

文章编号: 0253-2239(2008)12-2408-08

太阳能光催化-导光管北京夏季晴天 降解甲醛的实验研究

吴延鹏¹ 王晓东² 马重芳³

(¹ 北京科技大学土木与环境工程学院, 北京 100083; ² 北京科技大学机械工程学院, 北京 100083)

³ 北京工业大学环境与能源工程学院, 北京 100022

摘要 太阳能光催化-导光管将太阳光导入的同时兼具光催化空气净化功能。导光管的长度为 0.55 m, 直径为 0.28 m, 导光管内表面的平均反射比为 0.82。散光板的直径为 0.28 m, 为雪花型散光板, 将光催化剂 DegussaP25 溶液均匀地喷涂在散光板凹凸不平的一侧, 附着在散光板上的 DegussaP25 质量为 1.75 g。实验表明, 涂层背对太阳时散光板下的照度比无涂层的散光板下的照度有一定程度的减弱, 但是减弱的幅度并不大, 平均降幅只有 3.03%, 因此不会对室内采光产生明显影响。实验表明, 夏季晴天上午太阳直射下, 太阳能光催化-导光管能够使 0.1 m³ 小室内甲醛体积分数从 1.0×10^{-6} 下降到 0.19×10^{-6} 。中午太阳直射下 1 h 之内甲醛体积分数从 1.0×10^{-6} 下降到 0.17×10^{-6} ; 比上午的降解速度加快, 降解甲醛更为完全; 下午太阳直射下甲醛降解, 1 h 之内, 甲醛体积分数从 1.0×10^{-6} 下降到 0.2×10^{-6} , 降解速度比上午、中午都慢, 但也达到了良好的降解效果。

关键词 光学设计; 空气净化; 光催化; 太阳能导光管; 甲醛

中图分类号 O436 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20082812.2408

Solar Light Pipe Combined with Photocatalysis to Decompose Formaldehyde under Sunny Conditions in Summer in Beijing

Wu Yanpeng¹ Wang Xiaodong² Ma Chongfang³

¹ School of Civil and Environmental Engineering, University of Science and Technology, Beijing 100083, China
² School of Mechanical Engineering, University of Science and Technology, Beijing 100083, China
³ College of Environmental and Energy Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100022, China

Abstract Solar light pipe combined with photocatalysis could introduce sunlight into rooms and also has air purification function. The length of the solar light pipe is 0.55 m with a diameter of 0.28 m. The average ratio of reflection of the surface of solar light pipe is 0.82. Snow shaped astigmatism board has a diameter of 0.28 m. Coating DegussaP25 solution evenly on the rugged side for the quality of 1.75 g. The experiments show that when the coating side away from the sun the lighting degree may be reduced compared with when facing the sun. But the average reduction was only 3.03 percent which would not have a significant impact on indoor lighting. The experiments also show that in a sunny summer morning under the direct sun, Solar light pipe combined with photocatalysis could reduce formaldehyde in a little box of 0.1 m³ volume from 1.0×10^{-6} to 0.19×10^{-6} . Under the direct noon sun within 1h formaldehyde volume from 1.0×10^{-6} down to 0.17×10^{-6} with faster and more complete degradation of formaldehyde. In direct afternoon sun within 1 hour, the volume fraction of formaldehyde reduced from 1.0×10^{-6} down to 0.2×10^{-6} . The rate of degradation in the afternoon was slower than that in the morning and noon, but also achieved a good performance.

Key words optical design; air cleaning; photocatalysis; solar light pipes; formaldehyde

收稿日期: 2008-08-26; 收到修改稿日期: 2008-09-26

基金项目: 国家自然科学基金(50476036)资助课题。

作者简介: 吴延鹏(1972-), 男, 博士, 讲师, 主要从事太阳能导光管、光催化和建筑节能等方面的研究。

E-mail: wuyanpeng@tsinghua.org.cn

1 引言

太阳能导光管能够把太阳光有效地传递到室内阴暗的房间或者易燃易爆不宜采用电光源的房间,可以有效地减少电能消耗,又不会带来过多的热量^[1]。太阳能导光管还可以用于办公楼、住宅、商店、旅馆等建筑的地下室或走廊的自然采光或辅助照明,并能取得良好的照明效果,是太阳能光利用的一种有效方式^[2~5]。光催化技术是近年来发展起来的一种有效的空气净化技术,光催化是指光敏化剂吸收光后对物质所发生的光化学变化,它不仅能降解环境中的有害有机物,而且可氧化去除大气中的氮氧化物 NO_x 和含硫化合物 H_2S 、 SO_2 等有毒气体,同时还具有杀菌、除臭的功能^[6,7,9]。综合两种技术的优点,提出将导光管技术与光催化技术相结合的新方案,使导光管不仅发挥白天自然采光的作用,而且还可以有效改善室内空气品质,该项研究在国内外率先开展,具有一定的创新性,也有很强的实用价值。基于上述思想,把纳米 TiO_2 涂在太阳能导光管的散光板上,搭建太阳能光催化-导光管实验装置,考察其光催化效果。

