

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2020.08.029

# 聚乳酸基抗菌材料研究现状

秦霸,朱砂,吕承航,廖磊,卜孟浩

(西华大学材料科学与工程学院,成都 610039)

**摘要:** 简述了聚乳酸 (PLA) 基抗菌材料的研究现状,包括二氧化钛系列、银离子系列等无机抗菌剂型,合成有机物系列、天然有机物系列等有机抗菌剂型,以及有机无机复合抗菌剂型。比较了不同抗菌剂与 PLA 作用的综合抗菌效果,分析了各类抗菌剂的优缺点,并对 PLA 基抗菌材料的进一步发展提出了展望,指出在 PLA 材料自身条件下进行调控以达到抗菌的目的是今后 PLA 抗菌材料的重要发展方向。

**关键词:** 聚乳酸基抗菌材料;无机抗菌剂;有机抗菌剂

**中图分类号:** TB34 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2020)08-0153-05

## Research Status of Polylactic Acid Based Antibacterial Materials

Qin Ba, Zhu Sha, Lyu Chenghang, Liao Lei, Bu Menghao

(School of Materials Science and Engineering, Xihua University, Chengdu 610039, China)

**Abstract :** The research status of polylactic acid based antibacterial materials, including titanium dioxide series and silver ion series inorganic antibacterial agents, synthetic organic series and natural organic series organic antibacterial agents, and organic-inorganic composite antibacterial agents, was briefly reviewed. The comprehensive antibacterial effects of different antibacterial agents on polylactic acid were compared, the advantages and disadvantages of various antibacterial agents were analyzed. The further development of polylactic acid-based antibacterial materials in the future was put forward, and it was pointed out that the control under the conditions of polylactic acid materials to achieve antibacterial purpose was an important development direction of polylactic acid antibacterial materials.

**Keywords :** polylactic acid based antibacterial material ; inorganic antibacterial agent ; organic antibacterial agent

聚乳酸 (PLA) 是一种可再生的高分子材料,通常可由淀粉、小麦等可再生资源生产,这也使得 PLA 的成本较低<sup>[1-2]</sup>。加上 PLA 具有良好的生物相容性和加工特性等,在自然环境中可完全降解成小分子的水和二氧化碳,因此 PLA 较传统的石油基塑料具有明显的环保优势<sup>[3-4]</sup>。而良好的生物相容性使得 PLA 材料在医学领域的应用也越来越广泛<sup>[5-6]</sup>,食品包装和医用材料都要求 PLA 应具有良好的抗菌性能,以保证 PLA 基材料的安全使用。将具有抗菌性的物质与 PLA 材料相结合是提升 PLA 抗菌性能的有效途径,常用于抗菌的物质可大致分为无机物型(如二氧化钛、氧化锌等)和有机物型(如壳聚糖、酚类等)两大类<sup>[7-9]</sup>。

### 1 无机物型

无机抗菌剂的优点<sup>[10-11]</sup>是具有良好的安全性、热稳定

性和持久性,是当前众多材料中广泛应用的一类抗菌剂。但价格高昂和抗菌的迟滞性是最大的不足,它无法和有机抗菌剂快速的灭菌能力相比。而且对于真菌、霉菌等,几乎起不到抑制作用。无机抗菌剂的抗菌反应机理大致可以划分为两类<sup>[12-13]</sup>,一类是基于光催化原理,在光的激发下,无机抗菌剂中的某些金属离子扮演活性中心的角色(如  $\text{TiO}_2$  中的  $\text{Ti}^{4+}$ )能够使空气或水中的氧气产生具有很强氧化能力的活性氧离子和羟基自由基,破坏细菌的细胞膜,使细菌无法进行正常的繁殖而死亡,从而达到抑菌的作用。二是接触反应<sup>[14]</sup>,当细菌和某些金属离子接触后,金属离子会造成细菌原有的一些成分和功能遭到破坏。细菌的细胞膜一般带有负电,一旦与带有正电的金属离子接触,便会在库仑力的作用下紧紧吸附,同时金属离子(如银离子)能进入细胞内部与

**基金项目:** 2019 年省级大学生创新创业训练计划项目 (S201910623096),“西华杯”大学生创新创业项目 (2020135)

**通讯作者:** 廖磊,讲师,主要研究方向为热电材料及器件 E-mail: 380985529@qq.com

**收稿日期:** 2020-05-19

**引用格式:** 秦霸,朱砂,吕承航,等. 聚乳酸基抗菌材料研究现状 [J]. 工程塑料应用,2020,48(8):153-157.

Qin Ba, Zhu Sha, Lyu Chenghang, et al. Research status of polylactic acid based antibacterial materials[J]. Engineering Plastics Application, 2020, 48(8):153-157.

