

菌丝体基塑料的发展现状与前景

万杰¹, 银清扬², 翁端^{3*}

1. 南京工程学院能源研究院, 南京 211167
2. 同济大学材料科学与工程学院, 上海 201804
3. 清华大学材料学院; 先进材料教育部重点实验室, 北京 100084

摘要 菌丝体基塑料具有原材料成本低、环境友好、安全、惰性、可再生等优点, 有望取代现有聚苯乙烯基塑料而广泛应用于包装、建筑、交通等领域。简述了现有真菌栽培为基础的菌丝体基塑料的研究进展和现状, 介绍了菌丝体基塑料的合成工艺、性能优势、主要应用和产业现状, 从技术研发和市场应用两个方面进行了展望。

关键词 菌丝体基塑料; 生物可降解材料; 环境友好材料

随着工业经济的不断发展和社会需求的迅速增加, 塑料已成为工业、农业、国防建设和现代生活中不可或缺的物质元素。塑料制品在为人们带来诸多生活便利的同时, 由废弃塑料造成的环境污染亦已成为人类社会可持续发展面临的最主要环境问题之一^[1-3]。据统计^[4], 目前人类生产的 83 亿吨塑料中, 已有 63 亿吨塑料彻底成为废弃物, 这些废弃塑料中又只有 9% 被回收、12% 被焚烧处理, 剩余 79% 的废弃塑料则深埋在垃圾填埋场或在自然环境中累积。与此同时, 塑料的生产步伐并没有放缓的迹象, 按照目前趋势到 2050 年, 全球将有大约 120 亿吨塑料垃圾, 严重威胁到了地球生态环境和人类健康生活^[5]。

为应对上述挑战, 开发可降解塑料, 特别是生物可降解塑料得到了世界各国政府、科研机构 and 产业界的广泛关注。生物降解塑料是指利用微生物的侵蚀、分解、氧化等物理化学作用实现降解的一类环境友好材料^[6]。生物降解塑料主要包括利用生物技术直接制取的高分子材料^[7-9], 如聚羟基脂肪酸酯(PHA)等^[10-11]; 生物原料再经聚合得到的高分子材料, 如聚乳酸(PLA)、聚丁二酸丁二醇酯(PBS)等^[12-14]; 此外还有淀粉基生物降解塑料、二氧化碳共聚脂肪族塑料(PPC)等^[15-17]。然而与传统塑料相比, 生物降解塑料通常机械性能较差, 不耐高温、生产成本及价格普遍较高, 部分共混型材料降解后塑料微粒长期留存, 粮食型材料存在“与人争粮”问

收稿日期: 2018-09-18; 修回日期: 2019-01-03

作者简介: 万杰, 助理研究员, 研究方向为环境催化, 电子信箱: wangjie10@tsinghua.org.cn; 翁端(通信作者), 教授, 研究方向为环境材料, 电子信箱: duanweng@tsinghua.edu.cn

引用格式: 万杰, 银清扬, 翁端. 菌丝体基塑料的发展现状与前景[J]. 科技导报, 2019, 37(22): 105-112; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2019.22.012

题^[18-19]。寻找新型可降解、安全、成本低廉的生物降解塑料制品一直是研究的热点与重点^[20]。

真菌是自然界中广泛存在的一类生物。真菌在培养基的作用下,会产生单条管状菌丝,很多菌丝聚集在一起组成条形纤维状的菌丝体^[21-22]。2007年,美国 Eben Bayer 和 Gavin McIntyre 率先报道了利用真菌栽培制备菌丝体基塑料(俗称“蘑菇塑料”)的相关技术,并在很短时间内创立 Ecovative Design LLC 公司(以下简称 Ecovative),将其投入产业化制备和应用。该技术使用原料为成本低廉的农业废物,所获得菌丝体基塑料具有良好的生物可降解性和综合性能,迅速引起了学界、产业界和投资界的浓厚兴趣^[23-26]。本文以上述技术为切入点,简述现有真菌栽培为基础的菌丝体基塑料的研究进展和现状,介绍其合成工艺、性能优势、主要应用和产业现状,并从技术研发和市场应用两个方面进行展望。

