

炭黑与 NO 还原反应的研究综述

徐 宾, 谢广录, 范卫东, 章明川

(上海交通大学 机械与动力工程学院, 上海 200240)

摘 要:近 30 年来, 炭黑还原 NO 反应引起各国环境研究工作者的关注。本文综述了近年来炭黑还原 NO 方面的研究进展, 着重分析了纯 NO-炭黑还原的反应机理, 探讨了目前比较常用的实验反应仪器, 在不同的反应温度范围可使用不同的反应仪器, 且 NO-炭黑反应的产物也各不相同, 在低温下($< 300\text{ }^{\circ}\text{C}$)主要发生吸附反应, 高温下发生还原反应。最后简要叙述了不同气氛以及催化剂的存在对反应的影响, 不同的反应气氛对 NO-炭黑反应的影响各不相同, 凡能促进炭黑表面活性位生成的物质均可起到促进反应的作用。

关 键 词:天然气; 炭黑; 氮氧化物; 解吸; 表面基团

中图分类号: TQ533

文献标识码: A

1 引 言

利用含碳材料(活性炭、煤焦、石墨等)去除燃烧系统产生的 NO 是一种有效的方法, 越来越受到人们的重视。例如, 近年来一些研究者对煤焦还原去除 NO 的机理进行了大量的研究, 这为开发有效煤粉再燃技术提供了保证。炭黑也是一种在燃烧过程中生成的典型含碳颗粒, 利用它来去除 NO 是很好的思路。但在这一

方面, 更多的研究和应用集中在催化条件下, 炭黑处于填充模式下的 NO 还原反应, 例如内燃机尾气排放控制的应用。然而在实际火焰中, 火焰炭黑与 NO 的悬浮异相反应效果如何? 且能否有效地降低 NO 的生成也是值得关注的。例如, 在天然气燃烧中, 无催化条件下火焰炭黑对降低 NO 排放的效果就很值得研究。因为对于通常的大型燃烧换热设备, 以天然气作燃料时, 预混燃烧条件下火焰为蓝色或近似无色(暗焰), 辐射力很弱。为强化辐射力, 可采用扩散燃烧生成炭黑的方式来强化辐射力, 并确保燃烧后期组织空气氧化掉炭黑。据一些研究表明, 炭黑能使当地火焰温度降低数百摄氏度, 这对于以热力型 NO 为主要污染物的天然气燃烧装置而言, 达到低 NO_x 排放极为有利。同时炭黑本身具有很强的还原性, 可以在燃烧后期用炭黑来还原 NO_x 物质。因此, 对天然气燃烧火焰中生成的炭黑在高温下直接还原 NO 的研究非常有意义。

但上述炭黑-NO 的反应机理、反应条件等诸多方面还存在大量的问题需要进行深入研究。

本文正是在这一背景下对炭黑-NO 反应的最新研究情况进行综述, 重点围绕炭黑-NO 还原反应机理和反应气氛条件。为了能更好地了解炭黑-NO 的反应特性, 首先对炭黑的组成、结构和形成机理作简要介绍。

2 炭黑形成、成份及结构

炭黑通常产生于 1 585 ~ 1 700 K 的含碳燃料的扩散火焰中。炭黑形成过程为: 成核、生长和凝聚。不带电的原子和分子是火焰成核的前驱。随着气体含碳物质在原子和分子上的团聚就生成了球状颗粒, 随后, 在气体冷却过程中球状颗粒凝聚成团聚体。

炭黑以元素碳为主要成份, 结合少量的氢、氧、硫、氮等杂原子, 吸附少量的水分并含有少量的焦油、灰分等杂质。

虽然炭黑可以由不同燃料在不同条件下生成, 但是通过对柴油机炭黑的氧化动力学研究^[1], Neef 指出可以用其它火焰炭黑来替代柴油机炭黑; Clague 对柴油机炭黑和工业炭黑进行了比较^[2], 同样得出可以用工业炭黑来模拟柴油机炭黑的性质和形成

