

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2017.08.027

## 热膨胀微胶囊的研究进展\*

陈彬彬<sup>1,2</sup>, 付海<sup>3</sup>, 何力<sup>1,2</sup>, 龚维<sup>1,2,3</sup>

(1. 贵州大学材料与冶金学院, 贵阳 550022; 2. 国家复合改性聚合物材料工程技术研究中心, 贵阳 550014;

3. 贵州师范大学, 贵阳 550025)

**摘要:** 综述了近年来热膨胀微胶囊的研究进展, 重点介绍了配方组分、合成工艺对热膨胀微胶囊性能的影响, 叙述了聚合单体、发泡剂、交联剂、分散稳定剂的选择, 分别讨论了反应温度、水油比例、均化条件、搅拌速度合成工艺的选择, 并综述了热膨胀微胶囊壳体接枝改性技术的研究进展, 同时叙述了热膨胀微胶囊在复合材料、水泥、微流体等领域的应用。最后, 对热膨胀微胶囊的发展前景及研究方向进行展望。

**关键词:** 热膨胀微胶囊; 接枝改性; 合成工艺; 研究现状

**中图分类号:** TQ316.33+5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2017)08-0129-06

### Research Progress of Thermal Expansion Microcapsules

Chen Binbin<sup>1,2</sup>, Fu Hai<sup>3</sup>, He Li<sup>1,2</sup>, Gong Wei<sup>1,2,3</sup>

(1. College of Materials and Metallurgy, Guizhou University, Guiyang 550022, China; 2. National Engineering Research Center for Compounding and Modification of Polymeric Materials, Guiyang 550014, China; 3. Guizhou Normal University, Guiyang 550025, China)

**Abstract:** The research progress of thermal expansion microcapsules in recent years was reviewed. The effects of formulation and synthesis on the properties of thermal expansion microcapsules were introduced. The composition of the formula was discussed from the choice of polymerization monomer, foaming agent, crosslinking agent and dispersion stabilizer. The synthesis process was discussed from the reaction temperature, water and oil ratio, homogenization condition and stirring speed respectively. The research progress of graft modification technology of thermal expansion microcapsule shells was reviewed. The application of thermal expansion microcapsules in the fields of composite materials, cement and microfluidics was described. Finally, the development prospect and research direction of thermal expansion microcapsules were prospected.

**Keywords:** thermal expansion microcapsule; graft modification; synthesis process; research situation

微胶囊技术是一种把固体、液体、气体包裹在聚合物薄膜中而形成核壳结构的技术。微胶囊的粒径通常为 $0.1 \sim 1000 \mu\text{m}$ , 而壳壁厚度为 $0.01 \sim 10 \mu\text{m}$ 之内<sup>[1]</sup>。由于微胶囊材料胶囊核心处的物质被外壳所包覆, 所以被包裹的物质的性质就得到了很好的保护, 而在合适的条件下, 胶囊外壳破坏, 内部的物质便可在需要时释放出来。因此, 近年来微胶囊技术的应用越来越广泛。

热膨胀微胶囊便是利用了微胶囊技术而制成的一种高分子颗粒, 粒径为 $5 \sim 100 \mu\text{m}$ , 其外壳是由气密性的热塑性高聚物组成, 外壳的内部包裹的是低沸点的有机溶剂。有机溶剂的沸点要小于聚合物外壳的玻璃化转变温度, 加热到一定温度后, 聚合物外壳软化, 低沸点有机溶剂充当发泡剂, 气化产生的内蒸汽压使微胶囊膨胀变大, 微胶囊的密度大约会从 $1100 \text{ kg/m}^3$ 减少到 $30 \text{ kg/m}^3$ 。热膨胀性微胶囊发泡后其大小会在一定温度范围内稳定, 继续加热, 由于内部发泡剂的逸出, 微胶囊的大小会逐渐萎缩。

热膨胀微胶囊的制备方法一般选用悬浮聚合的方式。

悬浮聚合法是指溶有引发剂的单体以液滴状悬浮于水中进行自由基聚合的方法。整体看水相为连续相, 液滴为分散相。聚合反应发生在每个小液滴内。热膨胀微胶囊的原料包括两大类: ①水相, 水相中包括去离子水、分散剂、分散助剂等几个部分; ②油相, 油相中包括反应单体、引发剂、交联剂等几个部分。热膨胀微胶囊的制备流程大致为以下几个步骤: 首先分别配制水相溶液和油相溶液, 然后将水相、油相混合均化; 接着将混合均匀的反应液放入反应容器中, 在密闭环境中, 以一定温度、一定的搅拌速度反应22 h左右; 冷却完成后, 出料、洗涤、抽滤、干燥, 便可得到白色或淡黄色的粉末产品。