1 菌丝体基塑料的发展现状

1.1 菌丝体基塑料的合成工艺

目前,菌丝体基塑料的详细合成工艺仍作为 Ecovative 的商业机密受到专利保护。根据部分公开报道的资料,菌丝体基塑料的合成大概可以分为如下几个流程^[27-29],如图 1^[29]所示。

1) 原料与灭菌。菌丝体基塑料主要为农业废弃物如燕麦壳、棉籽壳、荞麦壳、碎棉屑、椰子壳等。这些废弃物在大量存在于农产品生产过程中,因此采用其作为原材料一方面保证了菌丝体基塑料的成本低廉;另一方面实现了农业废弃物的资源化利用。合成前,上述农业废弃物首先进入蒸汽净化装置,通过蒸汽加热杀灭细菌、昆虫和其他孢子,同时消除竞争性杂菌。

2) 接种与注模。灭菌冷却后的原料中添加入真菌生长所需的营养液,这些营养液通常由碳源、氮源、无机化合物等多种营养物质组成(如 $MgSO_4$, K_2HPO_4 , KH_2PO_4 , $CaCO_3$, $Zn(CH_3COO)_2$, $ZnSO_4$, $CuSO_4$ 等);随后接种真菌菌种,并将所得的松散颗粒压注至特定形状的培养模具中。



(a) 原料获取;(b) 灭菌接种;(c) 模具设计;(d) 菌丝培养;
(e) 培养后半成品;(f) 加热烘烤

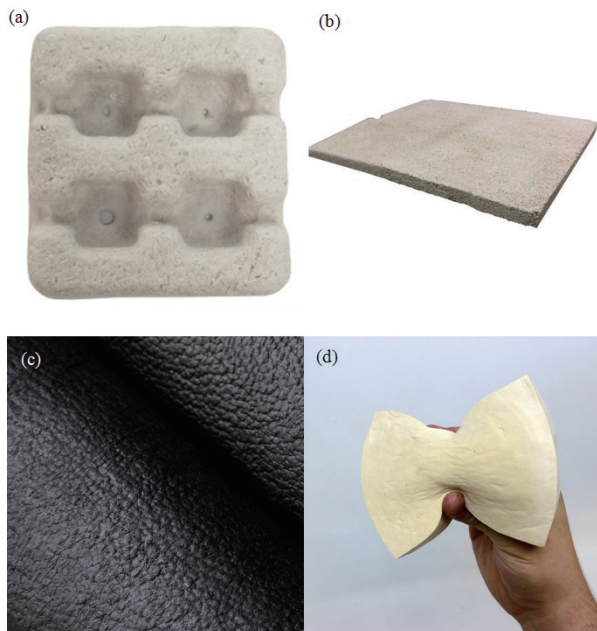
图1 菌丝体基塑料的合成流程

Fig. 1 Synthesis process of mycelium based plastics

3) 菌丝体培养。菌丝体培养是整个工艺的核心步骤,将接种注模后的材料放在合适的温度、湿度、遮光和无尘的环境中培养 5~7 天;直至整个模具内布满白色的菌丝体。菌体在培养过程中,会吸收基质的纤维素并将其转化成一种天然胶质,进而填满模具中的每个缝隙,形成致密的丝状网络。

4) 脱模与烘干。待菌丝体生长完成,达到合适的尺寸后,将其脱模取出,置于工业烤箱加热烘烤,使菌丝死亡而停止生长,即可获得最终产品。最后产品还需经过严格的生物检验,以确保全部菌丝都被杀灭失活。

在上述工艺流程中,通过选用不同的原料、接种特殊菌种、设计各式模具以及对于菌丝体培养过程中活性菌密度、底物浓度等调制,可以实现对最终材料性能和产品形状的“编程化”定制。目前,基于上述工艺, Ecovative 公司已实现了菌丝体基塑料泡沫材料 MycoFoam™, 板材/块材 mCore™ 以及类皮革材料 Mylo™ 的工业化生产,其柔性海绵材料 MycoFlex™ 也正在工艺放大,如图 2^[30]所示。



(a) MycoFoam™泡沫材料;(b) mCore™板/块材;
(c) Mylo™类皮革材料;(d) MycoFlex™柔性海绵材料

图2 Ecovative生产的各种类型的菌丝体基塑料
Fig. 2 Different types of mycelium based plastics
produced by Ecovative

