

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2018.10.019

碳纳米管与二硫化钼填充 PTFE 蠕变性能

李朋辉,侯根良,毕松,李浩,林阳阳,应承展

(火箭军工程大学,西安 710025)

摘要: 为提高聚四氟乙烯 (PTFE) 在高载荷下的抗蠕变性,强酸氧化处理碳纳米管 (CNTs),干燥过筛 MoS_2 ,模压成型烧结制备 PTFE/CNTs, PTFE/ MoS_2 , PTFE/CNTs/ MoS_2 复合材料,长期压缩研究复合材料的蠕变性能。结果表明:所有材料均在试验初期应变线性增加,应变增加速率为 $1.74\%/ \text{min}$, PTFE 基复合材料受载初期应变线性增加与 PTFE 分子链键角振动有关,与填充物类型和填充量无关。载荷作用 30 min 后,随着时间延续,应变又呈现出类似于线性的增加,增速稳定、增幅极小,这一阶段伴随黏性流动。材料屈服导致应变增速出现急剧减缓, CNTs, MoS_2 在屈服阶段作用机制分别为纤维捆束 PTFE 分子链和物理交联限制 PTFE 链段运动。同一填充量的材料在进入应变小幅增加阶段后,恒定载荷大的材料,其应变也大。随着 CNTs 或者 MoS_2 填充量增大,试样在同一恒定载荷作用阶段的应变是逐步减小的。在降低材料应变方面,20% MoS_2 填充优于 7% CNTs 填充,5% CNTs/20% MoS_2 填充效果好于 20% MoS_2 填充,物理交联较纤维捆束更能提高 PTFE 材料的抗蠕变性。PTFE 屈服应力为 7.937 MPa,波动性 δ^2 为 0.09。

关键词: 聚四氟乙烯;碳纳米管;二硫化钼;蠕变;屈服强度

中图分类号: TQ325.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-3539(2018)10-0098-05

Creep Properties of PTFE Filled with CNTs and MoS_2

Li Penghui, Hou Genliang, Bi Song, Li Hao, Lin Yangyang, Ying Chengzhan

(The Rocket Force University of Engineering, Xi'an 710025, China)

Abstract : The creep properties of polytetrafluoroethylene (PTFE) composites filled with carbon nanotube (CNTs) and molybdenum disulfide (MoS_2) were investigated by means of long term compressive creep. The results show that all materials present linear increase in strain in early test, growth rate of strain is $1.74\%/ \text{min}$, the changing of strain in the early experiment has nothing to do with the CNTs and MoS_2 existed or not, the changing of strain is bond angles which belong to PTFE molecular chain vibrating at the equilibrium position. Yield slows down growth rate of strain sharp, the action mechanisms of CNTs and MoS_2 are binding molecular chains of PTFE and limiting segment motion by physical crosslinking respectively at this stage. The strain is increasing with permanent load increasing at small amplitude increasing phase of the strain. With increasing mass fraction and strain capacity decreasing gradually, the most prominent filling type is samples with a mass fraction of 5% CNTs and 20% MoS_2 in reducing materials strain, samples with a mass fraction of 20% MoS_2 is better than samples with a mass fraction of 7% CNTs, physical crosslinking is more effective than the fiber binding in improving creep resistance. The yield stress of PTFE is 7.937 MPa, volatility δ^2 is 0.09.

Keywords : polytetrafluoroethylene ; carbon nanotube ; MoS_2 ; creep ; yield stress

蠕变是指材料在持续恒定载荷作用下形变随时间推移而逐渐发展的现象,实质是材料在一定条件下分子内部键角、链节、链段等运动单元对载荷的协同响应^[1]。聚四氟乙烯 (PTFE) 分子链为线性分

子链,链段独立,晶体中呈现螺旋构象^[2],这种结构特性使其具有优异的化学稳定性,耐高低温^[3],因而广泛应用于航空航天、石油化工等领域^[4],但 PTFE 耐蠕变性能很差,这直接严重影响其使用寿命^[5]。

通讯作者: 李朋辉,硕士,主要从事聚四氟乙烯改性研究 E-mail: 1505654643@qq.com

收稿日期: 2018-08-06

引用格式: 李朋辉,侯根良,毕松,等. 碳纳米管与二硫化钼填充 PTFE 蠕变性能 [J]. 工程塑料应用,2018,46(10):98-103.

