

# 焙烧温度对甲烷低温燃烧用 Pd 催化剂性能的影响

蒲 舸, 苗厚超, 陈 森, 王海涛

(重庆大学 动力工程学院 低品位能源利用技术及系统教育部重点实验室, 重庆 400044)

**摘 要:** 用分步浸渍法制备了 Pd/ $\gamma$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、Pd-16Zr $\gamma$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  系列催化剂, 使用制取的催化剂进行了超低浓度甲烷催化燃烧的实验, 考察了焙烧温度对钯催化剂活性的影响, 使用热重分析仪研究了催化剂热分解特性。结果表明: 对于 Pd/ $\gamma$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  系列催化剂, 焙烧温度为 600 °C 时, 催化活性最高; 对于 Pd-16Zr $\gamma$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  系列催化剂, 焙烧温度为 500 °C 时, 催化活性最高; 钯催化剂中 PdO 的分解活化能的大小与催化剂催化活性的高低有很好的相关性, 即 PdO 分解活化能较小时, 催化活性较高; 反之, PdO 分解活化能较大时, 催化活性较低。

**关 键 词:** 催化燃烧; 甲烷; Pd 催化剂; 焙烧温度; 热重分析仪; 热分解

中图分类号: TK16 文献标识码: A

## 引 言

通风瓦斯由于甲烷含量较低 (<1%), 常规直接燃烧的方法不能处理通风瓦斯, 用传统的变压吸附或者变温吸附等方法提纯分离, 需要消耗比所得甲烷更多的能量。

目前, 国内外通风瓦斯的利用主要有热氧化技术、催化氧化技术和作为辅助燃料技术 3 种利用方式<sup>[1~2]</sup>。在通风瓦斯催化氧化技术中, 高效催化剂的研制是该技术的核心问题。甲烷催化燃烧用催化剂主要有 Pd、Pt、Rh 和 Au 等催化剂, 其中 Pd 催化剂由于具有较好的低温起燃活性、活性稳定性、及较高的甲烷转化率而成为研究的重点<sup>[3~4]</sup>。

Patrick Euzer 等人实验研究表明, 以  $\text{SO}_2$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  为载体的 Pd 催化剂在 600~1 200 °C 焙烧温度段内, 随着温度的升高, 其催化性能随之降低<sup>[5]</sup>, 原因是 Pd 催化剂随着焙烧温度提高, 负载物的比表面积减小及 PdO 转化为 Pd 导致了其活性降低。Ryuji Kikuchi 等人的研究表明以  $\text{SiO}_2$  为载体的 Pd 催化剂在 800~1 000 °C 焙烧温度段内, 随温度升高, 其

催化活性升高<sup>[6]</sup>。Sekizawa 等人实验也发现了同样的现象<sup>[7]</sup>, Pd 催化剂在不同的载体及添加不同助剂后, 其最佳焙烧温度不同。在考察焙烧温度对 Pd 催化剂影响时, 大多数的研究者均从催化剂烧结、比表面积等角度分析<sup>[5~7]</sup>, 文献 [8~9] 表明, Pd 催化剂的活性与比表面积大小并无必然联系。为了深化焙烧温度对 Pd 催化剂甲烷催化燃烧活性影响的研究, 本研究运用分步浸渍法制备了 Pd/ $\gamma$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、Pd-16Zr $\gamma$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  系列催化剂, 使用制取的催化剂进行超低浓度甲烷的催化燃烧实验, 利用热重分析仪对制取的催化剂进行热分解特性研究。

## 1 实 验

### 1.1 催化剂的制备

采用分步浸渍法制备了 Pd/ $\gamma$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  催化剂。首先, 将  $\text{Pd}(\text{NO}_3)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  (分析纯) 溶于适量的去离子水中, 然后把一定量的载体  $\gamma$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  浸渍其中, 利用干燥箱加热到 120 °C, 充分搅拌至水分蒸发完全。将水分蒸发完全的催化剂放入干燥箱中, 在 120 °C 温度中干燥 12 h 最后使用管式炉加热至 600 °C 焙烧 4 h。在考察不同焙烧温度对 Pd/ $\gamma$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  催化剂活性影响时, 催化剂的其它制取条件不变, 仅改变添加 Pd 时的焙烧温度。

