

全喷射塔盘水力学性能和传质性能的研究

凌燕丽,陶金亮*,李 博,石智成,魏 峰

(河北工业大学化工学院,天津 300130)

摘要:针对错流塔盘板上存在液位梯度、造成大型塔器气液分布不均的现象,提出了一种穿流全喷射塔板(TST),并以空气-水和空气-CO₂-水体系为操作介质,对其水力学和传质性能进行了实验研究。实验结果表明,与其他喷射塔板相比,TST 具有压降小,漏液和雾沫夹带少的特点。在高板孔动能因子区,TST 获得了比 New VST 更高的传质效率。

关键词:全喷射塔板;水力学性能;传质性能

中图分类号:TQ053.5

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2018)11-0200-05

DOI:10.16606/j.cnki.issn 0253-4320.2018.11.044

Study on hydrodynamics performance and mass transfer efficiency of total spray tray

LING Yan-li, TAO Jin-liang*, LI Bo, SHI Zhi-cheng, WEI Feng

(School of Chemical Engineering and Technology, Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China)

Abstract: In order to solve the problem of uneven gas-liquid distribution in large-scale towers caused by the presence of liquid-level gradients on cross-flow tray, a total spray tray (TST) is proposed. Its hydraulic and mass transfer performances are studied experimentally by using air-water and air-CO₂-water systems as operating media. The experimental results show that compared with other spray trays, TST has the characteristics of low pressure drop, low leakage and entrainment. In addition, TST achieves higher mass transfer efficiency in the high kinetic energy factor than New VST.

Key words: total spray tray; hydrodynamics performance; mass transfer efficiency

作为一种重要的分离纯化设备,板式塔具有低压降、高弹性、抗堵塞等特性,在分离领域占有重要地位。板式塔按照结构特点可分为泡罩塔、浮阀塔、筛板塔和喷射塔 4 种^[1-3]。与其他塔板气液接触方式不同,喷射塔板工作时气相为连续态,液相为分散态,气液传质表面能够不断更新,十分有利于气液两相的传质。早期的喷射塔板有舌形塔板^[4]、浮舌塔板^[5]、斜孔塔板^[6]、网孔塔板^[7]等,但这些塔板传质区域局限于塔板表面,塔内空间利用率低。立体喷射塔板将气液接触区域由板面区域变为整个塔板空间内,增大了塔板的空间利用率,传质面积大大提高,实践证明立体喷射塔板具有优良的综合性能^[8-9]。目前,随着工业生产装置逐渐向高效、大型、自动化、各异化发展,立体喷射态塔板因其高效、低阻等特点逐渐受到国内外学者的关心。

传统立体喷射型塔盘一般采用气液错流设计,如 New VST^[10]、CTST^[11]、EJT 喷射型塔板^[12]等,其塔盘上设有集液区和降液区。相对于穿流塔板,错流塔板具有气液通量和操作弹性大的特点,因而为大多数工业设计采用。但错流塔盘由于液相需要横

穿塔板,因此塔板上存在一定的液位梯度。液位梯度的存在会造成气体分布不均等现象,且这种不均会随塔径的增大而逐渐增大,业已成为制约我国塔器大型化发展的一个主要瓶颈。传统大型板式塔多采用多降液管设计以缓解这一矛盾^[13-15],但多降液系统会造成传质区域减小、结构与安装复杂等问题,且不能从根本上消除产生液位梯度问题的根源。本文中提出了一种新型逆流全喷射塔板(total spray tray, TST)^[16-17],设计思路是将降液和传质元件有机结合在一起,使降液和传质过程同时完成。通过这种转变,TST 实现了整个塔板上无独立降液通道设计,同时又保留了立体喷射塔板大通量、高操作弹性的特征。

