

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2019.03.028

聚氨酯泡沫在节能建筑中的应用

矫立超^{1,2},戎贤¹,孔祥飞³,杨志强⁴

(1. 河北工业大学土木与交通学院,天津 300401; 2. 河南城建学院管理学院,河南平顶山 467036;

3. 河北工业大学能源与环境工程学院,天津 300401; 4. 河北曲港高速公路开发有限公司,河北定州 073007)

摘要:与传统建筑材料相比,聚氨酯泡沫具备保温效果好、防火性强和力学性能稳定等多方面的优势,聚氨酯泡沫在建筑外墙、屋顶、地板、门窗和供热管网等获得了广泛的应用。对聚氨酯泡沫在节能建筑中的使用优势、制备方法和应用范围进行了详细论述,指出在以后的发展过程中,聚氨酯泡沫产业应继续研发新型配方、施工技术和制备工艺,进一步降低生产成本,符合环保需求,为节能减排工作做出更大贡献。

关键词:聚氨酯泡沫;节能建筑;保温;应用

中图分类号: TQ323.8 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2019)03-0140-05

Application of Polyurethane Foam in Energy-Saving Building

Jiao Lichao^{1,2}, Rong Xian¹, Kong Xiangfei³, Yang Zhiqiang⁴

(1. School of Civil Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China; 2. School of Management, Henan University of Urban Construction, Pingdingshan 467036, China; 3. College of Energy and Environmental Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China; 4. Hebei Qugang Expressway Development Co., Ltd., Dingzhou 073007, China)

Abstract: Compared with traditional building materials, polyurethane foam has many advantages such as excellent thermal insulation effect, strong fire resistance and stable mechanical properties. Polyurethane foam has been widely used in the external building walls, roofs, flooring, doors, windows and heating pipes. The application scope, preparation method and advantages of polyurethane foam in energy-saving building were summarized. It was pointed out that in the future development process, the polyurethane foam industry should continue to develop new formula, construction technology and manufacturing technology, further reduce production costs, meeting the needs of environmental protection and make greater contributions to energy conservation and emission reduction work.

Keywords: polyurethane foam; energy-saving building; heat preservation; application

随着经济的快速发展,建筑节能问题越来越受到大家的广泛关注。建筑节能主要指在建筑的初始设计或施工过程中,严格遵守建筑节能的制度,不以降低建筑成本为根本目的,采用节能材料,减少能源消耗或热量流失,增强建筑物的保温隔热效果,实现能源的高效利用^[1]。目前我国建筑节能水平跟发达国家相比仍有较大差距,我国房屋单位面积供暖能耗是全球气候条件相近发达国家能耗的两到三倍,全国建筑能耗大概占据全国能源消耗的百分之三十左右,因此建筑节能对我国节能工作意义重大^[2-3]。在节能建筑的建造过程中,建筑材料的正确选择是一个至关重要的工作,决定着建筑的能耗和能源利用效率。

作为一种新型建筑材料,聚氨酯泡沫最近几年受到大家的普遍关注,它由异氰酸酯和多元醇化合物为单体进行聚合反应所制备,反应过程中产生的二氧化碳气体作为发泡剂,生成结构致密的微孔泡沫体^[4]。聚氨酯泡沫主要分为硬质聚氨酯泡沫、软质聚氨酯泡沫和半硬质聚氨酯泡沫。不同于硬质聚氨酯泡沫的闭孔结构,软质聚氨酯泡沫为开孔结构,具有质量轻、透气和回弹性好等特性。半硬质聚氨酯泡沫是硬度处在软泡与硬泡之间的一种开孔型聚氨酯泡沫,具有较高的压缩负荷值。硬质聚氨酯泡沫是一种具有保温与防水功能的新型合成材料,其导热系数低,密度小,因此常被作为建筑的保温隔热材料^[5]。

基金项目: 河北曲港高速公路开发有限公司科技计划项目 (QG2018-3)

通讯作者: 矫立超,博士研究生,讲师,主要从事建筑材料成型加工及应用工作 E-mail: jiaolichao2006@126.com

收稿日期: 2019-01-03

引用格式: 矫立超,戎贤,孔祥飞,等. 聚氨酯泡沫在节能建筑中的应用 [J]. 工程塑料应用, 2019, 47(3):140-144.