用悬浮聚合法制备热膨胀微胶囊的优势在于, 油相分散在水相中, 每一个油滴反应所带来的热量能够很好地传递到周围的水相中, 从而保证了产品的稳定性和反应的安全

\* 贵州省百层次人才项目, 黔科合人才 ([2016]5673号)

联系人: 龚维, 博士, 教授, 研究方向为高分子结构与性能

收稿日期: 2017-05-18

性。此外,悬浮聚合更容易控制微胶囊的粒径分布,更容易获得粒径大小均匀的产品。而且有着产物杂质少,制备过程价格低廉等优点。

## 1 热膨胀微胶囊配方组分的研究状况

### 1.1 聚合单体

一定条件下,单体之间的聚合反应生成聚合物,而生成的聚合物则构成了热膨胀微胶囊的外壳。所以高聚物单体的选择要具备以下几个特点:①能够与油相中的引发剂和发泡剂互溶,这是悬浮体系能够反应的首要条件;②单体聚合生成的聚合物有良好的热塑性,这样微胶囊才具有更好的热膨胀性能;③聚合的外壳有良好的耐溶剂性和气密性。

Chen Shuying<sup>[2]</sup>以丙烯腈(AN)、甲基丙烯酸甲酯(MMA)和丙烯酸甲酯(MA)作为单体且其质量比为70/20/10、水和油相的体积比为3:1,以二甲基丙烯酸1,4-丁二醇酯(BDDMA)作为交联剂通过悬浮聚合制备了发泡倍率良好,粒径均匀的热膨胀微胶囊。

K. Yasuhiro 等<sup>[3]</sup>以AN/甲基丙烯腈(MAN)为聚合单体,并以MAA的7种衍生物、MAA、丙烯酸(AA)分别作为第三单体加入到聚合体系中,研究了单体的化学结构对高温热膨胀微胶囊的影响,发现加入有比较强的分子间力和高玻璃化转变温度的酸性单体,如甲基丙烯酸,可以提高微胶囊的膨胀温度,更适用于高温热膨胀微胶囊的合成。

M. Jonsson 等<sup>[4]</sup>以AN, MAN为聚合单体,异辛烷为发泡剂、BDDMA为交联剂制备了起始发泡温度为170℃,最大发泡温度230℃的热膨胀微胶囊。

Hou Zhaosheng 等<sup>[5]</sup>以偏二氯乙烯(VDC), AN和MMA作为单体和异丁烷作为发泡剂通过悬浮聚合制备热塑性可膨胀微胶囊(TEM),其中VDC, AN和MMA的质量分数分别为58.4%,28%,13.6%,异丁烷占油相总量的32%,微胶囊粒径约为20 μm,发泡温度在111~120℃之间。且最大膨胀倍率可达25倍。

Hou Zhaosheng<sup>[6]</sup>以AN和MMA作为单体,异丁烷作为发泡剂。制备的热膨胀微胶囊发泡倍率为22倍,集中发泡温度为120~130℃。

纪立军等<sup>[7]</sup>在常压条件下以AN, MA,乙酸乙烯酯为单体,正己烷为发泡剂,用悬浮聚合方法合成了膨胀直径为1661 μm,发泡温度在100~120℃的低温热膨胀微胶囊。

缪克存等<sup>[8]</sup>以AN, N, N'-二甲基丙烯酰胺(DMAA)、MMA为单体,当DMAA用量为11%时,制备出了粒径分布较窄,而且发泡倍率更大的热膨胀微胶囊。

朱效杰等<sup>[9]</sup>以AN, MMA, MAA为单体,其比例为6:2:2,制备的可膨胀微胶囊最大发泡温度为202℃,发泡倍率为110.8倍。

周凯军等<sup>[10]</sup>以双键聚氨酯和丙烯酸酯为聚合外壳,正己烷为发泡剂、引发剂选择偶氮二异丁腈(AIBN),以Mg(OH)<sub>2</sub>/聚乙烯吡咯烷酮(PVP-K30)为复合分散剂,制备的热膨胀微胶囊起始膨胀温度为90℃,并在57℃的温度范围内保持稳定。

