

# 层数和表面开孔对金属丝网 填料性能的影响

姚跃宾<sup>1</sup>, 李洪<sup>1,2</sup>, 李鑫钢<sup>1,2,3</sup>, 高鑫<sup>1,2\*</sup>

(1. 天津大学化工学院, 天津 300072; 2. 精馏技术国家工程研究中心, 天津 300072;  
3. 天津化学化工协同创新中心, 天津 300072)

**摘要:**为了考察丝网层数和表面开孔对金属丝网填料性能的影响,测定了单层开孔金属丝网填料(BXH型)和双层无孔金属丝网填料(DM I型)的压降、泛点气速和传质效率,并将实验结果与单层无孔金属丝网填料(BX型)进行了对比。实验结果表明,与BX型单层无孔丝网填料相比,DM I型双层丝网填料的压降增大,泛点气速降低,传质效率提高;BXH型开孔丝网填料的压降降低,泛点气速增大,传质效率降低。丝网层数增加,可以提高填料的传质效率,但是填料的通量下降;填料表面开孔,可以提高填料的通量,但传质效率降低。

**关键词:**丝网填料;层数;表面开孔;流体力学性能;传质性能  
**中图分类号:**TQ174.75

**文献标志码:**A

**文章编号:**0253-4320(2014)11-0127-05

## Effects of layers and holes on performance of wire mesh packing

YAO Yue-bin<sup>1</sup>, LI Hong<sup>1,2</sup>, LI Xin-gang<sup>1,2,3</sup>, GAO Xin<sup>1,2\*</sup>

(1. School of Chemical Engineering and Technology, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

2. National Engineering Research Centre of Distillation Technology, Tianjin 300072, China;

3. Collaborative Innovation Center of Chemical Science and Engineering(Tianjin), Tianjin 300072, China)

**Abstract:** To investigate the effect of layer number and hole on the performance of structured packing, pressure drop, flooding velocity and mass transfer efficiency of BXH and DM I type structured packings are measured. The experimental results show that, compared with BX type structured packing, DM I type packing has a higher pressure drop and mass transfer efficiency with lower flooding velocity, while BXH type packing has a lower pressure drop and mass transfer efficiency with higher flooding velocity. This indicates that the increase of mesh layer can improve mass transfer efficiency of structured packing but reduce its capacity. On the contrary, the surface hole of the structured packing can improve the capacity but reduce the mass transfer efficiency.

**Key words:** wire mesh packing; number of layers; surface holes; hydrodynamics; mass transfer efficiency

金属丝网波纹填料是20世纪60年代由瑞士苏尔寿(Sulzer)公司开发的一种高效规整填料,具有气液分布均匀、持液量小、传质效率高、便于放大等优点,工业应用非常广泛<sup>[1]</sup>。近年来,以增大生产能力、提高分离效率为目的,人们对规整填料进行了大量的研究,其研究的焦点主要集中于对填料波纹结构的改进和对填料表面的特殊处理。在丝网表面开孔,不仅可以使液体从波纹片的一侧流动至另一侧,促进波纹片两侧液体的交换,而且可以减少液体在波谷处的聚集,避免沟流的发生;增加丝网层数,可以增强丝网的毛细作用,进而改善液体的流动形式和液体的分布状况<sup>[2]</sup>。

金属板波纹填料表面常常冲压有小孔,从而使得波纹片一侧的液体可以通过小孔流向波纹片另一侧,实现两侧液体的交换,以此增强液膜分布的均匀性并提高填料的有效传质面积。例如,瑞士苏尔寿

公司首创的Mellapack金属板波纹填料,其金属薄板表面冲有直径4 mm的小孔,开孔率约12.6%。丝网波纹填料由于丝网本身具有小孔,因而鲜有关于填料表面开孔的研究。多层丝网波纹填料是指有多层丝网片的丝网波纹填料,由金属丝网重叠在一起做成波纹片,然后以单层丝网波纹填料的几何结构组装成的填料,例如双层丝网波纹填料。

本文中在金属丝网波纹填料的基础上,实验研究表面开孔和单、双层结构对金属丝网波纹填料的流体力学性能的影响,以期能够为丝网波纹填料的结构优化,提高丝网波纹填料流体力学性能提供指导。

## 1 实验装置和材料

### 1.1 填料形式和结构参数

为考察丝网层数和表面开孔对填料性能的影响

收稿日期:2014-05-24

基金项目:国家自然科学基金(21176172,21336007);国家科技支撑计划资助(2011BAE03B07);长江学者和创新团队发展计划(IRT0936)

作者简介:姚跃宾(1988-),男,硕士生;高鑫(1984-),男,博士,副教授,研究方向为化工过程强化与节能,通讯联系人,022-24704701,gaoxin

@tju.edu.cn.