Jiao Lichao, Rong Xian, Kong Xiangfei, et al. Application of polyurethane foam in energy-saving building[J]. Engineering Plastics Application, 2019, 47(3):140-144.

与传统建筑材料相比,聚氨酯泡沫具备优异的保温效果、强防火性、强耐水性和力学性能稳定等多方面的优势,可以通过现场浇注或喷涂的方式形成连续保温层,在建筑外墙、屋顶、地板、门窗和供热管网等获得了广泛的应用。

1 聚氨酯泡沫在节能建筑应用中的优势

1.1 保温隔热效果优良

聚氨酯材料是一种高分子热固型聚合物,聚氨酯泡沫的导热系数相比于其他建筑材料较低,保温性能更好,也就是说如果要获得同样的保温效果,聚氨酯泡沫需要使用的量更少,既有效减少材料的消耗又增大实际建筑面积^[6],聚氨酯泡沫与其他建筑材料性能对比见表1。此外,聚氨酯泡沫的导热系数还与其密度和陈化时间有着紧密关系。贺梦琦^[7]研究发现,当聚氨酯密度处于35~60 kg/m³之间,导热系数随密度增加明显减小,当聚氨酯密度超过60 kg/m³以后,导热系数会逐渐变大,证明聚氨酯密度在35~60 kg/m³之间的导热系数最佳。在没有任何胶粘剂和锚固件的情况下,聚氨酯泡沫也可和普通墙体或建材有效粘结起来,粘贴强度能够达到0.29 MPa以上^[8]。此外,聚氨酯泡沫可以通过现场模浇的方式构建出高效连续保温层,有效减少热量损失。

表1 聚氨酯泡沫与其他建筑材料性能对比

材料	导热系数/[W·(m·K) ⁻¹]	密度/(kg·m ⁻³)
聚氨酯泡沫	0.023	40
矿物棉板	0.046	150
泡沫玻璃	0.058	140
泡沫石灰	0.116	300
珍珠岩	0.197	800
混凝土	0.345	1500

1.2 防火性强

作为一种热固型聚合物,聚氨酯泡沫在高温条件下不易熔化和燃烧,具备优良的阻燃特性,阻燃级别可以达到保温建材中较高的B1或B2级。这对减缓火势蔓延意义重大,在建筑出现火灾时,将为灭火和救援提供更多宝贵的时间^[9]。聚氨酯泡沫工作温度较高,能够在100℃的环境中正常使用,经过耐温改性后,其工作温度甚至可以达120℃,而其他常见保温材料如聚苯乙烯泡沫,在80℃条件下便会出现收缩变形^[10-11]。

聚氨酯泡沫还可以通过在基体中添加阻燃化合物提高其热稳定性和阻燃性能。胡胜利^[12]通过调节固体阻燃剂和液态阻燃剂的添加比例,合成出极限氧指数高达30%以上的高阻燃硬质聚氨酯泡沫塑料。M. Modesti等^[13]将可膨胀石墨作为阻燃化合物添加到硬质聚氨酯泡沫中,实验结果证明,当可膨胀石墨的添加量为25%时,聚氨酯泡沫的极限氧指数高达42%。此外,研究还发现,该复合材料在燃烧后能够维持膨胀石墨炭层下的泡孔结构,证明可膨胀石墨可以有

效避免聚氨酯泡沫发生降解反应。田长山^[14]分别利用三氧化二锑、磷酸三酯、氧化铝和磷酸双酯等阻燃剂对聚氨酯酯胶地板进行阻燃改性研究,发现氧化铝和磷酸双酯复配使用能够较好提高其阻燃性能且可以有效降低生产成本。纯聚氨酯硬泡属于易燃可燃材料,燃烧时会产生大量烟雾和有毒气体,陆伟苗等以木质素替代部分二乙二醇制备阻燃性高、成本低、环境友好的硬质聚氨酯泡沫材料,研究了木质素对硬质聚氨酯泡沫性能的影响,并采用两种添加型阻燃剂复配,研究表明,添加木质素可提高硬质聚氨酯泡沫材料的阻燃性能,通过阻燃剂复配可使硬质聚氨酯泡沫材料的极限氧指数达到26.5%,可满足墙面泡沫材料燃烧性能B2级。