2 太阳能光催化-导光管实验装置

2.1 光催化剂的选用及散光板上纳米 TiO_2 的负载

TiO_2 有三种晶体结构:板钛矿型、锐钛矿型和金红石型。板钛矿型结构不稳定,650 °C 以上直接转变为金红石型,因为不能用人工合成方法制造,已经很少应用。金红石型的密度和折射率比较大,具有较强的分散光射线的本领,但是由于其对紫外线有屏蔽作用,所以不能用于太阳能光催化-导光管的实验。锐钛矿型在常温下稳定,但在高温下可以向金红石转化。由于锐钛矿的结构不如金红石稳定,在晶体表面的缺陷比金红石要多,受激发的电子和空穴的复合比较差,纳米级的锐钛矿具有良好的光催化性能,保持一定比例的锐钛矿相和金红石相的二氧化钛的混晶的催化活性最好。Bickler 及 Tsai 等人的研究证明,由于 TiO_2 两种晶型存在着能级结构的差异,在一定情况下形成的混合晶型光催化效果好于单一晶型。锐钛矿与金红石为 7:3 混晶时的光催化活性最高,它的光催化活性是相同粒径下锐钛矿的 2~4 倍^[7]。因此采用 DegussaP25 作为光催化剂, TiO_2 纳米粉是德国 Degussa 公司研制的型号为 P25 的 TiO_2 粉(DegussaP25),粒子呈球状,平均粒径为 21 nm,其中金红石型占 25%,锐钛矿型

占 75%,比表面积约为 $50 \text{ m}^2/\text{g}$,纯度高于 99.5%。

散光板厚 2 mm,一侧为平板,为了增大散光面积,另一侧被压成密密麻麻的半球形凹槽。良好的 TiO_2 光催化剂载体应具有以下特点:良好的透光性;在不影响 TiO_2 催化活性的情况下 TiO_2 颗粒间具有较强的结合作用;比表面积大;对被降解的污染物有较强的吸附性。散光板作为载体要求具有一定的网格和高透光性,而且使光催化剂能够很好负载。实验前用酒精和清水把散光板彻底清洗干净,将 8 g DegussaP25 粉末用去离子水(水的含量为 95%)充分搅拌,用超声波清洗机震荡分散 20 min,待形成稳定的悬浮液后,混合制备好的 TiO_2 催化剂溶液用喷枪均匀的喷到散光板带有半球形凹槽的一侧,然后在烘箱内 100 °C 条件下烘烤 10 min。经过干燥以后,肉眼通过仔细观察才能看到 TiO_2 涂层的痕迹。经过一段时间以后证实,纳米 TiO_2 光催化剂在散光板上附着牢固,不会脱落。

2.2 实验装置

太阳能光催化-导光管实验装置如图 1。实验采用的 0.1 m^3 密封小室,选用不锈钢加工而成,不锈钢是美国 ASTM 标准中规定的对挥发性有机化合物吸附可忽略的材料之一^[8],可以减少吸附对光催化反应的影响。实验小室的上端面中央开一直径为 0.28 m 的圆孔,圆孔用石英玻璃板与实验小室的上端面连接,连接处也采用 O 型橡胶圈,玻璃的下方固定导光管的散光板,散光板涂有纳米 TiO_2 的一侧朝向小室内,导光管位于小室正上方。导光管的长度为 0.55 m,直径为 0.28 m,导光管内表面的平均反射比为 0.82。散光板的直径为 0.28 m,为雪花型散光板,将 DegussaP25 溶液均匀地喷涂在散光板凹凸不平的一侧,用电子天平称重,喷涂

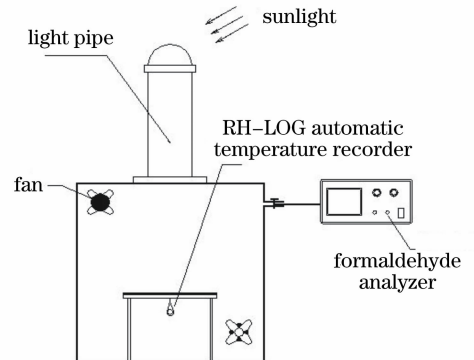


图 1 与光催化相结合的导光管系统实验装置

Fig. 1 Experimental apparatus of solar light pipe system combined with photocatalysis

DegussaP25 溶液前散光板质量为 120.17 g, 喷涂完毕并用 101-1AB 型电热鼓风机干燥箱烘干后再称重, 散光板的质量为 121.92 g, 附着在散光板上的 DegussaP25 质量为 1.75 g。实验前将小室内擦拭干净并风干。