1 塔盘结构与工作原理

TST 主要由液封单元、导流元件、受液盘以及喷射罩 4 部分组成,结构和工作原理如图 1 所示。当 TST 工作时,液体首先经液封单元溢流到喷射罩内,并在受液盘上积聚,同时沿受液盘和塔盘之间的环隙沿内壁呈膜态流下,当遇到自升气孔上升的气相

收稿日期:2018-04-03;修回日期:2018-09-03

作者简介:凌燕丽(1991-),女,硕士生;陶金亮(1973-),男,博士,副教授,研究方向为传热强化与优化,通讯联系人,taojin@hebut.edu.cn。

时,液膜在喷射区被气体迅速破碎成微小液滴,并随气体以一定速度自喷射孔喷出。喷出的气体上升到上层塔板,液体则在重力作用下降落到塔板上,继续下次的传质。TST 塔盘中受液盘的大小决定了液膜厚度,而液膜厚度与传质及塔盘操作状况有较大的关系。作为导流装置,内部的倒圆锥形元件可以使气相均匀分布,便于稳定操作。

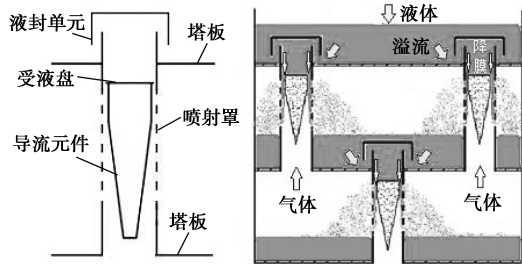
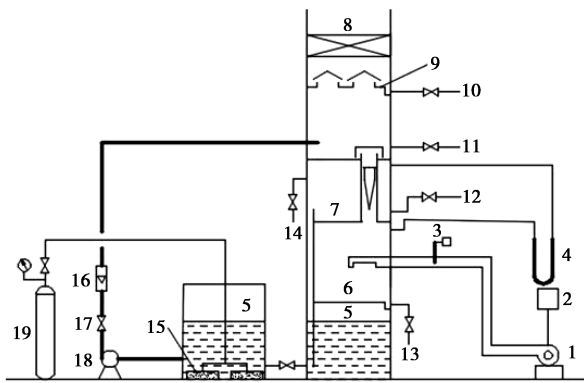


图 1 TST 的结构(左)与工作原理(右)

2 实验装置与流程

TST 流体力学实验和传质实验分别以空气-水,空气-水-二氧化碳为工作介质,实验流程如图 2 所示。



1—风机;2—变频器;3—管道热模风速变送器;4—U 型管压差计;5—循环储水箱;6—漏液收集板;7—实验塔板;8—丝网捕沫器;9—雾沫捕集板;10—雾沫夹带收集口;11—进口液体取样口;12—出口液体取样口;13—漏液收集口;14—气相取样口;15—二氧化碳细化器;16—转子流量计;17—球阀;18—离心泵;19—二氧化碳钢瓶

图 2 实验装置与实验流程

水力学实验中,水通过离心泵 18 从循环储水槽泵出,经由转子流量计 16 测量流量后,由塔顶进入实验塔板,经塔盘等元件自上向下流至塔釜循环储水槽 5 继续循环使用。空气由风机打入,由变频器 2 调节流量大小,通过热模风速仪 3 测量风速,空气由塔釜进入实验塔,经过塔盘和气液接触等过程后,在塔顶经丝网捕沫器 8 后排向大气。被捕集下来的

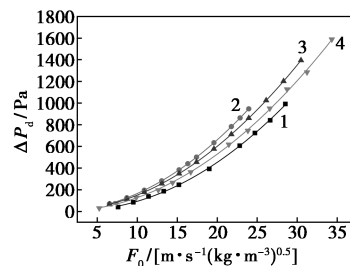
液体落在夹带收集板 9 上,并由收集口 10 采出。漏液落在收集板 6 上,由收集口 13 采出。

