

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2020.05.028

3D 打印用聚合物材料的研究进展

张向阳,贾仕奎,赵中国,曹乐,张奇锋,陈立贵

(陕西理工大学材料科学与工程学院,陕西汉中 723000)

摘要: 查阅了近几年 3D 打印聚合物材料方面的文献,对 3D 打印聚合物材料的类型进行了分类,并对其改性研究进展进行了整理。综述了生物可降解塑料聚乳酸、聚丁二酸丁二酯和聚己内酯,通用工程塑料丙烯腈-丁二烯-苯乙烯塑料和聚酰胺,以及特种工程塑料聚醚醚酮 3D 打印聚合物及其改性材料;并列举了不同类型的 3D 打印聚合物材料在生物医学、汽车等领域的应用进展。

关键词: 3D 打印;生物可降解塑料;工程塑料;特种工程塑料;改性;应用;研究进展

中图分类号: TQ322 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2020)05-0156-04

Research Progress of Polymer Materials for 3D Printing

Zhang Xiangyang, Jia Shikui, Zhao Zhongguo, Cao Le, Zhang Qifeng, Chen Ligui

(School of Materials Science and Engineering, Shaanxi University of Technology, Hanzhong 723000, China)

Abstract : The literatures on polymer materials for 3D printing in recent years were consulted, the types of the polymer materials were classified, and the research progress of their modification were summarized. The 3D printed polymers and their modified materials including biodegradable plastics such as polylactic acid, polybutylene succinate and polycaprolactone, general engineering plastics such as acrylonitrile-butadiene-styrene plastics and polyamide, as well as special engineering plastics such as polyetheretherketone (PEEK) were reviewed respectively. Moreover, the application progress of different types of the 3D printed polymer materials in the fields of biomedicine, automobile and other fields were introduced.

Keywords : 3D printing ; biodegradable plastic ; engineering plastic ; special engineering plastic ; modification ; application ; research progress

3D 打印技术的思想起源于 19 世纪末美国一项分层构造地貌地形图的专利,并在 20 世纪 80 年代得以发展与推广^[1-5]。3D 打印是一项融合机械工程技术、计算机软件技术、三维模型技术、数据处理技术、激光技术等多种学科的技术^[2-3]。现如今,3D 打印技术因其有低成本、高生产率、制造自由、高度环保和生产精度高等优点,已成为一种普及的加工方法。大到航空航天、生物医学和建筑等领域,小到日常生活的包装、容器外壳等方面都有 3D 打印的身影存在,给人们的生活带来了极大的便利。而 3D 打印所用材料是成型过程中的基础和保障,目前,3D 打印用聚合物材料日新月异,主要有聚乳酸(PLA)、聚丁二酸丁二酯(PBS)、聚己内酯(PCL)、丙烯腈-丁二烯-苯乙烯塑料(ABS)、聚酰胺(PA)和聚醚醚酮(PEEK)等。

而上述这些聚合物因为它们本身具有的优点已应用到了生物医学、军事领域、建筑、汽车制造、日常生活(家居、包装行业、光电)等不同领域。当前,3D 打印技术发展迅猛,材料类别越来越多,成形复杂,零件精确度也随之提高,它们都拓宽了 3D 打印的应用方向^[4-5]。笔者综述了可生物降解塑料 PLA, PBS, PCL, 通用工程塑料 ABS, PA 和特种工程塑料 PEEK 等 3D 打印用聚合物材料在改性方面的研究进展及它们在生物医学、汽车、工业生产等方面的应用现状,并对这些 3D 打印用聚合物改性材料在未来广阔领域中的应用前景进行了展望。

1 PLA 3D 打印聚合物改性材料

PLA 是一种能够替代石油基聚合物的最具发展潜力的可生物降解材料,具备优异的力学性能、物理性能、相容性、

基金项目: 国家自然科学基金项目(51703121),中国博士后科学基金特别资助项目(2018T111050)

通讯作者: 贾仕奎,博士,副教授,主要研究方向为聚合物基复合材料的先进制备、微观形态及性能 E-mail : shikuijia@sntu.edu.cn

收稿日期: 2020-03-10

引用格式: 张向阳,贾仕奎,赵中国,等. 3D 打印用聚合物材料的研究进展[J]. 工程塑料应用,2020,48(5): 156-159,165.