国内目前也有部分研究人员进行了菌丝体基塑料的相关制备研究。吴豪等^[31]将棉籽壳、稻壳、麸皮和水以不同比例混合制作培养基,然后接种不同的菌种,使之生长出不同性能的缓冲包装材料,结果表明:金针菇、鸡腿菇、平菇2005生长速度快于其他菌种,棉籽壳含量越高的培养基中菌丝体的

生长情况越好;臧建荣等^[32]以废旧塑料为基材,菌丝纤维为连续相,得到菌丝体/废旧塑料复合材料,该复合材料可部分生物降解,吸音降噪,可代替部分苯乙烯类泡沫塑料;鲁车龙等^[33]以菌糠、棉籽壳、桐木屑等废物为原料,利用蘑菇NRLY-1菌丝培养制备了生物板材,并通过数学建模研究了基质密度、培养时间、接种量等因素对于最终板材弯曲强度的影响;任晓琼^[34]等利用青霉素生产过程中产生的菌丝体制备出一种新型脱石膏缓凝剂,解决了焚烧处理带来的环境污染,实现了资源化利用。总体而言,国内关于菌丝体基塑料的研究更多关注于菌种筛选、培养过程因素调制、菌丝生长模型等,菌丝体基塑料尚处于实验室研究阶段,距离产业化应用仍有较长的路要走。

1.2 菌丝体基塑料的性能与优势

力学性能方面,Ziegler等^[35]对比了以纤维棉为原料制备的菌丝体基塑料与参考材料的部分力学性能指标,如表1所示,其中Styrofoam为陶氏公司的商用聚苯乙烯泡沫塑料。可以看出,菌丝体基塑料具有较轻的比重,其强度和模量等力学性能相较聚丙烯和聚苯乙烯材料仍有较大差距,但其压缩强度与聚苯乙烯材料近似,说明其具有良好的抗压回弹性,有望应用在包装、缓冲、海洋漂浮等领域。吴豪等^[31]测试了以平菇2005A-为菌种制备的菌丝体基塑料与EPS硬质蜂窝状泡沫的应力-应变曲线,结果表明,当承受相同的应力,菌丝体基塑料形变与EPS材料相当,说明其具备替代EPS材料的潜力。

表1 菌丝体基塑料与部分材料力学性能对比

Table 1 Mechanical properties of mycelium based plastics in comparison to some reference materials

样品	比重	弹性模量/MPa	压缩强度/MPa	拉伸强度/MPa	拉伸模量/MPa
菌丝体基塑料	0.14	70.57	1.18	0.20	3.65
聚丙烯	0.90~0.94	1173~1725	38~55	31~37	1139~1553
轻木	0.16	460	6.9~9.0	14~19	2757
Styrofoam™	0.04~0.1	2500~3600	0.69	24~28	2700~3470

其他性能方面,Pelletier^[36]对担子菌基塑料板材的声学性能进行了测试,结果表明,这类材料对于机动车噪音频段(1000 Hz)的吸收率高达75%,

非常有希望取代传统的泡沫隔音板;菌丝体基塑料的线性热膨胀系数与聚苯乙烯泡沫近似。此外,由于真菌菌丝体本身不可燃,甚至可以承受火焰

烧灼,是一种良好的天然阻燃材料。因此,利用其和惰性原料(如珍珠岩、贝壳等)所制备的菌丝体基塑料同样具备良好热稳定性和阻燃性。特别需要指出的是,与传统塑料及其他生物降解塑料相比,菌丝体基塑料还在以下几个方面具有突出优势。

1) 本地化低成本原料。使用区域性的农业废弃物,可根据世界不同地区农作物副产品开发不同的生产模式。例如,在中国可以使用稻壳或者棉籽壳;在北欧或者北美可用荞麦皮或者燕麦皮。这种本地化自给自足的生产模式可以有效节约原料长途运输过程中消耗的大量化石燃料。更重要的是生产所用的农业废弃物热值很低,不能燃烧发电或供暖,营养含量也很低,无法作为牲畜的饲料,大大降低了原材料成本,一定程度上避免了粮食基生物降解塑料“与人争粮”问题。

