

天然纤维素粉体与蛋白质粉体的制备及其应用

韩晓玉, 王运利

(武汉纺织大学 a. 化学与化工学院; b. 生物质纤维和生态染整湖北省重点实验室,
c. 纺织新材料与先进加工技术国家重点实验室, 湖北 武汉 430200)

摘要: 围绕高效回收、再利用废弃的天然纤维素与天然蛋白质材料,综述采用化学法、机械法、生物法等利用来自纺织工业、农业、造纸业等的废弃纤维制备天然纤维素粉体;利用低钠法、可循环利用法制备天然蛋白质粉体;天然纤维粉体在医学材料、食品及其包装材料、阻燃材料、传感材料,天然蛋白质粉体在生物医学材料、复合材料、添加剂等领域的研究现状;提出天然纤维素、蛋白质材料实现循环利用的理念,认为应该创新更加高效的和低能耗的天然纤维素、蛋白质材料制备方法,并拓展其在化妆品、涂料领域的应用等。

关键词: 纤维素粉体; 蛋白质粉体; 制备; 应用

中图分类号:TS959.9

文献标志码:A

Preparation and application of natural cellulose powder and protein powder

HAN Xiaoyu, WANG Yunli

(a. School of Chemistry and Chemical Engineering; b. Hubei Key Laboratory of Biomass Fiber and Ecological Dyeing and Finishing;
c. State Key Laboratory of New Textile Materials and Advanced Processing Technology, Wuhan Textile University, Wuhan 430200, China)

Abstract: Focusing on the efficient recovery and reuse of waste natural cellulose and natural protein materials, this paper reviewed that the preparation of natural cellulose powder by chemical, mechanical and biological methods using waste fibers from textile industry, agriculture and paper industry. That the natural protein powders were prepared by low sodium method and recycling method was summed up. The research status of natural fiber powders in medical materials, food and its packaging materials, flame retardant materials, sensing materials, and natural protein powders in biomedical materials, composite materials, additives and other fields were summarized. The concept of the recycling of natural cellulose and protein materials is put forward, and it is suggested that more efficient and low energy consumption preparation methods of natural cellulose and protein materials should be innovated, and their applications in cosmetics and coatings should be expanded.

Keywords: cellulose powder; protein powder; preparation; application

天然纤维素与天然蛋白质具有天然可降解性,在环保越来越受重视的今天备受关注;而经过多次加工的天然纤维素与天然蛋白质不能自行降解,造成严重的环境污染,对其进行回收再利用不仅可改善环境,还能创造经济效益。纺织行业作为环境污染大户,存在大量废弃天然纤维素纤维与蛋白质纤维。据统计,全球每年浪费的纺织品高达数百万吨,其中棉花占比40%~50%,特殊时期超过了85%,不仅带来了经济损失,更严重污染了环境^[1-2]。纺织业、农业^[3]和造纸业^[4]等领域均存在天然纤维素与天然蛋白质的浪费问题,因此,如何高效回收、利用废旧天然纤维材料成为研究热点。研究人员致力于天然粉体的制备,以此实现天然纤维素与天然蛋白质的高效回收与利用。20世纪80年代,粉体制备技术逐渐成为各国研究的重点。当材料被加工成粉体时,其性能会发生一系列变化,已知发生变化的

收稿日期:2021-02-19,修回日期:2021-03-12。

基金项目:湖北省中央引导地方科技发展专项基金项目,编号:2020ZYD038。

第一作者简介:韩晓玉(1997—),女,硕士研究生,研究方向为天然纤维粉体的功能化及应用。E-mail:302696898@qq.com。

通信作者简介:王运利(1979—),男,博士,教授,硕士生导师,研究方向为纺织品新型染整加工原理与技术。E-mail:ylwang@wtu.edu.cn。

属性有比表面积、表面能、表面活性、表面与界面性质,以及结晶度,其中2种性能变化最为明显,即比表面积增大和结晶度减小^[3-5]。同时,把废弃天然纤维素与天然蛋白质制作成粉体,有利于高效回收再利用,以及运输与储存。天然纤维素粉体与天然蛋白质粉体的制备方法有生物法^[3]、化学法、机械法以及化学法与机械法相结合的方法^[6-7]。天然纤维素粉体与天然蛋白质粉体被广泛应用于多个领域,因其生物相容性与无毒性,常作为药物载体应用于医学方面^[8-9];因其无毒性,天然纤维素粉体可以用来制作可降解食品级包装袋,并以此减少传统塑料带来的环境污染^[10];天然蛋白质粉体还可以作为人造血管、人造皮肤和人造器官的制备材料造福人类^[11]。