### 1.2 发泡剂

发泡剂被包覆在聚合物外壳内部,加热到一定温度会发生气化,在微胶囊内部产生内压力而使其膨胀。发泡剂一般选用低沸点的烃类物质如:异丁烷、异戊烷、异辛烷等,这样在外壳软化时,低沸点的烃类已经气化,可以提供足够的内压力,此外还不易与单体发生副反应,不影响外壳的性能。

纪立军等<sup>[7]</sup>通过研究发现,发泡剂与交联剂对微胶囊的形貌有交叉影响,并且当交联剂的质量分数达到0.46%时,微胶囊的形貌不再随发泡剂含量的变化而变化。

J. Hu 等<sup>[11]</sup>以AN, MMA、丙烯酸丁酯(BA)的共聚物为外壳,以对甲苯磺酰肼(TSH)为内核,并且发现单体比为7:2:1时,制备的微胶囊在150℃有良好的热膨胀性能和稳定性。以TSH为内核可使微胶囊应用在水性膨胀型阻燃木材涂料中。

H. Ogawa 等<sup>[12]</sup>通过一种新型的热致相分离的方法以聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)为聚合外壳,乙醇作为发泡剂,发现微胶囊的膨胀性能主要影响因素是内蒸汽压力和外壳的分子质量。

### 1.3 交联剂

单体聚合形成的外壳不但需要一定的韧性,还需要一定的刚性来维持微胶囊的形状。因此,反应体系中需要加入少量的交联剂来保持聚合物外壳的刚度。常用交联剂有:二甲基丙烯酸己二醇酯、二乙二醇二烯基醚等。

朱效杰等<sup>[9]</sup>分别以0~0.3份的乙二醇二甲基丙烯酸酯(EGDMA)为交联剂研究微胶囊的膨胀性能,发现交联剂的加入有利于热膨胀微胶囊的膨胀温度和膨胀倍率的提高。但当其含量过高时,发泡性能反而变差。

M. Jonsson 等<sup>[13]</sup>研究发现,可以通过改变交联剂的组合来改变热膨胀微胶囊的膨胀性能。发现当使用BDDMA和碳酸二烯丙酯(DAC)的组合作为交联剂时,热膨胀微胶囊有更高的起始膨胀温度和更好的膨胀性能。

M. Safajou-Jahankhanemlou 等<sup>[14]</sup>以三甘醇二甲基丙烯酸酯(TEGDMA)为交联剂,以PMMA为聚合外壳,通过悬浮聚合法合成了膨胀温度在160℃的热膨胀微胶囊,并研究发现TEGDMA浓度的微小变化便能够影响微胶囊的性能,并提出交联剂的浓度越大,微胶囊的平均粒径越大,而且微胶囊的外壳会更薄、硬度更高且不易膨胀。

林华端等<sup>[15]</sup>以AN为主要单体,以二丙二醇二丙烯酸

酯(DPGDA)、三缩丙二醇二丙烯酸酯(TPGDA)、新戊二醇二丙烯酸酯(NPGDA)、三羟甲基丙烷三丙烯酸酯(TMPTA)和二乙烯基苯(DVB)分别为交联单体研究其对可膨胀微胶囊膨胀性能的影响。发现采用1.7%的DPGDA作为交联剂所合成的微胶囊有30倍的膨胀倍率,并且其形貌好,粒径小。

#### 1.4 分散稳定剂

分散稳定剂的作用是保护分散在悬浮体系中的液滴,分散剂对整个悬浮体系的稳定性至关重要。目前的研究中使用最多的两种分散剂是纳米二氧化硅和氢氧化镁。使用二氧化硅作分散剂的缺点是反应完成后,吸附在微胶囊表面的纳米二氧化硅不易除去。而采用氢氧化镁作为分散剂,在反应结束后,可以通过调节溶液的pH值将其除掉。

除了分散剂外,体系中通常会加入少量的分散助剂,这些分散助剂可以吸附在油相液滴的表面,而更有利于分散。例如烷基、非离子乳化剂、硫酸盐和脂肪酸等。

J. G. Kim等<sup>[16]</sup>以直径30~70 nm和长度为1~3  $\mu\text{m}$ 埃洛石纳米管(HNTs)为分散稳定剂,用AN/MMA为单体,通过悬浮聚合的方式制备了热膨胀微胶囊,并发现随着HNTs浓度的增大,微胶囊的粒径平均大小逐渐降低。但HNTs的质量分数高于0.75%时,包覆的发泡剂的含量会显著下降。

J. S. Kyoung等<sup>[17]</sup>以AN, MAN为聚合单体,分别以HNTs和聚(乙烯基吡咯烷酮)(PVP)作为乳化剂和稳定剂,分别制备出了直径为150~200  $\mu\text{m}$ 和20~30  $\mu\text{m}$ 的微胶囊。发现PVP系列的微胶囊较HNTs系列有更大的膨胀倍率。