Zhang Xiangyang, Jia Shikui, Zhao Zhongguo, et al. Research progress of polymer materials for 3D printing[J]. Engineering Plastics Application, 2020, 48(5): 156-159, 165.

透气性、透明性,以及优越的抗拉强度和延展度,其在加工时受热容易降解,结晶性、韧性和耐热性比较差^[4-6]。

田伟等^[5]为解决 PLA/多壁碳纳米管(MWCNTs)导电打印耗材变脆的问题,制备了 PBS 增韧改性的 PLA/MWCNTs 复合材料。研究发现,当增加 PBS 含量时,复合材料的电阻率、断裂伸长率和冲击强度明显增加,而拉伸强度、弯曲强度和硬度降低,当 PBS 含量增加到 10% 时,复合材料的综合性能最好。许民等^[6]把质量分数不同的普通杨木粉和特殊杨木粉加入到 PLA 中来调控打印材料的黏度和力学性能,并降低打印 PLA 材料的成本,结果表明,当添加量相同时,添加特殊木粉的综合力学性能要比添加普通木粉的好。J. Bustillos 等^[7]利用石墨烯对 PLA 链进行限制而使其抗蠕变性得以增强,与纯 PLA 相比,PLA-石墨烯打印件的耐磨性提高了 14%。钱正等^[8]通过挤出 3D 打印技术,利用质量分数为 5% 的碳纤维(CF)增强改性 PLA 并分别调控挤出 3D 打印方法、层厚和喷嘴直径打印出 PLA/CF 复合材料制件,结果发现,与纯 PLA 相比,复合材料的拉伸强度增加了 50%,弯曲强度增加了 100%,压缩强度降低了 10%。

3D 打印用 PLA 及其改性材料在生物医用方面表现出独特的优异性,Wang Mian 等^[9]使用冷大气等离子体(CAP)作为 PLA 打印生物工程支架的处理方式,经 CAP 处理后,氧气与碳的比例显著增加,这些打印支架的亲水性和纳米级粗糙度均发生改变,对增强骨细胞和间充质干细胞(hMSCs)的附着和功能起着重要作用。P. Danilevicius 等^[10]利用激光三维打印制成了三维多孔的 PLA 组织工程支架。结果表明,三维打印技术可以随意制造空洞和孔隙率的 PLA 组织工程支架,得到所需模型。J. A. Weisman 等^[11]采用 3D 打印技术生产了形状各异的以 PLA 为基体的药物载体,该药物载体可以将庆大霉素或化疗用药甲氨蝶呤进行运输,该药物输送系统既能阻止被感染,又能够抑制颌骨肿瘤细胞的增殖,同时它还可以运送其它药品和活性因子。Tao Zhen 等^[12]利用熔融沉积成型(FDM)3D 打印技术打印了 PLA 假肢,利用拓扑优化对过程进行了优化,加快了生产速度。该假肢较普通假肢而言其质量减轻了 62%,极大地减轻了患者的生活负担。在鞋类方面,中国鑫达自主研发的 PLA/热塑性聚氨酯线材,被用来做 3D 打印生产鞋类的原材料,不仅提高了鞋类的体验感和质量,而且可以利用 3D 打印自主设计鞋的样式,主要用在运动鞋、休闲鞋等高档鞋品上^[13]。电池方面,陈军等^[14]采用 FDM 技术加工 PLA,生产了拥有平行流道和蛇形流道的燃料电池双极板。汽车方面,2017 年我国台北国际汽车零配件展及台北国际车用电子展中展出的台湾车辆研发联盟研制的 3D 打印 PLA 汽车,车身和内饰采用 PLA 材料,该车一经展出便在汽车领域引起轰动。由此可见

3D 打印制作 PLA 绿色环保汽车内饰和汽车框架已然成为一种趋势,在汽车内饰中不仅可以代替聚丙烯和 ABS 等难降解塑料,还能保证乘员的健康,降低了车辆行驶及车辆制造时的环境载荷。