2) 自组装设计、设备简便。菌丝体在生产过程中起到了自组装的作用,只需要将原料填充在模具内,就可以得到任何希望得到的形状。由于无需进行高温高压加工,进一步节约了制造过程中的能源消耗。同时菌丝体培养的环境也相对简单,对于设备要求较低,因此不需要建设传统的反应塔等大规模生产中心,反而可以因地制宜设立适应生产规模需要的小中型厂房。

3) 高产率。菌丝分解纤维素产生聚合物,在整个过程中起到粘结剂的作用,未被分解的部分最终也成为了产品的部分结构,被菌丝体网络牢牢绑定,一定程度上增加了材料的强度。整个过程中所有的原料都转化为产品,无多余的废料产生。

4) 低排放、可降解。菌丝体基塑料生产过程中不添加工业黏结剂等化工产品,因此几乎没有挥发性有机物(VOC)排放,碳排放也相对较低。本身使用的谷物壳等原料都是完全可以降解的,得到的产品经使用废弃后可以直接作为家庭堆肥或园艺覆土,如果条件合适 30 天内就能完全降解。MycFoam™ 菌丝体基塑料因其良好的环境友好性而获得了国际知名的可持续发展设计公司 MDBC 颁发的最高等级 Cradle to Cradle(从摇篮到摇篮) Gold Certified 认证。

1.3 菌丝体基塑料的主要应用

菌丝体基塑料具有原材料成本低、环境友好、安全、惰性、可再生等优点,虽然其力学性能相比传统的聚苯乙烯等略逊一筹,但是综合考虑其比重大、抗压回弹性好的特点,有望在包装、建筑、交通、海洋工程等诸多领域实现应用。

1) 包装材料。聚苯乙烯是最常见的包装材料,也是最难降解的塑料之一,垃圾填埋场中约有 30% 的废物为聚苯乙烯。菌丝体基塑料有望成为理想的聚苯乙烯泡沫包装材料替代品,在减少聚苯乙烯白色污染的同时,又实现了农业废弃物的资源化利用,具有良好的经济和环境双重效益。Ecovative 的产品已被戴尔公司(Dell Inc.)用于包装和支撑大型电脑服务器,以取代传统的聚乙烯泡沫。另外,利用菌丝体基塑料的自组装特性可以实现复杂形状包装件的定制,因此也被 Stanhope Seta、Merck、Rich Brilliant Willing 等公司用作化学试剂、玻璃容器、LED 组件等产品的缓冲包装^[37]。

2) 建筑材料。采用菌丝体基塑料替代现有建筑和家具行业中普遍使用的纤维板、三合板等木材产品,可以在满足使用性能要求的同时,一方面有助于减少木材使用量、保护森林资源;另一方面可以避免因胶粘剂挥发等引起的室内 VOC 污染。菌丝体基塑料还具有良好的热稳定性,可以进一步应用于建筑用隔热、阻燃和防火。Ecovative 公司采用珍珠岩等为原料制备的 Greensulate 材料^[27],可以耐受乙炔喷枪直接灼烧而不融化燃烧,其阻燃、隔热性能达到了美国材料与试验协会 ASTM E84 建筑材料表面燃烧性能测定最高 A 级标准。宜家(IKEA)、世楷家具(Steelcase Inc.)均与 Ecovative 达成合作,拟将菌丝体基塑料用于家居产品中。此外,由于其低廉的材料成本,菌丝体基塑料建材还可用于应急避难、灾后重建等场合。美国克利夫兰州的非盈利组织 Refugee Response 已尝试将菌丝体基塑料建材用于搭建难民收容和工作的 Ohio City Farm 城市农场。

3) 在交通、海洋、国防等领域应用。除上述包装和建材应用外,福特(Ford Motor Company)在内

的几家汽车生产商也在测试将菌丝体基塑料运用在汽车的保险杠、仪表门、车门等部件中,以利用其良好的缓冲和隔音特性,取代现有聚氨酯泡沫等材料;Green Futures Lab 尝试用菌丝体基塑料制作湿地浮筏,在其上种植水生绿植,以期对雨水净化、水温调节、水体修复等提供帮助;Ecovative 也在尝试利用菌丝体基塑料制造船舶缓冲件、海洋浮标、人工浮岛等;美国国防部高级研究计划局(DARPA)于去年启动了 Engineered Living Materials 项目,研究重点之一即是利用菌丝体基塑料实现战场装备快速修复、自销毁无人作战系统等技术。