H. B. Ji等<sup>[18]</sup>以AN-MMA为外壳,正辛烷为发泡剂,通过悬浮聚合法制备了30~50  $\mu\text{m}$ 的微胶囊,且发现添加聚乙烯醇作为稳定剂时,制备的微胶囊外表光滑且形态规则。

在配方组分方面,研究者分别对聚合单体、发泡剂、交联剂、分散稳定剂做了系统的研究。从众多研究结果中可得出如下结论:①单体的选择一般有丙烯腈类、丙烯酸类以及酯类单体等。聚合单体的差异会导致聚合外壳结构的差异,从而影响到外壳的刚性和韧性。常用刚性单体如AN含量的增加,会使微胶囊的膨胀温度增加;②发泡剂沸点及其用量的不同使微胶囊在膨胀过程中产生不同的蒸汽内压力。通常发泡剂沸点低、增大发泡剂含量会降低微胶囊的膨胀温度;③选用官能度较大的交联剂或增加交联剂含量使微胶囊有更大的膨胀倍率以及更高的膨胀温度;④分散剂的种类以及含量关系到微胶囊油状液滴的分散效果,除了常用的二氧化硅、氢氧化镁外,新的分散剂如HNTs等也可以应用于微胶囊的合成研究当中。

## 2 热膨胀微胶囊合成工艺的研究状况

### 2.1 引发剂和温度

工业上,较快的反应速度虽然带来了较高的反应效率,

但在微胶囊的生产过程中并不易形成外壳厚度均匀的产品。因此,反应体系中引发剂的选择要控制反应速度不能太高。选择半衰期较长的引发剂,控制反应的温度和引发剂浓度,适当的延长反应时间,更容易获得厚度均匀的微胶囊产品。引发剂一般选择过氧化苯甲酰和AIBN。

何思阳等<sup>[19]</sup>以AN, MA和MMA为单体,制备了发泡温度较低的热膨胀微胶囊。以过氧化月桂酰(LPO)为引发剂,研究了反应温度对发泡温度的影响,发现50℃时的发泡温度较62℃高,发泡倍率较低。而反应温度为71℃时的发泡温度下降,但外壳的强度下降并且外壳的厚度不均匀。

刘娇娇等<sup>[20]</sup>以AIBN为引发剂,研究不同反应温度(60, 65, 70℃)对热膨胀微胶囊膨胀性能的影响,发现随着反应温度的升高,集中发泡温度随之增加,但温度为70℃时,发泡后的微胶囊易破碎。

蔡秀丽<sup>[21]</sup>分别以相同百分比的AIBN和过氧化二苯甲酰(BPO)为引发剂,发现AIBN所得的微胶囊粒径小且分布更均匀。并建议AIBN的反应温度在60℃下,BPO的反应温度在80℃下。

### 2.2 水油比

使用悬浮聚合制备热膨胀微胶囊,合成工艺中的水油比直接决定反应过程中,油滴在水相中的分散情况,由此,直接影响微胶囊粒径分散尺度的大小,研究者通过改变水油比例研究其对粒径大小及其分布的影响,得到不同体系下水油比的适宜配比。

何思阳等<sup>[19]</sup>在制备微胶囊时,把合成工艺的水油比例控制为3:1,得到的微胶囊粒径分布窄,平均粒径大小约为20  $\mu\text{m}$ 。

刘娇娇等<sup>[20]</sup>选择不同的分散相和油相的质量比进行反应,研究了所得微胶囊的粒径分布,发现水油比5:1所得的微胶囊相比于4:1,3:1的粒径更小且分布更窄。

### 2.3 搅拌速度

如果反应的搅拌速度太小,油滴在悬浮体系中会合并,使制备的微胶囊粒径偏大。增大搅拌速度,油滴的粒径会变小。

侯昭升等<sup>[5]</sup>制备微胶囊时,把工艺的搅拌速度选择为250 r/min。Chen Shuying等<sup>[2]</sup>选用的搅拌速度是150~400 r/min之间,均合成了粒径分布均一的热膨胀微胶囊。

缪克存<sup>[22]</sup>分别用100, 200, 300 r/min的搅拌速度做对比,发现100 r/min的微胶囊粒径较大,采用300 r/min制备的微胶囊有更小的尺寸和更窄的分布。