1.3 力学性能稳定

建筑材料稳定的力学性能可以有效消散建筑结构受到的应力,能够提高复杂建筑的稳定性。聚氨酯泡沫具有优良的韧性,这意味着即使受到外力或温度等作用下发生较大变形,聚氨酯泡沫也不会发生破裂而损害其保温性能,具备优秀的抗冲击性能,在实际测试结果中,现场喷涂的聚氨酯复合墙体的抗压强度能够达到200 kPa以上^[15]。此外,硬质聚氨酯泡沫还可以通过加入添加剂增加其力学性能。尹波等^[16]研究发现,硬质聚氨酯泡沫能够通过添加粉末尼龙1010提高其压缩、拉伸和冲击性能,当粉末尼龙添加量为5%时,各项力学性能指标达到最大值。A. K. Bledzki等^[17]使用亚麻和黄麻纤维合成出均匀微孔的聚氨酯复合材料,通过增大添加量能够明显提高材料的剪切模量和抗冲击性能。

1.4 优良的环保性及耐用性

聚氨酯泡沫的成分中没有有毒化学物质,同时在使用过程中不会对周围环境和人体产生损害,废弃聚氨酯泡沫还可以回收利用。方伟等^[18]使用废弃硬质聚氨酯泡沫和二甘醇合成聚醚多元醇,实现废弃聚氨酯泡沫的回收循环利用,且所制备出的聚醚组合料能够稳定储存达到半年以上。汪广恒等^[19]将大豆分离蛋白质(SPI)添加到聚氨酯泡沫中,采用阻燃聚醚合成出软质聚氨酯泡沫,SPI的加入不仅有效提高了软质聚氨酯泡沫的开孔率、密度、回弹率和断裂伸长率等性能,还能够增强聚氨酯泡沫的可生物降解性。

此外,聚氨酯泡沫还具有稳定的孔隙结构和良好的化学稳定性能,在正常使用和维修的情况下,模浇方式制备出的聚氨酯保温层能够使用25年以上,满足绝大多数建筑保温材料的要求^[20]。高晓敏等^[21]将硬质聚氨酯泡沫(密度为0.35 g/cm³)贮存十年,经过测试发现其外观保持良好,密度基本没有产生变化,并且压缩强度变化较小。

1.5 施工简便

目前,聚氨酯保温层主要通过现场浇注的方式制备,这

种制备方法使用浇注机器进行,施工进程高效迅速,远高于其他保温工程。在施工过程中,聚氨酯保温层不受建筑结构种类的限制,可以应用于多种建筑结构如建筑外墙、屋顶、地板、门窗和供热管网等,制备过程不会因为基底的弯曲不平而出现厚度不均匀的现象^[22]。在实际应用过程中,聚氨酯保温层既能在复杂建筑结构中起到良好的保温性能,同时其疏水特性可以有效避免保温层被水蒸气破坏。

2 聚氨酯泡沫在节能建筑中的应用

作为一种高分子热固型聚合物,聚氨酯泡沫的导热系数较低,保温隔热性能优异,具备较强的抗冲击性能和耐用性,能够通过现场浇注或喷涂的方式在建筑结构外快速铺设连续聚氨酯泡沫保温层。作为新型高效保温建筑材料,聚氨酯泡沫在建筑外墙、屋顶、地板、门窗和供热管网等获得了广泛的应用。

2.1 聚氨酯泡沫在外墙中的应用

在建筑外墙的建造过程中,聚氨酯泡沫一般和其他种类的建材制备出复合建筑材料作为外墙。常见的复合建材有金属板、塑料板和三合板等,其中金属板由于高硬度和优异的保温效果被大量使用^[23]。尤光星等^[24]使用聚氨酯复合板、砂浆和网格布等构筑硬泡聚氨酯复合板外墙外保温系统,仅需 0.03 m 厚度的聚氨酯复合板,便可以实现建筑节能 65% 的标准。高群等^[25]公开了一种防火阻燃聚氨酯外墙保温系统材料的制备方法,主要采用阻燃聚醚多元醇、杂环氨基聚醚多元醇、有机硅泡沫稳定剂、二甲基乙醇胺、二月桂酸二丁基锡和阻燃型多异氰酸酯固化剂混合制备,具有较高的防火阻燃性能。谢松芬^[26]公开了一种纳米耐磨聚氨酯外墙保温材料的制备方法,主要采用异氰酸酯、聚醚多元醇和纳米氧化硅等制备而得,该材料具备耐磨防腐、强度高、密度低、阻燃性高和导热性低的优点,此外其制备过程不使用氯氟烃发泡剂,对环境友好。陆伟苗等^[27]以木质素替代部分二乙二醇制备阻燃性高、成本低、环境友好的硬质聚氨酯泡沫材料,研究了木质素对硬质聚氨酯泡沫性能影响,并采用了两种添加型阻燃剂复配,研究表明添加木质素可提高硬质聚氨酯泡沫材料的阻燃性能,通过阻燃剂复配可使硬质聚氨酯泡沫材料极限氧指数达到 26.5%,可满足墙面泡沫材料燃烧性能 B2 级。