2 PBS 3D 打印聚合物改性材料

人们最早开始研究 PBS 材料是在 20 世纪 90 年代,随着研究深入,PBS 很快成为可大力推广的通用型完全生物降解塑料。与其它可降解塑料相比,PBS 具有价格便宜和力学性能优良等特点,而和同等价格的 PLA 相比优势又在于其具有较低加工温度和受热不宜分解等特点^[15-18]。周运宏等^[17]向 PBS 中加入了滑石粉(Talc)和 PLA,结果表明,PLA 的加入使 PBS 的结晶温度下降了 5℃;随着 PLA 含量的增加,材料的复数黏度、储能模量和损耗模量均得到提高,而随着 PLA 质量份从 0 份增加到 30 份,拉伸强度下降了 1.71 MPa,缺口冲击强度下降了 2.63 kJ/m²;PLA 含量的增加使断面逐渐粗糙;在打印效果上,复合材料的打印模型随 PLA 含量的增加而变得雅观规整,同时,打印中的熔丝塌陷概率随着整体刚性的增加而减小,进而材料的打印精度上升;PLA 含量的增加使得整体黏度增加,随之增大的还有同温 and 同形变下流动的阻力、分子链间的内摩擦,所以整体的损耗模量会明显增加;另外,PLA 含量的增加导致熔丝间的粘结性下降,加上 FDM 的多缝隙结构使得拉伸强度和缺口冲击强度降低。此外,M. Ojansivu 等^[18]制备了 PLA/PBS 混合物,并分析了人类 hMSCs 在支架上的材料特性以及细胞附着、增殖和成骨分化。就 hMSC 附着、增殖和成骨而言,PBS 优于 PLA,这使其在骨组织工程支架应用中得到更广泛地利用。

3 PCL 3D 打印聚合物改性材料

PCL 是一种生物可降解材料,结晶度在 45% 左右,PCL 的断裂伸长率和弹性模量介于低密度聚乙烯与高密度聚乙烯之间,PCL 外观呈现乳白色,PCL 的玻璃化转变温度为 -60℃,熔点约 63℃,分解温度约 250℃^[19]。

PCL 主要被用在医疗方面,Zhang Kaile 等^[20]使用螺旋支架设计的 PCL 和聚 L-丙交酯-己内酯(PLCL)聚合物可以模拟兔子的天然尿道,研究首次证明了创建尿道结构是可行的,使用两种生物材料并获得与天然兔尿道相当的力学性能,为未来 3D 生物打印尿道的研究奠定了坚实的基础。J. Y. Won 等^[21]将 3D 打印的 PCL/聚(乳酸-共-羟基乙酸)/β-磷酸三钙(PCL/PLGA/β-TCP)膜与广泛使用的胶原膜用于比格犬植入模型中的引导骨再生(GBR)。对比结果显示,PCL/PLGA/β-TCP 膜在体外和体内具有与胶原膜相似的生物相容性和骨再生水平。考虑到 GBR 总是应用于潮湿环境(如血液),证明了 PCL/PLGA/β-TCP 膜在湿润环境中比胶原膜更可靠地保持其形式,证实了它们作为 GBR 的适

用性膜。Liu Dinghua 等^[22]利用3D打印方法制造PCL/羟基磷灰石(SrHA)复合材料支架(scaffolds),SrHA的加入在细胞增殖、活性和骨质疏松症方面有明显的优势。结果表明,PCL/SrHA复合材料scaffolds可以通过3D打印技术容易地制造,并且在骨组织工程应用的可植入材料方面非常有前途。J. Y. Lee 等^[23]研发了一种新型的三维支架,它是由骨形态发生蛋白-2(BMP-2)修饰的鞣酸(TA)改性PCL制备的。研究表明,PCL/BMP-2/TA支架在清除活性氧、抑制炎症反应和增强细胞成骨分化中起重要作用。向声焱等^[24]以PCL为材料,研究成型温度和打印层高对PCL制品翘曲变形的影响。结果显示,成型温度和层高的增加直接影响到PCL制品的翘曲形变量,使其翘曲形变量的数值先上升后下降;而3D打印的PCL的拉伸强度、弯曲强度和断裂伸长率都比普通工艺的好。金光辉等^[25]用选择性激光烧结(SLS)技术构建纳米PCL/透明质酸人工骨支架。研究发现,复合材料中的植入区板层可以看到有骨生成,该人工骨支架与种子细胞联合后能重新修整骨损伤,同时还具有特别好的降解能力。

