

测试装置和方法条件对薄膜耐穿刺性的影响

陈欣¹, 程香玉¹, 周加彦², 高翠玲², 贺祥珂², 于佳佳¹

(1. 济南兰光机电技术有限公司, 济南 250031; 2. 山东省产品质量检验研究院, 济南 250102)

摘要: **目的** 为了评价测试装置和方法条件对薄膜耐穿刺性的影响, 对测试装置的材质、尺寸精确性及测试条件等因素进行针对性分析。**方法** 利用显微镜对比国内外不同批次及材质穿刺针的尺寸和尖端结构, 并依次对均匀稳定的薄膜进行穿刺力测试。**结果** 相比直径和半径偏差均低于 ± 0.05 mm的穿刺针, 1#, 4#, 5#, 6#, 7#穿刺针的穿刺力存在明显波动; 尖端半球具有较差圆弧度的穿刺针试验结果标准偏差较大, 重复性较差; 相比于合金钢材质的穿刺针, 高速钢制造的穿刺针穿刺力平行性较好, 针头无弯曲变形、无穿刺力递增等现象; 使用上下环直径不一致的固定环测试所得穿刺力结果的平行性较差。**结论** 采用具有较好圆弧度、不易变形且针头尺寸精准的穿刺针, 并配合使用上下环直径一致且合理的固定环进行测试, 可准确反映薄膜的耐穿刺性。

关键词: 薄膜; 耐穿刺性; 穿刺针; 固定环; 圆弧度; 刚性; 测试方法

中图分类号: O484.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2019)09-0053-06

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2019.09.009

Effects of Testing Device and Method Conditions on Puncture Resistance of Film

CHEN Xin¹, CHENG Xiang-yu¹, ZHOU Jia-yan², GAO Cui-ling², HE Xiang-ke², YU Jia-jia¹

(1. Labthink Instruments Co., Ltd., Jinan 250031, China;

2. Shandong Institute for Product Quality Inspection, Jinan 250102, China)

ABSTRACT: The paper aims to research the influences of testing device and method conditions on the puncture resistance of film and analyze factors such as material and dimensional accuracy of the testing device and conditions of test. The size and tip structure of puncture needles of different batches and materials at home and abroad were compared by microscope, and the puncture force of uniform and stable films were tested in turn. Compared with puncture needles which diameter and radius deviations were less than ± 0.05 mm, the puncture force of puncture needles 1#, 4#, 5#, 6#, 7# fluctuated obviously. The needle tips with poor arc had large standard deviation and poor repeatability. Compared with the puncture needles of alloy steel, the puncture force of puncture needles with high-speed steel had better parallelism, force value was not increasing and the needle did not bend. The parallelism of puncture force which using upper and lower fixed rings with different diameters was poor. By using a puncture needle with good arc, non-deformable and accurate needle size, and together with consistent upper and lower ring diameters and reasonable fixed ring for testing, the film puncture resistance can be reflected accurately.

KEY WORDS: film; puncture resistance; puncture needle; fixed ring; arc; rigidity; test method

食品、药品、电子产品等行业常用的 BOPE, BOPA, PP 等材质的塑料薄膜包装应具有较好的耐穿

刺性^[1-3]。薄膜耐穿刺性反映薄膜抵抗外界与内部尖锐物刺穿的能力, 是确保包装成品完整性与密封性

收稿日期: 2019-01-14

基金项目: 山东省材料化学安全检测技术重点实验室开放课题 (2018SDCLHX006)

作者简介: 陈欣 (1984—), 女, 硕士, 高工, 主要研究方向为包装材料与内容物相容性。

至关重要的力学性能^[4]。特别在锂电池隔膜应用领域,不具备耐穿刺性的隔膜极易导致电池短路^[5-6],因此,国内外一些研究机构与生产企业专注于原料成分^[7-8]、基底材料^[9]与加工工艺^[10-12]等方面的研究以求改善薄膜的穿刺性能。

薄膜的耐穿刺性一般通过使用特定的穿刺试验装置对其进行穿刺力的测试来表征^[13],穿刺力的大小不仅取决于薄膜材质、加工条件及存放条件等根本性因素^[14-15],而且也与测试过程中的准确性与精密性有关。为了分析测试装置的精确性及测试方法、条件的选用对耐穿刺性的影响,文中拟对测试过程中穿刺针、样品固定环等材质、尺寸精确性以及测试条件等因素进行针对性的验证分析及综合评价。

1 试验

1.1 样品

采用国内专业企业生产的 BOPP21 薄膜(厚度为 21 μm)与 BOPET20 薄膜(厚度为 20 μm),该 2 种薄膜厚度均匀(厚度偏差低于 $\pm 2\%$)且样品完好。

1.2 方法

目前,因有关塑料薄膜和薄片耐穿刺性测试方法的标准还未正式发布,故该研究依据 GB/T 10004—2008《包装用塑料复合膜、袋干法复合、挤出复合》中所要求的试验方法进行相关试验。

1.3 试验设备与配件

采用 Labthink 生产的 XLW(EC)智能电子拉力试验机进行穿刺力测试,其中配套使用的穿刺针与试样固定环结构见图 1。

按照参考标准的要求,穿刺针应为钢材质,针头直径为 1.0 mm,尖端为半球状且半径为 0.50 mm,应垂直于试样固定环并位于试样中心位置的正上方。试样固定环为金属材质,内径为 50.0 mm 且可确保所夹