过程。可见，不同来源的炭黑具有相似的组成和化学活性，表明它们的形成过程是相似的。

炭黑基本可按颗粒状态分为 3 个层次结构：一次结构是初级粒子，也称为原生粒子，粒径在 10 ~ 100 nm 范围内，近似为球形；二次结构称为聚集体 (aggregate)，尺寸在 50 至数百纳米之间，是多个初级粒子的熔融体，是可分散的最小单元，以化学键结合；三次结构称为附聚体 (agglomerate)，尺寸在几百纳米至数微米之间，以范德华力作用连结成疏松的缔合物。所说的“炭黑粒子”实际上指的是聚集体。

3 炭黑与 NO 反应机理

虽然对炭黑-NO 反应过程仍不很明确，但通过对反应过程的基础研究可以为实际去除 NO_x 的研究提供帮助。根据反应方程式(1)，理论上炭黑的主要成份碳可以还原 NO，而且对反应条件的要求也不苛刻，在无催化剂条件下，高于 500 °C 时，炭黑就可以和 NO 发生反应：



然而，对炭黑-NO 的反应研究至今还是很少，对反应机理也充满着争议。主要在近 30 年，才开始对炭黑-NO 的气化反应有了一定的研究。现对一些主要研究者提出的反应机理做一概括。

在不同的气化氛围内，其炭黑-NO 反应机理也不尽相同。首先讨论在惰性气氛下 NO-炭黑的反应机理。其它氛围的炭黑-NO 气化反应将在后面论述。

3.1 表面基团的生成

早期的研究者认为在温度低于 200 °C 时，NO 在炭黑表面的化

学吸附先是导致 C(O)基团和 N₂ 的形成，NO 的吸附被认为是发生在下氧方位，然后两个邻近的吸附位反应生成 N₂：

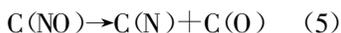


但文献 [3~4] 表明，在更高的温度下，发生第一步反应时，就已经发现了 C(N)基团的存在，可能遵循下面这个反应方程式：



Yang 在最近的研究中发现^[5]，在吸附温度低于 200 °C 时，同时发现了 C(N)基团和 C(O)基团的存在，并且更高的 NO 吸附温度生成更多的 C(N)基团。可见是支持反应式(3)的。

式(3)可以分解为下面两个基本方程：



认为吸附的 NO 分子是平行于炭黑表面的，N-O 极易断裂，因此形成了 C(N)基团和 C(O)基团。

3.2 N₂ 的生成机理

N₂ 的生成机理至今还不是很清楚，通常认为只有在高温下，两个相邻 C(N)基团反应解析才生成 N₂：



然而，通过同位素¹⁵N¹⁸O 标定法在酚醛树脂炭黑上进行实验发现^[6]，在温度为 850 °C 时，C(N)基团和气态 NO 之间进行反应形成 N₂，这并不排斥邻近 C(¹⁴N)基团和 C(¹⁵N)基团之间发生反应生成¹⁴N¹⁵N。但相比较之下，主要是前者在起作用，即反应方程式为：



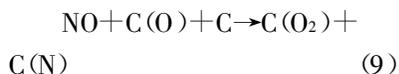
3.3 CO、CO₂ 的生成机理

通常认为 CO 产生于 C(O)基团的分解：



C_n 指反应过程中的炭黑表面位置。高温下热稳定性较好的 C(O)基团的解吸导致了 CO 的生成。鉴于 CO 产生于 600 °C 以上的高温，可见与 CO 生成有关的 C(O)基团是碱性基团。

CO₂ 的生成机理相对来说比较复杂。低温下，CO₂ 产生于热稳定性不高的酸性 C(O)基团，酸性 C(O)基团是由于 NO 与 C(O)的反应而产生^[7]：



酸性 C(O)基团的产生依赖于 NO 浓度。

在高温下，随着气相 CO 浓度的增大，其主要生成途径为：



既然只有在很高的温度下才能观测到 CO₂ 的产生，可知 CO₂ 主要是 CO 和 C(O)基团的产物。

3.4 NO-炭黑反应机理

虽然对于 NO 与炭黑的反应机理尚未完全研究透彻，但通过上述讨论，可以得出以下结论：对于 300 °C 以下的低温反应，反应方程式可能为：式(4)、式(5)、式(8)、式(9)和式(10)。由于表面基团的解吸是一个需要激活的过程，通常在高温下才能发生。所以当炭黑表面 C(O)基团和 C(N)基团吸附饱和时，反应就会停止。