Li Penghui, Hou Genliang, Bi Song, et al. Creep properties of PTFE filled with CNTs and MoS_2 [J]. Engineering Plastics Application, 2018, 46(10):98-103.

所以通过填充改性 PTFE 提高其抗蠕变性成为一项重要研究内容^[6-7]。

近年来,抗蠕变性能优异的聚合物复合材料的制备成为研究热点,尤其是纳米复合材料^[8-9],纳米粒子在聚合物材料填充方面取得良好效果^[10-12],材料力学性能十分优异^[13],碳纳米管(CNTs)于1991年发现^[14],具有大比表面积、高模量、高强度、高度纤维化的特点^[15-18],H. Varela-Rizo等^[19]分别将CNTs、碳纳米纤维填充到聚甲基丙烯酸甲酯中制备复合材料,发现两者均可提高复合材料的抗蠕变性,CNTs填充效果更好。T. Y. Hwang等对CNTs在基体中的分布结构特点对材料松弛行为、蠕变行为的影响做过研究^[20],PTFE/CNTs复合材料在高载荷下的蠕变性能少见报道。MoS₂硫原子层间由于作用力较弱,故易发生劈裂,劈裂面表面能低,是亲水性的^[21],PTFE为疏水性物质,二者在分子层面的粘接效果差^[22],这为MoS₂物理交联散布PTFE基体提供了条件。到目前为止,关于PTFE/MoS₂复合材料的蠕变行为的研究还未见报道,MoS₂对PTFE蠕变的影响规律尚不明确。CNTs很难在基体中分散均匀限制CNTs进一步改善复合材料抗蠕变性,笔者采用强酸氧化法分散CNTs,高载荷条件下压缩试样,分析CNTs、MoS₂对PTFE蠕变性能的影响。

1 实验部分

1.1 主要原材料

PTFE:悬浮,CGM-021,中蓝晨光化工厂;

CNTs:外径8~15 nm,长度0.5~2 μm,纯度>95%,南京先丰纳米材料科技有限公司;

MoS₂:纯度99.5%,粒径<2 μm,阿拉丁试剂(上海)有限公司;

浓硫酸:纯度95%~98%,北京化工厂;

浓硝酸:纯度65%~68%,四川西陇化工有限公司。

1.2 主要设备及仪器

分析天平:CPA225D型,德国Sartorius公司;

电鼓风干燥箱:101-1型,北京永兴科伟公司;

高速多功能混合机:LFP-800T型,浙江红太阳机电公司;

箱式烧结炉: SX12-10型,上海实验电炉厂;

电子万能试验机: WDW-100型,西安力创公司。

1.3 试样制备

模压烧结成型法制备PTFE基复合材料。PTFE干燥后过200目(75 μm)筛处理,强酸氧化分散处理CNTs,PTFE,PTFE/CNTs复合材料、

PTFE/MoS₂复合材料、PTFE/CNTs/MoS₂复合材料压制压力分别为27.5,54,50,52 MPa,370℃烧结15 h后随炉冷却制得烧结后试样。试样配比见表1。

表1 材料配比表

编号	填充物	CNTs / %	MoS ₂ / %	PTFE / %
1 [#]	PTFE	0	0	100
2 [#]	CNTs	1	0	99
3 [#]	CNTs	3	0	97
4 [#]	CNTs	5	0	95
5 [#]	CNTs	7	0	93
6 [#]	MoS ₂	0	5	95
7 [#]	MoS ₂	0	10	90
8 [#]	MoS ₂	0	15	85
9 [#]	MoS ₂	0	20	80
10 [#]	CNTs, MoS ₂	5	10	85
11 [#]	CNTs, MoS ₂	5	15	80
12 [#]	CNTs, MoS ₂	5	20	75

