

除雾器 $\Delta P-v-d_{cr}$ 选型方法研究

李 森, 周屈兰, 徐通模, 惠世恩

(西安交通大学 能源与动力工程学院, 陕西 西安 710049)

摘 要: 通过对湿法脱硫系统中除雾器分离特性的研究, 定义了除雾器临界分离粒径和圆柱对液滴临界捕捉粒径两个概念。针对设有管式烟气再加热器湿法脱硫系统, 提出了除雾器 $\Delta P-v-d_{cr}$ 选型方法。该方法为: 在满足烟气压降小于 200 Pa 且临界分离粒径小于烟气再加热器管壁临界捕捉粒径要求的除雾器中, 选择烟气压降最小的除雾器作为最佳选型。该方法简洁明了, 对除雾器的优化设计、选型和运行工况分析有一定的指导作用, 同时也提供了全面衡量除雾器分离特性的标准。

关 键 词: 湿法脱硫; 除雾器; 液滴; 分离

中图分类号: TQ051.1·X701.3 文献标识码: A

1 引 言

湿法烟气脱硫(WFGD)的特点是脱硫剂、脱硫过程和反应副产品等均在湿态下进行, 吸收塔中的烟气流程如图 1 所示。由于脱硫后的烟气携带微小液滴, 烟温低于露点, 烟气需流经除雾器把液滴分离, 防止或减轻烟气中的液滴对烟气再加热器、后部烟道和风机等处的沾污、腐蚀, 所以除雾器在脱硫系统非常重要^[1~2]。在湿法脱硫系统中, 通常采用波形板式除雾器, 其结构如图 2 所示。本文提出了 $\Delta P-v-d_{cr}$ 图法, 来综合分析除雾器性能, 对除雾器的选型、优化及工况分析有一定的参考价值。

2 除雾器性能参数

湿法烟气脱硫系统脱硫率高, 但最易发生腐蚀和局部堵塞, 同时烟气阻力大, 耗电量大。对于除雾器而言, 除雾能力高, 后面的设备腐蚀和局部堵塞可能性就小, 但通常烟气压降大, 经济性差。如何综合评价除雾器性能及优化除雾器结构, 应从除雾能力、烟气压降和烟气临界流速来全面分析。

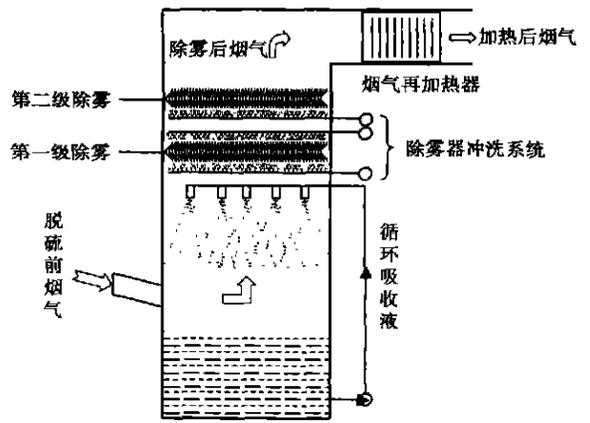


图 1 湿法脱硫塔示意简图

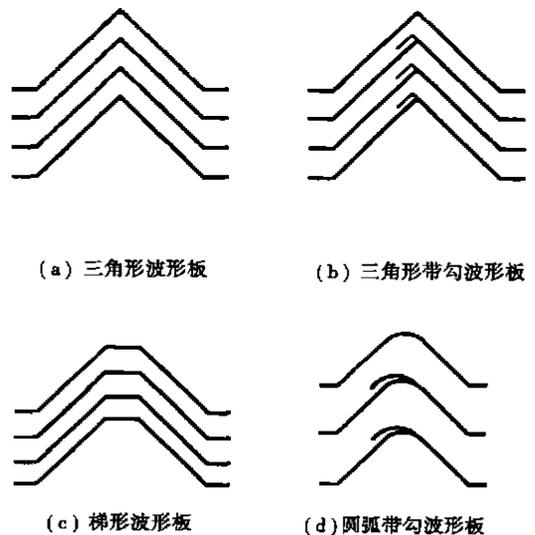


图 2 除雾器板型

2.1 除雾能力参数—除雾器临界分离粒径 d_{cr}

收稿日期: 2004-01-09; 修订日期: 2004-04-06

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50276051)