1 天然纤维素粉体和蛋白质粉体的制备

1.1 天然纤维素粉体的制备

天然纤维素粉体的制备方法有3种,分别为化学法、机械法^[6-7]和生物法^[3]。化学法制备粉体有粒径均匀、纯度高和能耗低等优点,但在制备过程中,可能会引入一些有毒物质,并且用到大量化学试剂,对环境造成严重影响。机械法制备粉体虽不会引入有毒物质,但缺点是能耗高且产量小。生物法制备纤维素粉体需要先利用化学法提取纤维素,再利用生物法对纤维素进行处理,最后利用机械法得到纤维素粉体,该法虽减少了化学试剂的应用,但耗时较长,生产工序较繁琐,故应用较少。研究人员发现先用化学法对纤维素进行处理,再利用机械法制备纤维素粉体,能大幅减少制备时间,有效提高产率,因此,工业上更倾向于采用化学法与机械法相结合的方法制备纤维素粉体。

1.1.1 纺织工业废弃纤维素制备纤维素粉体

在纺织工业中,Yuen等^[12]用机械法制备了棉的纳米级超细粉体,该研究先高温焙烘除去棉纤维内部的游离水并消减纤维强度,再把纤维切至1~2 cm,依次用旋转刀片、超声波机以及纳米碰撞机等机械将其粉碎为纳米级超细粉体,所得粉体可以广泛应用于新型生物医学、材料开发和化妆品领域。上述方法中,采用了高温焙烘的方式使纤维强度降低,与化学法中采用化学试剂(如酸)使其水解相比,不仅反应速率低且需要大量热能,所制备粉体产量低、粒径大小不均,因此化学法与机械法相结合比机械法高效。

Gan等^[13]在徐卫林等制备天然纤维粉体的研究基础上进行了创新,先用硫酸处理纤维素纤维,使其强度降低;再用切割机破坏纤维素纤维,加工成约1 mm的短纤维素纤维;最后用研磨机切削纤维素短纤维,加工成为纤维素粉体,所得粒径约为40 μm,且1.5 h能得到约1 kg的纤维素粉体,该方法适用于工业生产。用这种化学与机械相结合的方法制备纤维素粉体,比传统机械法制备纤维素粉体时产量高、能耗小。酸水解初期速率很快,试剂能快速渗入纤维无定形区,使该区域大分子降解,在短时间内有效消减纤维强度,而再向纤维结晶区渗透时很困难,此时将纤维清洗能有效保留其结晶度。基于上述优点,有希望大规模生产,且应用前景广阔。

1.1.2 农业废弃纤维素制备纤维素粉体

玉米壳、甘蔗渣和竹子等含有纤维素的废弃农产品能够制备纤维素粉体。Nishant等^[3]先用化学法从玉米壳中提取纤维素,再将提取的纤维素通过好氧厌氧联合生物处理工艺来制备纤维素粉体,所得粒径为30~45 μm。制备的纤维素粉体与商用纤维素粉体相比并无太大差别,且制备成本比商用纤维素粉体的低,可以替代商用纤维素粉体。该研究用极少量的化学试剂提取玉米壳中的纤维素,之后采用好氧厌氧联合生物处理工艺有效阻止化学试剂的使用,以实现“绿色化学”的目标,但因其产量低、工艺复杂,所以较少应用在工业生产中。

Gan等^[14]用化学法制备纤维素粉体,该实验成功用磷酸代替强酸从甘蔗渣中制备纤维素粉体,从而改善了纤维素粉体的热稳定性。当用强酸制备纤维素粉体时,有可能因为剧烈水解反应对纤维造成严重损伤,从而影响纤维素粉体的结晶度,而用弱酸可以温和地制备纤维素粉体,使所得产品具有可控性。该方法制备的纤维素粉体可用于增强新型复合材料的力学性能,并拓宽其应用领域。

Wang等^[15]先用活性氧、固体碱和过氧化氢对竹子进行预处理,以减少后续机械法的制备时间,再用高压均质法从预处理后的竹子中分离出纤维素粉体。该研究表明,所制备的纤维素粉体具有高结晶