蛋白质上的巯基( $-SH$ )发生反应,使得蛋白质变性失活,细胞失去繁殖和代谢能力,此外,金属离子还可以摧毁细菌的遗传物质系统、运输系统等。当细菌本体死亡后,金属离子会释放出来,再次和其它菌体结合,进行重复的杀菌。

### 1.1 二氧化钛系列

纳米二氧化钛( $nano-TiO_2$ )具有一系列优良的特性,如无毒、光催化活性高、物理化学性质稳定等。尹忠琳等<sup>[15]</sup>采用溶液共混法制备PLA/ $nano-TiO_2$ 复合膜,研究不同 $nano-TiO_2$ 质量分数对复合膜抗菌性能的影响,发现在 $nano-TiO_2$ 添加量为0.5%时,复合膜对大肠杆菌、沙门菌等微生物有明显的抑制作用。冯诗艺等<sup>[16]</sup>采用流延成膜法,通过向PLA体系中添加无机抗菌剂 $nano-TiO_2$ 共混制备得到PLA/ $nano-TiO_2$ 复合膜,其中 $nano-TiO_2$ 含量3%时复合膜的抗菌性最佳,对大肠杆菌和金黄色葡萄球菌的抑菌圈直径大小分别是 $(4.86 \pm 0.50)$  mm和 $(5.98 \pm 0.77)$  mm,实验表明复合膜具有较高的抗菌活性。优异的抗菌活性是因为 $nano-TiO_2$ 微粒拥有很高的比表面积,同时具有很高的表面能,高能表面能有效地和细菌反应,使得细菌丧失活性。该复合膜可应用于食品包装等领域。尹兴等<sup>[17]</sup>采用溶液流延法制备PLA/ $nano-TiO_2$ 抗菌薄膜,薄膜对金黄色葡萄球菌的抑菌率为90.27%,具有优良的抑菌效果,可用于食品、药品等产品的包装。

### 1.2 银离子系列

在无机抗菌剂中,银离子( $Ag^+$ )是应用最为广泛的一类抗菌剂,相比于镉、铜、铅等金属离子, $Ag^+$ 具有抗菌活性强、毒性低等一系列优点。因此, $Ag^+$ 抗菌剂在无机抗菌剂中占有主导地位。 $Ag^+$ 可强烈地结合酶蛋白的巯基而使酶失活是抗菌的主要原因。

M. T. Satoungar等<sup>[18]</sup>采用电纺丝法制备了PLA/银纳米线复合纤维,该纤维具有核-壳结构。抗菌性能测试结果表明,该复合纤维对金黄色葡萄球菌和大肠杆菌有良好的抗菌性能,当纳米银添加量为3%时,对金黄色葡萄球菌的抑制率可达100%,添加量为5%时对大肠杆菌的抑制率可达100%。E. E. Yalcinkaya等<sup>[19]</sup>采用阳离子表面活性剂十六烷基三甲基溴化铵(CTAB)作为纤维素纳米晶体(CNC)表面改性剂,在CNC上合成银纳米粒子并引入PLA基体中,由于基体中有 $Ag^+$ 的释放,PLA能有效地影响细菌生长。S. Alippilakkotte等<sup>[20]</sup>以硝酸银和苦瓜提取物(还原剂)为原料,在含有PLA基质的二相介质中,采用生物还原法制备了银胶体纳米膜,其中银胶体的平均粒径为5~20 nm。采用琼脂扩散法对PLA/银纳米纤维进行抑菌试验,发现PLA/银纳米纤维对大肠杆菌和金黄色葡萄球菌有明显的抑菌作用;同时体外分析结果表明,生物降解的PLA/银纳

米纤维(溶血率小于5%)与成纤维细胞具有良好的细胞相容性,不影响细胞生长,并提供了一个最佳的局部湿润环境来促进伤口愈合。这些结果表明,PLA/银纳米纤维作为伤口愈合剂,可以增强表皮细胞和成纤维细胞的增殖和功能,是一种很有价值的伤口敷料。