响,选择的 3 种波纹规整填料分别为单层无孔金属丝网填料(BX 型)、单层开孔金属丝网填料(BXH 型)、双层无孔金属丝网填料(DM I 型)。构成上述 3 种填料的波纹片实物如图 1 所示,3 种波纹规整填料的结构参数如表 1 所示。

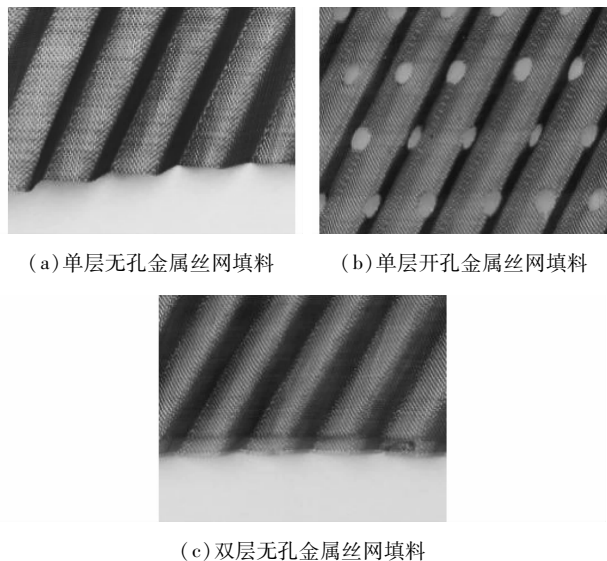


图 1 不同波纹片表面结构

表 1 三种填料的结构参数

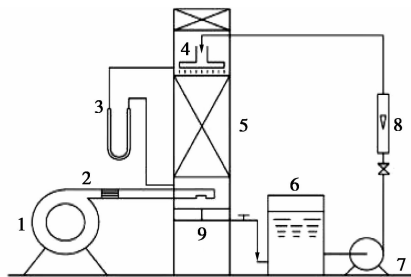
填料名称	填料型号	丝网层数	孔结构
单层无孔	BX	1	无孔
单层开孔	BHX	1	开孔
双层无孔	DM I	2	无孔

BX 型单层无孔丝网波纹填料是由单层丝网压制波纹片后,再按照一定的排列方式组装成填料盘。其中丝网的厚度为 0.15 mm,网眼大小为 80 目。BX 型填料的比表面积为  $500 \text{ m}^2/\text{m}^3$ ,波纹倾角为  $30^\circ$ ,孔隙率为 90%<sup>[2]</sup>。BXH 型单层开孔丝网波纹填料是先在丝网布上以一定的方式打孔,然后压制波纹片并按照一定的排列方式组装成填料盘。其开孔方式为:孔径为 4.5 mm,孔间距为 10 mm,孔以正三角形排列,开孔率为 8.7%。DM I 型双层无孔丝网波纹填料与 BX 型丝网填料的宏观结构相同,差别在于 DM I 型丝网波纹填料是由双层丝网压制波纹片后,再按一定的排列顺序组装而成。两层丝网之间并非紧密排列,而是存在一定的微空隙,空隙的存在使得其波纹片厚度微  $>0.3 \text{ mm}$ 。流体力学试验所用填料直径为 570 mm,传质效率试验所用填料直径为 310 mm,所有填料每盘高均为 200 mm,相邻两盘填料波纹片方