度以及高 zeta 电位,说明其能保持良好的稳定性及分散性,在功能性载体材料、薄膜材料添加剂和抗菌材料等领域有广阔的应用前景。

1.1.3 造纸业废弃纤维素制备纤维素粉体

在造纸业中,纤维素的回收依旧是研究热点。Antti 等^[4]先用乙二醛和催化剂硫酸铝对牛皮板进行浸渍,浸渍后的牛皮板在 110 ℃ 下的烘箱中风干固化,使乙二醛在牛皮纸板上进行更好的化学交联,风干固化后的牛皮板已经脆化,再用维利氏磨粉机将脆化后的牛皮纸磨成纤维素粉体。该工艺比传统工艺产量更高,耗时更少,且首次提出通过固化交联法使纤维素纤维脆化,再用机械法把脆化的纤维素纤维制备为纤维素粉体,为纤维素纤维的回收提供了新的研究方向。

1.2 天然蛋白质粉体的制备

天然蛋白质粉体的加工方法有 2 种,分别为化学法与机械法^[6-7]。化学法制备蛋白质粉体,会引入大量化学物质;机械法制备的蛋白质粉体,存在粉体粒径大小不均匀、产品纯度不够等问题。将化学法与机械法相结合,可制备纯度高、粒径均匀的蛋白质粉体。化学-机械结合法又可以根据其中化学处理方式的不同,细分为低钠法与可循环利用法。

1.2.1 低钠法

Wang 等^[16]在低浓度碳酸钠中煮沸蚕丝,除去丝胶等杂质,该方法称为低钠法。采用低钠法去除丝胶可以避免蚕丝在水解过程中引入不必要的化学杂质,得到较纯的蚕丝蛋白,且蚕丝在低浓度碱中稳定性好,不易被损伤;最终用冷冻干燥法得到蛋白质粉体。相比传统的水解法,低钠法具有操作简单、溶剂较环保和低成本的特点,但此类化学-机械结合法中的机械法同样影响产率,该研究所用的机械法(冷冻干燥法)相比传统干燥法能耗更高,从而使该方法制备的蛋白质粉体成本上升,收益降低,因而不能被广泛应用。把冷冻干燥法进行改良能够降低能耗较高的问题。慈美玉等^[17]用低钠法制备蛋白质粉体,先把生蚕丝放入碳酸钠溶液中脱胶、烘干,再用球磨机磨成蛋白质粉体。与上述所用的方法不同的是,制备蛋白质粉体时,机械法采用粉碎机与球磨机进行粉碎,而不是冷冻干燥法。低钠法制备蛋白质粉体可以用于提高聚氨酯膜的力学性能。此外,蛋白质粉体有很强的吸水性,如果长时间放置在空气中会有结块现象,需要密封保存。

1.2.2 可循环利用法

Samie 等^[18]在低钠法除去丝胶的基础上,以水性胆碱基氢氧化物离子溶液溶解蚕丝蛋白,把上述离子溶液放入甲醇中,通过离心使蛋白质粉体与离子溶液和甲醇溶液的混合液分离,通过旋转蒸发器除去甲醇,以此实现离子溶液在溶解蚕丝后的回收,所得离子溶液可用于下一次溶解蚕丝,且经过多次循环使用后,其对蚕丝的溶解力并没有减弱。该方法最终所得蛋白质粉体质量为原丝绸质量的 80%。在环保与可循环利用日益被重视的今天,采用该法制备蛋白质粉体不仅可循环利用,环保生产,且操作简单,能耗低,产量高;同时,所得粉体用途广泛,如制造以蛋白质为基底的支架等。

2 天然纤维素粉体和蛋白质粉体的应用

2.1 天然纤维素粉体的应用

2.1.1 医学方面的应用

Yuen 等^[12]用机械法制备了纤维素粉体。该方法所得的纤维素粉末可以用做新型医学材料。纤维素粉体作为新型生物医学材料,不仅是阻止过敏源和鼻黏膜相结合的天然屏障,还可降低虫敏感儿童的过敏症状;又因其为天然纤维素粉体,能被孕妇及特殊人群使用^[8]。Voicu 等^[19]研究人员将矿物黏结剂粉和新型生物医学材料纤维素粉体的复合材料与硅酸盐水泥粉混合后,通过 28 d 的硬化处理并应用于牙科治疗中。该研究证明纤维素粉体对硅酸盐水泥粉的硬化有促进作用,且该混合物不仅无细胞毒性,还具有维持细胞活性与增殖力的性能。