催化剂 Pd-16Zr $\gamma$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  的制作过程为: 首先, 要将计量的硝酸锆 (分析纯) 助剂负载到  $\gamma$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  上, 然后再将 Pd 负载到载体上, 其具体制作过程和 Pd/ $\gamma$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  催化剂相同。考察不同焙烧温度对 Pd-16Zr $\gamma$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  催化剂活性影响时, 仅改变添加 Pd 时的焙烧温度。

所有的催化剂中质量分数均为金属态的质量分数, 催化剂 Pd 质量分数均为 1%。

收稿日期: 2011-01-07 修订日期: 2011-02-16

基金项目: 重庆市科技攻关基金资助项目 (CSTC2009 AA7051); 重庆市自然科学基金资助项目 (CSTC2010BB6067)

作者简介: 蒲 舸 (1969-), 男, 四川南充人, 重庆大学副教授, 博士。

## 1.2 催化剂活性测量方法及装置

图 1 为催化剂活性评价装置流程图, 催化燃烧反应在固定床反应器内进行, 采用石英管作为固定床, 内径为 15 mm。催化剂用量 0.2 g 催化剂用石英棉包裹放在石英管中, 热电偶与催化剂接触, 以监测实际的反应温度。混合气中甲烷的体积分数为 1%, GHSV(空速) 50 000 mL/(g·h)。使用 SC-2000 型气相色谱仪对反应尾气进行检测分析, 在取样分析前, 至少在该温度点稳定反应 25 min 色谱条件: 柱温 120 °C, H<sub>2</sub> 载气, 5A 分子筛柱, TCD(热导检测器) 检测电流 120 mA。

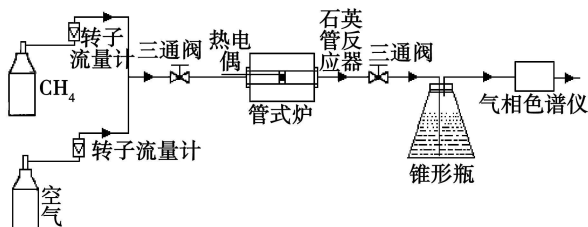


图 1 催化剂活性评价装置流程

使用 NETZSCH 公司 STA409 PC 型热重分析仪对催化剂的热解特性进行分析, 热解条件: 空气氛围, 流量为 50 mL/min, 升温速率为 4 K/min。在热重分析中, 由于升温过程中的动力学效应致使实际的 PdO 分解温度向高温方向偏移, 升温速率越高, 偏移量越大, 误差增加, 所以采用 4 K/min 的升温速率, 温度区间: 50 ~ 1 000 °C, 催化剂试剂量为 8 mg 左右, 质量精度为 0.002 mg。DSC(差式扫描量热) 单位为 mW/mg。

## 2 结果与分析

### 2.1 催化剂活性评价

催化剂活性以在某一温度下甲烷转化率来表示。在 400、500、600 和 700 °C 各焙烧温度下制取的 Pd/γ-A<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 系列催化剂的甲烷催化燃烧活性的 10、50、100 值列于表 1。其中 10、50、90 分别为甲烷燃烧反应转化率为 10%、50% 及 90% 时的转化温度。

表 1 Pd/γ-A<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 系列催化剂的催化活性

样品	燃烧温度 / °C		
	10	50	90
400	355	429	544
500	342	388	441
600	324	381	437
700	342	410	534

反应条件: CH<sub>4</sub> 体积分数为 1%、GHSV: 50 000 mL/(g·h)