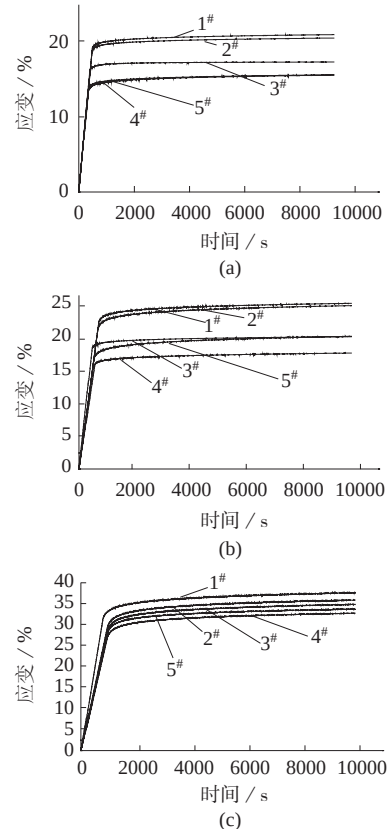
1.4 性能测试

试验温度室温,载荷设定分别为8,12,16,20 MPa,蠕变时间为3.5 h,试样总计48个。通过应变-时间变化曲线、应力-应变曲线观察材料蠕变特点,扫描电镜观察试样微观形貌。