4 ABS 3D 打印聚合物改性材料

ABS是一种强度高、韧性好和易于加工成型的热塑性高分子材料^[26-28]。Weng Zixiang 等^[27]向ABS中添加有机蒙脱土(OMMT)后发现材料的拉伸弹性模量、弯曲强度、弯曲弹性模量和储能模量显著提高,线性热膨胀率和热重损失降低,该材料在FDM 3D打印中具有较好的应用前途。F. Vishal 等^[28]采用OMMT基纳米复合材料溶液涂覆ABS长丝来进行改性,发现拉伸弹性模量增加了10.8%,OMMT离子将纳米复合材料的相对介电常数提高64%。OMMT离子在聚合物和粘土界面处提供增强作用,由于这些纳米颗粒与原始ABS相比具有更高的模量和强度,因此它们在聚合物中良好的分散增加了3D印刷部件的拉伸弹性模量。T. J. Quill 等^[29]用氮化硼(BN)对ABS进行改性,BN含量为35%时的3D打印件最大面内热导率为 $0.93 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$,比注射成型件的 $1.45 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 要小,但超过纯ABS热导率的5倍,并且热导率呈现各向异性,表明纳米复合材料在该3D打印技术下可以形成具有方向性的导热制品。

另外,黄敏强等^[30]采用牌号为M30i的ABS作为3D打印固定支架的原材料,之所以采用该材料是因为其本身硬度高且不发生排斥反应。利用FDM技术打印出了个性化外固定装置,被用来治疗胫腓骨粉碎性骨折,一举克服了外固定装置体积大、质量大、结构繁琐且呆板、患者生活和锻炼不便的难题。

在汽车方面,出现了以ABS/CF复合材料为材质的Strati汽车,其车身为一体成型,生产一辆车只需要44 h,全

车的3/4依靠3D打印完成,复合材料中ABS和CF的质量比为8:2,在成本合理的情况下该配比可保证材料的强度^[31]。新加坡南洋理工大学的学生创造出一辆3D打印汽车,整车有150个颜色各异的ABS零部件。

在工业设备方面,陈俊宇等^[32]利用FDM技术打印出ABS的燃气轮机叶片模型,利用这种叶片模型不到8 h就可生产出燃气轮机的金属叶片,一举攻克了燃气轮机叶片制造过程繁琐、时间长以及成本高等难题。在航空航天方面,英国南安普顿大学用增强型ABS打印了一架名为“SULSA”无人机,该无人机翼展可达2 m,速度最快为 100 km/h ^[33]。

5 PA 3D 打印聚合物改性材料

PA的强度高、柔韧性好、热变形温度和加工温度高、收缩率小,其3D打印产品的韧性比ABS好,冲击强度高。因为PA的热稳定性、可加工性和力学性能良好,所以PA是采用SLS加工方法制造零件的最好材料^[34-36]。

张正义等^[36]采用固相剪切加碾磨的方法制备了PA12/MWCNTs复合粉体材料,成功制备了表面平整、结构复杂和性能良好的PA12/MWCNTs SLS制品,所得PA12/MWCNTs烧结试样的拉伸强度达到44.2 MPa,缺口冲击强度达到 8.12 kJ/m^2 。Yan Chunjie 等^[37]采用SLS成型技术把OMMT填充到PA12中来改善其力学性能,得到制件的力学性能较未填充之前有大幅提高。方亮等^[38]采用溶剂沉淀法制备了用于3D打印的PA6/PA12复合粉末,分析和测试了不同PA12含量下复合粉末的表观密度、粒径分布、熔体流动速率变化,发现PA12使复合粉末的打印烧结温度有明显的降低,烧结温度窗口增大,有利于SLS成型。

PA具有优异的性能,其被广泛用于汽车、工业和日常生活方面。美国的Solvay公司采用PA通过3D打印技术生产了制动装置、过滤燃料装置和车门把手等,降低了汽车行驶时的燃料消耗^[31,39]。德国巴斯夫创新性地生产了PA6 Ultramid B3U50G6新型材料,其符合家用电器标准IEC60335-1,特别适用于洗衣机、洗碗机等定时程序开关和有定时器功能的小设备,如咖啡机等^[40]。