向呈  $90^\circ$  放置,在填料与塔壁之间安装防壁流圈以减少壁流的影响。

## 1.2 流体力学实验装置和方法

流体力学实验在直径为 600 mm 的有机玻璃塔中进行,其中填料段装填高度为 1 m,并以空气-水为测试体系。实验装置流程如图 2 所示。空气由风机输送,经气体流量计计量后从塔底部进入塔内,由气体分布器均匀分布,由下至上流经填料段后从顶部排出;水由离心泵输送,经玻璃转子流量计计量后从填料段顶部的液体分布器分布均匀后,流经填料段返回水槽。空气和水在填料段内发生接触,在塔顶安装丝网除沫器,以减少散失的水量。实验前对填料塔预液泛 30 min,使填料充分润湿。固定液体喷淋密度,在不同气速下记录填料层压降,直至液泛产生。整个实验中,液体喷淋密度范围为  $0 \sim 30 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ ,空塔气速范围为  $0 \sim 3 \text{ m/s}$ ,填料段压降由内装水的 U 形管压差计测量。

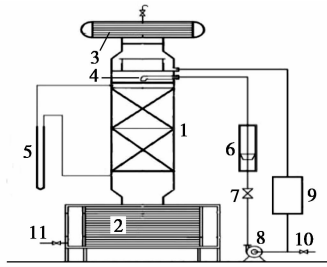


1—风机;2—气体流量计;3—U 型管压差计;  
4—液体分布器;5—填料段;6—水槽;7—离心泵;  
8—玻璃转子流量计;9—气体分布器

图 2 流体力学实验流程简图

## 1.3 传质实验装置和方法

传质实验在直径为 310 mm 的不锈钢精馏塔中进行,其中填料段装填高度为 2 m,采用环己烷-正庚烷二元物系作为测试体系,在常压下进行全回流实验。实验装置如图 3 所示,混合物在塔釜中经导热油加热,产生的气体由下至上通过填料段,在塔顶部冷凝器中冷凝,冷凝后的液体通过离心泵送入塔顶液体分布器,经均匀分布后,从填料段上部返回精馏塔。在某一固定回流量下操作 1 h 后,分别取样分析塔顶和塔釜样品浓度,若在一定时间内样品浓度基本保持不变,即达到稳定操作状态,记录此时的塔压降、塔顶和塔釜温度及对应的回流量;改变加热电压,开始第二个回流量的实验,重复上述操作。用阿贝折光仪测试塔顶、塔釜样品组成,通过 Fenske 方程计算填料的等板高度。



1—填料段;2—导热油;3—冷凝器;4—液体分布器;  
5—U 型管压差计;6—玻璃转子流量计;7—调节阀;  
8—离心泵;9—回流罐;10—塔顶取样口;11—塔釜取样口

图 3 传质效率实验流程简图

## 2 结果与讨论

### 2.1 丝网层数对填料性能的影响

通过测试 BX 型单层无孔丝网填料与 DM I 型双层无孔丝网填料的干填料压降 ( $\Delta P$ )<sub>dry</sub>、湿填料压降 ( $\Delta P$ )<sub>wet</sub>、泛点气速  $F_s$  以及等板高度 HETP 等流体力学性能和传质效率,研究了丝网层数对金属丝网波纹填料流体力学性能和传质效率的影响。

#### 2.1.1 干填料压降

图 4 为 BX 型单层无孔丝网填料与 DM I 型双层无孔丝网填料的每米干填料压降随气相动能因子  $F$  的变化趋势。从图 4 中可以看出, BX 型填料与 DM I 型填料的干填料压降均随气相动能因子  $F$  的增大而增大,但当  $F$  因子相同时, BX 型填料的压降低于 DM I 型填料,表明丝网层数的增加会导致干填料的压降增大。这是因为干填料压降主要是由填料表面与气体相互作用,并阻碍气体流动所造成,层数的增加使得填料波纹片厚度增加,填料孔隙率减小,气体沿波纹间通道流动的空间减小,因而干压降增大。

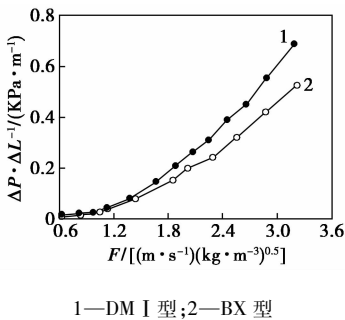


图 4 2 种填料的干填料压降与  $F$  因子的关系

#### 2.1.2 湿填料压降

图 5 为 BX 型单层无孔丝网填料与 DM I 型双层无孔丝网填料在喷淋密度分别为 11.60、19.33、

27.07  $\text{m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$  下的每米湿填料压降随气相动能因子  $F$  的变化趋势。