2 结果与讨论

2.1 蠕变性能

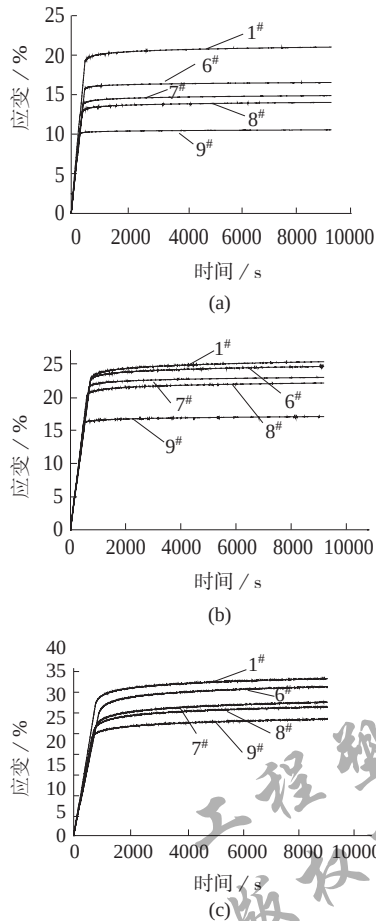
图1为PTFE/CNTs应变随时间变化的曲线。



载荷: a—8 MPa; b—12 MPa; c—20 MPa

图1 PTFE/CNTs应变-时间曲线

图2和图3分别为PTFE/MoS₂和PTFE/CNTs/MoS₂应变随时间变化的曲线。

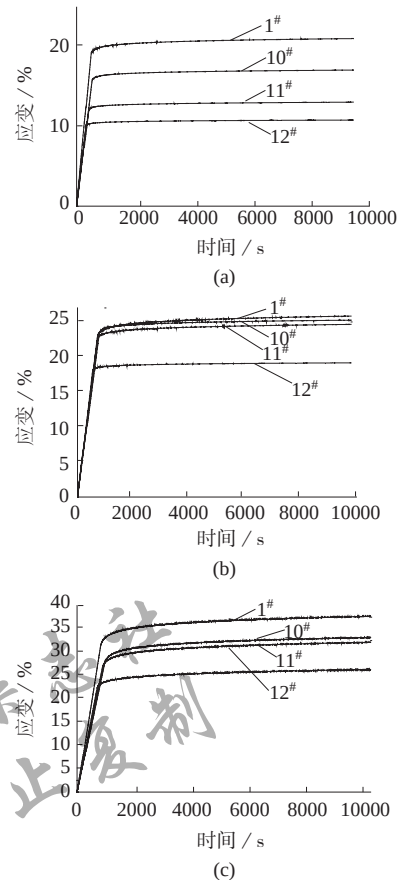


载荷: a—8 MPa; b—12 MPa; c—20 MPa

图2 PTFE/MoS₂应变-时间曲线

由图1~图3可以看出,应变随时间变化的三个特点:(1)所有试样均在试验初期应变线性增加,应变增加速率每分钟1.74%,说明恒定载荷大于8 MPa后,受载试样蠕变初期应变增速与载荷大小无关。(2)载荷作用30 min后,随时间延续,应变又类似于线性增加,增速稳定、增幅极小。(3)载荷作用一段时间后应变增速出现急剧减缓,在载荷作用30 min左右时应变增加速率均达到最小值。

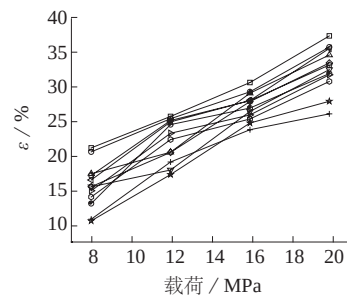
PTFE塑料玻璃化转变温度约为125℃,在室温条件下试样不易发生高弹形变和黏性形变,可以明确试样发生了普弹形变。处于玻璃态的纯PTFE及复合材料试样弹性变化是服从胡克定理,应变线性增加与分子链上各键角振动有关,与填充物类型和填充量无关,这是试验初期所有试样应变线性增加且增速一致的本质原因。



载荷: a—8 MPa; b—12 MPa; c—20 MPa

图3 PTFE/CNTs/MoS₂应变-时间曲线

图4为压缩试样9000 s时的应变(ϵ)变化规律图,由图4可以总结3条规律:(1)同一填充量的试样在进入应变小幅增加阶段后,恒定载荷大的试样,其应变也大。(2)随着CNTs或者MoS₂填充量增大,试样在同一恒定载荷作用阶段的应变是逐步减小的。(3)从材料应变降低幅度来看,20% MoS₂填充优于7% CNTs填充,5% CNTs/MoS₂填充效果又好于20% MoS₂填充。5% CNTs/20% MoS₂填充试样在载荷8,12,16,20 MPa下应变相对于纯PTFE分别降低48.7%,25.8%,22.4%,30.3%。



□—0#; ○—1#; △—2#; ▽—3#; ◇—4#; ◀—5#; ▶—6#; ×—7#; *—8#; ●—9#; ◐—10#; ▨—11#

图4 9000 s时试样应变变化规律图

载荷是影响试样应变量的关键因素,对于同一填充含量的试样,载荷的增加能够降低链段运动的位置^[1,6],链段运动活跃,则试样应变量随之加大。CNTs 散布在 PTFE 基体中,以其大比表面积可与 PTFE 分子链实现较为理想的界面粘合,高度纤维化又可使 CNTs 紧致缠绕多条 PTFE 分子链, CNTs 所联结的分子链就越多,分子链间的相对独立性被削弱^[20,22],并且其高模量、高强度的特点可在试样受载后较为均匀地向各方向传递应力,极大地避免应力集中使分子链错位,纤维捆束 PTFE 链段运动是 PTFE/CNTs 复合材料应变量减小的原因,同一载荷下,随着 CNTs 填充量的增大, PTFE/CNTs 复合材料应变量逐渐减小。MoS₂ 在 PTFE 基体中充当刚硬支撑点,表现出“物理交联”作用,优先承载并传递载荷,一定程度上削弱了应力方向的大面积带状滑移,同时,这些刚性颗粒的填充能够限制 PTFE 分子链的活跃的链段运动,宏观表现为应变量减小,物理交联限制 PTFE 链段运动是 PTFE/MoS₂ 复合材料应变量减小的原因,这种限制作用随 MoS₂ 填充量的增大而增大。造成恒定载荷下应变量随时间延长逐渐增加很有可能是这一阶段并不只是发生普弹形变,而是伴随有黏性流动。一般来说,线性高分子蠕变的过程是普弹形变、高弹形变、粘性流动线性叠加^[1], PTFE 是一种典型的线型高分子,所以并不能说试样蠕变的某个阶段就只发生一种蠕变形式。