2 菌丝体基塑料的产业现状

根据咨询公司 IHS Markit 的统计数据显示,2018 年全球对生物可降解聚合物的需求量是 36 万吨,市场金额超过 11 亿美元;预计到 2023 年,全球生物可降解聚合物的需求量将增长超过 50%,达 55 万吨,市场金额有望达到 17 亿美元,年平均增长率可达到 9%^[38]。应用领域方面,受惠于各个国家和地区政府部门的“限塑令”或“禁塑令”,包装(包括泡沫包装和食品包装)及塑料袋是生物可降解塑料最大的终端用户市场,也是最主要的增长引擎,并有望实现两位数的增长。而包装领域正是菌丝体基塑料最拿手的用武之地,市场空间潜力巨大。根据美国塑料工业协会(PIA)的数据,尽管目前从事菌丝体基塑料生产和应用研发的公司在整个塑料行业产值占比不到 1%,但其年均增长速度达到 20%,是引人注目的新兴力量^[39]。

Ecovative 是菌丝体基塑料领域最具代表性的公司,菌种库、合成技术与装置装备相关的绝大部分专利均掌握在其手中。Ecovative 由上文提到的菌丝体基塑料发明者 Eben Bayer 和 Gavin McIntyre 于 2007 年联合创立,总部位于美国纽约州 Green island。在短短几年时间内,Ecovative 就从最初不到 5 万美元的创业企业,一跃成为规模超过 500 万美元、占地 1 万平米的菌丝体基塑料领军企业,获得了来自 3M 公司、伦斯勒理工学院(RPI)、荷兰 Doen 基金会、美国国家科学基金会(NSF)、美国农

业部(USDA)、美国环保署(EPA)的多方面支持,先后与戴尔、宜家、福特、希悦尔、默克等商业巨头达成合作。Ecovative 既提供标准化的菌丝体基塑料泡沫和板/块材,也根据客户的特殊要求,生产各种定制化的菌丝体基塑料产品。

除 Ecovative 外,也有一些公司从事类似的菌丝体基塑料产品研发^[40-42]。例如美国加利福尼亚州的 Mycoworks 公司,利用菌丝体培养技术制造新型皮革材料;北卡罗来纳州的 BioMaison 公司,则致力于研究采用菌丝体制造可以替代传统水泥和砖块的新型建材;克利夫兰州的建筑设计所 Red-house studio 与 Mycoworks 合作,以废弃木材锯末为原料,通过菌丝体培养技术制造名为 Biotericals™ 的建筑材料,并用其搭建了一个名为 Mycohouse 生态示范小屋。

3 展望

菌丝体基塑料的开发和应用,是治理塑料废弃物污染、缓解化石能源矛盾的有效途径之一,对实现可持续发展这一人类社会共同目标有着重要的推动作用。现阶段菌丝体基塑料虽已取得部分商业应用,但仍存在诸多不足,未来无论是技术研发还是市场应用,都有赖于学界、业界等给予更多的关注和投入。

在技术研发方面,一是深入探索原材料选择、菌种培养、产品性能之间的构效关系,建立相应的理论模型,避免出现“炒菜”式材料研发;二是着力提高其力学性能,通过材料改性、复合材料设计等多种手段,以期获得能与传统塑料制品媲美的使用性能;三是继续优化工艺流程,解决原材料收储、追溯等问题,缩短产品生产周期和降解周期,继续降低产品成本;四是开展菌丝体基塑料的材料生命周期评价研究,利用 LCA (life-cycle assessment) 清单全面评估其可能环境影响。

在市场应用方面,一是做好宣传推广,向公众科普菌丝体基塑料相关知识,避免其因孢子毒性、寄生虫等导致的消费心理障碍,逐步改变公众对其认可和接受度;二是发掘菌丝体基塑料新的性能,