### 1.3 其它无机物系列

C. Swaroop等<sup>[21]</sup>以PLA与聚乙二醇(PEG)为基料,以氧化镁( $MgO$ )纳米颗粒为增强剂,采用溶剂浇铸法制备了厚度在40~50  $\mu m$ 的柔性薄膜,由于PEG和 $MgO$ 纳米颗粒的加入,经PLA/PEG/ $MgO$ 膜处理24 h后,大约有47%的细菌死亡,明显增强了PLA薄膜的抗菌效果,同时薄膜的力学性能优良,该复合膜是一种很有前途的食品包装材料。

S. Shankara等<sup>[22]</sup>以氯化锌和氢氧化钠为原料合成了氧化锌( $ZnO$ )纳米粒子,并将其用于PLA复合膜的制备。扫描电子显微镜图像显示PLA/ $ZnO$ 复合膜光滑致密,当加入0.5%的 $ZnO$ 时,复合膜对食源性致病菌、大肠杆菌和单核增生李斯特菌均有较强的抑菌活性,另外研究者将研制的薄膜用于鱼糜酱的包装,在实际应用中同样显示出较强的抗菌作用。J. Tongsai等<sup>[23]</sup>采用溶剂铸造法研究了 $ZnO$ 纳米粒子与PLA复合膜的抗菌性能,结果表明,PLA/ $ZnO$ 膜在金黄色葡萄球菌和大肠杆菌中均表现出良好的抗菌活性。

可持续抗菌PLA纳米复合材料由于其潜在的应用前景在生物医学和包装领域已经引起了广泛的关注。然而由于PLA的结晶速率低,所以制备不浸出的高结晶度抗菌PLA纳米复合材料仍然是一个难题。Peng W X等<sup>[24]</sup>将右旋聚乳酸(PDLA)与左旋聚乳酸(PLLA)通过原位氨解法合成了PLA接枝 $ZnO$ 。反应过程中PDLA基体与接枝的PLLA链倾向于在PDLA/ $ZnO$ 界面上并排定向,最终共结晶为立体络合物晶体。界面立体络合不仅可以作为成核剂来提高基体的结晶速率,而且可以有效地阻止 $ZnO$ 从聚合物基体中析出,最后材料体现出对大肠杆菌和金黄色葡萄球菌100%的抑菌率。此项研究为制备结晶速度快、不浸出抑菌的新型PLA材料提供了一条有效途径,拓宽了PLA的应用范围。

硒是一种存在于人体的天然元素,在人体的新陈代谢中起着重要的作用,与此同时,硒还具有抗菌和抗氧化性能。Lu R等<sup>[25]</sup>以PLA作为成膜的底物,采用溶液浇铸的方法来制作薄膜,并且加入一定比例的硒微粒( $SeMPs$ )来获得抗菌和抗氧化性能。结果表明,当 $SeMPs$ 浓度为1.5%时,复合膜对金黄色葡萄球菌(革兰氏阳性)和大肠杆菌(革兰氏阴性)菌株的生长抑制明显。

PLA常被应用于可生物降解的骨合成装置,因为其具有更好的生物相容性和生物活性,但纯PLA的抗菌性能不

高限制了其发展。M. C. Fernández-Calderón 等<sup>[26]</sup>研究发现,在 PLA 中添加 1%~10% 的镁可以减少 PLA 表面单胞菌生物膜的形成,但不影响其相容性。这些发现为生物可降解和生物兼容的 PLA/镁复合材料用于制作骨合成装置提供了重要的附加价值。

## 2 有机物型

有机抗菌剂相比于无机抗菌剂存在杀菌速度快,杀菌能力强,部分抗菌剂无毒,颜色稳定好等优点<sup>[27-28]</sup>。同时 PLA 和有机抗菌剂更容易结合,加工方便,使得抗菌效果更加稳定。有机抗菌剂的抗菌机理主要是与细菌和霉菌的细胞膜表面的阴离子相结合或与巯基反应等破坏蛋白质和细胞膜的合成系统,从而抑制细菌和霉菌的繁殖<sup>[29-30]</sup>。