高温下，反应过程可能为式(3)、式(6)、式(7)、式(8)和式(11)。

4 炭黑与 NO 反应的实验研究方法

由于实验的相似性，不同的反应气氛可以采用相同的反应器。用温度把反应器分为两类：低温反应器 (< 1 000 °C) 和高温

反应器。

4.1 低温反应器

炭黑低温氧化反应的特性主要是: 固有反应动力学速率、起燃特性和通过床层的燃烧锋面的传播。由于其低的反应速率, 所有的这些实验都是在炭黑床层上进行。为了获得精确的动力学参数, 炭黑应与其它大量的惰性材料混合, 比如石英、陶土、金刚砂或者氧化铝等。这样可以减少由于反应进行产生的温度变化, 并使氧化物沿床层传递。准稳态反应和瞬态反应都可以在炭黑床层中完成。低温反应的主要实验器材是固定床和热重分析仪等。

4.1.1 固定床

床层相对比较薄, 因此可以采用微分模式而不考虑氧化物浓度的变化(NO_2 例外)。对于动力学参数测量, 通常在持续通入惰性气体的条件下把系统温度加热到所需温度, 然后进行等温反应。此外还存在一个互补模式—温控氧化反应(TPO): 在氧化条件下, 慢慢地加热样品到最高温度, 然后在最高温度持续一段时间使反应进行充分, 出口气体可以连续监测。这种模式对于确定反应机理和起始反应温度是非常有用的。

4.1.2 热重分析仪

热重分析仪(TGA)可以跟踪检测燃烧过程中重量随时间或温度动态变化, 通过测定燃烧特性参数来计算燃烧反应性和反应活化能, 同时通过分析失重曲线, 可得到一些燃烧的特征值, 如燃尽温度、燃尽时间、最大失重温度、最大失重率和燃烧前期的燃烧量等。在该系统上可以有两种实验方法: 等温实验和升温实验。升温实验主要是为了确定吸附质

(SOF)的量和起始反应温度。在热重分析仪中也可以进行 TPO 实验, 但等温实验更易进行动力学参数的确定。

影响热重曲线的因素有很多, 但最重要的还是样品方面的原因, 包括样品量、样品粒度和样品的装填方式, 它们主要对气体扩散阻力和热传导产生影响。一般要求样品量少, 粒度小, 且装填的薄而均匀, 可以得到重复性好的实验结果。

没有考虑到这些因素的反应速率就会偏低很多, 在高温下更是如此。即使用惰性材料稀释炭黑, 氧气的供应量还是有限的。

4.2 高温反应器

炭黑生成后, 在火焰内部通常发生高温反应, 大约有 90% 的炭黑被消耗掉。对此类反应的研究通常有层流燃烧器和激波管等反应设备。

4.2.1 层流燃烧器

火焰温度的研究在层流燃烧器中进行, 通常还直接搭配一个亚化学当量比的炭黑燃烧生成器。Lee 等人把这两步直接并到了同一个燃烧器中^[8]: 在燃烧器中形成一垂直空气流, 并与周边提供的氧气反应, 形成扩散火焰, 生成炭黑。

4.2.2 激波管

通常用激波管中压缩波产生的高温来研究短时间内的气相反应。但也可以用来进行炭黑的研究, 因为炭黑的小尺寸(大表面积)允许瞬时升温燃烧反应。在激波管启动前, 炭黑悬浮在靠近反射墙的气体中, 并且激波管能打散附聚体。从初始气体条件和微波速率可以计算出温度, 最高温度可以达到 3 500 K。

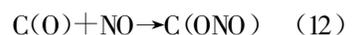
5 气氛条件对炭黑与 NO 反应的影响

对于不同的反应气氛, NO—炭黑反应的机理也各不相同。氧和 CO 的存在对 NO—炭黑反应起促进作用^[9~10]; 在较高温下, CO_2 的存在也会促进反应的进行^[11]; 水蒸气在高温条件下, 大于 1 000 °C 时, 对反应有抑制作用^[12]。