图 5 给出了 PTFE 试样的应力(σ)- ε 曲线。

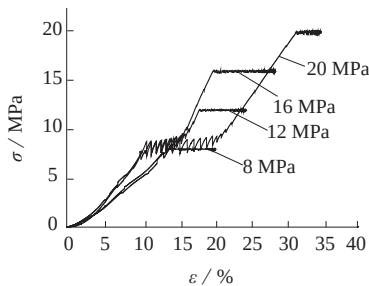


图 5 PTFE 应力-应变曲线

由图 5 可看出,试样在 8 MPa 下未发生明显屈服,12,16,20 MPa 下发生明显屈服,其他试样均有类似的规律。试样应变增速出现急剧减缓的直接原因是试样发生强迫流动,也即屈服。PTFE 烧结达不到完全结晶的程度,总是存在一部分无定型区域,在这部分无定型区域中的分子链杂乱、无序、排列极不规则,链段运动相对自由,键长、键角运动更加活跃, PTFE 受到外界载荷作用时产生的形变基本上都是发生在这部分无定型区域中。载荷大于屈服

应力时,强迫无定型区域链段运动,无定型区域的分子链沿着应力方向发生移动,此时 CNTs 纤维捆束 PTFE 链段运动, MoS₂ 物理交联限制 PTFE 链段运动使得试样应变量急剧减小。

图 6 为 PTFE/5% CNTs 和 PTFE/15% MoS₂ 复合材料扫描电镜图,从图 6 可以看出, CNTs 在 PTFE 基体中的纤维束散布状态,大块的 PTFE 分子链被 CNTs 纤维捆束, MoS₂ 颗粒状分布明显,充斥在 PTFE 分子链间隙。MoS₂ 物理交联限制 PTFE 链段运动较 CNTs 纤维捆束 PTFE 链段运动更能提高 PTFE 材料的抗蠕变性。

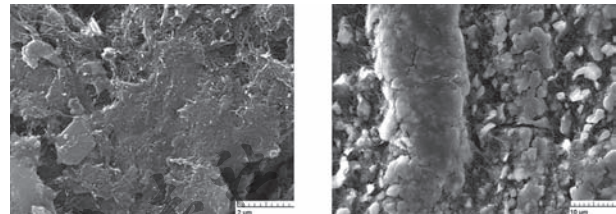


图 6 (a) PTFE/CNTs; (b) PTFE/MoS₂

图 6 PTFE/CNTs 及 PTFE/MoS₂ 材料的 SEM 形貌

2.2 屈服应力

表 2 为各试样起始屈服 σ , ε 值。

表 2 起始屈服 σ 及 ε 数据表

$\varepsilon / \%$	σ / MPa	$\varepsilon / \%$	σ / MPa	$\varepsilon / \%$	σ / MPa
13.32	7.59	12.9	8.25	13.11	8.02
18.44	7.82	11.88	7.69	15.24	8.03
12.37	8.20	8.47	7.50	12.40	7.90
9.58	7.99	10.56	7.44	11.15	7.96
10.26	7.42	10.49	7.99	13.87	8.47
10.05	7.25	10.43	8.32	11.61	7.76
13.20	7.56	11.61	8.54	12.00	7.94
13.91	7.88	9.03	7.71	10.32	7.85
17.82	7.73	14.41	8.03	10.17	7.68
14.22	7.79	14.67	7.86	11.35	7.82
8.32	8.12	13.08	8.34	11.96	8.18
15.81	8.24	13.51	8.42	14.19	8.25
9.03	7.83	10.04	7.81	14.44	8.31
10.84	7.99				