### 2.1 合成有机物系列

聚 3-羟基丁酸-co-3-羟基戊酸脂(PVHB)作为高分子时不具备抗菌性,但它的低聚物却抗菌,低聚合度的 PVHB 能够破坏微生物的生物膜和细胞壁,进入细胞内会改变酸碱平衡,打乱代谢,使其灭亡。Chang H C 等<sup>[31]</sup>采用静电纺丝技术,成功地制备了共混比为 50:50 的 PLA/PHBV 膜,并采用区域抑菌法进行抗菌评价。实验表明该膜对金黄色葡萄球菌和大肠杆菌有明显的抗菌性能。LPA/PHBV 膜是一种潜在的用于抑制细菌感染的组织再生材料。

P. Srimalanon 等<sup>[32]</sup>采用熔融共混工艺,以过氧化二异丙苯(DCP)作为自由基引发剂,制备了原位增容聚丁二酸丁二酯/PLA(PBS/PLA)反应共混体系。用 2-羟丙基-3-哌嗪基-喹啉羧酸甲基丙烯酸酯(HPQM)作为抗菌剂,研究了其对 PBS/PLA 体系的抗菌效果。实验结果显示,为了大肠杆菌的存活率降低 99.9%,在 20/80 和 40/60 的 PBS/PLA 共混物中,HPQM 最佳剂量分别为 0.2% 和 0.15%。

I. Karakurt 等<sup>[33]</sup>采用等离子体辐照后接枝技术将聚丙烯酸(PAA)刷非共价连接到 PLA 表面后,将氨基葡萄糖(GlcN)和硫酸软骨素(ChS)固定在 PAA 刷上,实现对 PLA 膜的抗菌性能改性。抗菌试验结果表明,PLA 涂膜对大肠杆菌的抗菌活性最高,此外,这两种糖类的存在可以增加 PLA 膜表面附生细胞的活力,使得 PLA 基医疗产品应用得到推广。

J. Mulle 等<sup>[34]</sup>以乙酸乙酯为溶剂,通过浇铸法制备了负载肉桂醛(CIN)的非晶 PLA 薄膜,其中 CIN 的掺入可以增强膜的抗菌活性。在复合膜表面进行抗菌实验发现,生长培养基中 CIN 的活性量释放均超过了大肠杆菌和因诺卡氏李斯特菌的最低抑菌浓度,证明了 PLA/CIN 膜对两种细菌的抑菌活性。

### 2.2 天然有机物系列

聚壳糖<sup>[35]</sup>价格低廉,含有活性-NH<sub>2</sub>和-OH,易与巯

基反应,具有广谱抗菌性,对人体无毒、无刺激,且具备生物相容性,因而被广泛用于食品加工及医药行业。Z. A. Raza 等<sup>[36]</sup>采用离子凝胶技术合成了 PLA-壳聚糖纳米颗粒溶胶复合材料,并将其浸渍在棉织物上,以增强其抗菌和物理性能。B. Munteanu 等<sup>[37]</sup>采用共轴静电纺丝法制备 PLA 薄膜,并将含有丁香油的 PLA 薄膜封装在壳聚糖中,丁香油中酚类含量高,有较高的抑菌活性,因此能制备出具有抗菌和抗氧化性能的生物降解包装材料。该研究的新颖之处在于利用活性植物油同时包覆于壳聚糖,使得壳聚糖-油包覆 PLA 膜比壳聚糖包覆 PLA 膜具有更高的抗菌活性。

芥菜籽中含有硫代葡萄糖苷,可通过酶解作用作为抗菌微生物挥发性异硫氰酸酯(ITC)的天然来源,而 ITC 可用于活性食品包装,抑制腐败微生物的增殖。Yao J Y 等<sup>[38]</sup>以电纺 PLLA/赖氨酸(PLAL)纤维为载体材料,通过包埋芥菜粉(MP)制备抗菌复合纤维。采用静电纺丝法制备了单轴复合纤维(PLLA/MP, PLLA/PLAL/MP)和同轴复合纤维(PLLA/PLAL-MP-PLLA, PLLA/MP-PLLA/PLAL),这些纤维可用于制备一系列挥发性抗菌物质 ITCs。用紫外分光光度法测定了这些纤维的控释行为,结果表明,这些纤维的平均粒径为(975±126) nm,其中 MP 与载体聚合物之间的主要相互作用是物理作用,不同纤维表现出不同的 ITC 释放行为。共轴纤维的 ITC 释放期(约 14 d)比单轴纤维的 ITC 释放期(约 8 d)长。此项研究使得 PLA 基纤维在抗菌控释方面具有广阔的应用前景。