由表 1 可知, 对于 Pd/γ-A<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 系列催化剂, 随着焙烧温度由 400 °C 上升至 700 °C, 催化剂的甲烷催化燃烧活性有一个先升高再下降的过程。在这 4 种催化剂中, 经过 600 °C 焙烧制取的 Pd/γ-A<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 催化剂, 其甲烷催化燃烧活性的起燃温度 10、中期燃烧温度 50、完全燃烧温度 90 都是最低的, 分别为 324、381 和 437 °C。

焙烧温度分别为 400、500、600 和 700 °C 的 Pd-16Zr/γ-A<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 系列催化剂甲烷催化燃烧活性如表 2 所示。在此系列催化剂中, 经 500 °C 焙烧的催化剂甲烷催化燃烧活性最高, 比活性最低的经 700 °C 焙烧的催化剂, 10、50、90 分别下降了 18.4、58.2 和 46.2 °C。这种情形和 Pd/γ-A<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 系列催化剂有了差异, 在 Pd/γ-A<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 系列催化剂中, 600 °C 焙烧后的催化剂甲烷催化燃烧活性最高。

表 2 Pd-16Zr/γ-A<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 系列催化剂的催化活性

样品	燃烧温度 / °C		
	10	50	90
400	298.5	356.4	450.3
500	284.7	349.9	441.8
600	301.0	363.3	452.6
700	303.1	408.1	488

反应条件: CH<sub>4</sub> 体积分数为 1%、GHSV: 50 000 mL/(g·h)

### 2.2 催化剂 DSC 分析

国内外学者对钯催化剂的甲烷低温催化燃烧反应机理进行了大量的研究, 现阶段的共识为: 钯催化剂中的 PdO 是甲烷催化燃烧反应中的活性成分, 而金属 Pd 颗粒则基本没有催化活性。

多数的研究者认为在钯催化剂上甲烷低温催化燃烧反应属于氧化还原机理即 Mars and van Krevelen 机理<sup>[10~11]</sup>, 反应机理过程为: 甲烷反应分子首先附着在钯催化剂上并与催化剂中的 PdO 发生氧化反应, 即 PdO 被还原, 被还原的 Pd 随即与原料气中的 O<sub>2</sub> 发生氧化反应, 即 Pd 重新氧化为 PdO。Mulle 等人用 O<sup>18</sup> 同位素实验证实了 PdO 的晶格氧参与甲烷燃烧反应<sup>[11]</sup>。国内外更多的研究小组用 O<sup>18</sup>/O<sup>16</sup> 同位素实验证实了钯催化剂中 PdO 的晶格氧参与了 CH<sub>4</sub> 低温催化燃烧反应<sup>[12~13]</sup>。

根据 Mars and van Krevelen 机理, 钯催化剂中 PdO 键的强弱对催化剂甲烷催化燃烧活性具有重要的影响。热重技术是进行金属氧化还原研究的重要手段, 利用热重分析仪产生的催化剂 DSC 曲线, 可以计算 Pd 催化剂的 PdO 键的分解活化能, 以此来

判断 Pd 催化剂中 PdO 键的强弱, 从而解释 Pd 催化剂的催化燃烧活性。

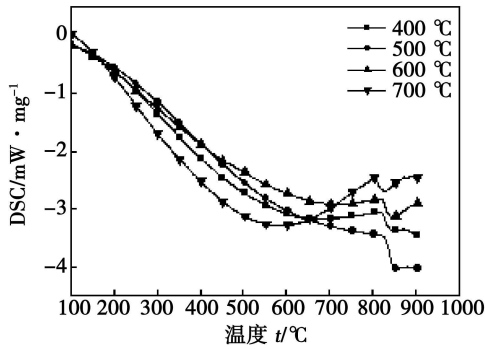


图 2 Pd/gamma-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 系列催化剂的 DSC 曲线

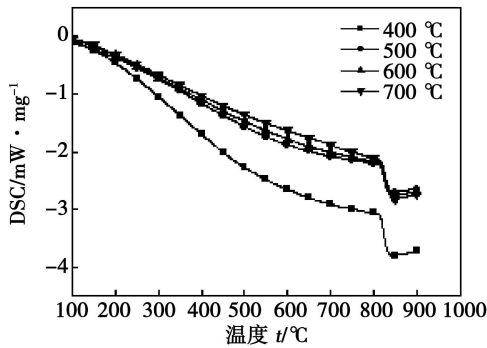


图 3 Pd-16Zr/gamma-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 系列催化剂的 DSC 曲线