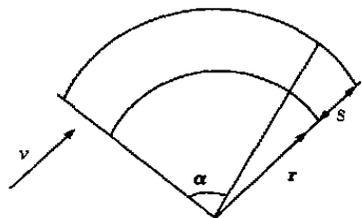
作者简介: 李 森(1973~), 男, 陕西凤翔人, 西安交通大学博士研究生。

Bürkholz 和 Muschelknautz 他们对图 3 所示波形板分离特性进行了分析, 认为实际波形板对 粒径为 d_p 的液滴分离效率 η_d 可写成函数:

$$\eta_d = f\left(\frac{\rho_p v d_p^2}{18 \eta_g} \cdot \frac{\alpha}{S}\right) \quad (1)$$

式中: ρ_p — 液滴的密度; η_g — 气体动力粘度。

式(1)中, 函数 η_d 具体形式可以通过实验整理得到。波形板除雾器利用液滴的惯性力进行分离, 在一定的气流流速下, 粒径大的液滴惯性力大, 易于分离, 当液滴粒径小到一定程度时, 除雾器对液滴失去了分离能力。除雾器临界分离粒径是指除雾器在一定气流流速下能被完全分离的最小液滴粒径, 本文用 d_{cr} 表示, 此粒径就是满足式(1) $\eta_d = 100\%$ 条件中最小液滴粒径。



v—烟气流速; r—通道的半径; s—通道间距; alpha—通道夹角

图 3 气流通道简图

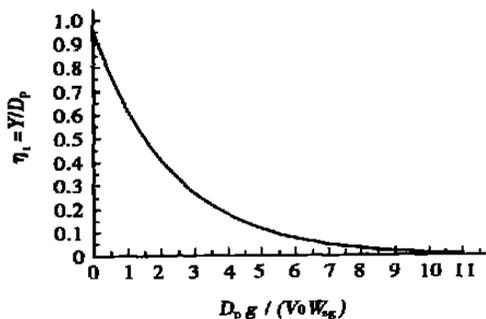
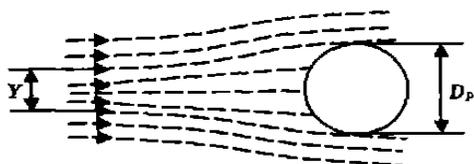


图 4 颗粒冲刷圆管时运动轨迹及圆管对颗粒捕集效率图

除雾器临界分离粒径 d_{cr} 越小, 表示除雾器除雾能力越强, 那么除雾器除雾能力达到什么程度可以避免除雾后的烟气不沾污后面的装置? 对此进行分析。

烟气从除雾器流出后, 首先可能沾污管式烟气再加热器。湿烟气冲刷加热管(加热管不加肋片且布置成顺排, 以防止被液滴沾污)时, 所携带的大粒径液滴会被管外壁捕捉, 但液滴粒径小到一定程度时, 不会被烟气再加热器管壁捕捉, 且能随烟气在很短的距离内被加热蒸发, 液滴运动轨迹如图 4 所示。这里把不能被烟气再加热器管壁捕捉的最大液滴粒径称为捕捉临界粒径, 本文用 d_{cr} 表示。

旋风分离器方面的权威巴利特利用绕圆柱的颗粒的轨迹计算了捕集效率 $\eta_l^{[3]}$ 。

在图 4 中, Y 是颗粒对直径为 D_p 圆柱的碰撞范围, 因此, 捕集效率定义为 $\eta_l = Y/D_p$; W_{sg} 是粒径为 d_p 的颗粒在气体内的终端速度, $W_{sg} = \rho_p d_p^2 g / (18 \eta_g)$, 式中 v_0 为气流速度, η_g 为气体动力粘度, ρ_g 为颗粒密度, g 为重力加速度。这里可以把 $D_p g / (v_0 W_{sg}) = 10$ (对应捕集率为 0.5%, 见图 4) 时, 所对应的颗粒粒径称为捕捉临界粒径 d_{cr} 。此处的颗粒可以是球形固体颗粒, 也可以是球形液滴。