2.1.2 食品及其包装材料方面的应用

目前的食品包装材料大多是不可降解的,而可降解食品包装袋能够大大缓解环境污染问题。纤维素既无毒性又是可再生资源,是制作可降解食品包装袋的良好材料。Wang 等^[15]用化学法与机械法相

结合的方法制备纤维素粉末,即化学法处理竹子,高压均质法(机械法)从中提取纤维素粉体。丁婷婷等^[10]研究人员用上述方法制备纤维素粉末,以此来制备纤维素-羧甲基纤维复合膜,从而改善纯羧甲基纤维素膜硬度大、极易吸湿的问题。由于该复合膜具有良好的天然性与可降解性,达到食品级要求,因此可以用作食品包装袋。王亚静^[20]从废弃的绿豆皮中提取纤维素粉体,再将其与浓缩乳清蛋白混合制成可食用膜,该膜有良好的机械性能、可食用性及可降解性,故可作为食品包装材料。在白色污染日益严重的今天,该研究方向应用前景广阔。

玉米须由于口感较差且没有食用价值而被丢弃,其实它含有大量的膳食纤维,有较高的抗氧化性。Castillo等^[21]研究人员用微波干燥法把玉米须制成玉米须粉并加入到牛肉饼中,既避免了玉米须的浪费,又解决了不含膳食纤维的纯牛肉饼带来的健康问题。

2.1.3 阻燃材料方面的应用

Gan等^[13]用化学法与机械法相结合的方法制备纤维素粉体,先用化学法(硫酸)处理纤维素纤维,再用机械法(切割机和研磨机)得到纤维素粉体。该方法制备的纤维素粉体可以替代膨胀阻燃体系中的碳源。冯政玉^[22]用天然纤维素粉体代替传统膨胀阻燃体系中的碳源季戊四醇,不仅改变了传统膨胀阻燃体系中碳源用量大以及相容性差的缺点,并且增加了膨胀碳层数,降低了阻燃剂对阻燃体系中力学性能的影响。纤维素粉体是绿色可再生资源,用它代替化学试剂季戊四醇能够达到环保目的。

2.1.4 传感材料方面的应用

纳米氧化锌(ZnO)的紫外线(UV)传感器能用简单且成本低廉的2步化学法来制作,所以备受研究人员的关注。Gimenez等^[23]通过研究发现纳米ZnO的UV传感活性可以通过与纤维素聚合物的合成而得到显著增强,之后,Sahoo等^[24]探究了在水化学法及3种不同的温度下,纳米ZnO在纤维素粉末表面生长的情况。该实验表明,在100℃下,会有晶须状纳米氧化锌生长在纤维素粉末上,其整齐又细密的排列使整个体系有较大的比表面积,由此得到的氧化锌-纤维素纳米粉末可以用于制造有超高开关频率的UV传感器。

2.2 天然蛋白质粉体的应用

2.2.1 生物医学材料方面的应用

蛋白质粉体由于其良好的生物降解与生物相容性被广泛应用于生物医学材料方面。Wang等^[25]用丝素蛋白粉体和聚丙烯酰胺制作新型水凝胶,该实验提高了水凝胶的机械性能,使其具有黏合性和自愈性,在伤口敷料以及透明人造皮肤等应用中有广阔应用前景。蛋白质粉体在小口径纺织基人造血管的研制上也有巨大应用潜力,Zhuang等^[11]制备了聚氨酯-蛋白质粉末复合膜,该复合膜比生物聚氨酯膜具有更好的生物相容性。总之,蛋白质粉体能够加强生物材料的生物相容性,使其应用在生物医学材料方面时,尽可能少甚至完全不产生细胞毒性,在人造皮肤、人造血管甚至人造器官的发展中有巨大的应用空间。

蛋白质粉体由于其生物相容性与无毒性,常常被作为载药的基材使用。现今最有效的治疗慢性呼吸系统疾病的方法是吸入抗生素来治疗,但需要给局部患处施以大剂量的抗生素,用蛋白质粉体为载药基材实现了局部大剂量的抗生素供给;并且可以提高干粉颗粒药物的有效载荷以及沉积效率,以及良好的生物降解性和无免疫原性,所以Liu等^[9]研究人员把蛋白质粉体应用于慢性呼吸系统疾病的辅助治疗。