### 2.4 均化条件

均化是把油相和水相混合的过程,油相在水相中的分散情况跟均化时间和均化速率有着密切的关系。

蔡秀丽等<sup>[21]</sup>研究了不同均化时间和不同均化速率对微胶囊粒径分布的影响。发现均化速率越大所得的微胶囊粒径越小、粒径分布越窄。但也不宜过大,选择 7000 r/min 为宜。均化时间越长所得产品粒径分布越窄,以 5 min 为宜。

谢贵明等<sup>[23]</sup>在制备 PMMA 微球时,在反应釜中以 1200 r/min 的速率,将油相预分散了 30 min。M. Jonsson 等<sup>[4]</sup>在制备微胶囊时,选用的均化速率为 8000 r/min,均化混合了 45 s。J. G. Kim 等<sup>[16]</sup>选择的工艺是 9500 r/min,均化 2 min。研究表明,这些工艺均能获得粒径分布均一,外观形貌规则的热膨胀微胶囊。

在合成工艺方面,研究者分别对反应温度、水油比例、搅拌速度、均化条件进行了研究。从合成工艺的研究结果中可以得出结论:①工艺反应温度的设定需根据所选择引发剂的种类及其半衰期而定,一般,温度越高,悬浮体系聚合速率越快,如果反应速度过快,可能会使聚合物生成过快而导致实验失败;②水油比的选择既要满足微胶囊的生产效率,又要使油相中反应产生的热量传递出来。一般水油比例选择 3:1~5:1;③搅拌速度的大小直接影响微胶囊粒径的大小,一般搅拌速度选择 100~400 r/min,并且在一定范围内,粒径随着速度的增大而减小;④均化条件决定油滴在水相中的初始分散形态,一般,均化时间越长,所得产品粒径分布越均一,均化速率一般选择 7000~9500 r/min。由于实验设备的差异,在合成之前,仍需要根据自身的生产条件,对合成工艺进行研究和探索。

### 3 壳体接枝和改性的研究状况

随着对热膨胀微胶囊研究的深入,科研工作者的研究已经不局限于仅仅合成一种微胶囊,在微胶囊外壳的表面接枝某种官能团,或对微胶囊外壳进行改性已经成为热膨胀微胶囊领域研究的热点和新的方向。

M. Safajou-Jahankhanlou 等<sup>[24]</sup>通过悬浮聚合法,以交联的 PMMA 纳米复合材料作为聚合外壳,戊烷作为发泡剂,制备了热膨胀微胶囊 (TEMS)。并用氧化石墨烯和 3-甲基丙烯酰氧丙基-三乙氧基硅烷 (MPS) 改性的氧化石墨烯分别作为纳米填料探究其对微胶囊的性能的影响,得到的微胶囊分散更均匀,热稳定性好,可包覆更多的发泡剂,所得微胶囊的集中发泡温度在 160℃。

G. Vamvounis 等<sup>[25]</sup>把热膨胀性微胶囊用 3-正十二烷基噻吩进行接枝改性,发现改性后的微胶囊膨胀倍率可达到 50 倍,并且发现膨胀后的微胶囊仍保持其结晶状态,而且功能化的微胶囊可以赋予其本身特有的光学和电学性能。

Lu Yuchen 等<sup>[26]</sup>在热膨胀微胶囊上接枝聚(甲基丙烯酸缩水甘油酯)(PGMA)而使粘结剂体系的性能得以提升,与未改性 TEM 的粘合剂相比,剪切强度增加高达 15.8%,极

限拉伸强度 (UTS) 增加 24.0%。而且改性的微胶囊粘结剂体系有更好的耐湿性能。

为了增强热膨胀微胶囊的性能以及赋予微胶囊更多的特性,研究者对热膨胀微胶囊表面进行接枝和改性,从研究结果看,进行适当的接枝和改性之后的微胶囊有着可优化其膨胀行为、改善与基体材料的相容性、抑制微胶囊之间的团聚行为等优点。极大地拓宽了可膨胀微胶囊的应用领域。随着接枝和改性技术研究的深入,热膨胀微胶囊也将有更好的发展前景。

### 4 热膨胀微胶囊用途的研究状况

热膨胀微胶囊的应用已涉及到了诸多领域之中,如海绵、陶瓷、复合材料、水泥、微流体等领域,随着研究的深入,其应用领域也将越来越广。

Chen Xiaosong 等<sup>[27]</sup>用 MSH-500 可膨胀微胶囊作为发泡剂,制备了三元乙丙橡胶 (EPDM) 海绵,并在加入 3 份过氧化二异丙苯 (DCP),5 份 MSH-500,固化温度 140℃和固化时间 15 min 的条件下,获得了综合性能较好的橡胶海绵,而且 EPDM 海绵的孔隙分布均匀,孔径大小均匀。

