有富燃料区（8）的初级燃烧区（10）内的火焰（6）中燃烧该燃料，同时

通过在从所述燃烧器（3）排出所述燃料时将氧气直接注射入所述初级燃烧区（10）内的所述燃料中或通过将氧气加入经由所述燃烧器（3）加入的空气中，将氧气加入到所述燃料中，以使氧气在所述富燃料区（8）中与所述燃料燃烧，其中所述氧气的量小于完全燃烧所述燃料所需的化学计算量的 20%，并调节经由所述燃烧器（3）加入的空气量以使在所述初级燃料区（10）中的化学计量比是 0.6-0.99，

和将空气从非所述燃烧器（3）的来源（7）加入到所述烧除区（9）中，其含有足量的氧气以使加入所述装置（1）中的氧气总量至少是完全燃烧所述燃料所需的化学计算量，和在所述烧除区（9）中燃烧来自所述初级燃烧区（10）的残余可燃物。

2. 根据权利要求 1 的方法，其中将燃料料流经由所述燃烧器（3）加入，并在燃料从燃烧器（3）排出时，将氧气经由位于所述料流中的空心喷枪（5）注射加入所述燃料中。

3. 根据权利要求 1 的方法，其中将燃料料流经由所述燃烧器（3）的环形燃料通道（4）加入，并将氧气经由围绕所述环形燃料通道（4）的环形通道（15）或被所述环形燃料通道（4）围绕的环形通道（5）注射加入到所述燃料中。

4. 根据权利要求 1 的方法，其中所述氧气直接经由喷枪（5）注射入所述燃料中，所述喷枪（5）在喷枪（5）的端部具有至少一个开孔（31），它沿着喷枪（5）的轴向排列。

5. 根据权利要求 1 的方法，其中所述氧气直接经由喷枪（5）注射入所述燃料中，所述喷枪（5）具有封闭端和至少两个在喷枪（5）端部附近的喷枪（5）周围的喷嘴（32）来径向注射氧气。

6. 根据权利要求 1 的方法，其中所述氧气直接经由喷枪（5）

注射入所述燃料中，所述喷枪（5）具有封闭端、至少两个在封闭端附近径向排列的喷嘴（32）和至少两个喷嘴（33），所述至少两个喷嘴（33）各自与氧气流入喷枪的方向的轴形成大于 0° 且小于 90° 的角度。

7. 根据权利要求 1 的方法，其中所述氧气直接经由喷枪（5）注射入所述燃料中，所述喷枪（5）具有封闭端和至少两个在喷枪（5）的封闭端附近的喷枪（5）周围的喷嘴（34），它们各自与氧气流入喷枪（5）方向的反向形成 $30-90^\circ$ 的角度。

8. 根据权利要求 1 的方法，其中所述燃料经由所述燃烧器（3）与空气一起以 50-150 英尺/秒的速度加入，和氧气以所述空气速度的 25-400% 的速度注射入所述燃料中。

9. 根据权利要求 1 的方法，其中任何经由所述燃烧器加入的二级和三级空气具有 0.6-2.0 的旋流数。

10. 根据权利要求 1 的方法，其中在所述富燃料区（8）中的化学计量比是 0.1-0.75。

11. 根据权利要求 1 的方法，其中在所述初级燃烧区（10）中的化学计量比是 0.7-0.85。

12. 根据权利要求 1 的方法，其中加入所述燃料的氧气量小于完全燃烧所述燃料所需的化学计算量的 10%。

13. 根据权利要求 1 的方法，其中经由所述燃烧器（3）加入的空气量被降低，使得初级燃烧区的化学计量比与不加入所述氧气到所述燃料时的化学计量比相比改变不超过 10%。

14. 一种降低 NO_x 释放量的燃烧方法，包括：

提供燃烧装置（1）；

经由所述空气动力学分段燃烧器（3）将空气和含有键合氮的无水燃料加入所述装置中，其中该无水燃料选自雾化烃液和粉末烃固体；和

在含有富燃料区（8）的火焰（6）中燃烧该燃料，同时

通过在从所述燃烧器（3）排出所述燃料时将氧气直接注射入所述富燃料区（8）内的所述燃料中或通过将氧气加入经由所述燃烧器（3）加入的空气中，将氧气加入到所述燃料中，以使所述氧气在富燃料区（8）中与所述燃料燃烧，其中所述氧气的量小于完全燃烧所

述燃料所需的化学计算量的 20%，并调节经由所述燃烧器（3）加入的空气量以使在所述富燃料区（8）中的化学计量比是 0.1-0.85，同时与在所述燃烧装置（1）中且没有所述氧气加入步骤但在其它相同条件下进行燃烧时的富燃料区的尺寸相比，保持或放大所述富燃料区（8）的尺寸。

15. 根据权利要求 14 的方法，其中将燃料料流经由燃烧器（3）加入，并在燃料从燃烧器（3）排出时，将氧气经由位于所述料流中的空心喷枪（5）注射加入所述燃料中。

16. 根据权利要求 14 的方法，其中将燃料料流经由燃烧器（3）的环形燃料通道（4）加入，并将氧气经由围绕所述环形燃料通道（4）的环形通道（15）或被所述环形燃料通道（4）围绕的环形通道（5）注射加入到所述燃料中。

17. 根据权利要求 14 的方法，其中所述氧气直接经由喷枪（5）注射入所述燃料中，所述喷枪在喷枪（5）端部具有至少一个开孔（31），它沿着喷枪（5）的轴向排列。

18. 根据权利要求 14 的方法，其中所述氧气直接经由喷枪（5）注射入所述燃料中，所述喷枪（5）具有封闭端和至少两个在喷枪（5）端部附近的喷枪（5）周围的喷嘴（32）来径向注射氧气。

19. 根据权利要求 14 的方法，其中所述氧气直接经由喷枪（5）注射入所述燃料中，所述喷枪（5）具有封闭端和至少两个在封闭端附近径向排列的喷嘴（32）和至少两个喷嘴（33），所述至少两个喷嘴（33）各自与氧气流入喷枪（5）的方向的轴形成大于 0° 且小于 90° 的角度。

20. 根据权利要求 14 的方法，其中所述氧气直接经由喷枪（5）注射入所述燃料中，所述喷枪（5）具有封闭端和至少两个在喷枪（5）的封闭端附近的喷枪（5）周围的喷嘴（34），它们各自与氧气流入喷枪（5）方向的反向形成 $30-90^\circ$ 的角度。

21. 根据权利要求 14 的方法，其中所述燃料经由所述燃烧器（3）与空气一起以 50-150 英尺/秒的速度加入，和氧气以所述空气速度的 25-400% 的速度注入所述燃料中。

22. 根据权利要求 14 的方法，其中任何经由所述燃烧器加入的二级和三级空气具有 0.6-2.0 的旋流数。

23. 根据权利要求 14 的方法, 其中在所述富燃料区 (8) 中的化学计量比是 0.4-0.75。

24. 根据权利要求 14 的方法, 其中所述氧气量小于完全燃烧所述燃料所需的化学计算量的 10%。

25. 根据权利要求 14 的方法, 其中经由所述燃烧器 (3) 加入的空气量被降低, 使得初级燃烧区的化学计量比与不加入所述氧气到所述燃料时的化学计量比相比改变不超过 10%。

低 NO_x 燃烧

发明领域

本发明涉及含有键合氮的烃燃料、特别是煤的燃烧。

发明背景

在美国和全世界越来越重视环境问题，导致日益增加的公众和法规压力来减少从锅炉、煅烧器和炉释放出的污染。一个倍受关注的污染物是“NO_x”（即氮的氧化物，例如但不限于 NO、NO₂、NO₃、N₂O、N₂O₃、N₂O₄、N₃O₄ 和它们的混合物），它们隐含在酸雨、地表臭氧和细颗粒形成中。

许多技术可以降低 NO_x 释放量。这些技术可以分成主要两类，初级和二级。初级技术通过控制燃烧过程来最小化或防止在燃烧区中形成 NO_x。二级技术使用化学品将燃烧区中形成的 NO_x 还原成分子氮。本发明是一种初级控制技术。

在初级控制技术中，不同的燃烧策略用于控制所谓的“热 NO_x”和“燃料 NO_x”。“热 NO_x”是通过氮分子 N₂ 主要在燃烧空气中于高温下氧化产生的。这是从天然气和不含化学键合氮物质的轻油释放的 NO_x 的主要来源。用于减少热 NO_x 的主要控制策略是降低火焰最高温度。燃料 NO_x 是通过在燃料中所含的含氮物质的氧化产生的，并且是从煤和重油的燃烧释放的 NO_x 的主要来源。本发明涉及控制燃料 NO_x 释放的改进方法。

用于燃料 NO_x 的初级控制技术通常称为分段燃烧，其中燃烧空气和燃料之间的混合要小心地控制以使 NO_x 的形成最小化。从燃料氮形成 NO_x 是基于从燃料挥发物和炭氮中的含氮物质形成 NO_x 和形成 N₂ 之间的竞争。富氧条件驱动朝向形成 NO_x 的竞争反应。富燃料条件驱动形成 N₂ 的反应。分段燃烧利用了该现象，通过小心控制空气和燃料的混合来形成富燃料区以防止形成 NO_x。为了降低 NO_x 的释放，富燃料区必须足够热以驱动 NO_x 还原动力学。但是，足够的热量必须从富燃料的第一阶段转变成炉热载荷以防止在第二阶段形成热 NO_x。