聚氨酯泡沫外墙保温层的制备方法主要分为浇注法、喷涂法和粘贴法。浇注法制备聚氨酯泡沫保温层首先由异氰酸酯和多元醇制备出流动态聚氨酯泡沫溶液,将其倒入预先固定好的浇注模板中,经过一定时间后聚氨酯泡沫在墙面与模板间发泡,经过界面处理后形成平整的保温层^[28]。该保温墙体包括聚氨酯泡沫层、墙面结构层、聚合物混合砂浆保护层和找平层(如图 1 所示),该制备方法主要在新建造的

房屋中使用。该方法制备保温外墙不适合在冬季寒冷和下雨天湿度较大条件下进行。在浇注过程中,模板必须牢牢固定于墙面,多次分批加入聚氨酯泡沫,如果单次加入量太多,会导致模板出现变形甚至破裂现象,严重影响聚氨酯泡沫的后续保温效果和实际使用寿命^[29]。

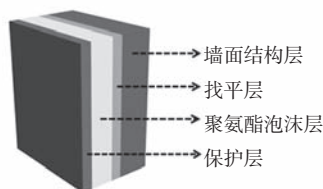


图1 聚氨酯泡沫保温层构造图

喷涂法制备聚氨酯泡沫保温层的过程是直接预先制备好的聚氨酯泡沫均匀喷涂于建筑墙体,接着喷涂界面稳定剂^[30]。该方法非常简单,易于操作,且成本低廉,比较适合建筑后续保温层的制备或改善。值得注意的是,在施工过程中需要保持墙体干燥,不合适在冬季寒冷和下雨天湿度较大条件进行,在不易于喷涂的建筑位置要预先涂抹一定量的聚氨酯泡沫,再进行喷涂操作以确保保温层不出现明显缺陷^[31]。

粘贴法制备聚氨酯泡沫保温层即利用粘贴的方式将成品聚氨酯泡沫固定于建筑外墙。在施工过程中,首先在墙面涂覆一层粘结胶,然后将聚氨酯泡沫仔细均匀粘贴于建筑墙体表面^[32]。该方法步骤简单,对环境温度和湿度要求较低,适用于简单平整外墙,当应用于复杂的建筑结构时,其保温效果不如浇注法所制备的保温层。

综上所述,浇注法和喷涂法所制备聚氨酯泡沫保温层可以和建筑外墙较好连接,不产生明显断层或缺口,其保温效果较好,热量传递系数低,良好的抗冲击性能可以保证当建筑主体出现膨胀或收缩时,聚氨酯泡沫保温层可以有效消散建筑结构的应力,以维持保温层结构的稳定。粘贴法虽然简单高效,不受施工环境制约,但不适合于复杂建筑结构,因此喷涂法和浇注法成为了当今聚氨酯泡沫保温层的主要施工方法。赵洪凯等^[33]对多种硬质聚氨酯泡沫外墙保温系统的设计和施工等进行了详细的总结和比较,使其在实际建造时能够更加合理高效。

2.2 聚氨酯泡沫在屋顶中的应用

屋顶的保温是节能建筑保温工作中的重要部分,对于提升建筑保温效果、减少热量损失意义重大。屋顶保温层的建造不仅要求保温材料具有优良的保温效果,还要求其质轻和密度低,不会对屋顶产生较大压力。同时该材料在潮湿环境下不会大量吸收水分,影响其保温效果。聚氨酯泡沫材料密度低,导热系数较低,属于保温性能优秀的建筑材料,强疏水特性(聚氨酯泡沫的闭孔率高达 95% 以上)保证其对水蒸气不产生吸附,在潮湿环境下也具备优越的保温效果^[34]。