图 2 和图 3 是焙烧温度分别为 400、500、600 和 700 °C 的 Pd/gamma-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、Pd-16Zr/gamma-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 系列催化剂的 DSC 曲线。图 2 和图 3 表明: 不同焙烧温度下制取的钯催化剂, 在 820 °C 附近, 有一个剧烈的吸热反应, 是 Pd 催化剂中的 PdO 的分解过程。

在 DSC 曲线上, 利用 Rogers-Morris 方法可以计算活化能 E<sup>[14]</sup>:

$$\left(\frac{d\alpha}{dt}\right)_1 = \frac{1}{H_1} \left(\frac{dH}{dt}\right)_1 = \frac{h_1 s}{H_1} = A f(\alpha) \exp\left(-\frac{E}{RT_1}\right) \quad (1)$$

$$\left(\frac{d\alpha}{dt}\right)_2 = \frac{1}{H_2} \left(\frac{dH}{dt}\right)_2 = \frac{h_2 s}{H_2} = A f(\alpha) \exp\left(-\frac{E}{RT_2}\right) \quad (2)$$

联立式 (1) 和式 (2), 得活化能 E 的方程为:

$$E = \frac{R \ln(h_1/h_2)}{1/T_2 - 1/T_1} \quad (3)$$

式中:  $\alpha$ —反应分数;  $f(\alpha)$ —微分机理函数;  $H_0$ —DSC 曲线下的焓值, mJ;  $t$ —时间, s;  $s$ —DSC 仪的灵敏度, mJ · s<sup>-1</sup> · mm<sup>-1</sup>;  $h_1$ 、 $h_2$ — $T_1$  和  $T_2$  处的 DSC 曲线高度, mm;  $T_1$  和  $T_2$  分别为 Pd 催化剂中 PdO 分解过程

中选取的两个温度值, K。

利用式 (3) 分别求得 Pd/gamma-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 系列催化剂的活化能及 Pd-16Zr/gamma-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 系列活化能, 如表 3 和表 4 所示。

表 3 和表 4 的数据表明: 在不同焙烧温度下制取的 Pd/gamma-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、Pd-16Zr/gamma-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 系列催化剂中的 PdO 分解活化能不同。对于 Pd/gamma-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 系列催化剂, 经过 600 °C 焙烧相比其它焙烧温度下焙烧的催化剂, PdO 发生分解反应时活化能最小, 即 Pd 催化剂中 PdO 键的强度较弱, 产生氧空位的能力较强, 能够为 CH<sub>4</sub> 的氧化提供充足的氧空位, 可以使 CH<sub>4</sub> 在较低的温度下即可转化, 所以焙烧温度为 600 °C 制取的 Pd/gamma-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 催化剂在超低浓度甲烷催化燃烧实验中催化活性最好, 起始转化温度 10 完全转化温度 90 均是最低的。

表 3 Pd/gamma-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 系列催化剂相关物理参数

焙烧温度 / °C	PdO 分解区间 / °C	分解活化能 / kJ · mol <sup>-1</sup>
400	813.7 ~ 836.5	7.1
500	826.6 ~ 843.8	7.4
600	819.0 ~ 836.6	6.6
700	794.8 ~ 820.0	9.7

表 4 Pd-16Zr/gamma-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 系列催化剂相关物理参数

焙烧温度 / °C	PdO 分解区间 / °C	分解活化能 / kJ · mol <sup>-1</sup>
400	816.4 ~ 835.2	9.3
500	817.1 ~ 835.8	8.3
600	815.4 ~ 834.9	9.8
700	821.9 ~ 840.3	11.5