如自修复、绝缘、吸附,进而拓展包括服装、体育、食品、污染治理、3D打印等领域可能应用的场景;三是建立包括综合性能、降解测试、安全等各方面在内的菌丝体基塑料评价标准化体系,使产品检验方法以及检测标准有据可循,市场得以规范;四是寻求政府、第三方公益机构等支持,通过政府政策扶持、第三方机构推介等多种措施,加速菌丝体基塑料的产业化应用和对传统塑料的替代。

最后需要指出的是,中国既是塑料制品生产和消费大国,又是农业大国,开发以农业废弃物为原料的菌丝体基塑料,为中国农业产业结构的优化调整找到了很好的出路,对推动中国废弃物资源利用和环境友好材料领域技术创新,实现生物、环境、材料等高技术产业群的跨越式发展具有重大意义。虽然近年来中国生物基材料技术取得了长足的进展,但在菌丝体基塑料的开发和应用这一细分领域尚处在起步阶段,与国际先进水平相比还存在很大差距,必须加快突破菌丝体基塑料制造过程的菌种筛选、菌丝培养、复合成型等关键技术,构建具有自主知识产权的菌种库设计研发平台,促进菌丝体基塑料低成本规模化生产与应用示范,为培育具有国际竞争力的环境友好材料产业提供有力支撑。

参考文献(References)

- [1] 汤桂兰, 胡彪, 康在龙, 等. 废旧塑料回收利用现状及问题[J]. 再生资源与循环经济, 2013, 6(1): 31-35.
Tang Guilan, Hu Biao, Kang Zailong, et al. Current status and problems on waste plastic[J]. Recyclable Resources and Circular Economy, 2013, 6(1): 31-35.
- [2] Al-Salem S M, Lettieri P, Baeyens J. Recycling and recovery routes of plastic solid waste(PSW): A review[J]. Waste Management, 2009, 29(10): 2625-2643.
- [3] 邓炜航, 屈茂会. 我国废旧塑料的废物再利用现状及未来趋势[J]. 中国资源综合利用, 2018, 36(4): 75-77.
Deng Weihang, Qu Maohui. Waste plastic recycling status and future trends in China[J]. China Resources Comprehensive Utilization, 2009, 29(10): 2625-2643.
- [4] Rochman C M, Browne M A, Halpern B S, et al. Policy: Classify plastic waste as hazardous [J]. Nature, 2013, 494(7436): 169-171.
- [5] Hosam E M S, Samir B E. Long-term effect on the solidified degraded cellulose-based waste slurry in cement matrix[J]. Acta Montanistica Slovaca, 2010, 14(4): 291.
- [6] 翁端, 冉锐, 王蕾. 环境材料学[M]. 第2版. 北京: 清华大学出版社, 2011.
Weng Duan, Ran Rui, Wang Lei. Environmental Materials Science[M]. Second Edition Beijing: Tsinghua University Press, 2011.
- [7] 霍鹏. 可降解塑料的研究现状及发展趋势[J]. 工程塑料应用, 2016, 44(3): 150-153.
Huo Peng. Research status and development trend of degradable plastics[J]. Engineering Plastic Application, 2016, 44(3): 150-153.
- [8] 张爱雷. 可降解生物包装材料的研究进展[J]. 科技与企业, 2014(14): 362-363.
Zhang Ailei. Research trends in biodegradable packaging materials[J]. Science-Technology Enterprise, 2014(14): 362-363.
- [9] 朱亚龙. 浅谈可降解塑料的研究现状及发展趋势[J]. 化工管理, 2018(6): 12.
Zhu Yalong. Brief discussion on current status and developing trends of degradable plastics[J]. Chemical Enterprise Management, 化工管理, 2018(6): 12.
- [10] 刘钺, 杜风光. 生物降解塑料的产业化现状与前景[J]. 河南化工, 2012, 29(15): 21-25.
Liu Yue, Du Fengguang. Status and progress of biodegradable plastics industry[J]. Henan Chemical Industry, 2012, 29(15): 21-25.
- [11] Pandey J K, Raghunatha R K, Pratheep K, et al. An overview on the degradability of polymer nanocomposites [J]. Polymer Degradation and Stability, 2005, 88(2): 234-250.
- [12] 孙斌. 生物可降解材料——聚乳酸及其共聚物的制备与性质研究[D]. 济南: 山东师范大学, 2015.
Sun Bin. Synthesis and properties of the biodegradable material- polylactide acid and its copolymers[D]. Jinan: Shandong Normal University, 2015.
- [13] Marcos-Fernández A, Abraham G A, Valentín J L, et al. Synthesis and characterization of biodegradable non-toxic poly(ester-urethane-urea)s based on poly(ϵ -caprolactone) and amino acid derivatives[J]. Polymer, 2005, 47(3): 785-798.
- [14] 郑楠. 生物可降解聚酯PHA及其改性的研究[D]. 大连: 大连工业大学, 2011.
Zheng Nan. Study on biodegradable polyester PHA and its modification[D]. Dalian: Dalian Polytechnic University, 2011.