常规的低 NO_x 燃烧器（LNB）包括富燃料的第一区，它接近进料口，主要通过燃料和初级空气，及在一定程度上在该区域中混合的额

外二级或三级空气的混合和燃烧来控制。对于煤粉的燃烧，初级空气用于输送煤颗粒。

在第二区中，剩余的二级空气和任何三级空气与未燃烧的燃料和来自第一阶段的部分燃烧产物混合，并完成燃烧。对于分段燃烧的一个重要工艺要求是将足量的热从富燃料的第一阶段转变成炉热载荷以使来自第一阶段的燃烧产物冷却。较低的第二阶段温度帮助降低剩余含氮化合物向 NO_x 的转化和防止在第二阶段中形成热 NO_x 。

在空气动力学分段的 LNB 中，所有燃烧空气从相同的燃烧器入口或邻近燃烧器入口引入。最常见的低 NO_x 煤燃烧器结构是具有一系列用于煤/初级空气、二级空气和三级空气的环形通道。中心通道通常用于油枪或用于天然气以开始加热。二级空气和三级空气料流配备有旋流发生器形成旋流，从而为了火焰稳定性而形成循环区。调节空气速度和旋流以形成沿着燃烧器轴的较大的富燃料第一区，然后沿着炉纵向逐渐混合二级空气和三级空气。因为必须提供充足的空气速度以在炉空间内混合燃料和空气从而完成燃烧，所以难以形成非常大的富燃料区以为最大降低 NO_x 而提供足够长的停留时间。

尽管 LNB 是较便宜的降低 NO_x 的方式且在燃烧器设计中已经有许多进展，但是目前可用的方案仍然不能达到未决法规对于公用锅炉燃煤的 $0.15 \text{ lb (作为 } \text{NO}_2) / \text{MMBtu}$ 的释放限制。

本领域技术人员已经通过使用“过度燃烧空气”(OFA)的整体分段燃烧设计克服了空气动力学分段 LNB 的限制。OFA 被从一个燃烧器或一组燃烧器分别注入以提供大的富燃料初级燃烧区(PCZ)和烧除区(BOZ)，其中通过混合 OFA 和未燃烧的燃料及来自 PCZ 的部分燃烧产物的混合来完成燃烧。通常，OFA 入口与最近的燃烧器相距至少一个燃烧器入口直径，并与最远的燃烧器相距几个燃烧器入口直径。尽管燃料和空气的混合以及在单个燃烧器的燃烧器入口附近的局部化学计量条件与没有 OFA 的那些相似，但是大的富燃料 PCZ 是在燃烧器附近的燃烧空气混合区之外形成。由于 OFA 注射口的物理分离，在富燃料 PCZ 中的停留时间远远长于在空气动力学分段燃烧器的富燃料第一区中通常得到的时间。LNB 和 OFA 的入口的组合能够进一步降低 NO_x 释放。

低 NO_x 燃烧器和过度燃烧空气代表了一个比较成熟的技术，并且

在专利和档案文献中广泛讨论。已经提出了许多方法来提高 LNB 和 OFA 的效率并同时使不利影响最小，例如差的火焰稳定性和灰分中的碳含量增加。在这些建议中，两个建议是特别相关的：将空气预热到第一阶段，和将燃烧器转化成含氧燃料燃烧。

空气预热和含氧燃料燃烧都能提高分段燃烧的效率以通过提高初级燃烧区中的温度且不增加化学计量比来降低燃料 NO_x 。含氧燃料燃烧提供的额外优点是在富燃料区域中的较长停留时间，这是由于较少的气流，这表现在 NO_x 的释放降低。如上所述，分段燃烧使用富燃料阶段来促进形成 N_2 而不是 NO_x 。因为形成 N_2 的反应是动力学控制的，所以温度和烃残基浓度对于减少形成 NO_x 都是关键的。例如，如果温度高而残基浓度低，例如在未分段或温和分段的条件下， NO_x 的形成增加。当残基浓度高但温度低时，例如在深度分段的条件下，中间物质例如 HCN 向 N_2 的转化被延迟。当加入空气以完成烧除时，中间产物氧化形成 NO_x ，所以 NO_x 的净形成量增加。

Sarofim 等在 “Strategies for Controlling Nitrogen Oxide Emissions During Combustion of Nitrogen Bearing Fuels”，第 69 届 AIChE 年会，芝加哥，IL，1976 年 11 月中和其它人已经建议第一阶段动力学可以通过将燃烧空气预热到相当高的温度来提高。或者 Kobayashi 等（“ NO_x Emission Characteristics of Industrial Burners and Control Methods Under Oxygen-Enriched Combustion Conditions”，International Flame Research Foundation 9th Members' Conference, Noordwijkerhout, 1989 年 5 月）建议使用氧气代替燃烧空气也将提高动力学。当火焰温度通过燃烧器设计控制时，含氧燃料燃烧还通过基本上清除燃烧空气中的 N_2 来降低热 NO_x 的形成。在这两种情况下，净结果是在第一阶段的气体温度升高，导致 NO_x 的形成降低。另外，使用空气预热和含氧燃料燃烧使得第一阶段更深度地分段，且不会降低火焰稳定性。这进一步降低了 NO_x 的形成。

含氧燃料燃烧为 LNB 提供了另一个优点。Timothy 等（“Characteristics of Single Particle Coal Combustion”，19th Symposium (international) on Combustion, The Combustion Institute, 1983）显示当煤在富氧条件下燃烧时，脱挥发分次数显著减少，挥发物产率增加。这些实验是单颗粒燃烧实验，在高度贫燃

料条件下进行，这不会提供关于需要多少氧气在更现实的燃烧条件下来完成的信息。较高的挥发物产率表示在气相中的可燃物高于基线，导致更富燃料的气相，这抑制了从挥发性含氮物质形成 NO_x 。另外，燃料挥发物迅速点燃并将火焰固定在燃烧器上，这已经通过较低的 NO_x 形成表现出来。提高的挥发物产率还导致较短的烧除时间，因为留下较少的炭。

O. Marin 等在题为 “Oxygen Enrichment in Boiler” (2001 AFRC/JFRC/IEA Joint International Combustion Symposium, Maui, HI, 2001 年 9 月 9-13 日) 的论文中讨论了氧气用于煤燃烧的益处。他们提出在过烧空气 (在该论文中称为 “三级空气”) 中注射氧气以降低灰分中未燃烧的碳，或点燃损失 (Loss on Ignition, LOI)，且不会增加氮氧化物释放量。Marin 等报道的计算机模拟结果比较了基线空气情况和氧富集情况，在后一种情况下在三级空气 (也称为过烧空气) 中具有高速度的富氧流。根据 Marin 等人，“观察到在燃烧室中的传热增加 5%，以及炭燃烧量绝对增加 7%。” (第 8 页)。

美国专利 4,495,874 公开了初级和/或二级空气在煤粉燃烧燃烧器中的氧富集以提高锅炉燃烧高灰分煤粉的蒸汽速率。在实施例 4 中，公开了当燃烧高灰分煤时氧富集对 NO 释放的影响，说明向初级空气或同样向初级或二级空气中加入氧气开始使得在约 2% 富集 (定义为占总空气的 23% 氧气浓度) 下 NO 含量提高，但是在较高富集情况下在烟道气中的 NO 量显著降低。例如，在 4% 富集的情况下， NO 降低约 18-21%。但是当氧气仅仅加入二级空气中时，没有导致 NO 降低。实际上， NO 浓度升高了约 12%。

尽管现有技术描述一些分段燃烧和 LNB 的良好方案，但是几个实际问题限制它们的应用。首先，将燃烧空气预热到提高动力学所需的水平需要对系统和空气管道都进行一些改进。空气加热器和省热器区段必须改进以使进入的空气被加热到更高的温度，这可能需要改进蒸汽循环系统的其它部分。管道、风箱和燃烧器本身也必须改进以处理热空气。所有改进是昂贵的，并对锅炉操作有不利影响。

在锅炉中使用含氧燃料燃烧的主要障碍是氧气的成本。为了经济地使用氧气，通过提高工艺效率节省的燃料费用必须大于供应氧气的成本。对于高温操作，例如没有显著热回收的炉，这是容易实现的。

但是，对于更有效的操作，例如锅炉，使用含氧燃料燃烧达到的燃料节省通常远远低于氧气的成本。例如，如果典型的燃煤公用锅炉被从空气燃烧转化成氧气燃烧，则需要锅炉的约 15-20% 的功率输出来生产必要的氧气。显然，这对于大部分锅炉是不经济的。

因此，仍然需要一种在含有一种或多种含氮化合物的燃料（特别是煤）的燃烧中实现降低 NO_x 释放的方法，特别是一种可以在现有炉中实施且不需要大量结构改造的方法。

发明简述

本发明的一个方面可以认为是一种将现有燃烧装置改装的方法，是一种降低 NO_x 释放量的方法，包括：

提供燃烧装置，该装置具有初级燃烧区和烧除区；

经由燃烧器将空气和含有键合氮的无水燃料加入所述初级燃烧区中，其中该无水燃料选自雾化烃液和粉碎的烃固体；和

在具有富燃料区的初级燃烧区中在火焰中燃烧该燃料，同时

通过在从所述燃烧器排出所述燃料时将氧气直接注入所述初级燃烧区中的所述燃料中或通过将氧气加入经由所述燃烧器加入的空气中，将氧气加入到所述燃料中，以使所述氧气在富燃料区中与所述燃料燃烧，其中所述氧气的量小于完全燃烧所述燃料所需的化学计算量的 20%，并调节经由所述燃烧器加入的空气量以使在所述初级燃烧区中的化学计量比是 0.6-0.99，

和将空气从非所述燃烧器的来源加入所述烧除区中，其含有足量的氧气以使加入所述装置中的氧气总量至少是完全燃烧所述燃料所需的化学计算量，和在所述烧除区燃烧来自所述初级燃烧区的残余可燃物。