5.1 氧对炭黑—NO 反应的影响

当氧存在于反应气中时, 可以促进炭黑—NO 的反应速率, 降低起始反应温度。早先 Yamashita 等人认为氧气的促进作用主要是把 NO 氧化为 NO_2 , NO_2 和炭黑反应生成 N_2 和 NO, 而后 NO 又被氧化为 NO_2 。然而, Suzuki 随即发现 NO 向 NO_2 的转化对于氧存在条件下 NO 的消除并不是很有益的^[12], 因为主要反应产物是 NO 而不是 N_2 。他们提出提高反应速率的主要原因是增加了含氧络合物, 它产生于炭黑气化过程中, 其解吸时提供自由活性位置。

Yamashita 等人假定了 C(O) 基团的生成^[13], 其解吸生成活性位, 并区分了活性和稳定的 C(O) 基团, 认为稳定的 C(O) 基团在 NO 和炭黑反应中并不重要; 而活性 C(O) 基团很容易解吸或者和 NO 或 CO 反应生成自由活性位置, 其反应方程式为:



但文献[14]认为靠近这些基团的炭黑位具有比普通炭黑位更高反应活性。一些炭黑位由于邻近稳定 C(O) 基团而被激活; 这些激活了的活性炭黑位又通过改变附近炭黑位的电子属性来激活它们, 从而降低了反应稳定状态时的表观反应活化能。

Jacquot 得出在氧气通入 NO₂ 一炭黑反应时^[15], 其反应机理为:

$$C \xrightarrow{NO_2} (int, species) \xrightarrow{O_2, NO_2} CO_2 + CO + NO + NO_2$$

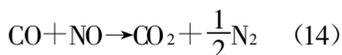
5.2 CO 对炭黑与 NO 反应的影响

CO 对反应的影响是很明显的。在高温条件下, CO 的加入提高了反应速率^[10]。认为是 CO 的存在能有助于脱除炭黑表面氧化物, 反应方程式表示为^[9]:



但随着温度的升高, CO 的影响减小^[10]。主要是因为温度的上升使得炭黑表面氧化物的脱吸附能力增强。

当温度升高至 1 000 °C 以上时, CO 改变了作用途径^[10], 见方程式(14):



炭黑在这种条件下起着催化剂的作用。

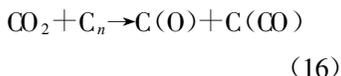
5.3 其它气氛对炭黑与 NO 反应的影响

CO₂对炭黑还原 NO 的影响研究相对较少, 低温下 (< 1 000 °C) 影响很小, 这源于低温下 CO₂ 与炭黑基本不反应, 高温下可借鉴 CO₂ 对煤焦还原 NO 影响的研究结果。高温下 CO₂ 的存在对煤焦还原 NO 有较大的影响, 在 1 000 ~ 1 300 °C 或更高的温度范围内, CO₂ 还原反应十分剧烈^[11]:



CO 的大量生成会加速 NO 的分解。

然而, 梁秀俊等人认为 CO₂ 在煤焦表面会生成能够与 NO 直接反应的 C(O) 基团。其气化反应过程如下^[16]:



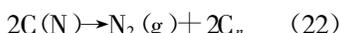
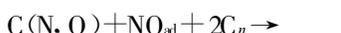
温度低于 1 000 °C, 当水蒸气存在于反应气(NO₂)中时, 水分子并不直接参与反应, 而是作为催化剂加速了反应的速率。认为可能是 NO₂ 和 H₂O 反应形成了 HNO₂ 和 HNO₃ 促进了反应的进行^[17]。随着温度超过 1 000 °C, Levy 等人得出水蒸气却会抑制 NO—炭黑反应的进行^[10], 认为是由于外界的氧化气氛占据了炭黑表面, 使得反应受到抑制。