M. K. Pierchala 等<sup>[39]</sup>采用静电纺丝法制备了 PLA/高岭土(HAL)多孔膜,并用氨基糖苷类抗生素(GM)包裹。抗菌性能测试表明,复合膜对金黄色葡萄球菌和大肠杆菌有明显的抑制作用。另外该研究中,膜上 GM 的释放谱符合理想的药物释放模式,它可以通过缓慢释放药物达到延长治疗的效果,因此制备的 PLA/HAL 纳米纤维多层膜作为药物载体用于持续给药系统具有很大的潜力。

具有抗菌性能的生物降解聚合物是活性食品包装应用的理想材料。麝香草酚(PCL)是一种膳食单萜酚,具有很强的抗菌活性,在属于麝香草属的植物中大量存在。S. Milovanovic 等<sup>[40]</sup>采用超临界流体技术在 PLA 中浸渍 PCL 制备抗菌薄膜。结果表明,PLA 浸渍 PCL 质量分数为 35.8% 时,共混膜对枯草芽孢杆菌和大肠杆菌均表现出较强的杀菌能力,该薄膜可作为活性食品包装材料。I. S. M. A. Tawakkal 等<sup>[41]</sup>以 PLA、红麻纤维和 PCL 为主要原料制备了生物复合材料,研究了 PLA 薄膜与红麻纤维和 PCL 复合后对大肠杆菌和天然真菌的抗菌力。研究表明,PLA/5% 红麻纤维/25% PCL 复合膜在 37℃ 条件下处理两天后,可使胰蛋白胨大豆肉汤中的大肠杆菌数量减少,并

在与接种了大肠杆菌的培养皿接触时出现一个显著的抑制区。该研究利用天然抗菌添加剂开发的生物基材料具有延长肉类产品货架期的潜力。

### 3 有机无机复合型

单一的有机抗菌剂和无机抗菌剂都存在着各自的优缺点,有时将两者结合可以取长补短,优化抗菌效果。同时复合抗菌剂的使用对于比较昂贵的无机抗菌剂(如  $\text{Ag}^+$ )等还可以大大降低成本。

N. Nootsuwan 等<sup>[42]</sup>以苯并恶嗪为还原剂,通过硝酸银还原制备了不同银含量的纳米银包覆壳聚糖(CS)。在制备的CS-Ag包覆层中,当Ag含量为8.4%时,包覆层的抗菌活性最好。将CS-Ag作为PLA复合球团的填充剂,采用模压法制备了CS-Ag与PLA的复合材料。研究表明,在PLA基质中加入质量分数3%的CS-Ag复合球团时,复合材料对枯草芽孢杆菌、金黄色葡萄球菌和大肠杆菌的抑菌性能能达到99.99%。

毛龙等<sup>[43]</sup>利用  $\text{Ag}^+$  引发吡咯(Py),在PLA薄膜表面聚合形成双重抗菌涂层(PPy/Ag),成功制备出PLA-PPy/Ag多层复合抗菌薄膜。该多层复合薄膜表现出更为优异的抗菌特性,大肠杆菌的菌落总数降低至  $2.9 \times 10^6 \text{ CFU/cm}^2$ ,较纯PLA薄膜( $4.8 \times 10^{10} \text{ CFU/cm}^2$ ),降低了超过4个数量级。相比于完全采用成本较高的纳米银离子负载抗菌方式来说,较低成本的双重抗菌涂层将会在PLA活性包装领域具有一定的研究意义。Chun H等<sup>[44]</sup>以PLA和抑菌剂(诺氟沙星和硝酸银)组成的粉体在真空中通过低能电子束分散产生活性气相,制备了具有抑菌性能的PLA生物降解纳米复合涂层,并采用琼脂扩散法在固体LB琼脂培养基上对大肠杆菌和金黄色葡萄球菌进行了PLA基涂层在不同基质上的抗菌活性测试。结果表明,与石英玻璃相比,沉积在硅单晶片上的薄纳米复合涂层具有更好的抗菌活性,这是由于在薄膜涂层系统中,底物对抗菌成分扩散行为的影响不同。这项工作可以为设计其它有机聚合物或金属-聚合物纳米复合材料提供良好的抗菌能力,在生物医学和生物领域具有广阔的应用前景。