Wang Lijun 等<sup>[28]</sup>用可膨胀微胶囊作为发泡剂制备了环氧泡沫材料,并且材料拥有低密度和较高抗压能力的优点。环氧泡沫材料已应用于海军舰艇、军用车辆、飞机制造、建筑物和海洋结构等方面。

K. Young-Wook 等<sup>[29]</sup>以可膨胀微胶囊作为牺牲模版,制备了孔隙度范围在 60%~80% 的多孔碳化硅陶瓷,用可膨胀微胶囊的优势在于减少了热解过程中产生的气态副产物,并且降低了成本。

H. Aglan 等<sup>[30]</sup>把可膨胀的热塑性微胶囊加入到波特兰白水泥 (PWC) 中,研究了其断裂性能和间接拉伸强度,发现加入 0.35% 的微胶囊其间接拉伸强度增加了 2.5 倍,加入 0.1% 的微胶囊其断裂性能增加了 3 倍,加入 1% 的微胶囊其热电阻率增加了 30%。混凝土本身容易开裂是因为其固有的空隙和不连续性。向水泥混合物中添加可膨胀的微球是提高材料韧性的一种方法。

L. Vaikhanski 等<sup>[31]</sup>把可膨胀微胶囊加入聚氯乙烯材料中,并用芳纶纤维增韧,制备了一种复合发泡材料。拉伸强度和拉伸弹性模量分别增加了 6 倍和 8 倍,剪切强度和剪切模量增加了 1.8 倍和 2.4 倍。复合泡沫材料还提升了应变能密度和损伤容限,并降低了缺口敏感度。

L. Andersson 等<sup>[32]</sup>基于以可膨胀微胶囊作为牺牲模版,通过凝胶浇铸方法制备了大孔陶瓷材料,通过控制微胶囊的含量以及大小,制备的材料孔隙率高达 86% 和孔径分布从 15 μm 到 150 μm。可膨胀微胶囊的加入使模版材料的粉体含量降低,提高了脱脂工艺的效率。

L. Vaikhanksi 等<sup>[33]</sup>以连续纤维增韧聚丙烯腈为外壳的热膨胀微胶囊,制备了一种复合泡沫材料,并与不含微胶囊的材料做对比,发现含微胶囊的复合泡沫材料有更好的塑性和力学性能。拉伸强度和拉伸弹性模量分别提高至 750 MPa 和 400%,抗裂纹扩展能力得到提高。

H. Andersson<sup>[34]</sup>研究了可膨胀微球在微流体组件中的应用。用两种不同的方法,光刻技术和基于表面化学的自组装技术使可膨胀微球成功地与非结构化的硅结合,表明其在微流体领域存在潜在研究价值。

B. Samel 等<sup>[35]</sup>把 TEMS 和聚(二甲基硅氧烷)(PDMS)复合,用低成本材料和晶圆级工艺制备了可以精确控制液体体积吸收释放的微流体控制元件,解决了部件在一些特定位置的驱动问题。

K. J. Sun<sup>[36]</sup>把热膨胀微胶囊作为发泡剂加入到聚丙烯(PP)材料中,且与加入化学发泡剂的 PP 材料做对比。发现当化学发泡剂和热膨胀微胶囊的含量增加时,材料的密度会降低。但加 TEM 的 PP 材料有更高的耐冲击性能。

## 5 展望

热膨胀微胶囊作为一种新型非传统物理发泡剂,具有广阔的应用前景,由于国内关于热膨胀微胶囊的研究起步较晚,所以现阶段国内的研究依然集中在合成工艺、配方组分上,有关悬浮液中微胶囊的形成机理的研究已有学者开始涉及,今后热膨胀微胶囊的研究工作应集中到以下几个方面:(1)更详细深入地探究热膨胀微胶囊的形成机理,从微观角度阐释其形成过程,模拟其合成模型。(2)改变合成组分或者对微胶囊表面进行接枝改性,给予热膨胀微胶囊一定的功能性,例如以石墨烯作为分散剂,可赋予热膨胀微胶囊一定的导电能力,除此之外,开发拥有其它功能性的热膨胀微胶囊也将是以后的研究方向。(3)热膨胀微胶囊本身膨胀吸热便是一种储能形式,与相变材料相结合,开发拥有储能功能的相变微球,对于绿色化学、节能环保有着积极意义。