实验时, 把甲醛溶液均匀滴注在表面皿内, 使甲醛能够均匀散发, 到达一定浓度后将表面皿取出, 关闭实验小室的操作端盖并拧紧端盖上的螺丝, 在导

表 1 测量仪器及其误差

Table 1 Measuring equipments and their errors

| Measurement | Instrument | Measurement error |
|----------------------------|--|-----------------------------------|
| Formaldehyde concentration | Formaldehyde concentration (4160-2 Interscan, USA) | $\pm 1\%$ |
| Illuminance | Full digital illuminance meter (XYI-IV) | $\pm 4\%$ |
| UV intensity | UVR-254nmradio menter (ZG-4B) | $\pm 5\%$ |
| Temperature | Automatic temperature recorder (RH-LOG) | $\pm 0.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ |
| Humidity | Automatic humidity recorder (RHLOG-T-11) | $\pm 2\%$ |

3 实验结果分析

3.1 太阳直射下涂有纳米 TiO₂ 涂层的散光板照度变化

散光板上涂有 TiO₂ 涂层后是否会严重影响导光管的采光性能是一个需要研究的问题。为此做了两组对比实验, 对比涂有纳米 TiO₂ 的散光板和无纳米 TiO₂ 涂层的散光板在太阳光直射下的照度变化。全数字照度计传感器距离散光板 32 cm。在太阳光直射下涂纳米 TiO₂ 的散光板在涂层背对太阳时散光板下的照度和无纳米 TiO₂ 涂层的散光板下的照度对比如图 2 所示。实验表明涂层背对太阳时散光板下的照度比无涂层的散光板下的照度有一定程度的减弱, 但是减弱的幅度并不大, 平均降幅只有 3.03%, 因此不会对室内采光产生明显影响。

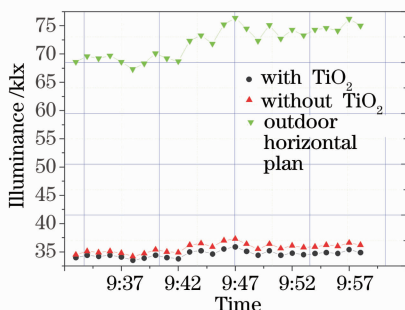


图 2 涂纳米 TiO₂ 的散光板在涂层背对太阳时与无涂层的散光板照度对比

Fig. 2 Compare illuminance with common diffuser and the diffuser with TiO₂ coating back to the sun

3.2 导光管采光性能实验

导光管采光效果的好坏直接影响光催化的效

果。在进行光催化实验过程中, 考虑到实验小室必须保持密封和对全数字照度计传感器的保护, 不能在实验小室内直接测量照度和紫外线强度, 因此导光管的性能测试只能在光催化实验前单独测量。图 3 为晴天室外照度和小室内散光板正中心处的照度变化情况, 实验表明导光管在晴天能把 55% 的太阳光导入小室内。

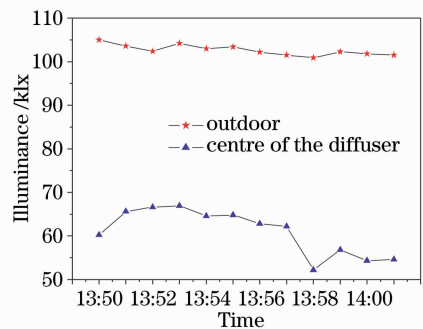


图 3 室外照度和小室内散光板正中心处的照度
Fig. 3 Outdoor illuminance and illuminance at the centre of the diffuser

光催化有两个必要条件, 一个是光, 一个是催化剂, 两者缺一不可。在光催化反应中, 光的作用只是激发反应和提供反应能量。当具有大于或等于半导体材料禁带宽度的能量的光子射入时, 电子从价带激发到导带, 在价带留下一个空穴。电子一空穴对是在光照的作用下产生的, 又称光生载流子。若要激活催化剂 TiO₂ 产生自由电子一空穴对, 就需要克服约 3.2 eV 的带隙能量, 只有波长小于 380 nm 的紫外光才能激发 TiO₂ 产生导带电子和价带空穴。太阳光含有 3%~4% 的紫外线, 紫外线的含量与太阳高度角

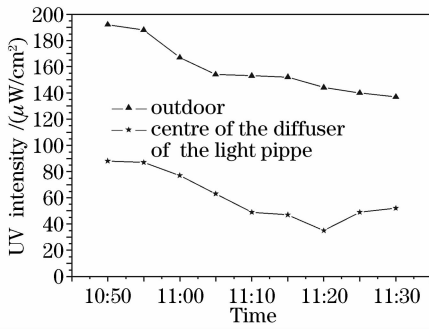


图4 晴天室外和导光管系统散光板中心紫外线强度

Fig. 4 Intensity of UV radiation at outdoor and at the centre of the diffuser of the light pipe under sunny conditions

成正比。图4为晴天室外紫外线强度和同一时刻涂有纳米 TiO₂ 的散光板中心处的紫外线强度。涂有纳米 TiO₂ 的散光板中心处与室外紫外线强度的比例为 38.3%,说明 61.7%的太阳光中的紫外线都被导光管系统屏蔽掉了。太阳能导光管对紫外线的穿透能力比对可见光的穿透能力弱。