L. Techawinyutham 等<sup>[45]</sup>从辣椒粉中提取出辣椒油树脂(CO),浸渍在硅胶溶液中制备出含有CO的纳米  $\text{SiO}_2$  球(SICO),并用SICO对PLA进行改性,从而制备抗菌PLA复合薄膜。抗菌性能表明复合薄膜即使在很低浓度的抗菌剂添加下,对革兰氏阳性致病菌和革兰氏阴性致病菌均能表现出良好的抗菌性能。此外,SICO的加入降低了PLA基体的脆性,提高了结晶性、强度和模量。采用简单方法研发的PLA/SICO抗菌薄膜具有优异的热力学性能,适合于抗菌食品包装应用。

### 4 结语

PLA基抗菌材料的性能与抗菌剂的类型密切相关,其中无机抗菌剂有耐热性好( $>600^\circ\text{C}$ )、抗菌谱广、有效抗菌期长、毒性低、不产生耐药性、安全性高等优点,是目前抗菌材料及技术中研究应用最多的一类抗菌剂,但也存在价格昂贵(如  $\text{Ag}^+$ )、抗菌性不高(如  $\text{ZnO}$ )、对真菌和霉菌几乎没有抑制效果等问题。有机抗菌剂抗菌速度快、抗菌能力强,部分抗菌剂无毒、加工方便、颜色稳定好,但存在耐热性差些,容易水解,有效期短等缺点。

目前PLA基抗菌材料的发展有了很大的进步,但大多是基于PLA和抗菌物质的结合,始终与抗菌物质的抗菌性能密切相关。能否在PLA材料的自身条件下进行调控以达到抗菌的目的,是今后PLA抗菌材料的重要发展方向。

### 参考文献

- [1] 柴阳,等.广州化学,2019,44(2):87-93.  
Chai Yang, et al. Guangzhou Chemistry, 2019, 44(2):87-93.
- [2] 佟毅.中国粮食经济,2019(8):49-53.  
Tong Yi. Food Economy In China, 2019(8):49-53.
- [3] 魏风军,等.今日印刷,2019(9):16-18.  
Wei Fengjun, et al. Today Press, 2019(9):16-18.
- [4] 司丹鸽. 秸秆粉/聚乳酸木塑复合材料的制备及改性研究[D]. 西安:陕西科技大学,2017.  
Si Dange. Preparation and modification of straw powder / poly (lactic acid) wood-plastic composite[D]. Xi'an: Shaanxi University of Science and Technology, 2017.
- [5] 王纪勇,等.CN1710161[P].2005-12-21.  
Wang Jiyong, et al. CN1710161[P].2005-12-21.
- [6] 白雁斌,等.高分子通报,2006(3):46-51.  
Bai Yanbin, et al. Polymer Bulletin, 2006(3):46-51.
- [7] 傅晓云,等.包装工程,2009,30(10):194-196,230.  
Fu Xiaoyun, et al. Packaging Engineering, 2009, 30(10):194-196, 230.
- [8] 赵冉冉,等.上海包装,2017(4):66-68.  
Zhao Ranran, et al. Shanghai Packaging, 2017(4):66-68.
- [9] 张智嘉,等.高分子通报,2018(3):1-11.  
Zhang ZhiJia, et al. Polymer Bulletin, 2018(3):1-11.
- [10] 王开梅.牙体牙髓牙周病学杂志,2018,28(3):169-174.  
Wang Kaimei. Journal of Dentistry and Pulp Periodontology, 2018, 28(3):169-174.
- [11] 吕鹏召.铜纳米粒子及复合材料的制备、表征以及抗菌性、催化加氢性能的研究[D].天津:天津理工大学,2019.  
Lyu Pengzhao. Preparation, characterization, antibacterial and