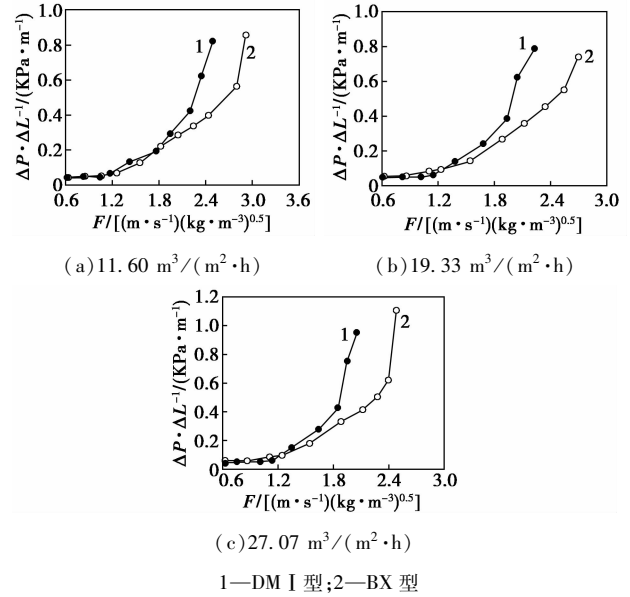


图 5 2 种填料的湿填料压降与  $F$  因子的关系

从图 5 中可以看出, BX 型填料与 DM I 型填料的湿填料压降变化规律与干填料压降变化规律相同。在固定的喷淋密度下, 2 种填料的压降均随动能因子  $F$  的增大而增加,且在 3 个不同的喷淋密度下, DM I 型填料的压降均高于 BX 型填料。这说明,丝网层数增加,填料的孔隙率减少,气相流动空间减小;同时由于波纹片厚度增加,在直径相同的情况下,波纹片数减少,因而使得填料内的液相通道体积较单层丝网填料小,填料表面液膜变厚,因此气液两相间流动阻力增大,导致填料压降增大。

#### 2.1.3 泛点气速

泛点因子  $F_s$  是填料塔设计的一个重要参数,填料塔在泛点因子  $F$  以下运行时,才能稳定操作。图 6 为 BX 型单层无孔丝网填料与 DM I 型双层无孔丝网波纹填料在不同喷淋密度下的泛点曲线图,横坐标为液体喷淋密度  $u_1$ ,纵坐标为泛点因子  $F$ 。

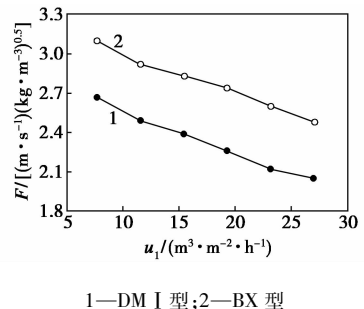
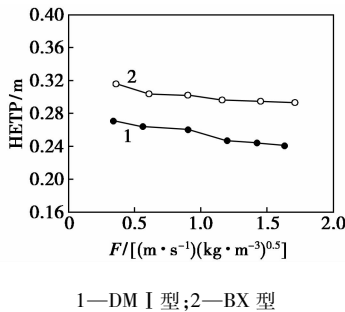


图 6 2 种填料在不同液相负荷下的液泛气速

从图 6 中可以看出,2 种填料的泛点因子  $F$  均随着液体喷淋密度的增大而减小,即喷淋密度越大越容易液泛;在不同的喷淋密度下,DM I 型填料的泛点因子  $F$  均低于 BX 型填料。这说明,丝网层数增加,填料的孔隙率减少,气液两相流动空间均减小,气液两相相互作用增强,导致液泛提前。

### 2.1.4 传质性能

等板高度 HETP 是衡量填料传质效率的重要参数,HETP 越小,传质效率越高。图 7 是 2 种填料的 HETP 随  $F$  因子的变化趋势。从图 7 中可以看出,在相同的  $F$  因子下,DM I 型双层无孔丝网波纹填料的等板高度低于 BX 型单层无孔丝网填料,也就是说前者的传质效率高于后者。这是因为,丝网层数增加,毛细作用增强,液体在丝网填料分布更均匀,因而有效传质面积增大,传质效率提高。