2.2.2 复合材料方面的应用

Nakayama等^[26]用天然蛋白质粉体和可生物降解聚丁烯二甲酸酯-聚乳酸酯的混合物熔融混合在一起,以此制备新型天然高分子材料。该高分子有着较好的加工性能,蛋白质粉体在混合物中也分布较均匀。该研究提供了制造天然-合成复合聚合物材料的新方向。Remadevi等^[27]采用本体合成法,以蚕丝纤维粉体、羊毛纤维粉体、氧化石墨烯和催化剂镍为原料制作导电复合材料,该复合材料经过碳化后获得较高的比表面积与孔容。由于蛋白质粉体与石墨烯表面的含氧基团产生了强烈的相互作用,因此使得天然蛋白质纤维粉体在导电复合材料的应用中有广阔应用前景。

2.2.3 添加剂方面的应用

蛋白质粉体作为透气剂加入到涂料中并应用在衣物上,可改善其透气性。涂料应用到织物上最大

的缺点是透气性差,Zhu等^[28]实验人员在防止热辐射的防护涂料中加入丝素蛋白质粉体,使防护服对水蒸气和空气的渗透性提高,为涂层整理后的织物提供了改善其透气性的可能性。蛋白质粉体经过处理后也可作为除垢剂使用,并且能有效抑制水中碳酸钙污垢的形成。丁凡^[29]从制革过程中的固体废弃物中提取蛋白质粉体,将其经过酶法水解和改性处理后得到能够抑制碳酸钙生成的抑垢剂,可有效抑制水中污垢。

3 结论与展望

从废旧织物、农业废料以及其他废弃材料中获取应用前景较好的纤维素粉体与蛋白质粉体,实现了废物循环利用的环保理念;纤维素粉体与蛋白质粉体的生物降解性、生物相容性也被广泛应用于医学及材料方面;但是,纤维素粉体与蛋白质粉体的制备效率低,且纤维素常用制备方法要用到大量化学试剂(一般为强酸或强碱),反应程度不好掌控;蛋白质粉体制备方法中传统干燥法产率低,而从溶剂中离心分离容易产生团聚。基于这些问题,科研人员应根据其自身特点创新更加高效及低能耗的制备方法,如可选用弱酸使反应过程温和。随着科研人员对可再生的天然蛋白质粉体与天然纤维素粉体的不断研究,并开发更多新的应用领域,如化妆品、涂料方面。在不久的将来,天然蛋白质粉体与天然纤维素粉体会为人类创造出更大的社会价值与经济价值。

参考文献(References):

- [1] ESTEVE-TURRILLAS F A, GUARDIA M D L. Environmental impact of recover cotton in textile industry[J]. *Resources, Conservation & Recycling*, 2017, 116: 107–115.
- [2] GUSTAV S, GREG M. Environmental impact of textile reuse and recycling: a review[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 184: 353–365.
- [3] NISHANT D K, MAGESHWARANV, PRASHANT G P, et al. Synthesis and characterization of microcrystalline cellulose powder from corn huskfibre using bio-chemical route[J]. *Cellulose*, 2017, 24(12): 5355–5369.
- [4] ANTTI K, HANNES O. Manufacture of fine cellulose powder from chemically crosslinked kraft pulp sheets using dry milling[J]. *Powder Technology*, 2020, 361: 642–650.
- [5] JIANG S, JI L. Damping properties and micro-morphology of textile waste rubber powder-AO 2246 composites[J]. *Journal of Composite Materials*, 2016, 50(7): 963–970.
- [6] 鄯冰玉, 唐亚丽, 卢立新, 等. 纳米纤维素在可降解包装材料中的应用[J]. *包装工程*, 2017, 38(1): 19–25.
- [7] 何孝清. 纳米纤维素的制备及其在造纸领域的应用[J]. *中国造纸*, 2019, 38(10): 68–74.
- [8] MANUYAKORN W, KLANGKALYA N, KAMCHASATIAN W, et al. Efficacy of nasal cellulose powder in the symptomatic treatment of allergic rhinitis: a randomized, double-blind, placebo-controlled trial[J]. *Allergy, Asthma & Immunology Research*, 2017, 9(5): 446–452.
- [9] LIU C, LIN L, HUANG Z, et al. Novel inhalable ciprofloxacin dry powders for bronchiectasis therapy: mannitol-silk fibroin binary microparticles with high-payload and improved aerosolized properties[J]. *AAPS Pharm Sci Tech*, 2019, 20(2): 85.
- [10] 丁婷婷, 李倩, 金贞福, 等. 纳米化竹粉/羧甲基纤维素复合膜材料制备及性能研究[J]. *林业工程学报*, 2017, 2(5): 90–94.
- [11] ZHUANG Y, ZHANG Q, FENG J, et al. The effect of native silk fibroin powder on the physical properties and biocompatibility of biomedical polyurethane membrane[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part H: Journal of Engineering in Medicine*, 2017, 231(4): 337–346.
- [12] YUEN C W M, CHENG Y F, LI Y, et al. Preparation and characterisation of nano-scale cotton powder[J]. *Journal of Textile Institute*, 2009, 100(2): 165–172.
- [13] GAN L, XIAO Z, WANG A, et al. Efficient preparation of ultrafine powder from waste cellulose by physicochemical method[J]. *Powder Technology*, 2021, 379: 478–484.
- [14] GAN I, CHOW W S. Synthesis of phosphoric acid-treated sugarcane bagasse cellulose nanocrystal and its thermal properties enhancement for poly(lactic acid) nanocomposites[J]. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 2019, 32(5): 619–634.