- catalytic hydrogenation of copper nanoparticles and composites[D].  
Tianjin:Tianjin University of Technology, 2019.
- [12] 孙剑,等. 材料导报,2007,21(5):344-348.  
Sun Jian, et al. Materials Reports, 2007, 21(5):344-348.
- [13] 崔跃红,等. 中国建材科技,2017,26(1):5-7.  
Cui Yuehong, et al. China Building Materials Science and Technology, 2017, 26(1):5-7.
- [14] 赵欣,等. 材料导报,2016,30(7):68-73.  
Zhao Xin, et al. Materials Reports, 2016, 30(7):68-73.
- [15] 尹忠琳,等. 食品科学,2019,40(8):16-22.  
Yin Zhonglin, et al. Food Science, 2019, 40(8):16-22.
- [16] 冯诗艺,等. 塑料工业,2019,47(7):82-87, 116.  
Feng Shiyi, et al. China Plastics Industry, 2019, 47(7):82-87, 116.
- [17] 尹兴,等. 包装工程,2017,38(15):36-40.  
Yin Xing, et al. Packaging Engineering, 2017, 38(15):36-40.
- [18] Satoungar M T, et al. Polymer Composites, 2016, 39:E65-E72.
- [19] Yalcinkaya E E, et al. Carbohydrate Polymers, 2017, 157:1557-1567.
- [20] Alippilakkotte S, et al. Physicochemical and Engineering Aspects, 2017, 529:771-782.
- [21] Swaroop C, et al. Materials Today:proceedings, 2018, 5(9):20711-20718.
- [22] Shankar S, et al. Materials Science & Engineering C, 2018, 93(8):289-298.
- [23] Tongsai J, et al. Key Engineering Materials, 2018, 772:100-104.
- [24] PengW X, et al. Acs Sustainable Chemistry & Engineering, 2018, 6(9):13367-13377.
- [25] Lu R, et al. Coatings, 2020, 10(3):280.
- [26] Fernández-Calderón M C, et al. Biomedical Materials, 2017, 12(1):15025.
- [27] 叶远丽,等. 服装学报,2018,3(1):1-8.
- Ye YuanLi, et al. Journal of Clothing Research, 2008, 3(1):1-8.
- [28] 张静,等. 印染助剂, 2019, 36(3):11-14.  
Zhang Jing, et al. Textile Auxiliaries, 2019, 36(3):11-14.
- [29] 李庆,等. 印染, 2017, 43(17):15-19.  
Li Qing, et al. China Dyeing & Finishing, 2017, 43(17):15-19.
- [30] 陈浩. 新型支化型聚合物抗菌剂的制备及其性能研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2017.  
Chen Hao. Preparation and properties of novel branched polymer antibacterial agent[D]. Harbin:Harbin Engineering University, 2017.
- [31] Chang H C, et al. Cogent Engineering, 2017, 4(1):1322479.
- [32] Srimalanon P, et al. Polymer Testing, 2018, 67(3):331-341.
- [33] Karakurt I, et al. Polymers, 2019, 11(7):1186.
- [34] Mulle J, et al. European Polymer Journal, 2017, 9(7):316-325.
- [35] 王赢,等. 保鲜与加工, 2020, 20(2):22-27, 34.  
Wang Ying, et al. Storage and Process, 2020, 20(2):22-27, 34.
- [36] Raza Z A, et al. Pigment & Resin Technology, 2019, 48(2):169-177.
- [37] Munteanu B, et al. Materials, 2018, 11(10):1973.
- [38] Yao J Y, et al. Polymer Journal, 2017, 29(5):449-456.
- [39] Pierchala M K, et al. Applied Clay Science, 2018, 160(8):95-105.
- [40] Milovanovic S, et al. Food Research International, 2018:486-495.
- [41] Tawakkal I S M A, et al. Journal of Food Processing and Preservation, 2017, 41(5):e13145.
- [42] Nootsuwan N, et al. Oriental Journal of Chemistry, 2018, 34(2):683-692.
- [43] 毛龙,等. 表面技术, 2019, 48(1):154-160.  
Mao Long, et al. Surface Technology, 2019, 48(1):154-160.
- [44] Chun H, et al. Progress in Organic Coatings, 2018, 123:282-291.
- [45] Techawinyutham L, et al. Journal of Applied Polymer Science, 2019, 19:47825-47830.

### 本刊声明

近期有不法网站和个人假借本刊名义向广大读者征稿,同时收取高额注册费、审稿费、版面费。本刊特此声明:《工程塑料应用》为中国兵器工业集团第五三研究所(山东非金属材料研究所)主办,杂志社所在地为山东省济南市,本刊唯一投稿网址为 [www.epa1973.net](http://www.epa1973.net),本刊未委托任何机构和个人从事征稿和组稿业务。请广大作者牢记本刊投稿网址,辨别来电属地,不要给个人账户汇款,防止受骗。本刊保留对相关网站和个人追究法律责任的权利。

(工程塑料应用杂志社)