6 PEEK 3D 打印聚合物改性材料

PEEK是一种性能优异的特种工程塑料,具有良好的耐高温性、耐摩擦性、尺寸稳定性、电绝缘性和生物相容性等性能,主要应用于航空航天、汽车、医疗等领域^[41-44]。由于PEEK的高强度、高稳定性和高耐温性,欧洲航天局在一项新的3D打印小卫星项目中采用了PEEK材料。

Kang Jianfeng 等^[42]用3D打印技术生产了PEEK肋骨假体,该肋骨假体的机械行为与天然肋骨的机械行为十分相近,该肋骨假体已成功植入患者体内,术后反应效果良好。C. Basgul 等^[43]采用PEEK通过3D打印制造出了腰椎融合

器标准件,该融合器的压缩和剪切强度为传统机加工融合器的 63%~71%,而扭转强度为 92%。并且在 3000 mm/min 的最高打印速度下仍获得高达 20% 的孔隙率,3D 打印的 PEEK 支架的结晶度与挤压棒加工成的 PEEK 支架的结晶度没有显著差异。Deng Lijun 等^[44]通过儿茶酚胺化学试剂开发了一种新型的银纳米晶 (AgNPs) 修饰 3D 打印 PEEK。测试显示,AgNPs 修饰的 3D PEEK 支架对革兰氏阴性和革兰氏阳性细菌显示出显著的抗菌作用,然后将 MG-63 细胞接种在样品上用于细胞增殖和碱性磷酸酶 (ALP) 活性测试。结果表明,与纯 PEEK 支架相比,用 AgNPs 修饰的支架可以支持细胞增殖,并增强了碱性磷酸酶活性,其在临床骨组织修复中具有巨大的潜在应用价值。I. Nakahara 等^[45]采用 CF 改性 PEEK 材料,然后用该材料生产大腿骨干,测试了 PEEK 复合材料人造骨的强度,为相应患者更换人造骨奠定了坚实的基础。此外, Magma 公司利用 Victrex PEEK 通过 3D 打印制备了连续长度可达 4 km 的缠绕式 m-pipe 管,该管由 CF 和玻璃纤维 (GF) 改性 PEEK 而得,最大受压超过 100 MPa,水下最大深度可至 3 km,是专门为了开采海底石油和天然气而设计的,与钢管相比,经过 CF 和 GF 改性的 PEEK 管材具有良好的耐疲劳性、浮力和耐腐蚀性^[32,39]。

7 结语

3D 打印技术是跨世纪性的技术创新,是人类社会制造业的一次突破性革命,为人类社会制造所需的物品节约了大量的时间和资源,大到房子的建造,小到一个装配零件,都能够帮助人们顺利完成,且具有特别高的产品合格率。它的出现打破了传统成型工艺在成型方面固有的减材制造思维和生产模式,在生产方面更加切合工程师的立体思维,再加上其成型效率高,在成型工艺上相比传统成型工艺有显著的优势。近年来,社会各行各业对于污染、材料消耗等节能环保方面的要求越来越高,就急需需要可降解材料的问世,来解决这些棘手的问题。而笔者所整理的这些聚合物,因为它们本身具有的特殊的性能和功能已然成为现在 3D 打印成型的常用材料,已有很多学者通过改性这些聚合物得到了性能更好并且更适合 3D 打印的聚合物材料,并且在生物医学、汽车、工业生产、家电等众多领域都取得了不同程度的进展,但是若要大规模普及这些聚合物材料在 3D 打印方面的应用,就需要针对不同领域或不同行业改性出更多功能性的聚合物材料,再通过对 3D 打印技术的不断更新,3D 打印成型技术及相应产品将会使各个行业发生显著变化。

参考文献

[1] 史玉升,等. 中国科学:信息科学,2015,45(2):197-203.
Shi Yusheng, et al. Scientia Sinica:Informationis, 2015, 45(2):197-203.

[2] 李轩,等. 自动化学报,2016,42(7):983-1003.
Li Xuan, et al. Acta Automatica Sinica, 2016, 42(7):983-1003.

[3] 毕向军,等. 工程塑料应用,2019,47(2):138-142.
Bi Xiangjun, et al. Engineering Plastics Application, 2019, 47(2):138-142.

[4] 贾仕奎,等. 高分子材料科学与工程,2019,35(5):136-142.
Jia Shikui, et al. Polymer Materials Science & Engineering, 2019, 35(5):136-142.