现依据表 2, 计算 PTFE 屈服应力。

计 $X_i (i=1, 2, 3 \cdots 40)$ 为屈服应力值, $n=40$, X 为屈服应力均值, δ^2 为方差, 则:

$$X = (X_1 + X_2 + \cdots + X_{39} + X_{40}) / n \quad (1)$$

将应力值代入式 (1) 得:

$$X = 7.937$$

$$\delta^2 = [(X_1 - X)^2 + (X_2 - X)^2 + \cdots + (X_{39} - X)^2 + (X_{40} - X)^2] / n \quad (2)$$

得: $\delta^2 = 0.09$ 。

初步计算得 PTFE 屈服应力为 7.937 MPa, 波动性 δ^2 为 0.09。

屈服应力散点图如图7所示。

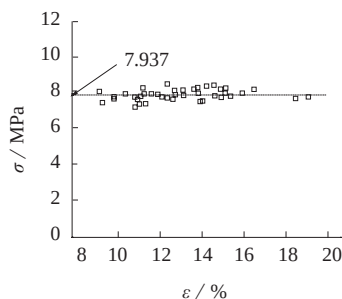


图7 屈服应力散点图

3 结论

(1) 纯 PTFE 及 PTFE 基复合材料受载初期应变量线性增加与 PTFE 分子链键角振动有关,与填充物类型和填充量无关。

(2) 无论是 CNTs, MoS₂ 单一填充还是协同填充均能提高试样抗蠕变性能。

(3) CNTs 提高材料抗蠕变性的机制为纤维捆束 PTFE 分子链, MoS₂ 提高材料抗蠕变性的机制为物理交联限制 PTFE 链段运动。

(4) MoS₂ 物理交联限制 PTFE 链段运动较 CNTs 纤维捆束 PTFE 链段运动更能提高 PTFE 材料的抗蠕变性。

(5) PTFE 屈服应力为 7.937 MPa,波动性 δ^2 为 0.09。

参考文献

- [1] 陈碧波. 聚四氟乙烯蠕变性能研究 [D]. 西安: 西北工业大学, 2007.
Chen Bibo. Study on the creep properties of PTFE [D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2007.
- [2] 张永明, 李虹, 张恒. 含氟功能材料 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2008.
Zhang Yongming, Li Hong, Zhang Heng. Functional Materials Containing [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2008, 16-17.
- [3] Kolska Z, Reznickova A, Hnatowicz V, et al. PTFE surface modification by Ar plasma and its characterization [J]. Vacuum, 2012, 86(6):643-647.
- [4] Murali K P, Rajesh S, Prakash O, et al. Preparation and properties of silica filled PTFE flexible laminates for microwave circuit applications [J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2009, 40(8):1179-1185.
- [5] 郑振超, 寇开昌, 张冬娜, 等. 聚四氟乙烯 / 聚苯酯共混物的蠕变及结晶性能研究 [J]. 中国塑料, 2013, 27(7):52-56.
Zheng Zhenchao, Kou Kaichang, Zhang Dongna, et al. Study on creep behavior and crystallization of POB filled PTFE blends [J]. China Plastics, 2013, 27(7):52-56.
- [6] Thomas S, Raman S, Mohanan P, et al. Effect of coupling agent on the thermal and dielectric properties of PTFE / Sm₂Si₂O₇ composites [J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2010, 41(9):1148-1155.
- [7] Das A, Hayvacı H T, Tiwari M K, et al. Superhydrophobic and conductive carbon nanofiber / PTFE composite coatings for EMI shielding [J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2011, 353(1):311-315.
- [8] Drozdov A D, Lejre A L, Christiansen J D. Viscoelasticity, viscoplasticity, and creep failure of polypropylene / clay nanocomposites [J]. Composites Science and Technology, 2009, 69(15-16):2596-2603.
- [9] Götz C, Handge U A, Piatek M, et al. Influence of e-beam irradiation on the dynamic creep and fatigue properties of poly(aliphatic / aromatic-ester) copolymers for biomedical applications [J]. Polymer, 2009; 50(23):5499-5507.
- [10] Guedes R M. Durability of polymer matrix composites: Viscoelastic effect on static and fatigue loading [J]. Composites Science and Technology, 2006, 67(11-12):2574-2583.