在本发明的方法中，将燃料料流经由所述燃烧器的环形燃料通道加入，并将氧气经由围绕所述环形燃料通道的环形通道或被所述环形燃料通道围绕的环形通道注射加入到所述燃料中。

在本发明的方法中，经由所述燃烧器加入的空气量被降低，使得初级燃烧区的化学计量比与不加入所述氧气到所述燃料时的化学计量比相比改变不超过 10%。

本发明的另一个方面可以认为是一种操作燃烧装置（不论是改装的或是体现了本发明特征的新构造的装置）的方法，其中该方法降低了 NO_x 释放量，包括：

提供燃烧装置；

经由空气动力学分段燃烧器将空气和含有键合氮的无水燃料加入所述装置中，其中该无水燃料选自雾化烃液和粉碎的烃固体；和

在含有富燃料区的火焰中燃烧该燃料，同时

通过在从所述燃烧器排出所述燃料时将氧气直接注入所述富燃料

区内的所述燃料中或通过将氧气加入经由所述燃烧器添加的空气中，将氧气加入到所述燃料中，以使所述氧气在所述富燃料区中与所述燃料燃烧，其中所述氧气的量小于完全燃烧所述燃料所需的化学计算量的 20%，并调节经由所述燃烧器加入的空气量以使在所述富燃料区中的化学计量比是 0.1-0.85，同时与在所述燃烧装置中没有所述氧气加入步骤但在其它相同条件下进行燃烧时的尺寸相比，保持或放大所述富燃料区的尺寸。

在关于含氧的氧化剂料流和燃料流的内容中使用的术语“化学计量比”表示在氧化剂料流和燃料流中的氧气与要将在构成该燃料流的物质中存在的所有碳、硫和氮全部转化成二氧化碳、二氧化硫和水所必需的氧气总量之比。

在这里使用的术语“富燃料”表示化学计量比小于 1.0。术语“贫燃料”表示化学计量比大于 1.0。

在这里使用的术语“键合氮”表示在分子中存在的氮，不包括氮气。

在这里使用的术语“无水”表示不是悬浮、溶解或分散在水中，以及不含有水，除了它不排除吸收的水或水合的水。

在这里使用的术语“初级燃烧区”表示在燃烧装置中的紧邻燃烧区出口的且被来自一个或多个燃烧器的一个或多个火焰大部分占据的区域。

在这里使用的术语“烧除区”表示在燃烧装置中位于初级燃烧区和烟道之间且在初级燃烧区中的火焰之外的区域，在其中注射入过度燃烧空气，并用过度燃烧空气燃烧来自初级燃烧区的残余燃料和可燃物。

在这里使用的术语“初级燃烧空气”表示在燃料和该空气被加入燃烧装置例如经由燃烧器口加入时已经与燃料混合的空气。

在这里使用的术语“二级燃烧空气”表示经由燃烧器的一个或多个入口加入燃烧装置、但是在该空气加入燃烧装置时还没有与燃料混合的空气。

具有二级空气入口的燃烧器可以具有额外的输送空气的入口，该额外入口到燃料进入燃烧器的入口点的距离大于到达二级空气入口的距离。在这里使用的术语“三级燃烧空气”表示经由这种额外入口加

入燃烧装置的空气。如果燃烧器还具有位于距离燃料入口点比三级空气入口更远的入口，则经由这种更远入口加入的空气称为“四级燃烧空气”。

在这里使用的术语“空气动力学分段燃烧器”表示这样的燃烧器，其中所有燃烧空气被从相同的燃烧器入口或邻近燃烧器入口引入，并能在这样的空气速度和流动方式的条件下操作，使得沿着燃烧器轴向形成较大的富燃料第一区，和然后沿着炉的纵向逐渐混合二级和三级空气。

在这里使用的术语“过度燃烧空气”（或“OFA”）表示从燃烧装置中一个或多个燃烧器分别注入燃烧装置的空气以提供大的富燃料初级燃烧区和烧除区，其中燃烧通过将 OFA 与未燃烧的燃料和来自初级燃烧区的部分燃烧产物混合来完成。

在这里，加入“氧气”，被加入的“氧气”，和在类似内容中使用的“氧气”，均表示含有至少 35 体积%氧气的气流。优选，氧气作为含有至少 50 体积%氧气的气流提供，更优选含有至少 80 体积%的氧气，甚至更优选含有至少 90 体积%的氧气。应该理解的是，这里涉及“氧气”的燃烧或反应指氧气本身。

附图简述

图 1 是进行本发明的装置的一个实施方案的横截面图。

图 2 是用于进行本发明的燃烧器的横截面图。

图 3a-3d 是用于根据本发明将氧气加入燃烧器的喷枪的横截面图。

图 4 显示了应用本发明降低 NOx 释放的实验室级实验结果。

图 5 显示了应用本发明降低 NOx 释放的中试级低 NOx 燃烧器实验结果。

图 6 显示了应用本发明降低 NOx 释放的工业规模级低 NOx 燃烧器实验结果。

图 7A 是可以使用本发明的另一种类型锅炉的横截面图，其中将燃料和氧化剂从不同入口切向加入炉中。图 7B 显示图 7A 所示炉的顶视图，显示燃料和氧化剂加入炉中的切向流动。图 7C 是从入口前面看过去的炉内部的前视图。

发明详述

下面将参考附图描述本发明，但是对附图的引用并不限制本发明的范围。

图 1 显示了燃烧装置 1，它可以是任何装置，其中燃烧在装置的内部 2 进行。优选的燃烧装置包括用于以常规方法产生蒸汽来产生电能的炉和锅炉（未显示）。

在燃烧装置 1 的侧壁或端壁中的每个燃烧器 3 将燃料、空气和氧气从其位于燃烧装置 1 外部的来源送入燃烧装置 1 的内部 2 中。合适的燃料包括烃液体，例如燃料油，还包括粉末烃固体，优选的例子是粉末煤或石油焦碳。

如图 1 且更详细地如图 2 所示，燃烧器 3 优选包括几个同心排列的通道，但是可以使用与此具有相同作用的其它结构。将燃料经由环形通道 4 加入燃烧装置 1 中，该通道同心地位于喷枪 5 周围，氧气经由喷枪 5 加入。优选，燃料从供应源 20 输送到一个或多个燃烧器 3，并通过燃烧器 3 推进到燃烧装置 1 的内部 2 中，这在液体例如燃料油的情况下通过合适的泵装置进行，而在烃固体例如煤粉的情况下通过常规设计的吹风机和推进器进行，它们通常在输送空气（它是初级燃烧空气）的协助下加入燃烧装置。液体烃燃料优选通过一个或多个常规设计的雾化喷嘴加入，从而将液体燃料作为离散的分散液滴与雾化空气一起加入燃烧室。有效量的通常约 1.5-2.0 lb 的初级空气用于输送 1 lb 的煤，这对应于完全燃烧烟煤所需的化学计量量燃烧空气的约 20%。对于燃烧重油，约 0.5-1.0 lb 的初级空气用于雾化 1 lb 的油。

参见图 2，燃烧空气 22 通过 FD 风扇供应到一个或多个风箱 21，并加入到一个或多个燃烧器 3 的空气通道中。二级燃烧空气 15 经由燃烧器 3 加入燃烧装置 1 中，优选经由在环形空间 4 周围同心排列的环形通道 11 加入，其中烃燃料经由环形空间 4 加入。优选的三级燃烧空气 16 经由燃烧器 3 加入燃烧装置 1 中，优选经由在第二空气通道周围同心排列的环形通道 12 加入。优选燃烧空气也经由过度燃烧空气入口 7 加入燃烧装置 1 中（参见图 1）。优选将氧气加入该装置的内部 2 中并与二级和三级燃烧空气隔开。也就是说，按照本发明经由燃烧器 3 加入的氧气优选在与燃料的燃烧中被完全消耗，在此之前氧气有在其加入燃烧装置 1 之前或刚好之后、特别是当不使用过度燃烧

空气时与二级和三级燃烧空气混合的机会。或者，仍然参见图 2，燃料可以经由环形通道 4 加入，经由被环形通道 4 围绕的喷枪 5 加入的氧气或氧气可以通过围绕环形通道 4 的通道 11 加入。

为了具有良好的空气动力学可调节性，优选的低 NO_x 燃烧器具有初级（燃料添加）、二级和三级空气通道。但是，可以使用仅有初级和二级空气进料的其它低 NO_x 燃烧器设计。在确定三个通道的最佳设置之后，二级空气旋流叶片和通道可以设计以形成与三通道设计大约相同的空气动力学混合特性。或者，可以使用具有额外（四级）通道的燃烧器（例如在美国专利 5,960,724 中描述的 RSFC™ 燃烧器）。

在根据本发明改装燃烧装置以降低在燃烧装置操作中形成 NO_x 之前，用于加入氧气的喷枪 5 并不存在。燃烧在烃燃料和燃烧空气中的氧气之间进行，形成火焰 6。在最接近燃烧器 3 端部的火焰区 8，也就是在烃燃料从燃烧器排出的地方，是富燃料区。在其周围的火焰 6 的区域较贫瘠，因为二级和三级燃烧空气尚未完全与燃料混合或反应。当进入燃烧器 3 的燃烧空气 22 的量降低并且足量的空气从过度燃烧空气入口 7 加入用于整体燃烧分段时，炉的整个较低区域，或者在过度燃烧空气入口 7 之下的初级燃烧区（PCZ）10 成为富含燃料的，除了接近燃烧器 3 的区域之外，在该区域，空气被注入且尚未完全与燃料混合或反应。