[5] 田伟,等. 材料导报,2018,32(S1):274-277.
Tian Wei, et al. Materials Review, 2018, 32(S1):274-277.

[6] 许民,等. 科技导报,2016,34(19):132-137.
Xu Min, et al. Science & Technology Review, 2016, 34(19):132-137.

[7] Bustillos J, et al. Polymer Composites, 2018, 39(11):3878-3888.

[8] 钱正,等. 工程塑料应用,2019,47(10):59-62.
Qian Zheng, et al. Engineering Plastics Application, 2019, 47(10):59-62.

[9] Wang Mian, et al. Acta Biomaterialia, 2016, 46:256-265.

[10] Danilevicius P, et al. Appl Surf Sci, 2015, 336:2-10.

[11] Weisman J A, et al. International Journal of Nanomedicine, 2015, 10:357-370.

[12] Tao Zhen, et al. Journal of Mechanical Science and Technology, 2017, 31(5):2393-2398.

[13] 于剑昆. 化学推进剂与高分子材料,2018,16(2):8-13.
Yu Jiankun. Chemical Propellants & Polymeric Materials, 2018, 16(2):8-13.

[14] 陈军,等. 塑料工业,2016,44(4):47-50.
Chen Jun, et al. China Plastics Industry, 2016, 44(4):47-50.

[15] 杨金明,等. 工程塑料应用,2015,43(2):117-120.
Yang Jinming, et al. Engineering Plastics Application, 2015, 43(2):117-120.

[16] 白桢慧,等. 中国塑料,2018,32(12):10-15,33.
Bai Zhenhui, et al. China Plastics, 2018, 32(12):10-15,33.

[17] 周运宏,等. 中国塑料,2018,32(3):85-91.
Zhou Yunhong, et al. China Plastics, 2018, 32(3):85-91.

[18] Ojansivu M, et al. Stem Cells International, 2018, 2018.doi: 10.1155/2018/5928935.

[19] 王礼建,等. 材料导报,2015,29(5):78-82,94.
Wang Lijian, et al. Materials Review, 2015, 29(5):78-82,94.

[20] Zhang Kaile, et al. Acta Biomaterialia, 2017, 57(1):154-164.

[21] Won J Y, et al. Biomedical Materials, 2016, 11(5).doi:10.1088/1748-6041/11/5/055013.

[22] Liu Dinghua, et al. Chemical Engineering Journal, 2019, 362:269-279.

[23] Lee J Y, et al. International Journal of Molecular Sciences, 2018, 19(11).doi:10.3390/ijms19113602.

[24] 向声燧,等. 中国塑料,2018,32(4):74-78.
Xiang Shengyi, et al. China Plastics, 2018, 32(4):74-78.

- [19] Zhao Tonghui, et al. *Macromolecules*, 2018, 51(5):2 027–2 037.
- [20] 龚新怀. 化工进展, 2016, 35(10):3 273–3 280.
Gong Xinhui. *Chemical Industry and Engineering Process*, 2016, 35(10):3 273–3 280.
- [21] Singh A A, et al. *Int J Biol Macromol*, 2019, doi:10.1016/j.ijbiomac. 2019.10.246.
- [22] 肖湘莲, 等. 塑料科技, 2014, 42(11):87–90.
Xiao Xianglian, et al. *Plastics Science and Technology*, 2014, 42(11):87–90.
- [23] 孙晋皓, 等. 塑料工业, 2016, 44(4):26–30.
Sun Jinhao, et al. *China Plastics Industry*, 2016, 44(4):26–30.
- [24] Aliotta L, et al. *European Polymer Journal*, 2019, 113:78–88.
- [25] Răpă M, et al. *Composites Part B:Engineering*, 2016, 102:112–121.
- [26] Celebi H, et al. *Journal of Applied Polymer Science*, 2018, 135(8). doi:10.1002/app.45895.
- [27] Maiza M, et al. *Polímeros*, 2015, 25(6):581–590.
- [28] Ali F B, et al. *Encyclopedia of renewable and sustainable materials*[M]. Amsterdam:Elsevier, 2018:569–575.
- [29] 赵永青, 等. 化工学报, 2014, 65(10):4 197–4 202.
Zhao Yongqing, et al. *CIESC Jornal*, 2014, 65(10):4 197–4 202.
- [30] 龚新怀, 等. 塑料科技, 2019, 47(4):54–58.
Gong Xinhui, et al. *Plastics Science and Technology*, 2019, 47(4):54–58.
- [31] Yuan Wenqiang, et al. *Polymer Testing*, 2019, 78, doi:10.1016/j.polymertesting.2019.105981.
- [32] Przybytek A, et al. *Industrial Crops and Products*, 2018, 122:375–383.
- [33] Liu Wendi, et al. *Polymer*, 2018, 148:109–118.
- [34] Xiong Zhu, et al. *Carbohydr Polym*, 2013, 92(1):810–816.
- [35] Raghunath S, et al. *Journal of Polymer Research*, 2018, 25(5):126–138.
- [36] Aydın R S T, et al. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 2017, 94(3):413–424.