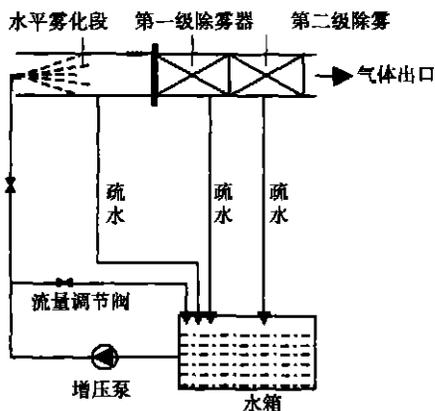


图 5 试验系统图

除雾器临界分离液滴粒径 d_{cr} 小于管式烟气再加热器的液滴捕捉临界粒径 d_{cr} 时, 烟气再加热器管壁就不会被沾污。由 $D_p g / (v_0 W_{sg}) = 10$ 可以分析得出, 气流速度越小, 圆柱捕捉临界粒径 d_{cr} 越大。这种研究方法在锅炉飞灰对受热面磨损研究中已得到应用^[4](携带飞灰的烟气冲刷受热面管壁时, 大粒径的灰粒会冲击到管壁使管壁磨损, 而小颗粒的灰不会冲击到壁上)。

2.2 烟气压降 ΔP

湿法脱硫系统设备多, 运行耗电量大, 人们希望除雾器在满足除雾要求的情况下, 烟气流经除雾器

时压降最小, 这就涉及到除雾器的优化设计。在湿法脱硫系统中, 通常要求除雾器烟气压降 $\Delta P < 200$ Pa。

$$\Delta P = \xi \frac{\rho_g v^2}{2} \quad (2)$$

式中: ξ —阻力系数; ΔP —烟气流经除雾器时的压降; v —烟气流速; ρ_g —烟气的密度。

2.3 除雾器临界烟气流速 v_{cr}

在一定烟速范围内, 除雾器对液滴分离能力随烟气流速增大而提高, 但当烟气流速超过一定流速后除雾能力下降, 这一临界烟气流速称为除雾器临界烟气流速, 本文用 v_{cr} 表示。

3 实验系统

本次试验利用水经过雾化喷嘴雾化后被空气携带来模拟脱硫吸收塔内湿烟气进入除雾器的工况, 除雾器波形板尺寸与原型 1:1。除雾器出口处气流中液滴粒径采用气流冲击氧化镁膜片法测量。试验对 4 种波形板(见表 1)组成的除雾器分离性能进行了研究。

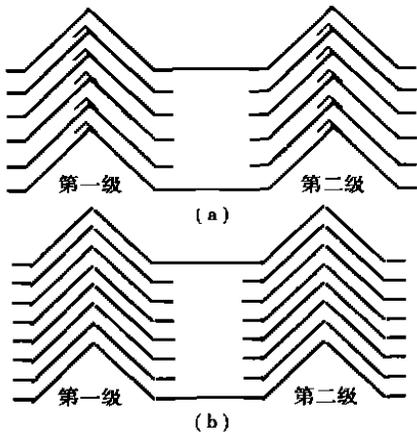


图 6 试验中采用的除雾器波形板形式

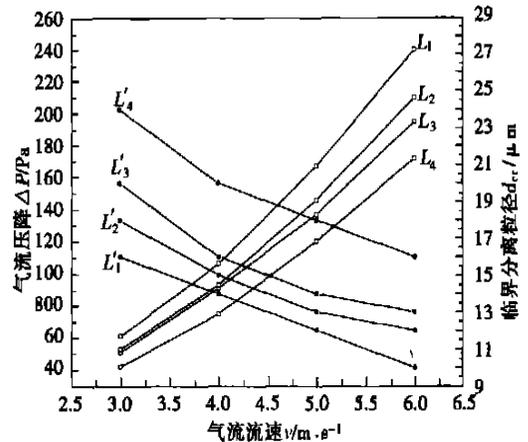
4 除雾器特性 $\Delta P-v-d_{cr}$ 图分析法

4.1 除雾器特性 $\Delta P-v-d_{cr}$ 图

当除雾器波形板结构已定时, 根据式(1)可知, 对于一定粒径 d_p 的液滴的分离效率只是气流速度 v 的函数, 所以除雾器临界分离粒径 d_{cr} 可以用函数 $d_{cr} = f_1(v)$ 表示; 根据式(2)可知, 除雾器阻力与阻力系数 ξ 和气流速度 v 有关, 而阻力系数 ξ 只与除雾器波形板结构有关, 当除雾器波形板结构已定时, 此时除雾器气流压降只是气流速度 v 的函数, 可用函