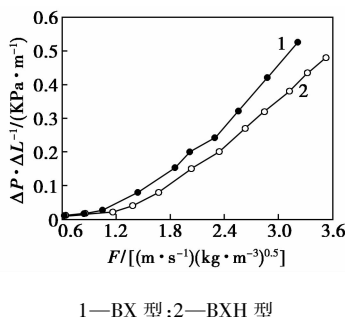
1—DM I 型;2—BX 型

图 7 2 种填料的等板高度与  $F$  因子的关系

## 2.2 表面开孔对填料性能的影响

### 2.2.1 干填料压降

图 8 为 BX 型单层无孔丝网填料、BXH 型单层开孔丝网填料的每米干填料压降随气相动能因子  $F$  的变化趋势。从图 8 中可以看出,BX 型填料与 BXH 型填料的干填料压降均随气相动能因子  $F$  的增大而增大,但当  $F$  因子相同时,BXH 型填料的压降低于 BX 型填料,这表明表面开孔能有效降低金属丝网波纹填料的干填料压降。这是因为干填料压



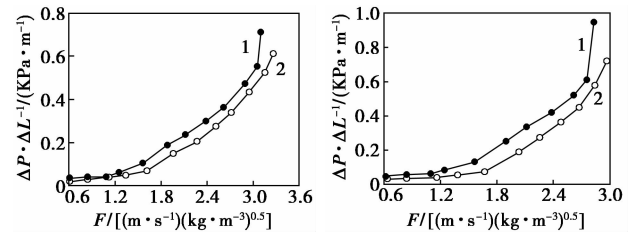
1—BX 型;2—BXH 型

图 8 2 种填料的干填料压降与  $F$  因子的关系

降主要是由填料表面阻碍气体流动的阻力所造成,而表面开孔使得气体更易从孔中直接垂直穿过,能减小气体穿过丝网时的阻力,从而简化气体在填料层内运动的轨迹,减小干填料的压降。

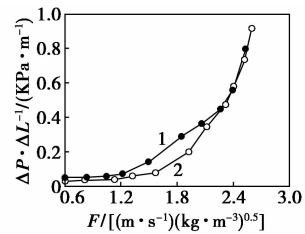
### 2.2.2 湿填料压降

图 9 是 BX 型单层无孔丝网填料以及 BXH 型单层开孔丝网填料在喷淋密度分别为 7.73、15.47、23.02  $\text{m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$  下的湿填料压降随气相动能因子  $F$  的变化趋势。从图 9 中可以看出,BX 型填料与 BXH 型填料的湿填料压降变化规律与干填料压降变化规律相同:在固定的喷淋密度下,2 种填料的压降均随动能因子  $F$  的增大而增加,且在 3 个不同的喷淋密度下,BXH 型填料的压降均低于 BX 型填料。这表明,表面开孔能有效降低金属丝网波纹填料的湿填料压降。这是因为湿填料压降主要是由填料表面液膜阻碍气体流动所造成,开孔使得气体更易从孔中直接垂直穿过,能减小气体与液膜之间的相互作用力,从而减小湿填料的压降。



(a) 7.73  $\text{m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$

(b) 15.47  $\text{m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$



(c) 23.02  $\text{m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$

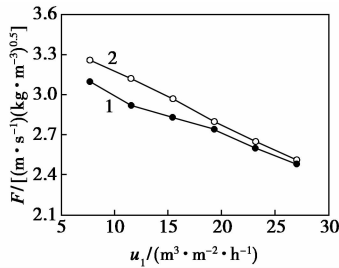
1—BX 型;2—BXH 型

图 9 2 种填料的湿填料压降与  $F$  因子的关系

### 2.2.3 泛点气速

图 10 为 BX 型单层无孔丝网填料、BXH 型单层开孔丝网填料在不同喷淋密度下的泛点曲线图。从图 10 中可以看出,2 种填料的泛点因子  $F$  均随着液体喷淋密度的增大而减小,即喷淋密度越大越容易液泛;在不同的喷淋密度下,BXH 型填料的泛点因子  $F$  均高于 BX 型填料。这表明,填料表面开孔可以增大填料的泛点气速,提高填料的通量。这主要是因为,表面开孔能减弱气液两相在两盘填料间转换流动方向时产生的阻力,使液