同时, H₂ 存在于 NO—炭黑反应系统时, 在高温下会加快反应的进行, 这主要是因为 H₂ 对炭黑表面氧化物有脱吸附作用。

6 催化剂对反应的影响

催化剂会大大改善炭黑对 NO 的还原性。催化剂添加量对还原 NO 的影响较大, 但当催化剂量达到一定程度后, 继续添加催化剂对 NO 的还原反应只能起到很小的作用^[17]。催化剂的种类对反应也存在着较大的影响, 通常一个好的催化剂可以降低起始反应温度和提高 NO 还原率。纯 NO—炭黑反应通常使用的催化剂有 K、Cs、Na 盐和 M—La₂O₃—Pt(M—Ni, Co) 等。

纯 NO—炭黑的催化反应机理是相当复杂的, 至今我们只得到如下可能反应机理方程^[18]:



NO_{ad} 是指吸附在催化剂表面的

NO 分子。

7 结 论

综上所述, 可以得出如下结论:

(1) 各种不同来源的炭黑结构都具有相似性, 可以通过研究其中的一种炭黑来推测其它炭黑的属性。初等粒子的球形直径都在 20 ~ 30 nm 之间, 带微孔隙。聚集体是炭黑最小的可分散单元。

(2) 对于实验仪器, 低温下主要采用固定床和热重分析仪; 高温下主要是激波管和层流燃烧器。

(3) 在不同的温度范围内, NO—炭黑反应的产物各不相同。低于 300 °C 的温度范围, 发生吸附反应, 主要生成活性基团。在高温下, 发生还原反应, 产物主要是 N₂、CO 和 CO₂。

(4) 不同的反应气氛对 NO—炭黑反应的影响也各不相同。总的来说能够促进炭黑表面活性位生成的物质均可起到促进炭黑与 NO 反应的作用。

(5) 催化剂对反应的影响比较大, 它的存在降低了对反应的要求, 通常在 500 °C 以下就可以发生反应。

参考文献:

[1] NEEFT JOHN P A. Kinetics of the oxidation of diesel soot [J]. *Fuel*, 1997, 76 (12): 1129—1136.
 [2] CIAGUE A D H. A comparison of diesel engine soot with carbon black [J]. *Carbon*, 1999, 37: 1553—1565.
 [3] ILLAN GOMEZ M J, LINARES SOLANO A, RADOVIC L R *et al.* Some mechanistic aspects of uncatalyzed and catalyzed reaction [J]. *Energy Fuels*, 1996, 10 (1): 158—168.

(下转第 9 页)

的运行寿命更长(达 60 000 h), 并将在含有杂质的氦气下运行, 预期合金自身的温度会达到 850 °C。与核环境有关的激活考虑出现了对候选材料允许钴含量的问题。

(3) 要求给叶片加上耐腐蚀的保护涂层。对于当前的参数, 定向结晶和单晶超耐热镍基合金是适用于涡轮第一级叶片的候选材料。

(4) 在冷却轮盘设计方案的情况下, 镍基超耐热合金是候选材料。若把温度限制在 600 °C, IN 718 是所选择的材料。对于更高的温度, 则应考虑粉末冶金 U720LI 和粉末冶金 MA6000 镍基合金。

参考文献:

[1] RAULE G, BAUER R. Properties of mate-

rials for the high temperature helium turbine under mechanical and thermal loading [R]. Mannheim: BBC Central Materials Laboratory, 1982.

[2] KODOCHIGOV N G, ROMANTSOV A A, DOLGOV S A. Materials used for the main elements of high-temperature elements of HTGR turbocompressor [A]. 2nd International Topic Meeting on High Temperature Reactor Technology [C]. Beijing: Department of Nuclear Energy Engineering under the Tsinghua University, 2004. 1—13.

[3] NATESAN K. Materials behavior in HTGR environments [R]. Washington: U S Department of commerce, National Bureau of Standards Special Technical Publication, 2003. NUREG/CR—6824, ANL—02/37.

[4] JAKOBEIT W, PFEIFER J P, ULLRICH G. Evaluation of high temperature alloys for helium gas turbines [J]. *Nuclear Technology*, 1984 **66**: 195—206.