传质实验中,二氧化碳由二氧化碳钢瓶 19 提供,经过减压表,通入循环储水槽中,二氧化碳经由二氧化碳细化器 15 充分细化,使二氧化碳能够充分溶解在水中,待水中二氧化碳吸收饱和后,被离心泵打入塔顶,并重复上述过程。本文中传质实验利用的是空气解析水中的二氧化碳的过程。实验中进口液体由采样口 11 采出,出口液体由采样口 12 采出,气相经由采样口 14 利用采样泵收集到铝箔采样袋中备用。

3 实验结果与讨论

3.1 干压降

在相同的实验条件下,对筛板塔、New VST 和 TST 塔盘的干板压降进行了实验测量,并与文献 [18] 中 CTST 的干板压降进行了对比,4 种塔盘的开孔率相同,比较结果如图 3 所示。从图 3 可以看出,New VST 的干压降最大,筛板塔最小。这是因为在筛板塔上,气体仅需通过板上的孔,而对于 New VST、CTST 和 TST 而言,气体通过板上的孔后,还需要经过帽罩侧壁的开孔,气流通道突然增大和缩小以及气体在塔盘罩内的方向发生改变引起了能量损失。对于 TST 和 CTST 而言,喷射罩顶部与帽罩顶盖之间有气流通路,而 New VST 顶部封死,气体碰到顶盖后折回从小孔喷出,阻力更大些。另外,TST 塔盘内部的倒圆锥形的导流元件使气流分布更加均匀,故其压降稍小一些。



1—Sieve;2—New VST;3—CTST;4—TST

图 3 TST 塔盘干压降性能比较

本文中利用阻力系数模型对 TST 干板压降进行了关联,得出了 TST 干压降与板孔动能因子之间的关系,如式(1)所示:

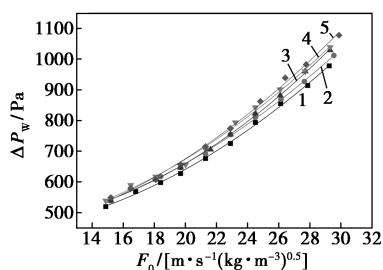
$$\Delta P_d = 1.201915F_0^2 \quad (1)$$

式中 $\xi = 2.40383$ 时,相关性系数 $R^2 = 0.988$ 。

3.2 湿压降

TST 的湿压降来源于 2 方面,一是气体通过板

孔的动能损失, 主要与板孔动能因子有关; 二是气体破碎液膜产生的动能损失, 即与液体流量有关。图 4 给出了 TST 塔盘湿压降与液体流量和板孔动能因子之间的关系。从图 4 可以看出, 与其他喷射塔板类似, TST 湿压降随板孔动能因子的增加明显升高。然而随着液量的增大, 尤其在低板孔动能因子区域, TST 湿压降增加并不显著。这是因为 TST 为全喷射传质, 其降液周边长度(喷射罩横截面周长总和)远大于传统错流塔盘的溢流长度, 因此液体流量增大对液膜厚度的影响较小; 实验中液体流量增大 1 倍, 喷射区液膜厚度只增加 0.5~1.0 mm, 故 TST 湿压降受液体流量影响较小。



1— $L_w = 1.0 \text{ m}^3/\text{h}$; 2— $L_w = 1.2 \text{ m}^3/\text{h}$; 3— $L_w = 1.6 \text{ m}^3/\text{h}$;
4— $L_w = 1.8 \text{ m}^3/\text{h}$; 5— $L_w = 2.0 \text{ m}^3/\text{h}$

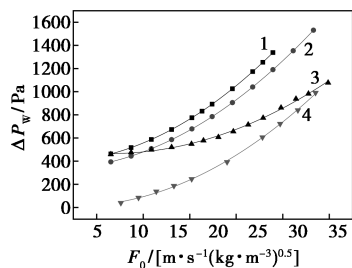
图 4 TST 塔盘湿压降与液体流量的关系

通过数据关联, 本文中得出了 TST 湿压降的关系表达式, 如式(2)所示:

$$\Delta P_w = \xi F_0^a L_w^b \quad (2)$$

式中, L_w 为液流强度, L/h ; $\xi = 20.86$; $a = 0.9742$; $b = 0.0775$; 相关性系数 $R^2 = 0.981$ 。