然后，在实施本发明方法时，加入喷枪 5。或者，用如图所示的燃烧器代替加入燃料和燃烧空气的燃烧器。

优选，空气也经由过度燃烧空气入口 7 加入燃烧装置 1 的内部，以使得初级燃烧区 10 不太贫燃料或更加富含燃料并提供额外的氧气来帮助达到燃料在烧除区 9 中的完全燃烧。经由燃烧器 3 加入的燃烧空气中的氧气与在入口 7 加入的空气中所含的氧气（如果使用的话）一起足以能完全燃烧燃料，并通常含有相对于完全燃烧燃料所需量而言 10-25 体积%的过量氧气。

优选的是，二级和三级燃烧空气在燃烧器 3 加入，从而围绕纵轴旋流，由此形成接近每个燃烧器的循环区并改进空气和燃料的混合。旋流可以通过公知的技术实现，例如提供在用于燃烧器的二级和三级空气流的环形通道中的转向器 13 和 14，它们将料流的流动方向引向所希望的旋流方向。优选提供高度旋流，优选 0.6-2.0 的旋流数，如

在“Combustion Aerodynamics” J.M. Beer 和 N.A. Chigier, Robert E. Krieger Publishing Company, Inc. 1983 中所定义。

在用过度燃烧空气实施本发明时, 优选经由燃烧器 3 加入的空气总量, 即初级、二级和三级空气的总和, 是完全燃烧所需的化学计量空气的 60-99%。最优选经由燃烧器 3 加入初级燃烧区的空气总量是完全燃烧所需的化学计量空气的约 70-85%。

在排出空气的喷嘴出口处, 初级、二级和三级燃烧空气的每个料流的速度优选是 50-150 英尺/秒。在排出氧气的喷嘴出口处, 经由喷嘴 5 注射的氧气的速度优选是初级空气速度的 10-900%, 更优选 25-400%。

实验已经显示优选的方法是将至少一部分燃料颗粒或液滴暴露在高浓度的氧气下, 与均匀富集整个燃烧空气相反。将氧气注入低 NO_x 燃烧器的风箱 21 中以将富集空气加入整个燃烧器 (包括关键的初级阶段空气) 的简单方式不能认为是有效的。

当使用化学计量空气的 20% 将纯氧气预先混合或快速混合入煤输送料流 (即初级空气料流) 并通过从二级或三级空气 (*) 取出化学计量当量的空气使得总燃烧化学计量比保持恒定在 1.15 时, 计算氧气在输送空气料流中和在总燃烧空气中的以下平均浓度, 假定空气是干燥的并含有 21% 氧气。

用氧气代替的化学计量空气的% (*)	在输送空气中的氧气浓度 (体积%)	在全部燃烧空气中的平均氧气浓度 (体积%)
0	21.0	21.0
5	24.9	21.7
10	28.5	22.5
15	31.7	23.4
20	34.7	24.3
25	37.4	25.4

(*例如 5 立方英尺 (cf) 的空气被 1.05cf 的纯氧气代替以得到相同量的氧气)

在这个例子中, 由于使用了少量的氧气, 即使当氧气仅仅与输送

空气混合时，也仅仅适度地增加了混合均匀的空气中的氧气浓度。优选方法是将氧气注入喷枪喷嘴尖端处的煤/空气输送料流中。在这种情况下，一部分煤颗粒与氧气射流混合，并局部形成煤/高氧气混合物的区域。与氧气与输送空气料流预先混合的情况相比，这些条件可以提供迅速点燃源的区域并促进早点燃和脱挥发分。

另一个优选的方法是从邻近煤料流的内部或外部环形空间注射氧气。在这种情况下，有利的富氧燃烧条件是在煤和氧气料流的边界上提供的。

当氧气与燃料流分别以高速度注射时，就像 Farmayan 等的情况，氧气射流可能被周围气体快速稀释，其作用被延迟。因此，氧气注射方法必须小心设计。

本发明通过这里所述的向进入的烃燃料流中加入氧气而改进，即减少了燃烧装置中 NO_x 的形成。更特别且优选的是，在燃料从燃烧器排出并进入燃烧装置 1 的内部 2 时，将氧气作为优选含有至少 50 体积%氧气、更优选含有至少 80 体积%氧气、最优选含有至少 90 体积%氧气的浓缩氧气流添加并直接加入烃燃料中。因此，固体燃料颗粒的至少一部分或液体燃料（当这种情况可能时）的液滴在含有高浓度氧气的气态气氛中进入燃烧装置和火焰 6 的富燃料区域。

当过度燃烧空气用于整体燃烧分段时，优选使用配有三个或四个独立空气通道的空气燃烧器，使用在燃烧器 3 中的气体通道内的合适分布器将氧气与初级或二级空气或两者预先混合。

氧气优选经由喷枪 5 或类似的进料管线加入，该进料管线能在一端开口通向燃烧装置 1，或者在一端封闭并在封闭端附近其周边上具有一个或多个开口，使得氧气经由这些开口直接流入从燃烧器进入燃烧装置的烃燃料中。

参见图 7A 和 7C，切向燃烧炉 1 包括用于将燃料注射入炉内部的开口和用于将燃烧空气注射入炉内部的开口的排列。通常，燃料开口和燃烧空气开口按照垂直列排列，彼此交替，如图 7A 和 7C 所示，其中用于注射燃料的开口 31 与用于注射燃烧空气的开口 32 交替。燃料在炉内部与燃烧空气燃烧。炉还配备有过度燃烧空气开口 7。

本发明还适合具有这种构造的炉，例如通过在一个或多个燃料开口中提供喷枪 5，然后将本文所述需要量的氧化剂在燃料从燃烧器排

出时加入到燃料中。氧气喷枪 5 还可以位于一个或多个燃烧空气开口中或者空气和燃料开口之外，并且氧气从这些喷枪朝向邻近的燃料料流注射。

图 3a 至 3d 显示了可以使用的各种喷枪构造。可以使用其它喷枪构造。在图 3a 中，喷枪 5 的端部是一个开孔 31，它优选沿着喷枪的轴取向。

在图 3b 中，喷枪 5 的端部是封闭的，在接近喷枪热端，喷枪周边有 2 个或多个，优选 2-16 个，更优选 4-8 个喷嘴 32，从而径向注射氧气。也可以在接近热端的喷枪周边提供一排径向喷嘴。也可以在该喷枪的端部提供四个或更多个喷嘴。

在图 3c 中，在喷枪 5 的封闭下游端附近径向地提供 2 个或多个，优选 2-16 个，更优选 4-8 个喷嘴 32，并在与氧气流入喷枪 5 方向成大于 0° 且小于 90° 角地提供 2 个或多个，优选 2-16 个，更优选 4-8 个喷嘴 33。

在图 3d 中，在接近喷枪 5 热端的喷枪周边有 2 个或多个，优选 2-8 个喷嘴 34，每个喷嘴与氧气流入喷枪 5 方向的反向形成 $30-90^\circ$ 、优选 $30-60^\circ$ 角。

在这些和其它喷枪方案中，通过喷枪侧边的喷嘴可以在一个或多个的周边上排列。

用于控制 NO_x 的最佳氧气注射角度取决于周围空气的切向和径向动量、燃烧器开口几何形状以及氧气喷枪附近的燃烧器空气流动方式的性质。因此，为了在具有低径向空气动量的燃烧器中得到更好的结果，最佳角度是相对于燃烧器轴的 90° 或更大角度，而要在具有较高径向动量的燃烧器中得到更好结果将通常需要减小该角度以避免氧气与空气流的混合。对于高径向空气流动，最佳角度是 15° 或更小（大部分是轴向注射）。对于那些使用能产生径向方向的强空气流分量的技术的燃烧器，例如具有燃烧器浅开口或空气转向器的高旋涡而言，主要在轴向成角度的氧气喷嘴（与轴向夹角小于 30° ）是最佳的。对于其中空气流动主要是轴向（即，空气流动的径向分量小或不存在的燃烧器，优选沿着径向方向注射氧气（与轴向流动分量成 $45-135^\circ$ 角）。

当如上所述将氧气注射入燃烧装置 1 时，经由燃烧器 3 加入的燃

烧空气的流速同时降低以保持或降低初级燃烧区的化学计量比。当使用过度燃烧空气时，氧气注射的初级燃烧区的化学计量比优选是完全燃烧燃料所需的化学计算量空气的 60-99%，更优选 60-85%，最优选 70-85%。以此方式加入的氧气量优选足以建立火焰 6 的富燃料区 8 中的化学计量比，该化学计量比小于约 0.85，更优选远小于 0.85，例如是 0.65 或更低。经由管线 5 加入的氧气量应该低于要完全燃烧燃料所需的化学计算量的 20%。优选的是，该量低于要完全燃烧燃料所需的化学计算量的 15%。更优选的是，该量低于要完全燃烧燃料所需的化学计算量的 10%。最优选的是，该量低于要完全燃烧燃料所需的化学计算量的 5%。

与本发明相反，美国专利 4,495,874 公开了在 2%富集氧时 NO 增加，这在该专利中定义为等于要完全燃烧燃料所需的化学计算量的约 13%。该专利还公开了在较高的氧气富集（4%富集氧，这在该专利中定义为等于要完全燃烧燃料所需的化学计算量的约 23%）下，NO 显著降低。显然，该专利并没有预料到本发明的发现，即在将氧气或富氧空气注射入初级燃烧区的富燃料区中时，少量的氧气，即小于完全燃烧燃料所需的化学计算量的 20%能意想不到地降低 NO_x 释放量。