- [11] Christian J S, Shyam B. Studies on the tribological behavior and transfer film-counterface bond strength for Polyphenylene sulfide filled with nanoscale alumina particles [J]. Wear, 2000, 237:261-273.
- [12] Chen L, Chen G H, Lu L. Piezoresistive Behavior Study on Finger-Sensing Silicone Rubber / Graphite Nanosheet Nanocomposites [J]. Advanced Functional Materials, 2007, 17(6):898-904.
- [13] Mishra S, Chatterjee A. Effect of nano-polystyrene (nPS) on thermal, rheological, and mechanical properties of polypropylene (PP) [J]. Polymer for Advanced Technologies, 2011, 22:1547-1554.
- [14] Iijima S. Helical microtubes of graphitic carbon [J]. Nature, 1991, 354:56-58.
- [15] 成会明. 纳米碳管制备、结构、物性及应用 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2002.
Cheng Huiming. Preparation, structure, properties and application of CNTs [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2002.
- [16] Avila-Orta C A, Raudry-Lopez C E, Davila-Rodriguez M V, et al. Morphology, thermal stability, and electrical conductivity of polymer nanocomposites of isotactic polypropylene / multi-walled carbon nano-tubes [J]. International Journal of Polymeric Materials and Polymeric Biomaterials, 2013, 62:635-641.
- [17] Tae Y H, Young jae Y, Jae W L. Electrical conductivity, phase behavior, and rheology of polypropylene / polystyrene blends with multi-walled carbon nanotube [J]. Rheologica Acta, 2012, 51:623-636.
- [18] Jin S H, Kang C H, Yoon K H, et al. Effect of compatibilizer on morphology, thermal, and rheological properties of polypropylene

- Li Yunde. Study on structures and properties of air curing FEVE paints and preparation of high-performance FEVE paints[D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2009.
- [7] 侯佳音. PVDF/PMMA/TiO₂ 复合材料的制备及耐候性研究[D]. 上海: 东华大学, 2011.
- Hou Jiayin. Preparation of PVDF/PMMA/TiO₂ composite system and its anti-aging property[D]. Shanghai: Donghua University, 2011.
- [8] 李卫. PVDF/PMMA 和 PVDF/PMMA/TiO₂ 共混体系结构与性能研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2009.
- Li Wei. Investigation on structure and property of PVDF/PMMA and PVDF/PMMA/TiO₂ composites[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2009.
- [9] Zhou Xixian, Cakmak M, Cakmak M. Phase behavior of rapidly quenched PVDF/PMMA blends as characterized by raman spectroscopy x-ray diffraction and thermal techniques[J]. Journal of Macromolecular Science Part B, 2007, 46(4):667-682.
- [10] 邓婕, 吴立峰. 钛白粉应用手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005.
- Deng Jie, Wu Lifeng. Application Manual of Titanium Dioxide[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2005.
- [11] 周大纲, 谢鹤成. 塑料老化与防老化技术(第二版)[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2017.
- Zhou Dagang, Xie Gecheng. Degradation and stabilization of plastic materials (second edition)[M]. Beijing: China Light Industry Press, 2017.