3.3 没有光线进入导光管时实验结果

为了证明光催化的有效性,太阳能光催化-导光管实验前分别做了两次没有光线进入导光管时小室内的甲醛浓度衰减实验。第一次在晚上进行,从晚上 21:37 到 22:32,在实验进行时晚上无月光,实验结果如图5所示,由于甲醛完全靠自然衰减,从图上看几乎是一条直线,在 55 min 的时间内甲醛体积分数只降低了 0.27×10^{-6} 。第二次实验选择在晴天的中午,导光管的采光罩用遮光布遮挡,没有光线进入导光管内,甲醛的浓度变化如图6,甲醛自然衰减的速度依然很慢,在 1 h 的时间内甲醛体积分数只降低了 0.22×10^{-6} ,说明晚上在没有遮挡的情况下仍然有部分天空反射光导入。

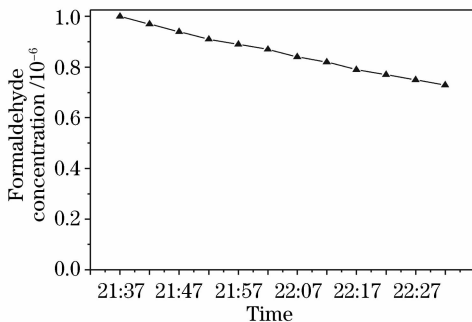


图5 没有光线进入导光管时甲醛自然衰减情况

Fig. 5 Natural attenuation of formaldehyde no light into the light pipe

3.4 太阳直射下出现泄露时实验结果

图5和图6是在小室在实验前密封情况下得到

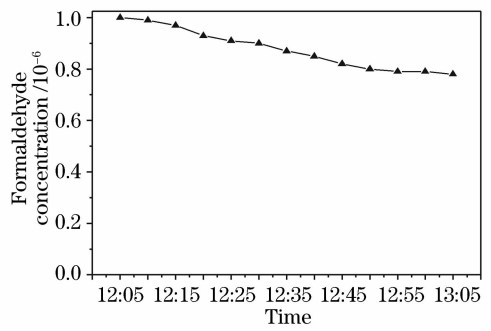


图6 导光管采光罩用遮光布遮挡以后甲醛浓度变化

Fig. 6 Attenuation of formaldehyde when the capture of the light pipe shielded from light

的,如果不加密封,即在实验前把甲醛分析仪与实验小室的连接短管处只用橡皮管连接,在橡皮管和实验小室的短管连接处不用铝箔纸与胶带密封,在夏季太阳直射下实验结果如图7所示,甲醛的体积分数下降速度加快,但由于实验小室的其他部位仍然密封良好,泄露量并不大,下降的速率也比较慢,图7可以用于在密封良好情况下实验结果的对比,从而可以检验在室外太阳光的作用下光催化反应是否起作用。

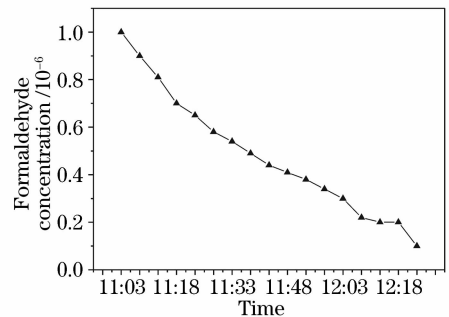


图7 太阳直射下出现泄露时甲醛的浓度变化

Fig. 7 Concentration change of HCHO under sunny conditions with air leak

3.5 夏季晴天太阳直射下实验结果

图8~图11为2005年6月3日上午的实验结果。从图9太阳直射下甲醛降解曲线可以看出,30 min内甲醛体积分数从 1.0×10^{-6} 下降到 0.26×10^{-6} ;在 1 h 之内,甲醛体积分数从 1.0×10^{-6} 下降到 0.19×10^{-6} 。甲醛的降解出现了骤降的情况,和图7太阳直射下出现泄露时甲醛的浓度变化相比说明光催化起了明显的降解甲醛的作用。在 1 h 之内甲醛体积分数能够降低到 0.19×10^{-6} 说明反应比较完全。甲醛分析仪连接实验小室的软管不加密封措施,会导致小室内的甲醛均匀泄露,因此实验过程中每次都要保证小室的密封性,最容易出现泄露的

就是甲醛分析仪和小室的软管连接处。对比图 7 和图 8, 出现泄露和在光催化作用下的实验结果有明显不同: 泄露导致的甲醛浓度衰减是缓慢而相对均匀的, 基本是呈一条直线; 而光催化作用下的甲醛浓度衰减则是抛物线型, 浓度出现骤降的现象。