- [15] WANG H, ZUO M, DING N, et al. Preparation of nanocellulose with high-pressure homogenization from pretreated biomass with cooking with active oxygen and solid alkali[J]. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 2019, 7(10): 9378–9386.
- [16] WANG R, PU D, DONG Y, et al. Silk fibroin powder prepared by nontoxic low-sodium salt system[J]. *Materials Letters*, 2017, 206: 5–8.
- [17] 慈美玉, 刘杰, 张瑞, 等. 热塑性聚氨酯/蚕丝蛋白粉体共混膜的制备及性能[J]. *纺织高校基础科学学报*, 2019, 32(2): 186–189.
- [18] SAMIE M, MUHAMMAD N, YAMEEN M A, et al. Aqueous solution of a basic ionic liquid: a perspective solvent for extraction and regeneration of silk powder from bombyx mori silk cocoons[J]. *Journal of Polymers and the Environment*, 2020, 28(2): 657–667.
- [19] VOICU G, JINGA S I, DROSU B G, et al. Improvement of silicate cement properties with bacterial cellulose powder addition for applications in dentistry[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2017, 174: 160–170.
- [20] 王亚静. 绿豆皮纳米纤维素的制备及其在可食膜中的应用[D]. 长春: 吉林大学, 2016.
- [21] CASTILLO L O, AZARES G F, ALMONTE C, et al. Effects of incorporation of microwave: dried corn silk (stigma maydis) powder on the quality and stability of beef patties[J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2020, 1529(3): 032064.
- [22] 冯政玉. 竹粉纤维素微晶表面改性及其对环氧树脂和聚乳酸阻燃性能的影响[D]. 北京: 北京化工大学, 2019.
- [23] GIMENEZ A J, YÁÑEZ-LIMÓN J M, SEMINARIO J M. ZnO–cellulose composite for UV sensing[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2012, 13(4): 1301–1306.
- [24] SAHOO K, BISWAS A, NAYAK J. Effect of synthesis temperature on the UV sensing properties of ZnO–cellulose nanocomposite powder[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2017, 267: 99–105.
- [25] WANG C, DU Y, CHEN B, et al. A novel highly stretchable, adhesive and self-healing silk fibroin powder-based hydrogel containing dual-network structure[J]. *Materials Letters*, 2019, 252: 126–129.
- [26] NAKAYAMA D, WU F, MOHANTY A K, et al. Biodegradable composites developed from PBAT/PLA binary blends and silk powder: compatibilization and performance evaluation[J]. *ACS Omega*, 2018, 3(10): 12412–12421.
- [27] REMADEVI R, AL FARUQUE M A, ZHANG J, et al. Electrically conductive honeycomb structured graphene composites from natural protein fibre waste[J]. *Materials Letters*, 2020, 264: 127311.
- [28] ZHU F L, FENG Q Q. Preparation, thermal properties and permeabilities of aluminum-coated fabrics destined for thermal radiation protective clothing[J]. *Fire and Materials*, 2020, 44(6): 844–853.
- [29] 丁凡. 利用含铬革屑制备胶原蛋白粉及其在阻垢剂中的应用[D]. 烟台: 烟台大学, 2020.