图 5 给出了 New VST、CTST、TST 和 Sieve Tray 4 种常用塔盘的湿压降对比。从图 5 可以看出, 在高板孔动能因子区, TST 湿压降与 Sieve Tray 相当, 并明显小于传统立体喷射塔盘 CTST 和 New VST。这是因为与 CTST 和 VST 相比, TST 液体靠重力及塔盘内形成的负压流下, 气相无需提升液体, 只需将沿内壁流下的液膜吹出小孔即可, 所以气相的动能损失更小。



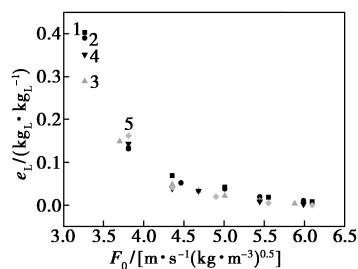
1—Sieve Tray; 2—New VST; 3—CTST; 4—TST

图 5 TST 塔盘湿压降与其他塔盘的对比

3.3 漏液

TST 塔盘的漏液量曲线如图 6 所示。从图 6 可以看出, 当板孔动能因子大于 $6 \text{ m/s}(\text{kg}/\text{m}^3)^{0.5}$ 时, TST 的漏液量已基本趋近于 0。通过数据关联, 本文中得出了 TST 相对漏液率的经验表达式, 如式(3)所示:

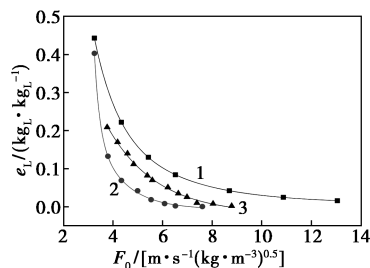
$$e_L = 7.3 \times 10^3 \times F_0^{-7.45} L_w^{-2.19} (R^2 = 0.88) \quad (3)$$



1— $L_w = 1.0 \text{ m}^3/\text{h}$; 2— $L_w = 1.2 \text{ m}^3/\text{h}$; 3— $L_w = 1.6 \text{ m}^3/\text{h}$;
4— $L_w = 1.8 \text{ m}^3/\text{h}$; 5— $L_w = 2.0 \text{ m}^3/\text{h}$

图 6 TST 塔盘漏液与液流强度的关系

相同条件下 ($R_0 = 0.056, L_w = 1.2 \text{ m}^3/\text{h}$), 本文中对 New VST 相对漏液率进行了测试, 并与文献[18]中 CTST 的漏液情况进行对比, 结果如图 7 所示。可以看出 TST 塔盘的漏液量明显低于 New VST 和 CTST。这是因为不同于 New VST 和 CTST 塔盘, 本文中测试的 TST 与塔板之间并不存在底隙, 因此减小了液体从底隙泄落的机率, 从而获得了较低的操作下限。



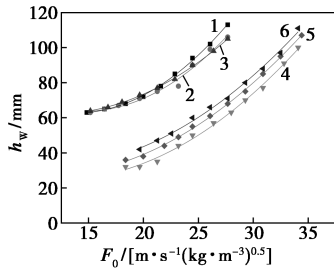
1—New VST; 2—TST; 3—CTST

图 7 TST 塔盘的漏液与其他塔盘的对比

3.4 板上清液层高度

对于大多数塔盘而言, 无论是鼓泡型的筛板或浮阀塔, 还是喷射型塔板, 板上清液层(溢流堰)高度的设计十分关键, 直接影响到塔板的压降损失与传质效率^[15]。然而对于本文中测试的 TST 而言, 由于采用穿流设计, 气体不直接穿过液层, 也无需提升液体, 因此其清液高度对板压降和传质效率影响不大。相反, TST 板上清液高度反而会随板压降和液体流量的波动而变化。