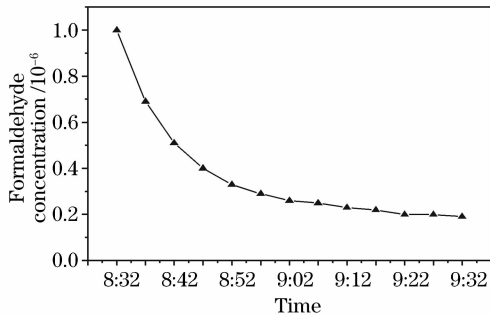


图 8 上午太阳直射下甲醛降解曲线

Fig. 8 Photodegradation of formaldehyde under sunny conditions in the morning

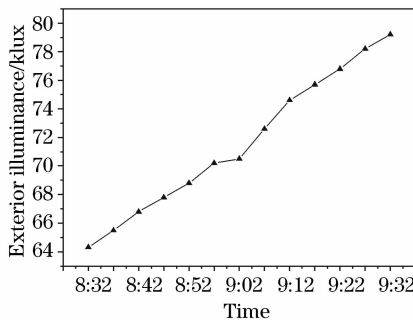


图 9 上午太阳直射下室外照度

Fig. 9 Exterior illuminances under sunny conditions in the morning

图 9 为室外照度, 在实验过程中室外照度由 64.3 klx 上升到 79.2 klx。图 10 为太阳直射下室外紫外线强度, 实验过程中从 $322 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ 上升到 $352 \mu\text{W}/\text{cm}^2$, 作用在散光板上涂有 P25 纳米 TiO_2 催化剂一侧的紫外线强度为 $123 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ 到

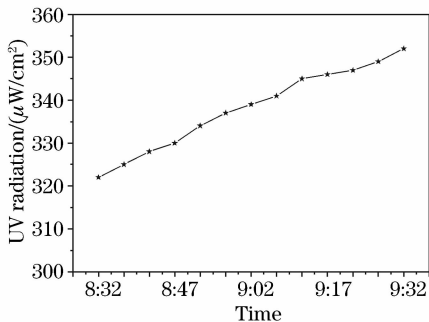


图 10 上午太阳直射下室外紫外线强度

Fig. 10 Intensity of UV radiation under sunny conditions in the morning

$135 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ 之间。

图 11 为用 RHLOG-T-11 温湿度自记仪测得的小室内相对湿度变化; 图 12 为用 3 个 RHLOG 温湿度自记仪测得的小室内温度和室外温度的变化, 室外温度分别测量了室外太阳直射下的温度和室外阴暗处的温度, 由于太阳照射到自记仪的表面会引起仪器自身的温度升高, 因此阴暗处的温度比太阳直射下的温度低。从图上看, 反应温度在 $35.5 \text{ }^\circ\text{C} \sim 44 \text{ }^\circ\text{C}$ 之间, 相对湿度在 $16\% \sim 36\%$ 之间。由于反应温度对光催化效果影响并不明显, 因此不对温度和湿度的影响进行研究。

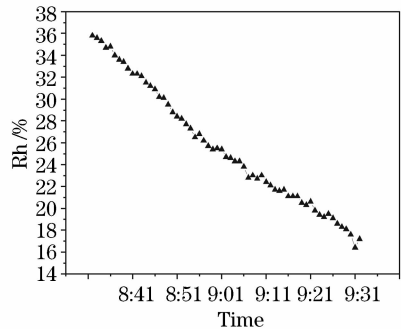


图 11 上午小室内相对湿度变化

Fig. 11 Relative humidity of the air in the test box

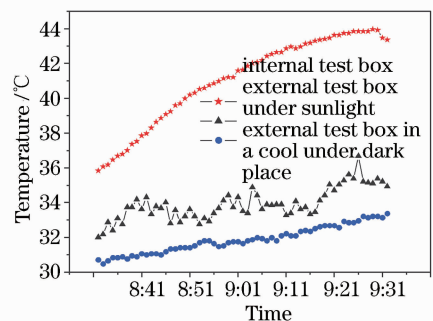


图 12 上午小室内温度和室外温度的变化

Fig. 12 Temperature curves of internal and external

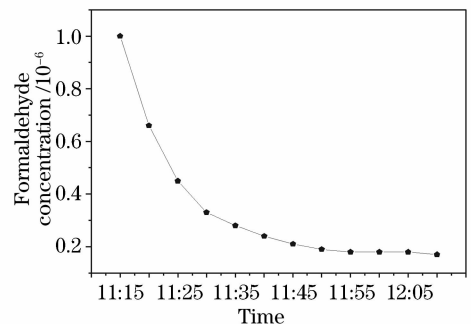


图 13 中午太阳直射下甲醛降解曲线

Fig. 13 Photo degradation of formaldehyde under sunny conditions at noon

中午太阳直射下甲醛降解曲线见图 13。30 min 内甲醛体积分数从 1.0×10^{-6} 下降到 0.21×10^{-6} ; 1 h 之内甲醛体积分数从 1.0×10^{-6} 下降到 0.17×10^{-6} ; 比上午的降解速度加快, 降解甲醛更为完全。中午太阳直射下室外紫外线强度见图 14。