NO_x 释放量在很大程度上取决于局部化学计量条件。由于氧气的注射使得局部化学计量条件更贫瘠，必须考虑在氧气注射之后改变局部化学计量条件。例如，将等于化学计量空气的 10%的氧气注射入化学计量比为 0.4（SR=0.4）的局部富燃料区中且不改变加入的燃烧空气的流速，将会使局部化学计量条件变为 SR=0.5，并预计会显著降低 NO_x 释放量。但是，这是由于 SR=0.4 对于最佳 NO_x 降低而言太富含燃料了。这种作用远远大于“用氧气代替 10%空气”并同时保持局部化学计量条件恒定为 SR=0.4 的效果。如果相同量的氧气注射入富燃料燃烧区且不改变燃烧空气的流速，其中局部化学计量条件是 SR=0.95，则预计 NO_x 释放量会随着局部化学计量条件增加到 SR=1.05 而显著增加。

因此，通常优选将氧气注射入火焰的最富集区域。在使用空气动力学分段式燃烧器的燃烧装置中，在注射氧气下的火焰的富燃料区中的化学计量比是 0.1-0.85，优选 0.4-0.75。

氧气向三级空气和四级空气（如果使用的話）中的注射或混合在

没有 OFA 的空气动力学分段式燃烧器中应该避免使用。这是因为三级和四级空气在火焰的较贫瘠区域混合。如果低 NO_x 燃烧器仅仅具有初级和二级空气，则氧气向二级空气中的注射或混合应该避免。理论上，可以用任何氧化剂，包括空气，进行局部化学计量条件的最佳化。但是，氧气是更有效的，因为仅仅需要小的体积，而且可以在对火焰的整个空气动力学混合条件没有大影响的情况下改变局部化学计量条件。

另一个重要的要求是氧气富集必须以保护或提高空气动力学分段式火焰的富燃料区（“ N_2 形成区”）的物理尺寸的方式进行。氧气注射和随后在燃烧器的特定空气通道中降低空气流动的方法将影响燃烧器的空气动力学分段条件，进而影响物理尺寸和局部化学计量条件。如果富燃料区的尺寸降低并且由于氧气注射导致富燃料区中的平均气体停留时间减少，则这种改变会引起 NO_x 增加。例如，经由轴向喷枪，例如图 3a 所示的喷枪高速注射氧气将有效提高周围煤/空气流的轴向动量，这进而会提高与二级和三级空气的混合。结果，火焰中用于减少 NO_x 的富燃料区的尺寸减少， NO_x 增加。另一方面，当氧气流从轴向位置的氧气喷枪，例如图 3b 所示的喷枪在接近燃烧器的尖端径向注射时，这会有效地提高接近燃烧器的循环区，进而增加富燃料区的尺寸，并进一步通过氧气富集来促进 NO_x 的减少。氧气注射对燃烧器空气动力学条件的复杂影响必须小心地对于特定燃烧器进行评价以实现 NO_x 的减少。

不打算使本发明出乎预料的性能受限于任何特别的解释，但是按照本发明运行的燃烧装置的性能与其中注射氧气引起最接近燃烧器的火焰部分的温度提高的机理一致，这又引起在烃燃料中存在的挥发性较高的组分从燃料进入气相并与环境氧进行部分反应，从而形成相对还原性的气氛，它能使从燃烧燃料释放的含氮物质转化成分子氮，即 N_2 ，而不是转化成 NO_x 和其它含氮化合物例如 HCN 和 NH_3 。

通常，燃料和氧气进入的富燃料区的温度是约 2500°F 或更高。以此方式加入的氧气会引起火焰 6 的底部更接近燃烧器 3 的开口，或甚至与燃烧器 3 连接。但是，以这里所述方式将氧气加入烃燃料是以与它从燃烧器排出时相同的方式进行的，即使火焰与燃烧器连接时也是如此。在稳态操作中，例如在燃烧装置已经按照这里的描述改装时，

燃烧装置的操作继续在小于完全燃烧燃料所需的化学计量氧气的20%，优选小于15%，更优选小于10%，最优选小于5%的基础上加入燃料中，而燃烧空气以另外更小的量经由燃烧器加入的情况相同，使得加入该装置的氧气总量至少是完全燃烧燃料所需的化学计算量。

按照这里的描述，已经发现燃烧装置的操作、通过烃液体燃料或粉状固体烃燃料的加料能惊人且显著地降低在燃烧装置中通过燃烧形成的NO_x的量。

实施例 1

将氧气混合入供应到 17kW 热自持下烧实验炉的第一阶段中的燃烧空气中，该炉具有 6 英寸的内径。富含氧的燃烧空气加入预先混合的非旋流式粉状煤-空气燃烧器中。使用高挥发性 A 型烟煤 (Illinois 6 号)。将氧气以代替燃烧空气的 20 体积%的速率加入，在氧气当量的基础上，供应到初级燃烧区 (PCZ)。这相当于化学计量空气所要求的 10-20%。“过度燃烧空气”注入位于燃烧器表面下游约 8 英尺的炉内，这在 PCZ 内提供约 1 秒的气体停留时间。注射足够的过度燃烧空气以保持整体化学计量比为约 1.2。尽管在过度燃烧空气注射点的温度根据初级燃烧区化学计量比而变化，但是将其在空气 (基线) 和富氧情况之间保持恒定。从图 4 可见，当在约 0.9 的化学计量比之下操作第一阶段时，加入少量的氧气降低了氮氧化物的释放。

实施例 2

低 NO_x 煤-空气燃烧器在约 4MMBtu/hr 下在耐火衬实验炉中燃烧，该实验炉的内部尺寸是约 3.6 英尺宽，3.6 英尺高和 41 英尺长。一对过度燃烧空气开口位于距离燃烧器出口约 10.5 英尺处。燃烧器与图 2 中所示的相似，包括用于通过煤、空气、氧气和天然气料流的中心圆形通道和几个环形通道。中心通道用于插入 1.9"OD 和 1.5"ID 氧气喷枪或者被封闭以提供陡直壁来提高气体循环，从而改进火焰稳定性。煤和初级空气从 3.068"OD 和 1.9"ID 的第一环形通道注射。第二环形通道 (4.026"OD 和 3.5"ID) 用于注射天然气或者氧气。第三 (6.065"OD 和 4.5"ID) 和第四 (7.981"OD 和 6.625"ID) 环形通道用于二级和三级空气流，并配备可变式旋流发生器以得到旋流流动。燃烧器设计成

提供空气动力学分段的燃烧条件。初级和二级空气的轴向速度是相似的，以提供二级空气与煤料流的缓慢混合。三级空气的速度显著高于二级空气的速度。因此，二级空气为三级空气和煤料流之间的混合提供“缓冲”。较大的燃烧富集燃烧区沿着燃烧器的轴形成，同时二级空气和三级空气沿着炉的纵向进行相对梯度混合。

图 5 显示在不同氧气注射方法下检测的 NO_x 释放结果。纯氧气经由位于燃烧器轴中的圆柱形喷枪注射。不同的喷嘴设计用于注射氧气并与邻近的环形煤料流混合。注射的氧气量是化学计量氧气的 5-15%。当注射氧气时，从二级和三级空气流中取出化学计算量等量的空气以保持相同的初级燃烧区和总的燃烧化学计量比（固定在 $\text{SR}=1.15$ ）。初级空气流动速率保持恒定在约 $\text{SR}=0.15$ 。用于整体燃烧分段的过度燃烧空气与炉轴垂直地从 2 个正相对的空气喷嘴注射。

在约 0.80 的初级燃烧区 SR （初级燃烧区的化学计量比）之下，与空气基线相比，获得了显著降低的 NO_x ，与所用氧气喷嘴的类型无关。当使用如图 3.d 所示的具有 8 个 1/4 英寸直径孔的反向角喷嘴（也称为 B 型喷嘴）时，较高燃烧器 SR 的 NO_x 释放量较高，当使用如图 3.c 所示的具有 8 个 1/4 英寸直径径向孔和 4 个 1/4 英寸直径的前向角的喷嘴（也称为 A 型喷嘴）时，获得相同或更低的值，这取决于氧气的注射量。

观察到的结果可以用在燃烧器的空气动力学分段条件中的氧气注射引起的变化来解释，即富燃料区的物理尺寸和局部化学计量条件。当初级燃烧区被深度分段时（ SR 小于 0.8），在燃烧器和分段空气注射点之间的大体积的炉空间保持富含燃料。尽管氧气的注射及二级和三级空气流动的降低将改变接近燃烧器的局部化学计量条件（增加或降低接近燃烧器的富燃料区的体积），大部分初级燃烧区内保持富含燃料。氧气的主要作用是提高温度和加速在大部分初级燃烧区中 NO_x 降低的动力学。因为大的富燃料区的体积改变极小，显著的 NO_x 降低与氧气喷嘴类型的关系不大。

随着过度燃烧空气的量降低，富燃料区的尺寸逐渐减小。在燃烧器 $\text{SR}=1.15$ 时，不使用分段空气，并且仅仅通过燃烧器的空气动力学分段来形成富燃料区。氧气的注射将影响二级和三级空气流与煤料流的混合方式，并且富燃料区的尺寸将显著变化。如果由于注射氧气，

富燃料区的尺寸减小并且富燃料区中的平均气体停留时间减少，这种改变将引起 NO_x 增加。

在 $\text{SR}=1.15$ 下的 NO_x 释放，即没有分段空气，对氧气喷嘴的类型和氧气的用量十分敏感。CFD 研究显示了用图 3b 所示的具有八个 1/4 英寸径向孔的喷嘴的以下混合条件。径向氧气射流短距离穿透进入环形煤料流，并与周围的煤料流迅速混合。环形煤料流部分在氧气射流的“手指”之间流动，部分径向膨胀。结果，接近燃烧器的再循环区的直径增加，引起富燃料区的尺寸变大。