图 8 给出了不同液体流量下板上清液高度与板孔动能因子之间的关系变化。从图中可以看出随着液体流量的增加, TST 板上清液层高度有一个阶梯性的变化。实验发现, 以液体流量 $1.4 \text{ m}^3/\text{h}$ 为临界点, 不同流量下受液盘上会分别出现不同的液体积聚态, 如图 9 所示。当受液盘有液体积聚时 ($L>0$), TST 操作更加稳定。



1— $L_W = 0.8 \text{ m}^3/\text{h}$; 2— $L_W = 1.0 \text{ m}^3/\text{h}$; 3— $L_W = 1.2 \text{ m}^3/\text{h}$;
4— $L_W = 1.6 \text{ m}^3/\text{h}$; 5— $L_W = 1.8 \text{ m}^3/\text{h}$; 5— $2.0 \text{ m}^3/\text{h}$

图 8 液流强度对板上清液层高度的影响

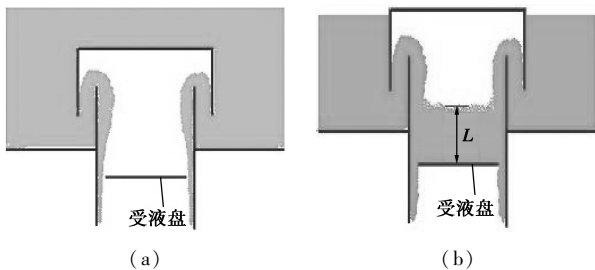
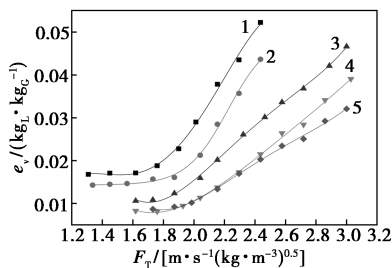


图 9 TST 塔盘 2 种操作状态

3.5 雾沫夹带

雾沫夹带实际上主要与空塔气速有关, 与板孔动能因子没有太大关系^[16]。因此图 10 给出了塔盘雾沫夹带随空塔动能因子和液流强度的变化情况。可以看出在液流强度相同时, 随着空塔动能因子的增加, 塔盘雾沫夹带也随之增高; 在空塔气速相同时, 随着液量的增大雾沫夹带逐渐减小。这是因为空塔气速越大, 液滴就越容易被带至上层塔板; 而当



1— $L_W = 1.0 \text{ m}^3/\text{h}$; 2— $L_W = 1.2 \text{ m}^3/\text{h}$; 3— $L_W = 1.6 \text{ m}^3/\text{h}$;
4— $L_W = 1.8 \text{ m}^3/\text{h}$; 5— $L_W = 2.0 \text{ m}^3/\text{h}$

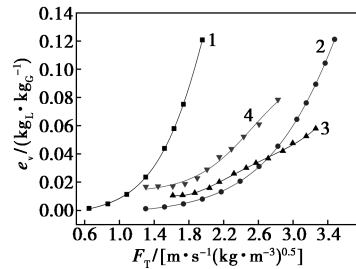
图 10 液流强度对 S-TST 塔盘雾沫夹带的影响

空塔气速一定时, 液流流量越大, 液滴尺度越大, 越难以被上升气流带到上层塔板。

通过数据关联, TST 雾沫夹带的关系表达式可用式(4)加以表述。

$$e_v = 6.7 \times 10^{-3} \times F_T^{2.3} L_W^{-1.47} (R^2 = 0.882) \quad (4)$$