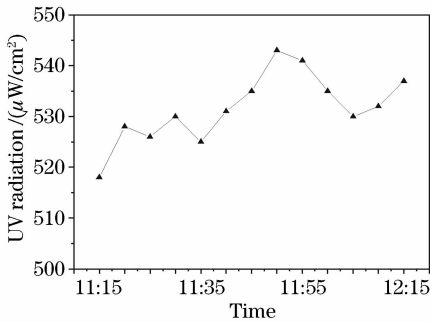


图 14 中午太阳直射下室外紫外线强度

Fig. 14 Intensity of UV radiation under sunny conditions at noon

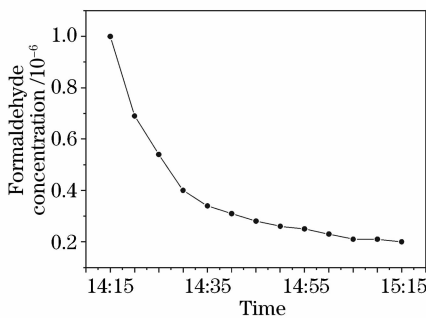


图 15 下午太阳直射下甲醛降解曲线

Fig. 15 Photodegradation of formaldehyde under sunny conditions in the afternoon

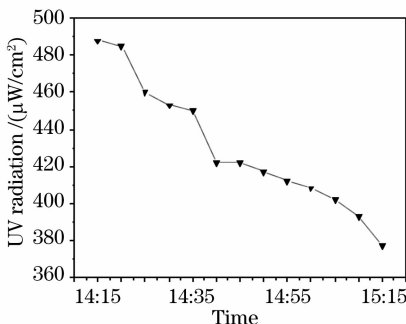


图 16 下午太阳直射下室外紫外线强度

Fig. 16 Intensity of UV radiation under sunny conditions in the afternoon

下午太阳直射下甲醛降解曲线见图 15, 下午太阳直射下室外紫外线强度见图 16。30 min 内甲醛体积分数从 1.0×10^{-6} 下降到 0.31×10^{-6} ; 1 h 之内甲醛体积分数从 1.0×10^{-6} 下降到 0.2×10^{-6} , 降解速度比上午、中午都慢得多。说明下午随着室外紫

外线强度的降低, 光催化反应速度急剧减慢, 紫外线强度和紫外线的增强或减小是影响太阳能光催化-导光管降解甲醛效果的最重要因素。

由于太阳能导光管的光线不能人为控制, 紫外线也一直变化, 因此很难得到光催化的影响因素的规律性。如果实验中光源采用两只 8 W 的紫外灯, 无太阳光导入, 紫外灯照射在催化剂表面的光强约为 $120 \mu\text{W}/\text{cm}^2$, 主波长为 365 nm, 相同的实验小室下光催化降解甲醛的效果如图 17 所示^[9]。对比图 8、图 13、图 15、图 17 可以得出结论, 太阳直射下的太阳能光催化-导光管系统可以近似等效为用两只 8 W 的紫外灯对甲醛的光催化降解效果, 但是并不是太阳光的强度越大光催化的效果越好。

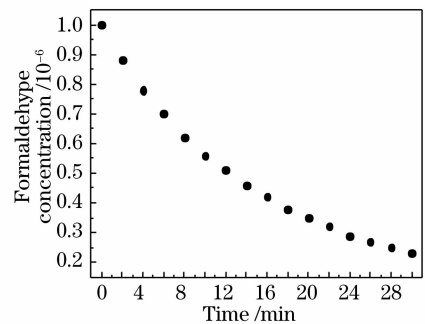


图 17 TiO_2 分散水溶液制得的催化剂膜对甲醛的降解效果 (P25)

Fig. 17 HCHO degradation effect of the photocatalytic film by spraying TiO_2 solution (P25)

太阳能光催化-导光管系统如何提高光催化效率是一个重要问题。有两个可行途径: 一是改善太阳能导光管的传光性能, 提高导光管本体的内表面反射比、增大采光罩和散光板的穿透率。控制太阳能导光管的光强大小, 特别是控制进入导光管的紫外线含量。可以通过在导光管材料上进行相关研究或加紫外线控制装置, 调节紫外线含量; 二是提高太阳光下的光催化效率。二氧化钛无毒、价廉, 化学稳定性好、氧化还原能力强, 应用前景良好, 其缺点是禁带宽度大(锐钛矿 TiO_2 的禁带宽度为 3.2 eV), 只能被紫外光激发, 从而限制了应用范围。太阳光谱中能被催化剂 TiO_2 利用的紫外光只占太阳能谱不到 5%, 太阳光利用率很低, 通过对催化剂进行改性, 使其对太阳光的响应向可见光区拓展, 光催化效率有望得到提高。对催化剂改性目前已经有多种方法, 如利用对 TiO_2 的表面和体相进行化学改性, 调整其电子结构, 降低催化剂的带隙能 E_g , 降低光生载流子的复合几率, 提高光能利用率并使有效光