泛推迟发生<sup>[3]</sup>。

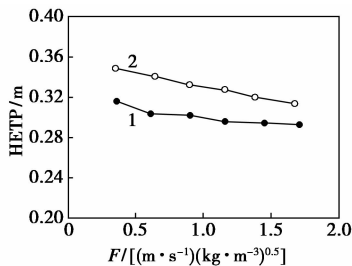


1—BX型;2—BXH型

图10 2种填料在不同液相负荷下的液泛气速

图10中还可以看出,当喷淋密度较小时,2种填料的泛点气速相差不大;但当喷淋密度增大时,2种填料的泛点气速接近。这主要是因为,液相负荷较大时,填料表面液膜增多并且变厚,填料表面的孔开始部分被液膜覆盖,因而气体穿过波纹片的通道部分消失,BXH型填料的泛点气速逐渐接近于BX型填料。

#### 2.2.4 传质效率



1—BX型;2—BXH型

图11 2种填料的等板高度与F因子的关系

图11是BX型单层无孔丝网填料、BXH型单层开孔丝网填料的理论板当量高度HETP随动能因子

$F$ 的变化趋势。从图11中可以看出,在相同的动能因子 $F$ 下,BXH型填料的等板高度高于BX型填料,也就是说前者的传质效率低于后者。这表明,在填料表面开孔会导致填料传质效率的下降。这主要是因为填料的传质效率与比表面积紧密相关,与表面无孔填料相比,表面开孔填料减少了部分比表面积,因而传质效率下降。

### 3 结论

测试了BX型单层无孔金属丝网填料、BXH型单层开孔金属丝网填料以及DM I型双层无孔金属丝网填料3种填料的流体力学性能和传质效率,分析了丝网层数和表面开孔对填料性能的影响,得到如下结论。

(1)与BX型单层丝网填料相比,DM I型双层丝网填料的压降增大,泛点气速降低,传质效率提高。这表明,丝网层数增加,可以提高填料的传质效率,但是填料的通量下降。

(2)与BX型无孔丝网填料相比,BXH型开孔丝网填料的压降降低,泛点气速增大,传质效率降低。这表明,填料表面开孔可以增大填料的通量,但填料的传质效率降低。

### 参考文献

- [1] 李群生,田原铭,常秋连. 新型高效规整填料性能研究[J]. 北京化工大学学报,2008,35(1):1-4.
- [2] Meier W. The applications of Sulzer structured packing[J]. Sulzer Technical Review,1970,52(3):147-153.
- [3] Suess P, Spiegel L. Hold-up of Mellapak structured packings[J]. Chem Eng Proc,1992,31(2):119-124. ■

### 陶氏化学聚焦新材料领域的联合创新

陶氏化学首度与浦江创新论坛合作,2014年10月25日在上海举办了2014年“陶氏创新日”,与行业专家在新材料领域探求联合创新的机遇。2014陶氏创新日上的主题演讲和圆桌讨论吸引了300多位与会人士。陶氏化学全球高级副总裁麦健铭(Jim McIlvenny)、来自中国工程院、国家自然科学基金委员会的专家院士、上海汽车集团股份有限公司、新疆德蓝股份有限公司等企业和大专院校的代表发表了主题演讲。陶氏化学全球研发总监、亚太区首席技术官姚维广博士和来自华为公司的代表参加了随后的圆桌讨论。

陶氏化学全球研发总监、陶氏亚太区首席技术官姚维广博士表示:“新材料是中国业已确定的战略性新兴产业之一,也是中国高新产业的重要基石,对于中国的经济转型来说至关重要。陶氏是新材料领域的全球领导者,我们希

望在充分发挥自身创新实力的同时,与众多合作伙伴一道推动新材料领域的联合创新。”

在陶氏创新日活动期间,陶氏也展示了在新材料等领域的众多技术突破和行业应用。近年来,陶氏在中国推出了许多创新型的应用,有力地推动了中国许多关键行业的发展。在中国,陶氏已经与海尔、华为等领先公司结成了致力于联合创新的战略合作伙伴关系。近日,海尔正式推出了与陶氏联合研发的省水洗衣机。该洗衣机可以省水30%,除菌率高达99%,并实现了将超滤技术应用于洗衣机的行业首创。

中国制定的新材料产业“十二五”发展规划提出,中国计划将新材料产业的规模在5年内翻3番,在2015年提升至2万亿元,并将其打造为推动国民经济发展的支柱产业。(党敏)