郭亚莉等^[35]公布了一种利用聚异氰脲酸酯改性聚氨酯屋顶防水保温板的制备方法,该板材通过上下金属层和聚异氰脲酸酯改性聚氨酯泡沫层两部分构成,力学性能好,采用隐扣式进行搭接,防水性能优异,阻燃效果高达B1级标准。

传统保温层首先在平整屋顶外铺设隔热保温层,在外面再涂覆一层防水层。当受到高温或阳光的长时间照射下,普通屋顶防水层会出现裂缝,吸收水分后其保温效果显著下降。相比于传统保温层,聚氨酯泡沫保温层具备疏水特性,在潮湿环境下不会大量吸收水分,不需再铺设防水外层^[36]。当聚氨酯泡沫在屋顶面对阳光长期照射时,外保护层能够有效避免其受紫外线和外界侵蚀,此外保护层还可以增强屋顶整体强度,防止屋顶在大风大雨气相条件下产生裂缝。闫成文等^[37]构建了土工格栅聚氨酯屋顶保温系统,实验结论证明,在受到应力和应变作用时,两种材料的有效复合能够使聚氨酯泡沫的压缩强度显著增加3.6倍,可以跟钢筋混凝土构造的力学性能相媲美。

2.3 聚氨酯泡沫在地板中的应用

在室内地板中使用聚氨酯泡沫保温层,能够维持地板表面的温度,避免热量大量进入地下损失。当地板进行加热提升室内温度时,聚氨酯泡沫耐热性能优秀,不会发生热变形,产生有毒有害物质。既能维持室内温度,又可以减小地板所需厚度,大幅降低房屋地板保温系统改建过程的成本,简化施工步骤^[38]。此外聚氨酯泡沫力学性能稳定,具备优秀的抗冲击性能,通过增加其质量密度提高抗压能力,能够将其应用于需要抵抗较高压力的抗压地板。刘明福^[39]对直埋聚氨酯保温管的导热系数、热量流失和其它保温材料及保温管道进行详细对比分析,发现在获得相同保温效果的条件,采用直埋聚氨酯保温管具有更多优势。

2.4 聚氨酯泡沫在门窗中的应用

一般情况下,门窗往往是建筑结构中保温隔热效果最差的部分,门窗缝隙成为热量流失的重要通道,经研究者计算,热量在门窗中的流失量占据全部建筑热量流失量的40%以上,所以减小门窗热量流失增加其保温性能成为建筑节能工作的重要部分^[40]。

门窗的保温一般从提高门窗保温隔热性能和增强门窗密闭性两个方面开展工作。首先提高门窗保温隔热性能,采用隔热性能更好的塑料门窗如聚氯乙烯,该类型门窗的导热率大幅低于传统铝窗材和钢窗材。然后在门窗缝隙中加塞聚氨酯泡沫密封条。聚氨酯泡沫有较好的弹性和粘贴能力,能够通过自行发泡的方式使其体积快速膨胀,进入到门窗缝隙中,经过交联固化作用,使门窗缝隙产生密封效果,大幅减少门窗缝隙间的热量流失和冷空气进入量,以保持室内温

度。贾雪芹等^[41]公布了一种高弹性聚氨酯门窗密封条的制备方法,采用聚烯烃多元醇、聚合物多元醇、扩链剂、聚醚多元醇、异氰酸酯和储存稳定剂等制备而得,其回弹性能良好,密封性强,成本低廉,操作简单。

2.5 聚氨酯泡沫在供热管网中的应用

供暖锅炉通过供热管网向各建筑物进行供暖,供热管网一般埋于管沟或暴露于室外环境下,热量如果在供热管网中大量流失将会增大锅炉的供暖压力。聚氨酯泡沫保温效果优异、耐水性强且质轻抗压性能强,在供热管道外利用管中管法或喷涂法可以构建聚氨酯泡沫保温层,其保温隔热效果高于常规保温管道2倍左右,在实际管道保温工程中获得大量应用^[42]。韩德福等^[43]公布了一种耐高温聚氨酯保温管道的制备方法,其中使用气凝胶材料作为隔热层,有效提高了聚氨酯保温管的保温性能和热能利用效率。