中国科学家研制出可在海水中“消失”的塑料

为解决日益严峻的海洋塑料污染问题, 保护海洋生态环境, 中国科学家最近研制出一种可在海水中降解的聚酯复合材料, 有望在诸多领域替代现有难以降解的通用塑料。

中国科学院理化技术研究所高级工程师王格侠介绍, 其团队研制出这种结合了水溶性与降解性的材料具有一定环境耐受性, 废弃后能在数天到数百天内在海水中降解消失, 最终分解为不会对环境造成污染的小分子。王格侠说, 长期以来人们聚焦于陆地上的白色污染及其治理。直至近年, 大量塑料污染致使海洋生物受害的现象被频繁报道才引起广泛关注。据保守估计, 人类每年向海洋投放的塑料垃圾为 480 万 t 到 1 270 万 t, 占海洋固体污染物总量的 60%~80%。目前, 人类活动和洋流导致这些塑料垃圾集中分布于北太平洋、南太平洋、北大西洋、南大西洋及印度洋中部。

世界经济论坛也发出警告, 2050 年全球海洋塑料总质量将超过鱼类的总质量。

专家介绍, 目前几乎所有类型的塑料都已经在海洋中找到。这些塑料微粒或者漂浮在海水中, 或者沉入海底, 几十年甚至几百年不会分解, 对整个海洋环境造成了严重的污染。塑料在使用后被直接丢弃或从陆地经过河流、风吹进入海洋, 在海水中受到光、海水风化, 以及洋流和生物群的作用,

导致塑料最终形成小于 5 mm 的微塑料。

一些海洋生物, 如信天翁、海龟等, 误食塑料袋会产生一系列的胃肠问题, 以至于无法再进食, 最终被饿死。王格侠指出, 尽管海洋中塑料污染问题已经非常严峻, 但目前人们对于这些塑料污染仍然没有有效的应对措施。海洋特殊水域环境使得人们不能像在陆地上一样对这样大量分散的垃圾进行集中收集和处理。最根本有效的办法就是让材料废弃进入海水后能自行降解消失。

据介绍, 中国科学院理化技术研究所降解塑料和工程塑料研究组是中国率先开展生物可降解塑料研究的单位。生物降解塑料大都是含酯键的高分子材料, 分子链相对脆弱, 因而可以被自然界许多微生物分解、消化, 最终形成二氧化碳和水。目前, 该团队的生物降解塑料生产及应用技术已经向 4 家中国企业完成了技术授权, 其中 3 家已经顺利投产, 总产能达到每年 7.5 万 t, 占全球总量的一半。

经过多次反复实验, 理化技术研究所的科研团队将非酶水解过程和水溶过程与生物降解过程结合起来, 实现了材料在海水中快速降解。在近期于深圳举行的旨在提升中国自主创新能力、加大先进科技成果转化成果的第一届“率先杯”未来技术创新大赛上, 这一技术位列 30 个优胜项目之一。

(新华网)

(上接第 102 页)

- / functionalized multi-walled carbon nanotubes composite[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2009, 111:1 028-1 033.
- [19] Varela-Rizo H, Weisenberger M, Bortz DR, et al. Fracture toughness and creep performance of PMMA composites containing micro and nano sized carbon filaments[J]. Composites Science and Technology, 2010, 70(7):1 189-1 195.
- [20] Hwang T Y, Lee S, Yoo Y, et al. Reactive extrusion of polypropylene / polystyrene blends with supercritical carbon dioxide[J]. Macromolecular Research, 2012, 20:559-567.
- [21] Berntsen N, Gutjahr T, Loeffler L, et al. A solvothermal route to high-surface-area nanostructured MoS₂ [J]. Chemistry of Materials, 2003, 15(23):4 498-4 502.
- [22] 林启权, 毛波, 董文正, 等. 二硫化钼与二硫化钨填充改性聚四氟乙烯的摩擦学性能[J]. 高分子材料科学与工程, 2016, 11(32):51-56.
- Lin Qiquan, Mao Bo, Dong Wenzheng, et al. Tribological behaviour of polytetrafluoroethylene composites modified with molybdenum disulfide and tungsten disulfide[J]. Polymer Materials Science And Engineering, 2016, 11(32) : 51-56.