与其他喷射塔盘相比, TST 的雾沫夹带与 CTST 基本相当, 并明显小于 New VST, 如图 11 所示。

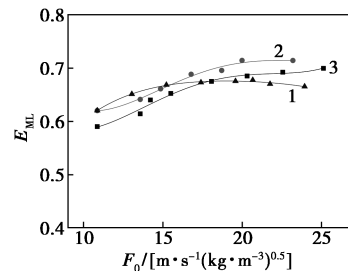


1—New VST; 2—CTST; 3—TST, $L_W = 1.6 \text{ m}^3/\text{h}$; 4 TST, $L_W = 1.0 \text{ m}^3/\text{h}$

图 11 TST 塔盘的雾沫夹带与其他塔盘的对比

3.6 传质效率

图 12 给出了不同流量下, 塔板传质效率与板孔动能因子的关系, 并与 New VST 的塔板效率^[19-22]进行了对比。从图中可以看出, 随着板孔动能因子的增加, TST 的塔板效率逐渐增加, 当 F_0 增大到 $20 \text{ m/s} (\text{kg}/\text{m}^3)^{0.5}$ 左右时, 增长速度逐渐变缓。这可能是由于在低气速时, 气液接触不充分, 随着气速的增大, 气液接触面积逐渐增大(液膜被破碎成更加细小的液滴), 相应的传质效率得以提高。从传质效率上看, TST 在高板孔动能因子区比 New VST 更具优势。



1—New VST; 2—TST, $L_W = 1.8 \text{ m}^3/\text{h}$; 3—TST, $L_W = 2.0 \text{ m}^3/\text{h}$

图 12 TST 塔盘与 New VST 的传质效率

4 结论与展望

TST 采用降液与喷射于一体的设计, 是一种新型的全喷射塔盘。

(1) 在板孔动能因子较大时, TST 不仅可获得与筛板塔相近的湿压降, 同时还可获得与 CTST 相

近的雾沫夹带。

(2) TST 的相对漏液量明显小于传统立体喷射塔盘。

(3) TST 的传质效率与 New VST 基本相当, 实验条件下两者效率可达 70%。

塔器大型化是未来精馏技术的一个主要发展方向。基于穿流设计理念开发的 TST 可有效解决现有大型错流塔盘中存在的板上由液位梯度引起的气液分布不均的现象, 因此发展前景广阔。同时, TST 低阻、高效以及大操作弹性的特点也适用于固有塔器产能扩大、节能改造等场合。