数 $\Delta P = f_2(v)$ 表示。由上面分析可知, 对于某一除雾器, 除雾器临界分离粒径 d_{cr} 和气流压降 ΔP 都只是气流速度的函数, 所以可以把除雾器特性试验结果 d_{cr} 和 ΔP 分别与气流速度 v 的关系绘制在一张图上, 这就是除雾器特性 $\Delta P-v-d_{cr}$ 图。

本次试验对表(1)中的 4 种除雾器进行了试验, 实验时气流速度根据湿法脱硫系统的特点选用了 $v = 3$ m/s, $v = 4$ m/s, $v = 5$ m/s, $v = 6$ m/s 4 种流速。实验结果利用图(7) $\Delta P-v-d_{cr}$ 表示出来。



曲线 L_1, L_2, L_3, L_4 分别表示表 1 中除雾器 1、除雾器 2、除雾器 3 和除雾器 4 气流压降与气流速度的函数曲线; 曲线 L'_1, L'_2, L'_3, L'_4 分别表示表 1 中除雾器 1、除雾器 2、除雾器 3 和除雾器 4 气流速度与临界分离粒径的函数曲线。

图 7 除雾器 $\Delta P-v-d_{cr}$ 图

表 1 试验中采用的波形板除雾器结构特点

除雾器编号	除雾器特点
除雾器 1	图 6(a) 波形板形式, 两级布置, 曲折角 45° , 第一级板间距 $S = 30$ mm, 第二级板间距 $S = 30$ mm。
除雾器 2	图 6(a) 波形板形式, 两级布置, 曲折角 45° , 第一级板间距 $S = 40$ mm, 第二级板间距 $S = 30$ mm
除雾器 3	图 6(b) 波形板形式, 两级布置, 曲折角 45° , 每级板间距 $S = 25$ mm
除雾器 4	图 6(b) 波形板形式, 两级布置, 曲折角 45° , 每级板间距 $S = 30$ mm

4.2 除雾器 $\Delta P-v-d_{cr}$ 图分析法

除雾器 $\Delta P-v-d_{cr}$ 图, 是用来综合分析除雾器性能, 对除雾器的选型、优化和工况分析有很大的参考价值。除雾器 $\Delta P-v-d_{cr}$ 图分析法, 就是根据脱硫系统的特点, 选定除雾器内烟气流速, 根据此流速在除雾器 $\Delta P-v-d_{cr}$ 图上查得除雾器所对应的烟气压降 ΔP 及临界分离粒径 d_{cr} , 当满足 $\Delta P < 200$ Pa 和 $d_{cr} < d_{req}$ 要求时, 该除雾器可以采用, 否则不能采用。如

有几种除雾器都能满足要求, 从中选择压降最小的除雾器作为最佳选择。对于布置在脱硫吸收塔内的除雾器, 气流速度 v 与塔内气流速度相等, 不同形式的脱硫塔, 其速度不同; 当除雾器布置在吸收塔外

时, 气流选择灵活, 但不能大于除雾器临界流速 v_{cr} 。

下面介绍对表 1 中 4 种除雾器利用 $\Delta P-v-d_{cr}$ 图 (见图 7) 选型, 进一步说明除雾器 $\Delta P-v-d_{cr}$ 的方法。

表 2 除雾器 $\Delta P-v-d_{cr}$ 选型结果

除雾器编号	布置在塔内 $v = 4.5 \text{ m/s}$		布置在塔外 $v = 5.5 \text{ m/s}$		是否选用及原因
	$\Delta P/\text{Pa}$	$d_{cr}/\mu\text{m}$	$\Delta P/\text{Pa}$	$d_{cr}/\mu\text{m}$	
除雾器 1	131	12.9	205	10.9	可以布置在吸收塔内; 不能布置在吸收塔外, 因为 $\Delta P > 200 \text{ Pa}$ 压降太大。
除雾器 2	118	13.8	178	12.4	不能布置在吸收塔内, 因为 $d_{cr} > 13.5 \mu\text{m}$; 可以布置在吸收塔外。
除雾器 3	112	14.9	167	13.6	不能布置在吸收塔内和塔外, 因为 $d_{cr} > 13.5 \mu\text{m}$ 。
除雾器 4	95	19.1	145	17.1	不能布置在吸收塔内和塔外, 因为 $d_{cr} > 13.5 \mu\text{m}$ 。