由表 4 可知, 经过 500 °C 焙烧过后的催化剂的 PdO 分解反应活化能最小, 所以在超低浓度甲烷催化燃烧实验中, 经过 500 °C 焙烧的催化剂 Pd-16Zr/gamma-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 催化活性在超低浓度甲烷燃烧实验中优于其它温度焙烧的催化剂。

### 3 结论

利用分布浸渍法制取了 Pd/gamma-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、Pd-16Zr/gamma-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 系列催化剂, 分析了焙烧温度对催化剂甲烷催化燃烧活性的影响, 使用热重分析仪对制取的催化剂的热分解特性进行了研究, 结果表明:

(1) 在不同的焙烧温度下制作的催化剂有不同的催化活性, 焙烧温度为 600 °C 时, Pd/gamma-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 催化剂甲烷催化燃烧活性最高; 焙烧温度为 500 °C 时

Pd-16 Zr $\gamma$ -Al $_2$ O $_3$  催化剂甲烷催化燃烧活性最高;

(2) 利用热重分析仪研究了催化剂热分解特性。对于 Pd $\gamma$ -Al $_2$ O $_3$  系列催化剂, PdO 键的强弱与催化剂甲烷催化燃烧活性的高低有很好的相关性, 经过 600 °C 焙烧的催化剂分解活化能最小, 甲烷催化燃烧活性最高, Pd-16 Zr $\gamma$ -Al $_2$ O $_3$  系列催化剂, 经过 500 °C 焙烧制取的催化剂分解活化能最小, 而其甲烷催化燃烧活性最高。

#### 参考文献:

- [1] ZHANG HENG GROMEK JACK FERNANDO GAYATH W, et al. PdO/Pd system equilibrium phase diagram under a gas mixture of oxygen and nitrogen [J]. Journal of Phase Equilibria 2002 23(3): 246-248.
- [2] 尹 娟, 翁一武, SU SHI 等. 煤矿通风瓦斯在燃气轮机中的催化燃烧特性 [J]. 动力工程学报, 2009 2(29): 104-110.
- [3] MA DNE ANDREA ANDRE FLORIANE RUIZ PATRICKJ Structured bimetallic Pd-Pt $\gamma$ -Al $_2$ O $_3$  catalysts on FeCrAlloy fibers for total combustion of methane [J]. Applied Catalysis B: Environmental 2007 75(1-2): 59-70.
- [4] CMNO S CASALETTO M P LESTI L, et al. Pd-LaMnO $_3$  as dual site catalysts for methane combustion [J]. Applied Catalysis A 2007 327(2): 238-246.
- [5] EUZEN PATRICK LE GAL JEAN-HERVE. Deactivation of Palladium catalyst in catalytic combustion of methane [J]. Catalysis Today 1999 47(1-4): 19-27.
- [6] KKUCHI RYUJI MAEDA SHINGO SAKIKAZUNARI et al. Catalytic activity of oxide supported Pd catalysts on a honeycomb for low temperature methane oxidation [J]. Applied Catalysis A General 2003 239(1-2): 169-179.
- [7] SEKIZAWA KOSHI WIDJAJA HARDYANTO MAEDA SHINGO et al. Low temperature oxidation of methane over Pd/SrO $_2$  catalyst [J]. Applied Catalysis A General 2000 200(1-2): 211-217.
- [8] SEKIZAWA KOSHI WIDJAJA HARDYANTO. Low temperature oxidation of methane over Pd catalyst supported on metal oxides [J]. Catalysis Today 2000 59(1-2): 69-74.
- [9] WIDJAJA HARDYANTO SEKIZAWA KOSHI. Oxidation of methane over Pd/mixed oxides for catalytic combustion [J]. Catalysis Today 1999 47(1-4): 95-101.
- [10] FUJIMOTO KEN ICHIRO RIBEIRO FABIO H MIGUEL AVALOS BORJA et al. Structure and reactivity of PdOx/ZrO $_2$  catalysts for methane oxidation at low temperatures [J]. Journal of Catalysis 1998 179(2): 431-442.
- [11] MULLER CHRISTIAN A MAREK MACIEJEWSKI KOEPEL RENE A et al. Role of lattice oxygen in the combustion of methane over PdO/ZrO $_2$ . Combined Pulse TG/DTA and MS Study with  $^{18}$ O-Labelled Catalysts [J]. J Phys Chem 1996 100(51): 20006-20014.
- [12] YEUNG JACKY AU CHEN KADONG BELL ALEXIST et al. Isotopic studies of methane oxidation pathways on PdO catalysts [J]. Journal of Catalysis 1999 188(1): 132-139.
- [13] CLIPARU DRAGOS ALIMAN ERIC PFEFFERLE LISA. Contributions of lattice oxygen in methane combustion over PdO-based catalysts [J]. Journal of Catalysis 2001 203(1): 64-74.
- [14] 胡荣祖, 高胜利, 赵凤起 等. 热分析动力学 [M]. 北京: 科学出版社, 2008.