据认为，使用 B 型氧气喷嘴，氧气射流的上游角度引起了初级煤料流和三级空气的显著混合，导致 NO_x 增加。一般来说，来自径向或有角度的径向喷嘴的较高氧气流增加了氧气喷射速度并引起更多的混合。因此，氧气喷嘴的尺寸和角度必须小心设计以快速将氧气混合入煤料流中，但不会引起在三级空气和煤料流之间的过度混合。

实施例 3

工业低 NO_x 煤-空气燃烧器 (RSFC™ 燃烧器，描述在美国专利 5,960,724 中) 在约 24MMBtu/hr 下在耐火衬实验炉中燃烧，该实验炉的内部尺寸是约 7.5 英尺宽，7.5 英尺高和 34 英尺长。一对或两对相对的过度燃烧空气开口位于距离燃烧器出口约 26 英尺处。燃烧器包括用于通过煤、空气、氧气料流的中心圆形通道和几个环形通道。中心通道用于插入 1.9"OD 和 1.5"ID 氧气喷枪。煤和初级空气从第一环形通道注射。第二、第三和第四环形通道用于二级、三级和四级空气流，并配备可变的旋流发生器以得到旋流流动。燃烧器设计成提供空气动力学分段的燃烧条件。较大的燃料富集燃烧区沿着燃烧器的轴形成，同时三级空气和四级空气沿着炉的纵向进行相对梯度混合。

氧气通过位于燃烧器轴中的圆形喷枪注射。喷嘴设计与图 3c 所示相似，具有八个 3/8 英寸直径的径向孔和四个 3/8 英寸直径的轴向孔用于注射氧气和与邻近的环形煤料流混合。氧气的注射量是氧气化学计算量的 5-15%。当注射氧气时，从二级、三级和四级空气流中取出化学计算量等量的空气以保持相同的初级燃烧区 ($\text{SR}=0.75$) 和总的燃烧化学计量比 ($\text{SR}=1.15$)。初级空气流动速率保持恒定在约 $\text{SR}=0.20$ 。用于整体燃烧分段的过度燃烧空气与炉轴垂直地从 2-4 个

正相对的空气口注射。

使可调节的用于二级、三级和四级空气流的旋流叶片的设置最佳化以得到对于仅仅燃烧的空气而言的最低 NOx 释放量，当注射氧气时使用相同的设置。图 6 显示 NOx 释放随着氧气注射的结果，在三个不同的实验阶段测定。尽管用空气的基线 NOx 释放随着实验时间而变化，但是显著的 NOx 降低通过本发明得以实现。

虽然本发明已经主要参考壁燃烧式锅炉例如图 1 和图 2 所示类型进行了描述，但是这并不说明本发明限于这种燃烧系统。本发明适用于其中燃烧燃料和空气的其它系统，包括但不限于图 7A-7C 所述类型的切向燃烧系统，和在本领域中称为“旋风”炉的燃烧系统，其中该炉的初级燃烧区包括一个或多个封闭室，各自具有圆筒形壁、封闭的端壁和经由炉壁通向炉主室的开口端，其中燃料、燃烧空气和氧化剂（上述加入燃料的量）经由圆筒形壁和端壁加入封闭室中，加入方向使得它们围绕封闭室的旋转中心轴旋转并燃烧形成火焰，燃烧热经由开口端释放到炉的主室中。

除了在此例举的之外，可以使用其它类型的燃烧炉，例如所谓的分流燃烧器，其中燃料流在进入燃烧室时被分流成多个彼此独立的料流，并甚至彼此分流。用这种类型的燃烧器，氧气从相应的多个喷枪加入每个燃料流中，或从具有多个朝向各燃料流的喷嘴的喷枪加入，并且所要求的氧气的化学计算量基于加入的燃料和氧气的总量。