[5] SCHUSTER H, JAKOBEIT W. High temperature alloys for the power conversion

loop of advanced HTRs [A]. *Proceeding of the Symposium Gas-Cooled Reactors with Emphasis on Advanced Systems* [C]. Jülich: IAEA, 1976. 401—418.

[6] SERAN J L, BILLOT P, BURLET H, *et al.* Metallic and graphite materials for out-of-core and in-core components of the VHTR: first results of the CEA R&D program [A]. 2nd International Topic Meeting on High Temperature Reactor Technology [C]. Beijing: Department of Nuclear Energy Engineering under the Tsinghua University, 2004(E15). 1—16.

[7] HALL B, ROAD C, CHESHIRE K. Results from EU 5th framework HTR projects HTR—M & HTR—M1 [A]. 2nd International Topic Meeting on High Temperature Reactor Technology [C]. Beijing: Department of Nuclear Energy Engineering under the Tsinghua University, 2004(E12). 1—15.

(渠源 编辑)

(上接第 4 页)

[4] TENG H, SUUBERG E H. Chemisorption of nitric oxide on char. 2 Irreversible carbon oxide formation [J]. *Ind Eng Chem Res*, 1993 **32**(3): 416—423.

[5] YANG J. Reaction of NO with carbonaceous materials. 1. Reaction and adsorption of NO on ashless carbon black [J]. *Carbon*, 2000, **38**: 715—727.

[6] CHAMBRION P, KYOTANI T, TOMITA A. Role of N-containing surface species on NO reduction by carbon [J]. *Energy Fuels*, 1998, **12**(2): 416—421.

[7] LI H Y, LU G Q, RUDOLPH V. The kinetics of NO and N₂O reduction over coal chars in fluidised-bed combustion [J]. *Chem Eng Sci*, 1998, **53**(1): 1—26.

[8] LEE K B, THRING M W, BEER J M. On the rate of combustion of soot in a laminar soot flame [J]. *Combust Flame*, 1962, **6**: 137—145.

[9] INDREK AARNA, SUUBERG ERIC M. A review of the kinetics of the nitric oxide-

carbon reaction [J]. *Fuel*, 1997, **76**(6): 475—491.

[10] LEVY J M, CHAN L K. NO/char reaction at pulverized coalflame conditions [A]. *Symposium Institute Combust 18th Symposium (Internation) on Combustion* [C]. Pittsburgh: Combustion Institute, 1981. 111—120.

[11] LEE J G, KIM J H, LEE H J, *et al.* Characteristic of entrained flow coal gasification in a drop tube reactor [J]. *Fuel*, 1996, **75**(9): 1035—1042.

[12] SUZUKI T, KYOTANI T, TOMITA A. Study on the carbon-nitric oxide reaction in the presence of oxygen [J]. *Ind Eng Chem Res*, 1994, **33**(11): 2840—2845.

[13] YAMASHITA H, TOMITA A, YAMADA H, *et al.* Influence of char surface chemistry on the reduction of nitric oxide with chars [J]. *Energy Fuels*, 1993, **7**(1): 85—89.

[14] CHEN S G, YANG R T, KAPTEIJN F, *et al.* A new surface oxygen complex on car-

bon: toward a unified mechanism for carbon gasification reactions [J]. *Ind Eng Chem Res*, 1993, **32**(11): 2835—2840.

[15] JACQUOT F. Kinetics of the oxidation of carbon black by NO₂ influence of the presence of water and oxygen [J]. *Carbon*, 2002 **40**: 335—343.

[16] 梁秀俊, 高正阳, 杜彦芬. 煤粉再燃过程煤焦与 NO 的反应机理分析 [J]. *华北电力技术*, 2003(12): 5—6.

[17] 钟北京, 张怀山. 催化剂作用下贫煤焦对 NO 还原的实验研究 [A]. *中国工程热物理学会第十届年会燃烧学论文集* [C]. 北京: 中国工程热物理学会, 2001. 655—659.