热膨胀微胶囊的研发过程中应注重理论与实际相结合,促进热膨胀工业化的发展,降低生产成本,做到物美价廉、绿色环保、多功能、多类型的热膨胀微胶囊更普及的应用于实际生产生活之中。

## 参考文献

- [1] 林书乐,等. 高分子材料科学与工程,2012,28(5):179-182.  
Lin Shule, et al. Polymer Materials Science and Engineering, 2012, 28(5):179-182.
- [2] Chen Shuying, et al. Materials Science Forum, 2016, 852:596-600.
- [3] Yasuhiro K., et al. Journal of Applied Polymer Science, 2005, 96(4):1306-1312.
- [4] Jonsson M., et al. Journal of Applied Polymer Science, 2010, 118(2):1219-1229.
- [5] 侯昭升,等. 高分子材料科学与工程,2015,31(9):49-52.  
Hou Zhaosheng, et al. High Polymer Materials Science and Engineering, 2015, 31(9):49-52.
- [6] Hou Zhaosheng, et al. Chinese Chemical Letters, 2014, 25(9):1279-1281.
- [7] 纪立军,等. 高分子学报,2015(8):906-912.  
Ji Lijun, et al. Journal of Polymers, 2015(8):906-912.
- [8] 缪克存,等. 含 DMAA 热膨胀性微球的制备与性能 [J]. 塑料工业, 2012, 40(5):115-118.  
Miao Kecun, et al. Plastics Industry, 2012, 40(5):115-118.
- [9] 朱效杰,等. 塑料工业,2013,41(4):14-18.  
Zhu Xiaojie, et al. Plastics Industry, 2013, 41(4):14-18.
- [10] 周凯军,等. 塑料工业,2016(6):21-25.  
Zhou Kaijun, et al. Plastics Industry, 2016(6):21-25.
- [11] Hu J., et al. Pigment & Resin Technology, 2009, 38(5):280-284.
- [12] Ogawa H., et al. Journal of Applied Polymer Science, 2010, 106(4):2825-2830.
- [13] Jonsson M., et al. Journal of Applied Polymer Science, 2011, 121(1):369-375.
- [14] Safajou-Jahankhanlou M., et al. Colloid and Polymer Science, 2016, 294(6):1-10.
- [15] 林华端,等. 高分子材料科学与工程,2012,28(6):65-68.  
Lin Huaduan, et al. Polymer Materials Science and Engineering, 2012, 28(6):65-68.
- [16] Kim J G., et al. Colloid and Polymer Science, 2015, 293(12):1-8.
- [17] Kyoung J S., et al. Journal of Applied Polymer Science, 2016, 133(47):44247-44252.
- [18] Ji H B., et al. Polymer Korea, 2015, 39(1):78-87.
- [19] 何思阳,等. 塑料工业,2013,41(5):96-100.  
He Siyang, et al. Plastics Industry, 2013, 41(5):96-100.
- [20] 刘姣姣. 核-壳结构热塑性膨胀微球的制备及发泡性能研究 [D]. 合肥:合肥工业大学,2015.  
Liu Jiaojiao. Core shell structure of thermoplastic expansion microspheres and [D]. Hefei: Foaming Properties of Hefei University of Technology, 2015.
- [21] 缪克存. 热膨胀微球的合成研究 [D]. 上海:华东理工大学,2012.  
Miao Kecun. The study on the synthesis of thermal expansion microspheres [D]. Shanghai: East China University of Science and Technology, 2012.
- [22] 蔡秀丽. 热膨胀微球的制备及性能研究 [D]. 合肥:合肥工业大学,2014.  
Cai Xiuli. Preparation and properties of thermal expansion microspheres [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2014.
- [23] 谢贵明,等. 水相添加剂对热可膨胀聚合物微球颗粒结构和膨胀特性的影响 [J]. 化工学报, 2015, 66(11):4682-4688.  
Xie Guiming, et al. Transactions of the chemical industry, 2015, 66(11):4682-4688.