#### 新技术、新工艺

## 1 600 °C 级的 M501 燃气轮机装置

据《Gas Turbine World》2010 年 9~10 月号报道, MHI(日本三菱重工)已推出了其所研制的 1 600 °C 级 M501 燃气轮机联合循环装置。

日本 KEPCO(关西电力公司)已为在 2012 年初安装 6 台单轴 M501 联合循环装置开始了现场的准备工作, 这些装置计划将于 2013 年 10 月商业启动。

主要的联合循环设计和性能如下:

涡轮额定值: 在 1 600 °C 进口温度下, 标准的 1×1 (1 台燃气轮机加 1 台汽轮机) 参考装置在 ISO 条件下的额定输出总功率为 460 MW, 效率超过 61%。

启动: 在 25~30 min 内燃气轮机可以达到 320 MW 满输出功率, 然后汽轮机将在 10 min 达到 120 MW 满输出功率。

调低功率: 装置可以 20 MW/min 的速率调低功率, 并且在减少到 230 MW 输出功率 (50% 部分负荷) 时能保持效率超过 55%。

排放: 在没有催化还原的情况下, DLE(干式低排放) 燃烧有效地使 NO $_x$  排放减少到小于 25 mg/kg 并且使 CO 排放减少到 9 mg/kg。

(吉桂明 摘译)

Tong bin WEI Chun zhi (Baoding Electric Power Vocational Technical College, Baoding, China, Post Code 071003) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power — 2011, 26(3). — 351 ~ 353

During the practical operation of a steam turbine unit, the main steam pressure inevitably deviates from its reference value and affects the heat rate of the unit. Based on the off-design theory for steam turbines and in combination with the thermal system calculation, a program was designed by using the software MATLAB. With a 600 MW condensing type steam turbine unit serving as an example, the main steam pressure and heat rate correction curves for the unit were obtained through a calculation under the THA (turbine heat acceptance) operating condition. The main steam pressure ranged from 16.0 to 17.3 MPa. Compared with the heat rate correction curve provided by the steam turbine manufacturer, the error between the calculated value and the design one of the heat rate will increase with an increase of the main steam pressure deviation from the design value 16.7 MPa. When the main steam pressure is 16.0 MPa, the error attains its maximum value of 0.045%. However, this maximal error can completely meet the requirements of engineering practice. The research results show that the method in question has a certain calculation precision and is simple and practical. Key words: main steam pressure; off-design operating conditions of a steam turbine; heat rate correction curve

双进双出磨煤机降低磨煤电耗试验研究 = Experimental Study of a Dual Inlet and Outlet Coal Mill for Reducing Its Milling Power Consumption [刊, 汉] YUE Jun feng, XIAO Jie, QN Peng (Jiangsu Frontier Electric Power Technology Co., Ltd, Nanjing, China, Post Code 211102), SU Zhongming (Huanun Electric Power Co., Ltd, Changshu, China, Post Code 215536) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power — 2011, 26(3). — 354 ~ 357