能从紫外光向可见光拓展;研制带隙能远远小于 TiO_2 带隙能(3.2 eV)的新型复合氧化物光催化,使催化剂对太阳光的响应向可见光区拓展^[10,11]。通过增强光催化剂自身的光催化性能是可行的途径,对 TiO_2 改性目前最常用的是阳离子掺杂和阴离子掺杂,近年来在这方面很多学者已经做了尝试,如用沉积-沉淀(DP)法制备 Au/TiO_2 在 110 °C 干燥处理后,表面存在的 Au^{3+} 能有效地促进锐钛矿 TiO_2 光催化性能,其一级反应速率常数比纯锐钛矿 TiO_2 提高了 3.2 倍,比商用光催化剂 Degussa P25 提高了 4.1 倍^[12]。以 TiCl_4 为钛源,采用酸催化水解法合成 TiO_2 前驱体,在 NH_3/N_2 气氛下经不同温度处理制得浅黄色的 N 掺杂 TiO_2 (TON) 光催化剂,以苯酚为模型物,掺杂 N 以阴离子形式进入 TiO_2 体相中置换晶格中的 O,适宜温度下制得适量 N 掺杂的 TON 在紫外光区、可见光区及太阳光下均表现出较高的活性^[14]。氮掺杂纳米 TiO_2 在整个可见光区都有明显的吸收,不同波长可见光及不同气体流速的光催化氧化丙烯动力学研究表明,活性最好的 N 掺杂纳米 TiO_2 催化剂(600 °C NH_3 处理)对可见光的利用范围可扩展至 500 nm^[13~15]。另外可以尝试其他光催化剂,增大光催化剂的比表面积,提高可见光光催化活性。如用氨浸法制备不同 V_2O_5 含量的纳米 $\text{V}_2\text{O}_5/\text{ZnO}$ 光催化剂,以壬基酚聚氧乙烯(NPE210)为模型污染物,随着 V_2O_5 含量的增加, $\text{V}_2\text{O}_5/\text{ZnO}$ 的粒径逐渐减小,比表面积逐渐增大。 $n(\text{V})/n(\text{Zn})=215\%$ 的 $\text{V}_2\text{O}_5/\text{ZnO}$ 光催化剂样品的催化活性最高(在紫外光和可见光照射 3 h 后,NPE210 降解率分别约为 79% 和 62%)^[16]。但是目前这些可见光光催化的技术还处于实验阶段,距离应用还很遥远,由于制备的材料质量也很少,在太阳能光催化-导光管中应用目前还做不到,而太阳能光催化-导光管技术在建筑中应用是最有价值的,尤其对于光催化空气净化技术^[17]。这些新技术将使太阳能光催化-导光管的性能更加优化,未来的发展趋势是太阳能光催化-导光管技术在建筑中成功应用。

4 结 论

太阳能导光管技术属于可持续能源技术,与光催化技术相结合组成太阳能光催化-导光管复合装置,综合了两种技术的优点,不但能够提供良好的自然采光,还能达到改善室内空气品质的目的,这项研究在国内外尚属首次。(1)实验表明,散光板涂有纳

米 TiO_2 对导光管的总体采光效果影响很小,平均只下降 3.03%,对室内采光这种影响可以忽略不计;(2)通过北京地区夏季晴天太阳能光催化-导光管系统降解甲醛的实验研究,该装置能够对甲醛具有良好的净化效果,实验的重复性较好。该装置能够使 0.1 m³ 小室内甲醛体积分数从 1.0×10^{-6} 下降到 0.19×10^{-6} 。中午太阳直射下 1h 之内甲醛体积分数从 1.0×10^{-6} 下降到 0.17×10^{-6} ;下午太阳直射下甲醛降解,1 h 之内,甲醛体积分数从 1.0×10^{-6} 下降到 0.2×10^{-6} ,降解速度比上午和中午都慢,但也达到了良好的降解效果;北京夏季晴天该太阳能光催化-导光管降解甲醛相当于两只 8 W 的紫外灯照射下的光催化效果;(3)该项研究采用的催化剂是商用的 Degussa P25,随着可见光光催化技术的发展,采用向可见光拓展的光催化剂能够改善太阳能光催化-导光管效果,这是下一步的研究内容;(4)该项研究的实验小室为 0.1 m³,只适用于小型太阳能光催化-导光管装置,对于大空间建筑上的应用还需要继续深入探讨;(5)对于不同长度、不同直径的太阳能光催化-导光管装置对光催化和照度的影响也是我们下一步的工作,相关理论分析正在进行。