3 结语

建筑节能工作是我国节能工作中的重要部分,作为一种高分子热固型聚合物,聚氨酯泡沫的导热系数较低,保温隔热性能优异,具备较强的抗冲击性能和耐用性,能够通过现场浇注或喷涂的方式在建筑结构外快速铺设连续聚氨酯泡沫保温层。作为新型高效保温建筑材料,聚氨酯泡沫在建筑外墙、屋顶、地板、门窗和供热管网等获得了广泛的应用,具有广阔的市场前景。今后,聚氨酯泡沫产业应继续研发新型配方、施工技术和制备工艺,进一步降低生产成本,符合环保需求,为节能减排工作做出更大贡献。

参考文献

- [1] 钱伯章,等.建筑节能,2009,37(2):56-60.
Qian Bozhang, et al. Building Energy Efficiency, 2009, 37(2):56-60.
- [2] 张在旭,等.中外能源,2015,20(12):14-18.
Zhang Zaixu, et al. Sino-Global Energy, 2015, 20(12):14-18.
- [3] 杨俊兰,等.建筑科学,2014,30(6):87-91.
Yang Junlan, et al. Building Science, 2014, 30(6):87-91.
- [4] 丁雪佳,等.化工进展,2009,28(2):278-282.
Ding Xuejia, et al. Chemical Industry and Engineering Progress, 2009, 28(2):278-282.
- [5] Amaral C, et al. Energy and Buildings, 2017, 153:392-402.
- [6] 陈勇军,等.塑料科技,2012,40(3):103-109.
Chen Yongjun, et al. Plastics Science and Technology, 2012, 40(3):103-109.
- [7] 贺梦琦.科技通报,2017,33(1):174-177+194.
He Mengqi. Bulletin of Science and Technology, 2017, 33(1):174-177+194.
- [8] Singh H. Key Engineering Materials, 2016, 678:88-98.
- [9] 杨春柏.中国塑料,2009,23(2):12-15.
Yang Chunbai. China Plastics, 2009, 23(2):12-15.