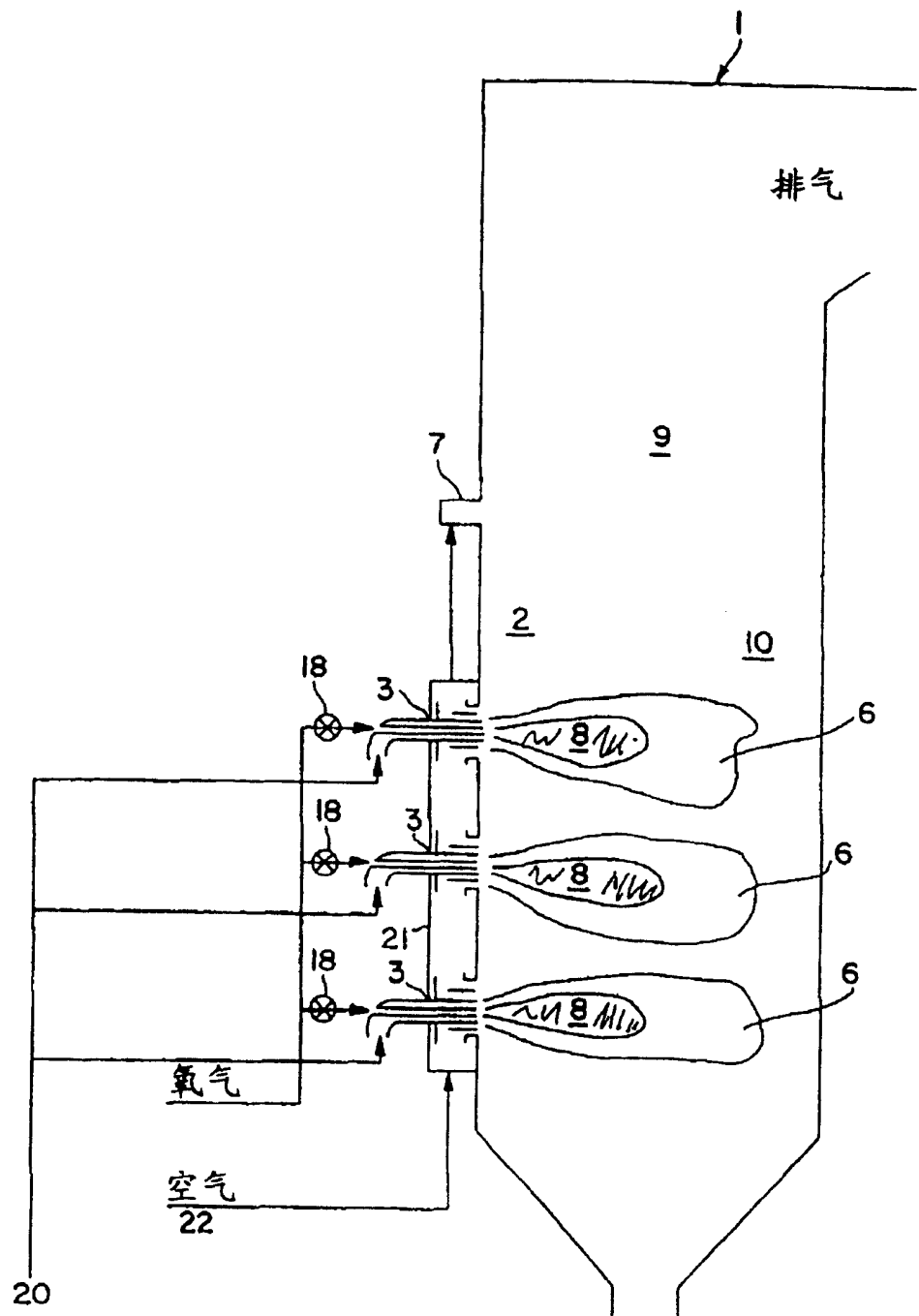


图 1

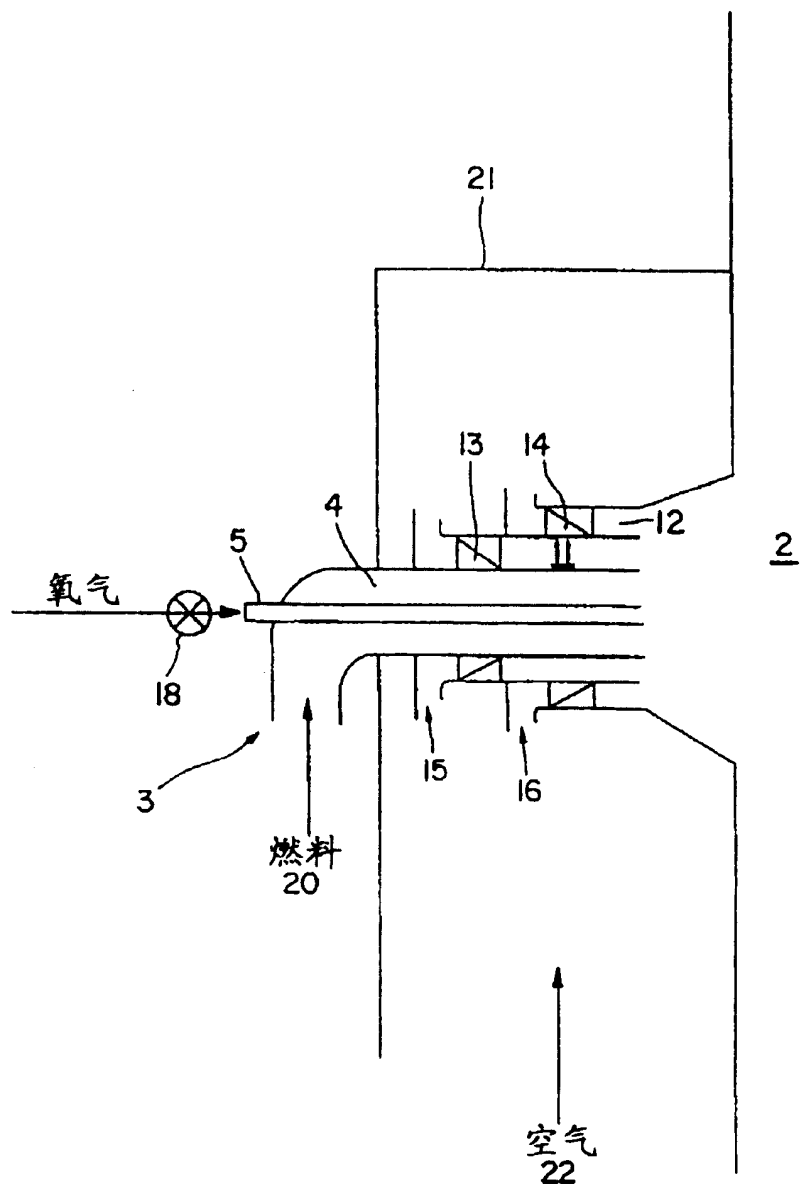


图 2

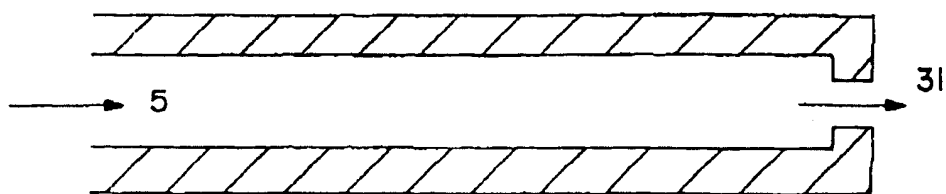


图 3a

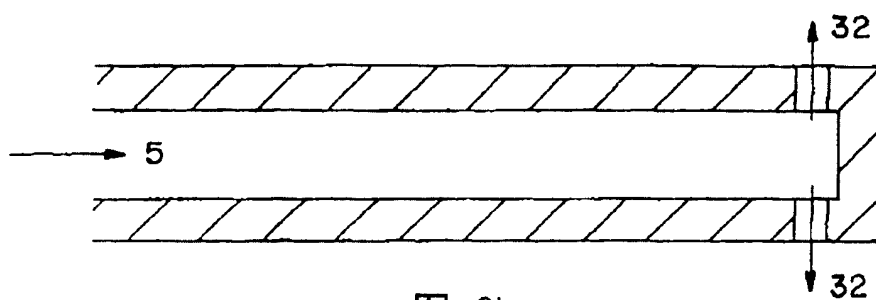


图 3b

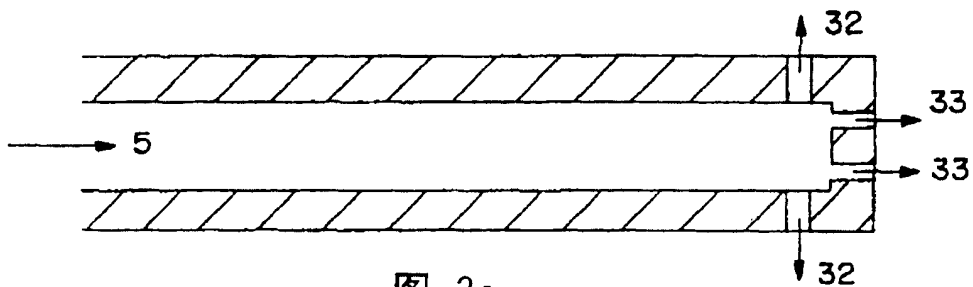


图 3c

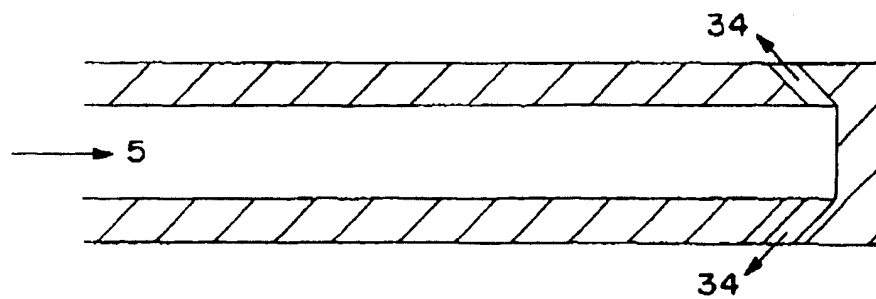


图 3d