On a dual inlet and outlet coal mill, an experiment for reducing the coal milling power consumption was performed and the influence of the bypass air quantity, steel ball load, steel ball distribution proportion and material level etc factors on the coal milling power consumption was studied. The test results show that the coal milling power consumption gradually increases with an increase of the bypass air quantity, rising from 18 kW·h/t at a bypass air quantity of 10 t/h to 18.24 kW·h/t at a bypass air quantity of 26 t/h. The coal milling power consumption will first decrease and then increase with an increase of the steel ball load. When the steel ball load is 54 t/h, the power consumption will be minimized. It will gradually decrease with an increase of the material level, lowering from 17.44 kW·h/t at a material level of 400 mm to 16.45 kW·h/t at a material level of 600 mm. Among all the influencing factors, the steel ball load will play a decisive role in influencing the coal milling power consumption, the influence of the steel ball proportion and material level, however, can not be ignored. Key words: dual inlet and outlet coal mill; coal mill power consumption; steel ball

焙烧温度对甲烷低温燃烧用 Pd 催化剂性能的影响 = Influence of the Calcination Temperature on the Per-

formance of Pd Catalyst Used in Low-temperature Combustion of Methane [刊, 汉] PU Ge MAO Houchao, CHEN Sen et al (Education Ministry Key Laboratory on Low Quality Energy Source Utilization Technologies and Systems, College of Power Engineering, Chongqing University, Chongqing, China, Post Code: 400044) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power — 2011, 26(3). — 358 ~ 361

A series of Pd/ $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and Pd-16Zr/ $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> catalysts were prepared by adopting a step-by-step dipping method. The catalysts such prepared were used to conduct a catalytic combustion experiment of methane at an ultra low concentration. In this connection, the influence of the calcination temperature on the activity of palladium catalyst was investigated and its thermal decomposition characteristics were studied by using a thermogravimetric analyzer. The research results show that for Pd/ $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> series catalysts, when the calcination temperature is 600 °C, the activity of the catalyst is highest. For Pd-16Zr/ $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> series catalysts, when the calcination temperature reaches 500 °C, the activity of the catalyst attains the highest. Among the palladium catalysts, the magnitude of the decomposition activation energy of PdO is closely correlated with the catalytic activity of the catalyst used, i.e. when the decomposition activation energy of PdO is relatively small, the activity of the catalyst is comparatively high and vice versa.

Key words: catalytic combustion, methane, Pd catalyst, calcination temperature, thermogravimetric analyzer, thermal decomposition

用于支撑 HTR-10GT 氦气轮机的磁力轴承试验研究 = Experimental Study of the Magnetic Bearings for Supporting a HTR-10GT Helium Turbine [刊, 汉] LI Dong, ZHANG Zhi-jian (College of Nuclear Science and Technology, Harbin Engineering University, Harbin, China, Post Code: 150001), YU Xiao-li, YU Su-yuan (Nuclear Energy and New Energy Source Research Institute, Tsinghua University, Beijing, China, Post Code: 100084) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power — 2011, 26(3). — 362 ~ 365

To verify the technical feasibility of the magnetic bearings for supporting a helium turbine, a small-sized rotor simulation test rig was built based on the basic theory of the kinetic similarity. The basic structure and key parameters of the test rig were described. On the test rig, completed were a static state levitation test, bending critical speed passing test and self-balance control algorithm test. The test results show that during the static state levitation period, the vibration amplitude of the rotor does not exceed 2  $\mu$ m. The PID (proportional, integral and differential) controller of the tandem phase compensator can make the rotor successfully pass through the first and second order critical speed. The self-balance control method can effectively reduce and eliminate the vibration amplitude of the rotor and narrow the variation range of the current through the coils. By the simulation test, the design principle and control method of the magnetic bearings were verified and certain design and operation experience was accumulated.

Key words: magnetic bearing, helium turbine, test rig, control algorithm