- [10] Prociak A, et al. *Polymer Testing*, 2000, 19(6):705-712.
- [11] 刘国胜,等. *中国塑料*, 2011, 25(11):5-9.
Liu Guosheng, et al. *China Plastics*, 2011, 25(11):5-9.
- [12] 胡胜利. *聚氨酯工业*, 2001, 16(3):21-23.
Hu Shengli. *Polyurethane Industry*, 2001, 16(3):21-23.
- [13] Modesti M, et al. *Polymer Degradation and Stability*, 2002, 77(2):195-202.
- [14] 田长山. *聚氨酯工业*, 2003(2):44-46.
Tian Changshan. *Polyurethane Industry*, 2003(2):44-46.
- [15] Pokharel N, et al. *Journal of Constructional Steel Research*, 2003, 59(12):1 533-1 552.
- [16] 尹波,等. *高分子材料科学与工程*, 2004, 20(9):151-154, 158.
Yin Bo, et al. *Polymer Materials Science & Engineering*, 2004, 20(9):151-154, 158.
- [17] Bledzki A K, et al. *Composites Science and Technology*, 2001, 72(15):2 405-2 411.
- [18] 方伟,等. *油气田地面工程*, 1998, 17(3):75-76.
Fang Wei, et al. *Oil-Gas Field Surface Engineering*, 1998, 17(3):75-76.
- [19] 汪广恒,等. *化工进展*, 2012, 31(5):1 076-1 081.
Wang Guangheng, et al. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2012, 31(5):1 076-1 081.
- [20] 马丽红. *石化技术*, 2016, 23(6):24-25+36.
Ma Lihong. *Petrochemical Industry Technology*, 2016, 23(6):24-25+36.
- [21] 高晓敏,等. *四川兵工学报*, 2002, 23(1):19-20.
Gao Xiaomin, et al. *Sichuan Ordnance Journal*, 2002, 23(1):19-20.
- [22] 鲁江,等. *工程塑料应用*, 2005, 33(7):36-38.
Lu Jiang, et al. *Engineering Plastics Application*, 2005, 33(7):36-38.
- [23] Cay Y. *Energy Education Science and Technology Part A: Energy Science and Research*, 2011, 28(1):83-94.
- [24] 尤光星,等. *建筑节能*, 2015, 43(12):41-43.
You Guangxing, et al. *Building Energy Efficiency*, 2015, 43(12):41-43.
- [25] 高群,等. *中国*, 201010174230.1[P].2010-05-14.
Gao Qun, et al. CN, 201010174230.1[P].2010-05-14.
- [26] 谢松芬. *中国*, 201610728154.1 [P].2016-08-25.
Xie Songfen. CN, 201610728154.1 [P].2016-08-25.
- [27] 陆伟苗,等. *东北林业大学学报*, 2018, 46(2):67-71.
Lu Weimiao, et al. *Journal of Northeast Forestry University*, 2018, 46(2):67-71.
- [28] 贾丰春,等. *合成树脂及塑料*, 2015, 32(4):100-102.
Jia Fengchun, et al. *China Synthetic Resin and Plastics*, 2015, 32(4):100-102.
- [29] 葛建,等. *建筑施工*, 2001, 23(3):198-200.
Ge Jian, et al. *Building Construction*, 2001, 23(3):198-200.
- [30] 杨斌,等. *中国建筑防水*, 2011(19):41-45+49.
Yang Bin, et al. *China Building Waterproofing*, 2011(19):41-45+49.
- [31] Vincelas F F C, et al. *Applied Thermal Engineering*, 2017, 122: 806-819.
- [32] 祝峻. *塑料工业*, 2016, 44(5):15-17+74.
Zhu Jun. *China Plastics Industry*, 2016, 44(5):15-17+74.
- [33] 赵洪凯,等. *建筑技术*, 2015, 46(11):1 020-1 023.
Zhao Hongkai, et al. *Architecture Technology*, 2015, 46(11): 1 020-1 023.
- [34] 朱海静,等. *工程塑料应用*, 2003(7):62-64.
Zhu Haijing, et al. *Engineering Plastics Application*, 2003(7):62-64.
- [35] 郭亚莉,等. *中国*, 201310490927.3 [P].2013-10-20.
Guo Yali, et al. CN, 201310490927.3 [P].2013-10-20.
- [36] 郭晓飞. *新型建筑材料*, 2001(4):24-26.
Guo Xiaofei. *New Building Materials*, 2001(4):24-26.
- [37] 闫成文,等. *新型建筑材料*, 2005(10):30-32.
Yan Chengwen, et al. *New Building Materials*, 2005(10):30-32.
- [38] 李进卫. *化学工业*, 2015, 33(10):38-41.
Li Jinwei. *Chemical Industry*, 2015, 33(10):38-41.
- [39] 刘明福. *山西建筑*, 2001(4):141-142.
Liu Mingfu. *Shanxi Architecture*, 2001(4):141-142.
- [40] 郭兴忠,等. *建筑材料学报*, 2014, 17(2) : 261-265+297.
Guo Xingzhong, et al. *Journal of Building Materials*, 2014, 17(2) : 261-265+297.
- [41] 贾雪芹,等. *中国*, 201310660827.0[P].2013-12-09.
Jia Xueqin, et al. CN, 201310660827.0[P].2013-12-09.
- [42] 徐业峰,等. *聚氨酯工业*, 2017, 32(3) : 1-4.
Xu Yefeng, et al. *Polyurethane Industry*, 2017, 32(3) : 1-4.
- [43] 韩德福,等. *中国*, 201620201036.0[P].2016-03-16.
Han Defu, et al. CN, 201620201036.0[P].2016-03-16.

日本开发出断开后可复原的高分子材料

日本研究人员日前开发出一种断开后可自动修复的高分子材料,这一成果有望应用于各种需要材料本身能自我修复的场景。

日本理化学研究所和日本九州大学的研究团队使用一种稀土类金属钪作为催化剂,成功地在常压下将乙烯与苯甲酰丙烯合成了一种聚烯烃高分子材料,这种新材料具有极强的

柔韧性和弹性,且像液体一样,即使将其切断也会依靠分子间的相互作用自动复原。

研究发现,这种材料不仅在空气中具备自我修复和形状记忆能力,在水中和酸中以及碱性水溶液中也同样具备这种能力,且不需额外施加任何作用力。这种新型高分子材料成本较低,可以大量合成。这一研究成果给今后自我修复性材料的设计研发提供了重要指导。(新华网)