[18] TERAOKA Y, KAGAWA S, SHANG-GUAN W F. Kinetics of soot-O₂, soot-NO and soot-O₂-NO reactions over spine-type CuFe₂O₄ catalyst [J]. *Appl Catal*, 1997, **12**(2—3): 237—247.

(渠源 编辑)

炭黑与 NO 还原反应的研究综述= **An Overview of the Research on Reduction Reactions Involving Soot and NO** [刊, 汉] / XU Bin, XIE Guang-lu, FAN Wei-dong, et al (Institute of Mechanical & Power Engineering under the Shanghai Jiaotong University, Shanghai, China, Post Code: 200240) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2006, 21(1). — 1~4, 9

Over the last three decades reduction reactions involving soot and NO have attracted the attention of environmental research workers worldwide. The authors have given an overview of the recent research progress on the above-mentioned reduction reactions with an emphasis on the reduction reaction mechanism of pure NO and soot. The experimental instruments nowadays being often used are discussed. Various kinds of reaction instrumentation can be employed for different ranges of reaction-temperature and the various products thus obtained as a result of the NO-soot reaction are also quite different. At low temperatures (less than 300 °C) an adsorption reaction will mainly take place, while at high temperatures a reduction reaction occurs. Finally, a brief description is given of the impact of the different atmospheres and the presence of catalysts on reaction results. Different reaction atmospheres will have different impacts on NO-soot reactions. All substances, which promote the generation of an activated potential on a soot surface, can invariably be conducive to the progress of reactions. **Key words:** natural gas, soot, nitric oxide, desorption, surface base groups

氦气轮机装置的高温材料= **High-temperature Materials for Helium Gas Turbines** [刊, 汉] / JI Gui-ming, WANG Chong (Harbin No.703 Research Institute, Harbin, China, Post Code: 150036) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2006, 21(1). — 5~9

Due to its operating features a helium gas turbine is constrained in its use of construction materials, which must cope with specific operating conditions, environmental and maintenance service factors. The key problems to be considered during material selection include: long creep life, high-temperature corrosion and radiation effects. Briefly described are the major candidate materials used for the parts and components, such as blades, discs, stators and shafting, of HTGR-GT (high-temperature gas cooled reactor - helium gas turbine) based power generation plants. It is noted that oriented crystallization and single crystal nickel-based alloys with protective coatings are the best candidate materials for turbine blades of currently prevalent operating parameters. As for the design scheme of a cooled disc, nickel-based super heat-resistant alloys are considered eligible materials. For use at temperatures below 600 °C alloy IN 718 can be selected with U720LI and MA 6000 being destined for still higher temperatures. **Key words:** helium gas turbine unit, high-temperature alloy, turbine, blade, disc

微型燃气轮机回热器燃气腔结构优化= **Configuration Optimization of the Recuperator Gas-cavity of a Micro Gas Turbine** [刊, 汉] / ZHANG Dong-jie, WANG Qiu-wang, LUO Lai-qin, et al (State Key Laboratory of Multiphase Flows under the Xi'an Jiaotong University, Xi'an, China, Post Code: 710049) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2006, 21(1). — 10~13

A numerical simulation was conducted for the gas-cavity flow field of the split-body type recuperator of a 100 kW micro gas turbine along with an analysis of the impact on the gas cavity by such factors as the use of different cone angles α at the gas inlet piping and different lengths L of protrusion into the cavity. The results of the simulation indicate that when $\alpha = 5^\circ$ and L = 370 mm, the resistance losses of the flow path as a whole and the uniformity of velocities at various gas outlets have been comprehensively evaluated as having achieved optimum values. **Key words:** distributed power generation, micro gas turbine, recuperator, configuration optimization

燃气轮机湿空气回注循环分析= **An Analysis of the Gas Turbine Humid-air Injected Cycle** [刊, 汉] / WEN Xue-you, LU Ben, LI Ming-jia (Harbin No.703 Research Institute, Harbin, China, Post Code: 150036) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2006, 21(1). — 14~18

A gas turbine humid-air injected cycle is discussed with the assertion that there are two kinds of injected cycle, namely, internal and external humid air injection. On the basis of a partial regenerative steam injected gas turbine (PRSTIG) cy-