- ty, 2011.
- [15] 申志翔, 陈复生, 宋小勇, 等. 淀粉基生物可降解材料的研究进展[J]. 食品工业, 2017, 38(11): 290-294.
Shen Zhixiang, Chen Fusheng, Song Xiaoyong, et al. Research progress of biodegradable starch-based plastics [J]. The Food Industry, 2017, 38(11): 290-294.
- [16] Ma X F, Chang P R, Yu J G, et al. Preparation and properties of biodegradable poly(propylene carbonate)/thermoplastic dried starch composites[J]. Carbohydrate Polymers, 2007, 71(2): 229-234.
- [17] Cao Y X, Du F G, Wang X L, et al. New biodegradable blends from aliphatic polycarbonate and poly(vinyl alcohol) [J]. Polymers and polymer Composites, 2006, 14(6): 577-584.
- [18] 钱伯章. 可生物降解塑料的发展现状与前景[J]. 国外塑料, 2010, 28(8): 38-43.
Qian Bozhang. Current status and future of biodegradable plastics[J]. World Plastics, 2010, 28(8): 38-43.
- [19] 高文永. 中国农业生物质能源评价与产业发展模式研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2010.
Gao Wenyong. Study on resource evaluation and industry development models of agricultural bioenergy in China[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2010.
- [20] Haider T, Völker C, Kramm J, et al. Plastics of the future? The impact of biodegradable polymers on the environment and on society[J]. Angewandte Chemie, 2018, doi: 10.1002/ange.201805766.
- [21] 黄占华, 张斌, 邹莉, 等. 一种潜在新型材料——真菌纤维的晶体结构表征[J]. 功能材料, 2012, 43(7): 940-943.
Huang Zhanhua, Zhang Bin, Zou Li, et al. Characterization of the crystal structure of fungus fiber: A novel potential material[J]. Journal of Functional Materials, 2012, 43(7): 940-943.
- [22] Karimjee M Z. Biodegradable architecture: finite construction for endless futures[D]. Ottawa: Azrieli School of Architecture and Urbanism, 2014.
- [23] 李桂梅, 白晓, 李燕立. IDEA13 创新产品面面观[J]. 非织造布, 2013, (3): 64-68.
Li Guimei, Bai Xiao, Li Yanli. Review of innovative products in IDEA12[J]. Nonwovens, 2013(3): 64-68.
- [24] Morlin Y S. "Magic mushroom material grows into desks, chairs and lampshades" [EB/OL]. [2016-09-17]. <http://edition.cnn.com/style/article/ecovative-mushroom-furniture/index.html>.
- [25] Binder L. "Ecovative design: Making magic out of mushrooms" [EB/OL]. [2009-05-11]. <https://earth911.com/inspire/diy/making-magic-out-of-mushrooms/>.
- [26] The Economist. A library of new materials: Exotic, but applicable [EB/OL]. [2012-07-11]. <https://www.economist.com/babbage/2012/07/11/exotic-but-applicable>.
- [27] Abhijith R, Ashok A, Rejeesh C R. Sustainable packaging applications from mycelium to substitute polystyrene: A review[J]. Materials Today: Proceedings, 2018, 5(1): 2139-2145.
- [28] Ashok A, Rejeesh C R, Renjith R. Biodegradable polymers for sustainable packaging applications: A review [J]. International Journal of Bionics and Bio-Materials, 2016, 2(2): 1-11.
- [29] Ecovative design LLC. How it works: Mycelium biofabrication platform [EB/OL]. [2018-09-01]. <https://ecovative-design.com/how-it-works>.
- [30] Ecovative design LLC. All products grown by Ecovative [EB/OL]. [2018-09-01]. <https://shop.ecovatedesign.com/>.
- [31] 吴豪, 赵鹏, 章琦, 等. 基于菌丝体的缓冲包装材料制备及性能研究[J]. 浙江科技学院学报, 2015, 27(1): 22-27.
Wu Hao, Zhao Peng, Zhang Qi, et al. Preparation and properties of cushion packaging material based on mycelium [J]. Journal of Zhejiang University of Science and Technology, 2015, 27(1): 22-27.
- [32] 臧建荣, 谭学锋. 一种新型的菌丝体废旧塑料复合材料[J]. 广东化工, 2014, 41(3): 31-32.
Zang Jianrong, Tan Xuefeng. A new composite material of mycelium and waste plastic [J]. Guangdong Chemical Industry, 2014, 41(3): 31-32.
- [33] 鲁车龙. 利用食用菌发酵生产生物板材关键技术研究 [D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2015.
Lu Chelong. The key technology of productin biomass board by edible fungi fermentation [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2015.
- [34] 任晓琼, 赵风清, 胡倩倩. 利用青霉素废菌丝体制备脱硫石膏缓凝剂的研究[J]. 环境科学与技术, 2014, 37(2): 134-137.
Ren Xiaoqiong, Zhao Fengqing, Hu Qianqian. Preparation of gypsum retarder from waste penicillin mycelium [J]. Environmental Science and Technology, 2014, 37(2): 134-137.
- [35] Ziegler A R, Bajwa D S, McIntyre G, et al. Evaluation of physico-mechanical properties of mycelium reinforced