假定烟气再加热器进口最低流速 $v_0 = 4 \text{ m/s}$, 管外径为 $D_p = 30 \text{ mm}$, 可利用 $D_p g / (v_0 W_{sg}) = 10$ 计算得到烟气再加热器管捕捉临界粒径为 $13.5 \mu\text{m}$ 。只要除雾器临界分离粒径小于 $13.5 \mu\text{m}$ 时, 加热管壁不会被沾污。根据脱硫系统的特点, 设除雾器布置在吸收塔内时烟气流速取 $v = 4.5 \text{ m/s}$, 当布置在吸收塔外时烟气流速取 $v = 5.5 \text{ m/s}$, 在实验中这个流速都小于除雾器临界流速。根据图 7 分析得到选型结果见表 2。

5 结 论

本文提出了除雾器 $\Delta P-v-d_{cr}$ 图分析法, 该方法

是在满足烟气压降小于 200 Pa 且临界分离粒径小于烟气再加热器临界捕捉粒径要求的除雾器中, 选择烟气压降最小的除雾器作为最佳选型。该方法简洁明了, 对除雾器的优化设计、选型和运行工况分析有一定的指导作用, 同时也提供了全面衡量除雾器分离特性的标准。

参考文献:

- [1] 钟 秦. 燃煤烟气脱硫脱硝技术及工程实例[M]. 北京: 化学工业出版社, 2002.
- [2] 阎维平. 洁净煤电发电技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2002.
- [3] 小川明. 气体中颗粒的分离[M]. 周世辉译. 北京: 化学工业出版社, 1991.
- [4] 陈学俊, 陈听宽. 锅炉原理[M]. 北京: 机械工业出版社, 1991.

(上接第 574 页)

4 结 论

(1) CuO 在 $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ 载体上分布的阈值为 0.47 mg/m^2 , 这也是以离子形态分散在 $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ 表面的的最大量, 只有当 CuO 负载低于阈值的情况下, 在 $\text{CuO}/\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ 上添加助剂才有助于研究助剂对金属盐分散度的影响作用。

(2) 引入助剂的时候, 必须考虑到阴离子对脱硫活性的影响, 不应引入可能会明显阻滞脱硫反应的阴离子, 尤其是 SO_4^{2-} 。

(3) 添加助剂使脱硫活性发生变化的因素包括: CuO 在载体表面分散度是否得到改善; 脱硫剂的表面贮氧功能是否得到改善; 负载物与载体结合物

的相态变化情况; 脱硫剂的孔结构变化情况等等。

参考文献:

- [1] 杨国华, 郑琼姣. 流化床 CuO 烟气脱硫试验研究[J]. 环境工程, 1995, 13(5): 19-23.
- [2] JEONG SM, KIN SD. Enhancement of the SO_2 sorption capacity of $\text{CuO}/\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ sorbent by an alkali-salt promoter[J]. *Ind Eng Chem Res*, 1997, 36(12): 5425-5431.
- [3] CENTI G, PASSA RINI N, PERATHONER S, et al. Combined $\text{deSO}_x/\text{deNO}_x$ reactions on a copper on alumina sorbent-catalyst. 1. Mechanism of SO_2 oxidation-adsorption[J]. *Ind Eng Chem Res*, 1992, 31(8): 1947-1955.
- [4] CENTI G, PASSA RINI N, PERATHONER S, et al. Combined $\text{deSO}_x/\text{deNO}_x$ reactions on a copper on alumina sorbent-catalyst. 2. Kinetics of the deSO_x reaction[J]. *Ind Eng Chem Res*, 1992, 31(8): 1956-1963.
- [5] FRIEDMAN RM, FREEMAN JJ, LYILE FW. Characterization of $\text{Cu}/\text{Al}_2\text{O}_3$ catalysts[J]. *J Catal*, 1978, 55: 10-28.