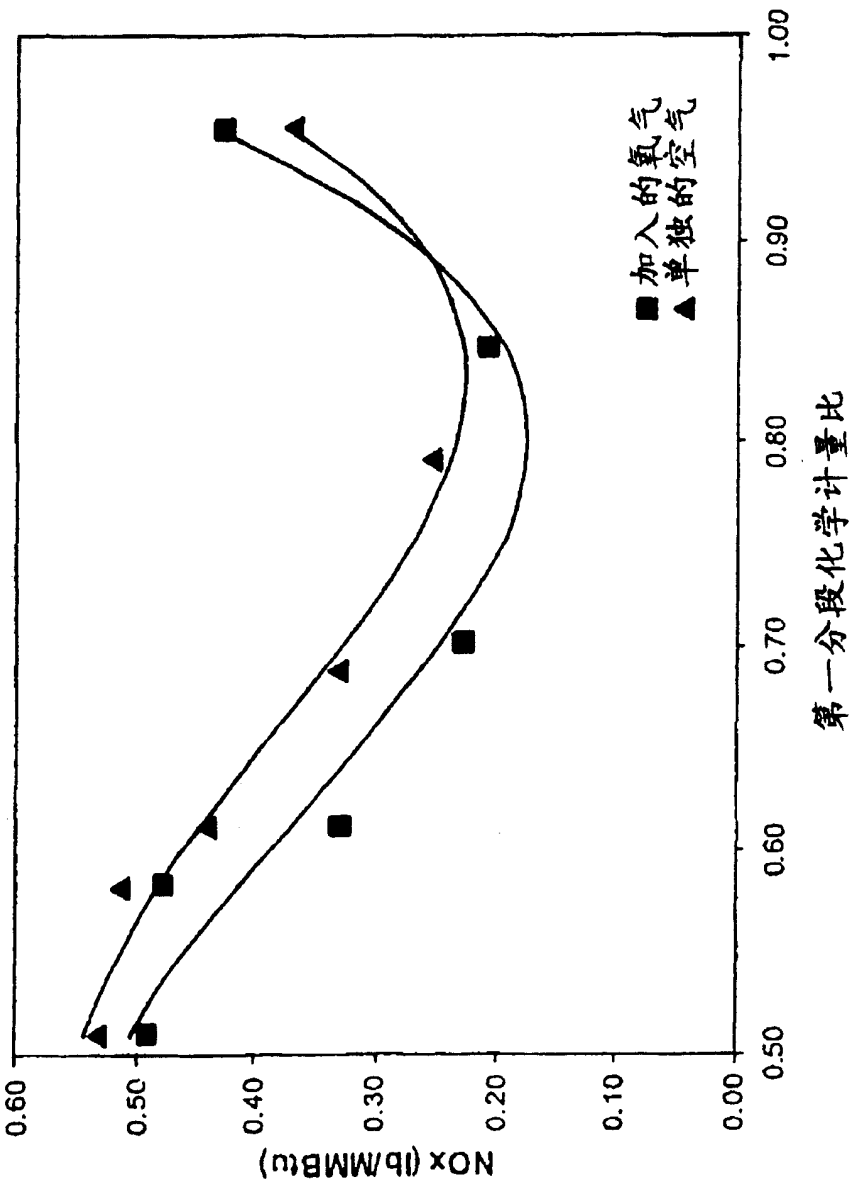


图 4

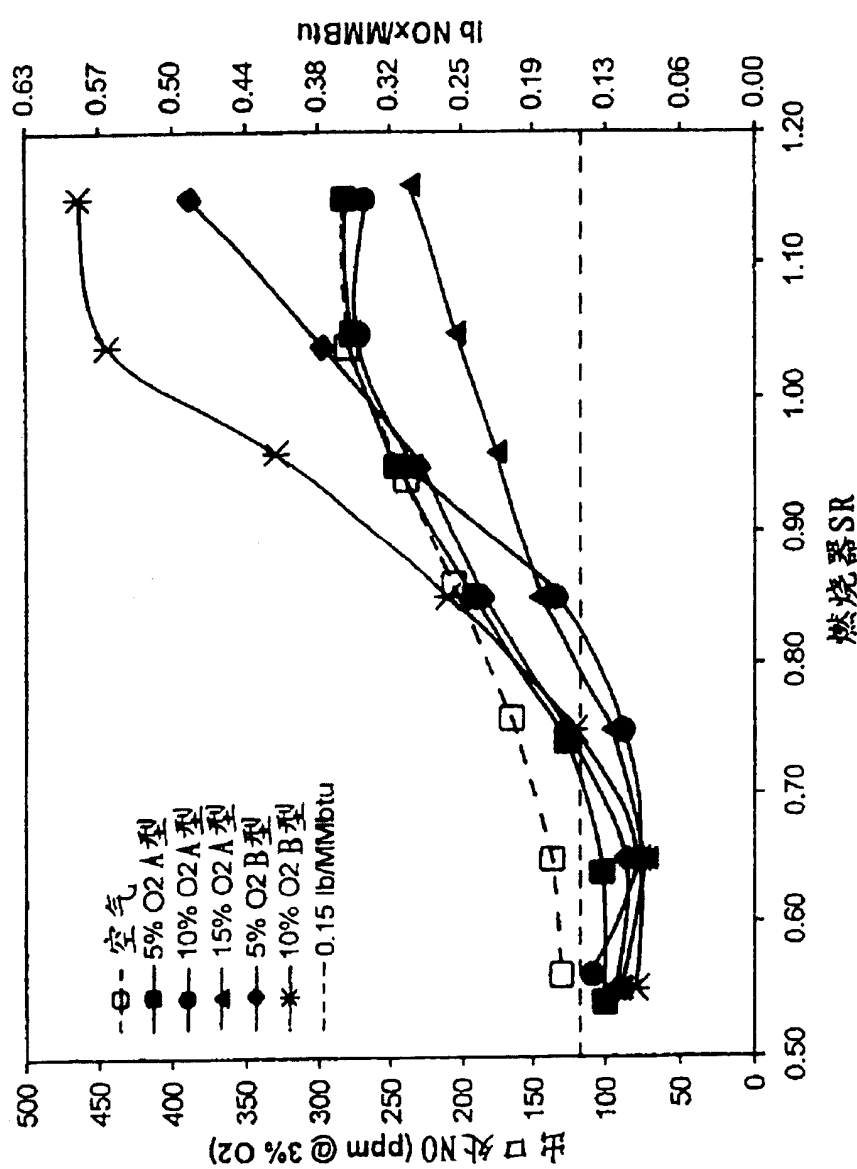


图 5

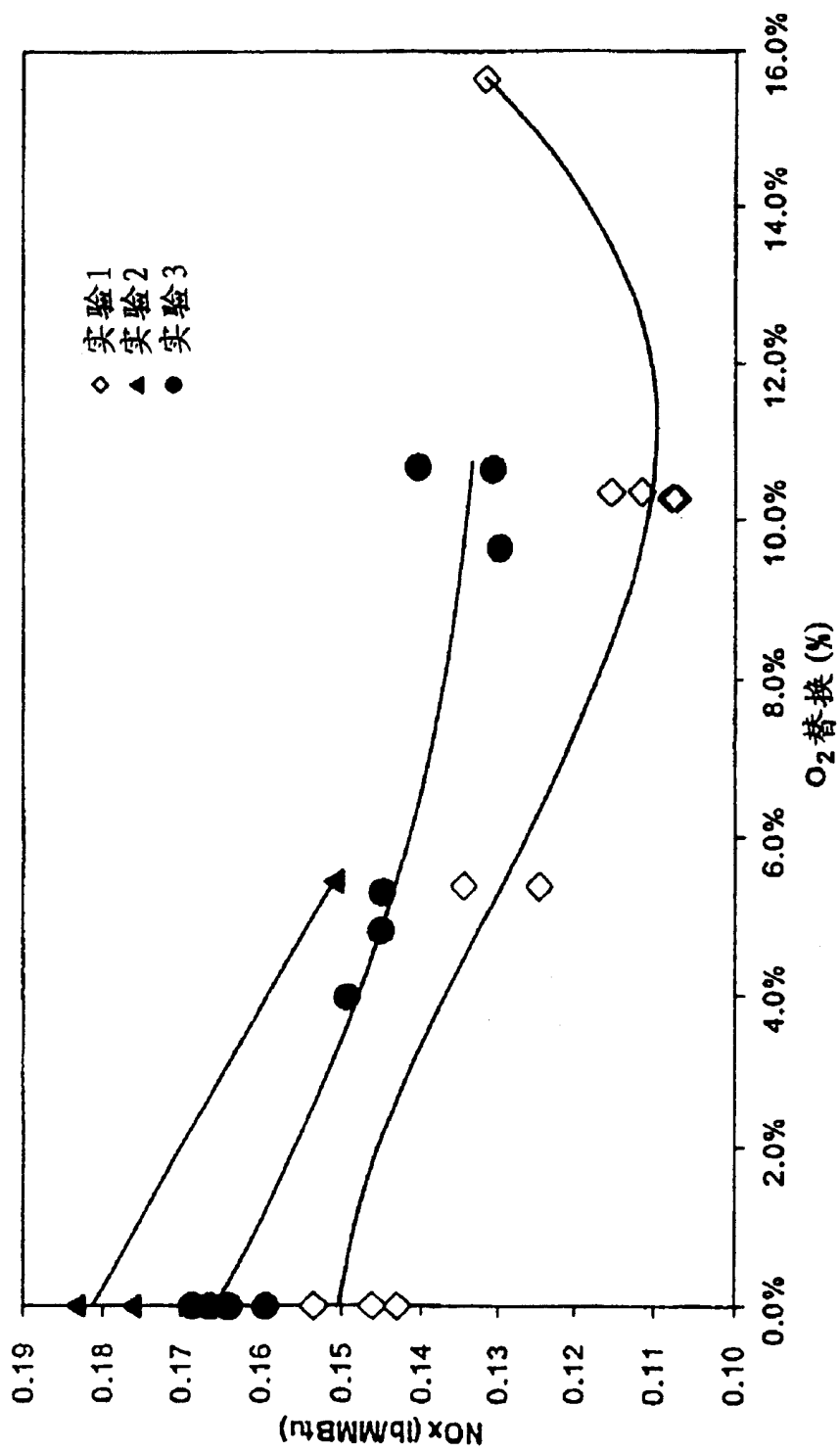


图 6

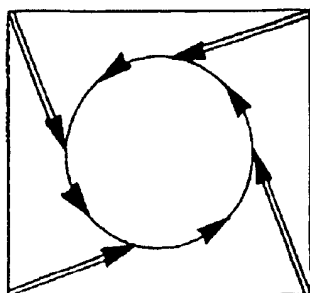


图 7b

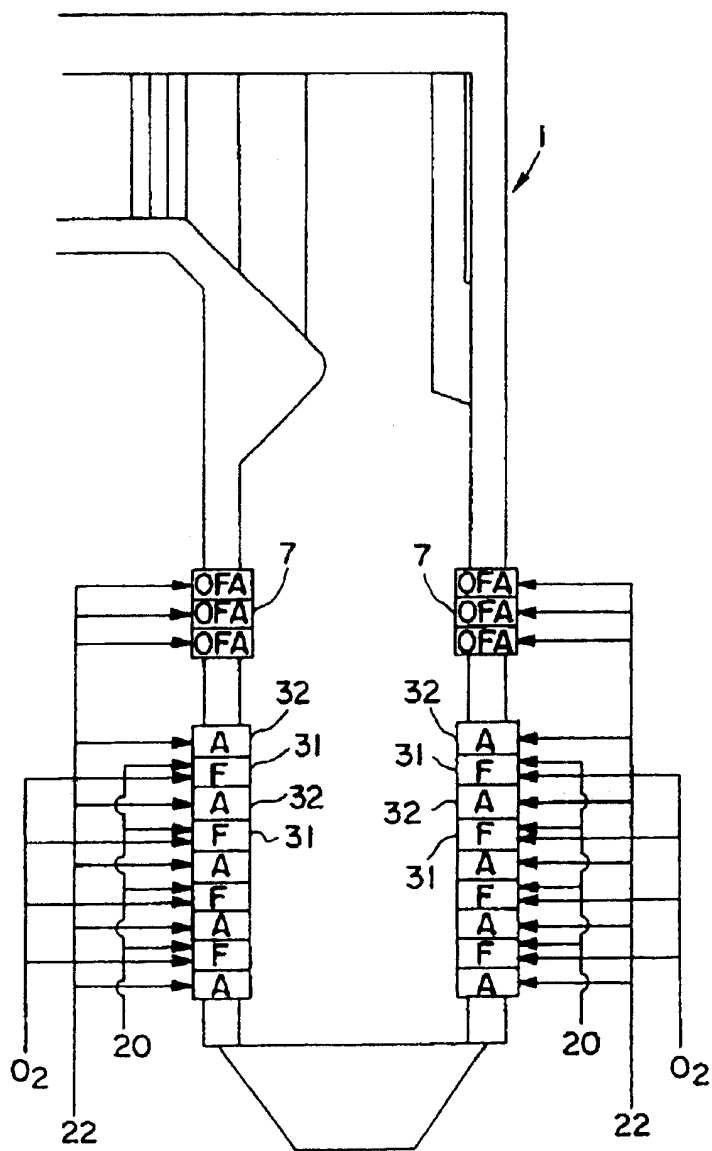


图 7a

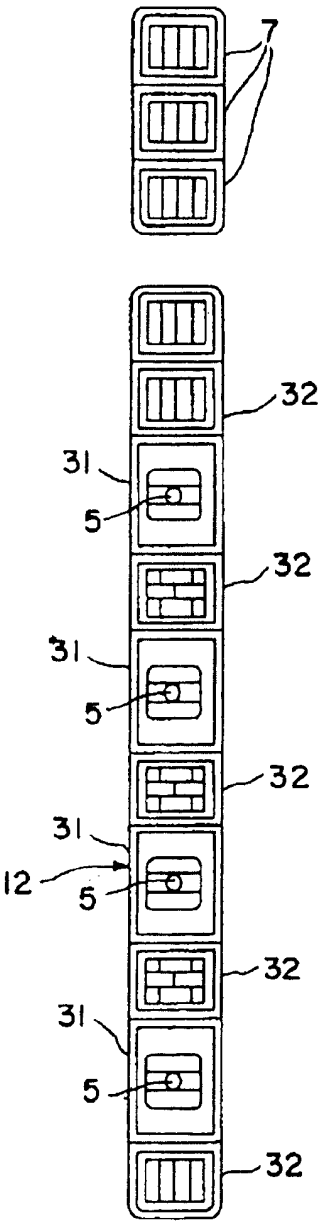


图 7c