(上接第 159 页)

- [25] 金光辉, 等. 第二军医大学学报, 2015, 36(12):1 289–1 294.
Jin Guanghui, et al. *Academic Journal of Second Military Medical University*, 2015, 36(12):1 289–1 294.
- [26] 陈延凯, 等. 工程塑料应用, 2019, 47(10):47–52.
Chen Yankai, et al. *Engineering Plastics Application*, 2019, 47(10):47–52.
- [27] Weng Zixiang, et al. *Materials & Design*, 2016, 102:276–283.
- [28] Vishal F, et al. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 2018, 40(7). doi:10.1007/s40430-018-1282-6.
- [29] Quill T J, et al. *Applied Composite Materials*, 2018, 25(5):1 205–1 217.
- [30] 黄敏强, 等. 中国修复重建外科杂志, 2016, 30(2):156–160.
Huang Minqiang, et al. *Chinese Journal of Reparative and Reconstructive Surgery*, 2016, 30(2):156–160.
- [31] 杨振英, 等. 塑料工业, 2017, 45(5):11–15.
Yang Zhenying, et al. *China Plastics Industry*, 2017, 45(5):11–15.
- [32] 陈俊宇, 等. 铸造技术, 2016, 37(7):1 418–1 420.
Chen Junyu, et al. *Foundry Technology*, 2016, 37(7):1 418–1 420.
- [33] 金大元. 新技术新工艺, 2015(4):9–13.
Jin Dayuan. *New Technology & New Process*, 2015(4):9–13.
- [34] 于翔, 等. 高分子材料科学与工程, 2018, 34(9):165–170, 175.
Yu Xiang, et al. *Polymer Materials Science & Engineering*, 2018, 34(9):165–170, 175.
- [35] Pirvu C, et al. *Industrial Lubrication and Tribology*, 2017, 69(1): 42–51.
- [36] 张正义, 等. 高分子材料科学与工程, 2017, 33(3):1–6.
Zhang Zhengyi, et al. *Polymer Materials Science & Engineering*, 2017, 33(3):1–6.
- [37] Yan Chunjie, et al. *Rapid Prototyping J*, 2011, 17:28–36.
- [38] 方亮, 等. 工程塑料应用, 2019, 47(2):20–24, 51.
Fang Liang, et al. *Engineering Plastics Application*, 2019, 47(10):20–24, 51.
- [39] 房鑫卿. 化工设计通讯, 2019, 45(5):72–73.
Fang Xinqing. *Chemical Engineering Design Communications*, 2019, 45(5):72–73.
- [40] 宁军. 塑料工业, 2018, 46(4):1–19, 50.
Ning Jun. *China Plastic Industry*, 2018, 46(4):1–19, 50.
- [41] 陈鹏, 等. 高分子材料科学与工程, 2017, 33(6):157–162.
Chen Peng, et al. *Polymer Materials Science & Engineering*, 2017, 33(6):157–162.
- [42] Kang Jianfeng, et al. *Biomechanics and Modeling in Mechanobiology*, 2018, 17(4):1 083–1 092.
- [43] Basgul C, et al. *Journal of Materials Research*, 2018, 33(14): 2 040–2 051.
- [44] Deng Lijun, et al. *Colloids and Surfaces B:Biointerfaces*, 2017, 160:483–492.
- [45] Nakahara I, et al. *Journal of Artificial Organs*, 2014, 17(4):358–363.