Thermal Energy & Power. — 2004, 19(6). — 567 ~ 571.

The promotive role of a hydration reaction on CaO particle-based desulfurization reaction has been attributed to the activation of the hydration reaction while the promotive role of Fe₂O₃ on the above-cited desulfurization reaction attributed to an increase in active core number of the CaO particles. From the viewpoint of chemical kinetics the above assertion is not sufficiently clear-cut. Through a series of TGA tests the authors have proved that the essential function of hydration activation reaction of CaO and that of Fe₂O₃ in CaO particle-based desulfurization reaction consists in the enhancement of a pre-exponential factor. Moreover, a contrast analysis was conducted of the functioning mechanism of the hydration reaction and Fe₂O₃. **Key words:** desulfurization reaction, hydration reaction, Fe₂O₃, CaO particles, Arrhenius formula, pre-exponential factor

助剂对 CuO/ γ -Al₂O₃ 烟气脱硫活性影响的初步研究 = Preliminary Study of the Effect of a Catalytic Promoter on the Activity of CuO/ γ -Al₂O₃ for Flue Gas Desulfurization [刊, 汉] / WANG Yan, ZHANG Chao, ZHENG Chu-guang (National Key Laboratory on Coal Combustion under the Huazhong University of Science & Technology, Wuhan, China, Post Code: 430074) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2004, 19(6). — 572 ~ 574, 578.

Sulfur dioxide and NO_x brought about by combustion processes are a main precursor of acid rain. The use of regenerative CuO/ γ -Al₂O₃ as an integrated adsorption catalyst for the removal of sulfur dioxide and NO_x has wide prospects of applications. Through the adding of various metallic salt compounds into a CuO/ γ -Al₂O₃ flue-gas desulfurization agent to serve as a catalytic promoter the effect of various promoters on desulfurization activation has been preliminarily investigated. In addition, with the help of physical characterization means an analysis was conducted of the internal causes, which enable these promoters to influence the desulfurization activation. **Key words:** flue gas desulfurization, copper oxide, metallic salt compound, catalytic promoter

除雾器 $\Delta P-v-d_{cr}$ 选型方法研究 = A Study of the Type Selection of Mist Eliminators with the Help of a $\Delta P-v-d_{cr}$ Method [刊, 汉] / LI Sen, ZHOU Qu-lan, XU Tong-mo, HUI Shi-en (College of Energy & Power Engineering under the Xi'an Jiaotong University, Xi'an, China, Post Code: 710049) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2004, 19(6). — 575 ~ 578.

Through a study of the separation characteristics of a mist eliminator in a wet desulfurization system the following two concepts are defined, namely, critical separated droplet diameter of a mist eliminator and critical captured droplet diameter by a cylinder. With respect to a wet desulfurization system equipped with a tubular flue-gas reheater the authors have proposed the type selection of mist eliminators by using a $\Delta P-v-d_{cr}$ method. This method can be described as follows. A mist eliminator with the lowest flue-gas pressure drop is selected as the optimum type. The selection shall meet two requirements; i. e. the flue-gas pressure drop is less than 200 Pa and the critical separated particle diameter is smaller than the critical captured particle diameter of the flue-gas reheater tube wall. The recommended method features conciseness and clarity. It can serve as a guide during the optimized design, type selection and operating condition analysis of mist eliminators. Moreover, it also provides a standard for a comprehensive evaluation of the separation characteristics of mist eliminators. **Key words:** wet flue-gas desulfurization, mist eliminator, droplet, separation

粉煤加压气化小型试验研究 = Small-scale Experimental Research of Pulverized-coal Pressurized Gasification [刊, 汉] / REN Yong-qiang (Energy & Power Engineering Institute under the Xi'an Jiaotong University, Xi'an, China, Post Code: 710049), XU Shi-sen, XIA Jun-cang, ZHU Hong-chang (Xi'an Thermal Engineering Institute Co. Ltd., Xi'an, China, Post Code: 710032) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2004, 19(6). — 579 ~ 581.

Coal gasification technology is considered a key technology employed in coal-based combined cycle power generation,