参 考 文 献

- 1 Wu Yanpeng, Wang Xiaodong, Liu Li *et al.*. The effects of solar light pipes on room temperature in office buildings[C]. The 3rd International symposium on Modern Mining & Safety Technology Proceedings, Coal Industry Publishing House, Beijing, 2008, **6121**: 1091~1094
- 2 Wu Yanpeng, Ma Chongfang. Experimental research on daylight performance of side lighting light pipe [J]. *J. Chongqing University-Eng. Ed.*, 2003, (2): 96~99
- 3 Wu Yanpeng, Ma Chongfang. Experimental research on side lighting light pipe under sunny conditions in winter [J]. *J. Engineering Thermophysics*, 2004, **25**(suppl.): 179~181
吴延鹏,马重芳. 冬季晴天侧采光光导管实验研究[J]. *工程热物理学报*, 2004, **25**(增刊): 179~181
- 4 P. D. Swift, R. Lawlor, G. B. Smith *et al.*. Rectangular-section mirror light pipes[J]. *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 2008, **92**: 969~975
- 5 M. Kocifaj. Analytical solution for daylight transmission via hollow light pipes with a transparent glazing[J]. *Solar Energy*, 2008, In Press, Corrected Proof, Available online 10 August 2008
- 6 Wu Yanpeng, Ma Chongfang. Status of studies and applications of photocatalytic technology in building environment and facility field[J]. *J. HV&AC*, 2006, **36**(3): 29~36
吴延鹏,马重芳. 光催化技术在建筑环境与设备中的应用与研究现状[J]. *暖通空调*, 2006, **36**(3): 29~36
- 7 Yang Rui. Research on Photocatalytic Oxidation of VOCs by Using Nanometer Photocatalyst [D]. Beijing: Tsinghua University, 2005. 10~16
杨 瑞. 纳米材料光催化降解 VOCs 研究[D]. 北京: 清华大学, 2005. 10~16
- 8 ASTM. ASTM Designation: D 6670-01. Standard Practice for

Full-Scale Chamber Determination of Volatile Or5

- 9 Wang Wei. Application of photocatalytic technology on indoor air quality control[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2004. 11
王 伟. 光催化技术在室内污染控制中的应用研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2004. 11
- 10 Asahi R, Morikawa T, Ohwaki T *et al.*. Visible-light photocatalysis in nitrogen-doped titanium oxides [J]. *Science*, 2001, **293**: 269~271
- 11 Khan Sum, Al Shahry M, Ingler W B. Efficient photochemical water splitting by a chemically modified *n*-TiO₂ [J]. *Science*, 2002, **297**: 2243~2245
- 12 Lu Hanfeng, Zhou Ying, Xu Boqing *et al.*. Effect of gold doping on the photocatalytic activity of the anatase TiO₂[J]. *Acta Phys. - Chim. Sinica*, 2008, **24**(3): 459~464
卢哈锋, 周 瑛, 徐柏庆 等. Au 掺杂方式对锐钛矿 TiO₂ 光催化性能的影响[J]. 物理化学学报, 2008, **24**(3): 459~464
- 13 Takeshi Morikawa, Takeshi Ohwaki, Ken-ichi Suzuki. Visible-light-induced photocatalytic oxidation of carboxylic acids and aldehydes over N-doped TiO₂ loaded with Fe, Cu or Pt [J]. *Applied Catalysis B: Environmental*, 2008, (83): 56~62
- 14 Liu Shouxin, Chen Xiaoyun, Li Xiaohui. Effect of N-doping on structure characteristics and photocatalytic activity of TiO₂ photocatalyst[J]. *Chin. J. Inorganic Chemistry*, 2008, **24**(2): 253~259
刘守新, 陈孝云, 李晓辉. N 掺杂对 TiO₂ 形态结构及光催化活性的影响[J]. 无机化学学报, 2008, **24**(2): 253~259
- 15 Feng Caixia, Wang Yan, Jin Zhesheng *et al.*. Kinetic behavior of visible light photocatalytic oxidation of propylene for N-Doped Nano-TiO₂[J]. *Acta Phys. - Chim. Sinica*, 2008, **24**(4): 633~638
冯彩霞, 王 岩, 金振声 等. N 掺杂纳米 TiO₂ 可见光催化氧化丙烯的动力学行为[J]. 物理化学学报, 2008, **24**(4): 633~638
- 16 Hu Lili, Du Zhiping, Tai Xiumei *et al.*. Catalytic activity of nano-V₂O₅/ZnO photocatalyst for degradation of nonylphenyl poly(oxyethylene) ether [J]. *Chin. J. Catalysis*, 2008, **29**(6): 571~576
胡利利, 杜志平, 台秀梅 等. 纳米 V₂O₅/ZnO 光催化剂对壬基酚聚氧乙烯醚降解的催化活性[J]. 催化学报, 2008, **29**(6): 571~576
- 17 D. M. Tobaldi, A. Tucci, G. Camera-Roda *et al.*. Photocatalytic activity for exposed building materials [J]. *J. European Ceramic Society*, 2008, **28**: 2645~2652