参考文献

- [1] 王树楹, 高长宝, 兰仁水. 板式塔研究进展[J]. 化学工程, 2003, 31(3): 20-26.
- [2] 李苏雅, 王文建. 塔板技术应用研究进展[J]. 化工技术与开发, 2011, 40(12): 30-34.
- [3] 董军, 李建波. 塔板技术的发展现状与研究展望[J]. 石油炼制与化工, 2007, 38(11): 46-51.
- [4] 韩树鎧, 陈丙珍, 沈复. 舌形塔板研究 I [J]. 化工学报, 1965, (2): 117-128.
- [5] 兰州石油机械研究所塔器组. 浮动舌形塔板的流体力学和传质试验[J]. 化工炼油机械通讯, 1972, (2): 14-29.
- [6] 何建培, 周荣琪, 段占庭. 大液相负荷下斜孔塔板的流体力学性能[J]. 化学工程, 2002, 30(1): 7-11.
- [7] 路秀林, 赵大企, 刘玉民, 等. 网孔塔板的流体力学[J]. 化工学报, 1980, (3): 265-280.
- [8] 陈华艳, 李春利, 张文林. 新型立体垂直塔板的开发现状[J]. 天津理工学院学报, 2002, 18(4): 88-91.
- [9] 叶智刚, 乔英云, 田原宇. 新型立体垂直筛板塔的开发进展[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2011, 31(10): 282-284.
- [10] 杜佩衡. 新型垂直筛板塔 (New VST) 的结构原理及优异特性[J]. 小氮肥设计技术, 1995, (1): 12-13.
- [11] 李春利, 孙玉春, 王志英, 等. 新型立体传质塔板 CTST 的研究与开发进展[J]. 河北工业大学学报, 2004, 33(2): 155-162.
- [12] 孙兰义, 唐正强, 李军. EJT 喷射塔板实验研究[J]. 石油化工设备, 2008, 37(3): 5-8.
- [13] Delnicki W V, Wagner J L. Performance of multiple downcomer trays[J]. Chemical Engineering Progress, 1970, 66(3): 50.
- [14] 江山, 胡大鹏, 金鑫, 等. 大通量板式塔研究进展[J]. 化工装备技术, 2015, 36(5): 31-34.
- [15] 丁梦军, 王成习. 大通量塔板研究进展[J]. 化学工程, 2010, 38(10): 37-41.
- [16] 陶金亮. 降膜喷射塔盘. CN:201520966831.4[P]. 2015-11-30.
- [17] Wang R, Ling Y L, Tao J L, et al. Total spray tray (TST) for distillation columns: A new generation tray with lower pressure drop[J]. Chemical Industry & Chemical Engineering Quarterly, 2017, 23: 5.
- [18] Wang H, Niu X, Li C, et al. Combined trapezoid spray tray (CTST)—A novel tray with high separation efficiency and operation flexibility [J]. Chemical Engineering and Processing: Process Intensification, 2017, 112: 38-46.
- [19] 刘衍烈. 新垂直筛板的流体流体力学理论分析及关联[J]. 化学工程, 1983, (5): 1-13.
- [20] 刘衍烈, 王昂, 翁力, 等. 新型垂直筛板的塔板分离效率研究[J]. 化学工程, 1983, (5): 24-37.
- [21] 王志魁, 张海跃. 帽罩式气液并流接触塔板的板效率—传质池与混合池的双池模型[J]. 化学工程, 1986, (1): 61-65.
- [22] 张佑红. 新垂直筛板塔的 Hausen 板效率[J]. 石油化工, 1996, 25(7): 483-490. ■

甲醇汽车即将进入推广应用阶段

据了解, 工信部已编制完成《关于开展甲醇汽车推广应用工作的指导意见》(下称《意见》), 即将正式发布。《意见》将成为下一阶段甲醇汽车推广应用的重要指导性文件。

为做好下一阶段的推广应用工作, 工信部节能与综合利用司已提前向中国汽车工业协会下达了《关于请协助做好甲醇汽车推广应用宣传工作的函》, 要求中国汽车工业协会做好推广准备。

据悉, 工信部将按照因地制宜、积极稳妥、安全可控的原则, 重点引导和支持陕西、贵州、山西、甘肃等通过验收的甲醇汽车试点地区, 加快建立市场化推广应用机制。

关于重型甲醇汽车市场化, 工信部将积极支持重型甲醇汽车推广应用, 加快推动在《道路机动车辆生产企业及产品公告》管理中, 对包括重型车在内的甲醇车辆放开区

域限制; 鼓励和支持地方政府及相关企业, 重点在国家基础设施建设如高铁、港口、机场等领域以及资源类开采如露天矿产、盐田等领域, 优先选择使用重型甲醇商用车, 加大推广应用力度; 支持企业提升甲醇汽车制造能力, 重点推广应用甲醇/柴油二元燃烧技术, 开发甲醇商用车等多种车型产品, 以满足市场需求; 加快制定甲醇/柴油燃料发动机技术条件、重型甲醇汽车燃料消耗量及污染物排放限值及测量方法等技术标准, 完善标准化支撑。

一位汽车行业的人士表示: “甲醇作为燃料, 安全性是很好的。作为液体, 运输、储存都很方便, 同时也实现了煤炭资源的可持续利用。中国的甲醇汽车进入市场后, 既是参与市场竞争和产业竞争的新生力量, 也是协同传统能源汽车, 落实党中央和国务院提出的打好蓝天保卫战的主力军。”(上海证券报)