- [24] Safajou-Jahankhanemlou M, et al. Polymer Composites, 2016, doi:10.1002 / pc.24025.
- [25] Vamvounis G, et al. European Polymer Journal, 2013, 49(6):1 503–1 509.
- [26] Lu Yuchen, et al. International Journal of Adhesion & Adhesives, 2015, 66:33–40.
- [27] Chen Xiaosong, et al. China Rubber Industry, 2011, 58(2):101–104.
- [28] Wang Lijun, et al. Composites Part B Engineering, 2014, 56(1):724–732.
- [29] Young-Wook K, et al. Journal of the American Ceramic Society, 2008, 91(4):1 361–1 364.
- [30] Aglan H, et al. Construction & Building Materials, 2009, 23(8):2 856–2 861.
- [31] Vaikhanski L, et al. Composites Part A Applied Science & Manufacturing, 2003, 34(12):1 245–1 253.
- [32] Andersson L, et al. Journal of the European Ceramic Society, 2008, 28(15):2 815–2 821.
- [33] Vaikhanski L, et al. Composites Part A Applied Science & Manufacturing, 2003, 34(8):755–763.
- [34] Andersson H, et al. Sensors & Actuators B Chemical, 2002, 84(2):290–295.
- [35] Samel B, et al. Active liquid aspiration and dispensing based on an expanding PDMS composite[C]//IEEE, International Conference on MICRO Electro Mechanical Systems. Piscataway, N J: IEEE, 2007.
- [36] Sun K J, et al. Polypropylenes foam consisting of thermally expandable microcapsule as blowing agent[C]//AIP Publishing LLC. New York ; Melville, 2016.

## 投稿须知

### 1 稿件内容

稿件应注重科学性、实用性及时效性,要求技术新颖,论点明确,论据可靠,数据准确,文字通顺、简练。稿件内容必须真实,避免抄袭,请作者文责自负。引用他人成果时,请按《著作权法》有关规定说明出处。内容应未曾发表过或被其他出版物刊载过,且无一稿多投。

### 2 稿件要求

凡属于重大科技获奖的论文和重点项目资助的论文,请在来稿第一页注明名称及批准号,本刊将优先刊登。

(1) 题目、作者署名及单位。题目力求简明、醒目,反映出文章的主题,一般不超过 20 个汉字。作者姓名在题目下按序排列,不同工作单位的作者,应在姓名右上角加注阿拉伯数字序号。作者单位须写全称并注明省份、城市和邮政编码。联系人信息(包括姓名、学历或职称、主要研究方向)注在第一页下方。

(2) 摘要及关键词。论文需要同时提供中文和英文摘要,摘要以提供论文的内容梗概为目的,不加评论和补充解释,应简明、确切地论述研究目的、原理和结论,具有相对独立性。中文和英文摘要均要求采用报道性摘要类型。具体要求:中英文摘要均为一段式,内容比较具体,一般需要列举关键数据。中英文摘要内容基本一致,中文摘要以 200~300 字为宜,英文摘要可略详。关键词要求 3~8 个。

(3) 正文。正文各部分都应简洁明了。层次标题一律用阿拉伯数字连续编号,尽量减少层次;不同层次的数字之间用小圆点相隔,末位数字不加标点符号。如“1”,“1.1”等。文中量、单位及符号的使用应符合国际标准和国家标准。

(4) 图表。图表要设计合理,简单自明。每一幅图都应有图序和简短确切的图名,横纵坐标均要注明物理量及其单位,线条图要用矢量格式的图,或将 \*.opg, \*.dwg, \*.eps 等格式的图打包压缩随投稿一起上传。表格请使用三线表,每一表格都应有表序和简短确切的表题。图表标题一律用中文表达。

(5) 参考文献。以作者亲自阅读过的主要原始文献为限,不可引用非公开出版或发表的文献,不能引用其他文章中引用的但未经核对原文的文献,要注意引用最新的文献。参考文献要有一定的数量,研究性论文至少 10 篇。参考文献的著录按文章中引用的顺序依次排列,中文参考文献要有对照英文部分(英文部分不编号)。无论中外文的作者,一律采用姓前名后的形式著录;作者不超过 3 人时可全部著录,超过 3 人时,只著录前 3 位,其后加“等”或“et al”。综述类论文的参考文献著录项目适当简化,可参见本刊相关栏目文章样式。作者对所引文献的准确性和完整性负责。

### 3 投稿方式

请作者登陆“工程塑料网”(http://www.epa1973.com),进入杂志社之页,点击“网上投稿”后投稿。来稿请注明详细地址、电话、邮箱等信息,便于通知联系。一般一个月左右可以查询稿件审理意见,超过 3 个月未收到修改意见或回复的可自行处理。

### 4 注意事项

为适应我国信息化建设需要,扩大学术交流渠道,本刊已编入国内外著名数据库。稿件一经录用,将同时被数据库收录,作者著作权使用费与本刊稿酬一次性给付。如作者不同意收录,请在投稿时声明,否则将视为同意。