- green biocomposites made from celulosic fibers[J]. *Applied Engineering in Agriculture*, 2016, 32(6): 931-938.
- [36] Pelletier M G, Holt G A, Wanjura J D, et al. An evaluation study of mycelium based acoustic absorbers grown on agricultural by-product substrates[J]. *Industrial Crops & Products*, 2013, 51(6): 480-485.
- [37] Ecovative design LLC. Packaging: Case study of dell, Merck and Rich Brilliant Willing [EB/OL]. [2018-09-01]. <https://shop.ecovatedesign.com/collections/packaging>.
- [38] Xinhua News. Regulations driving demand for biodegradable plastics: Report[EB/OL]. [2018-07-27]. http://www.xinhuanet.com/english/2018-07/27/c_137350599.htm.
- [39] 刘朝艳. 2016—2017年世界塑料工业进展(1)[J]. *塑料工业*, 2018, 46(3): 1-12.
- Liu Zhaoyan. Progress of the world's plastics industry in 2016—2017(1)[J]. *China Plastics Industry*, 2018, 46(3): 1-12.
- [40] Haneef M, Ceseracciu L, Canale C, et al. Advanced materials from fungal mycelium: fabrication and tuning of physical properties [J]. *Scientific Reports*, 2017, 7: 41292.
- [41] 周立成, 刘峰. 中国包装年鉴2011—2012[M]. 北京: 中国包装联合会, 2013.
- Zhou Licheng, Liu Feng. *China packaging yearbook*[M]. Beijing: China Packaging Federation, 2013.
- [42] Leena ElDeeb. Redhouse studio: Creating buildings that breathe [EB/OL]. [2018-02-25]. <https://progrss.com/sustainability/20180225/redhouse-studio-buildings-breathe/>.

Current status and tomorrow of mycelium based plastics

WAN Jie¹, YIN Qingyang², WENG Duan^{3*}

1. Energy Research Institute, Nanjing Institute of Technology, Nanjing 211167, China
2. School of Material Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China
3. Key Lab for Advanced Materials of Ministry of Education, School of Material Science and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China

Abstract Mycelium based plastic shows advantages of being low cost, eco-friendly, safe, inert and renewable, and therefore has the potential to replace polystyrene for a wide variety of applications such as packaging, construction, and transportation. This paper reviews the achievement and current status of the technology based on mushroom cultivation for mycelium based plastics. Synthesis process, property advantages, major applications and industrialization progresses are also briefed. Prospects of both technology and application are discussed in the end.

Keywords mycelium based plastics; biodegradable material; eco-friendly material ●



(责任编辑 田恬)