持试样的平整。

11 根穿刺用钢针的具体钢材型号不同,将其依次编号。1 $\#$, 2 $\#$ 与 3 $\#$ 为德国进口且钢材型号相同的穿刺针,4 $\#$ 为美国进口的穿刺针,5 $\#$ 至 11 $\#$ 均为国内加工且采用不同钢材型号的穿刺针,其中 5 $\#$, 6 $\#$ 与 7 $\#$ 为相同碳素钢型号,8 $\#$ 与 9 $\#$ 为相同合金钢型号,10 $\#$ 与 11 $\#$ 为相同变速钢型号。

2 结果与讨论

该研究以穿刺力试验结果为评估依据,对试验相关装置及配件的尺寸精确性、材质等影响因素进行验证与分析。

2.1 穿刺针直径与尖端半径

通常穿刺针的粗细程度以及针头的尖端半径大小会影响刺穿薄膜时所施加的力。为了验证穿刺针直径和尖端半径分别与穿刺力的关系,采用 10 倍光学显微镜对每根穿刺针进行了尺寸测量(具体的显微镜细节详见图 2,尺寸数据见表 1),图 2 中穿刺针截面顶端所绘制的圆形可反映针尖的尖端半球圆弧程度及尖端半径,针头截面上下 2 条平行线的距离为针头直径,即穿刺针直径。以 BOPP21 薄膜样品为测试样品验证每根穿刺针的穿刺力,见表 1。

结合图 2 与表 1 可以看出,2 $\#$, 3 $\#$, 4 $\#$, 8 $\#$ 与 9 $\#$ 的穿刺针直径相同,穿刺力随着尖端半径的增大而增大,同样的现象也可从针头直径相同的 1 $\#$ 与 5 $\#$ 中发现。同时可发现,1 $\#$, 6 $\#$ 与 7 $\#$ 穿刺针针头直径的偏差与尖端半径的偏差均较大,会导致穿刺力出现明显增大的现象。

针头直径偏差与尖端半径偏差范围的正确选取关乎穿刺力评价的准确性及比较的有效性。按照可允许薄膜穿刺力在 $\pm 10\%$ 偏差范围内波动的要求,去除 1 $\#$, 6 $\#$ 与 7 $\#$ 穿刺针的测试数据,计算得到剩余 8 根穿刺针穿刺力的最大偏差为 8% (各穿刺力结果与穿刺力平均值的最大差值除以平均值即为最大偏差),即针头直径应在 (1.00 ± 0.05) mm 范围内,且尖端半径在 (0.50 ± 0.05) mm 内。如果对穿刺力波动范围的要求为 $\pm 5\%$,则要去掉 1 $\#$, 4 $\#$, 5 $\#$, 6 $\#$ 与 7 $\#$ 穿刺针的测试结果,随后计算穿刺力的最大偏差为 5%,即针头直径和尖端半径应分别满足 ± 0.05 , ± 0.04 mm 的偏差要求。

2.2 穿刺针的圆弧度

仅利用肉眼辨析穿刺针尖端半球的圆弧度极易造成试验误差。为了验证圆弧度对测试效果的影响,采用显微镜分别对 5 $\#$ 与 10 $\#$ 穿刺针进行尺寸测试与针尖半球形状观察。由图 2 可以看出,5 $\#$ 穿刺针尖端半球有明显的凸起,已不再是规则的圆形,即圆弧度较

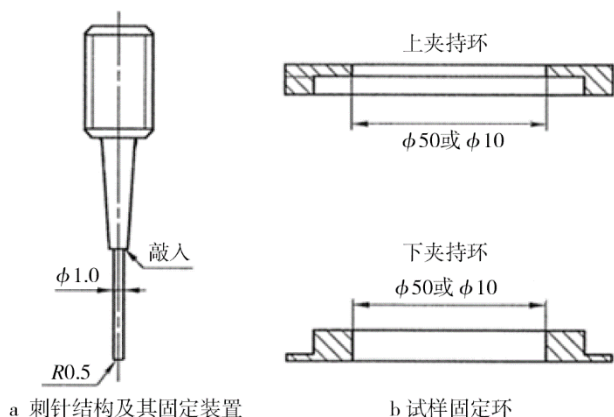


图 1 耐穿刺性试验装置示意
Fig.1 Drawing of test device for puncture resistance

差；10#穿刺针尖端半球具有规则的圆球形，具有较好的圆弧度。随后分别用这2根穿刺针对BOPET20薄膜样品进行穿刺力测试，测试结果见表2。

观察表2中发现，5#穿刺针的5次平行测试结果之间有较大偏差，标准偏差为1.21 N，而10#穿刺针各个测试结果之间差异较小，标准偏差仅为0.276 N。可知，圆弧度的差异不仅会导致测试结果出现偏差，也会导致测试数据之间的平行性较低，使得穿刺力结果的重复性与准确性较差。综上，不仅需对穿刺针针头直径与尖端半径有严格要求，同时还应要求尖端半

球的圆弧度呈现完美的球形，因此，在试验前需采用10倍以上光学显微镜对穿刺针的尺寸与圆弧度进行严格检验。

2.3 穿刺针的刚性

虽然穿刺针的材质均为钢材质，但是不同型号钢材穿刺针的刚性优劣性与易形变程度不一样。如果穿刺针在试验过程中发生形变，穿刺力测试结果的准确度及重复性是否会受到明显影响，需要进行针对性的验证分析。选用具有不同刚性的合金钢（8#与9#穿刺

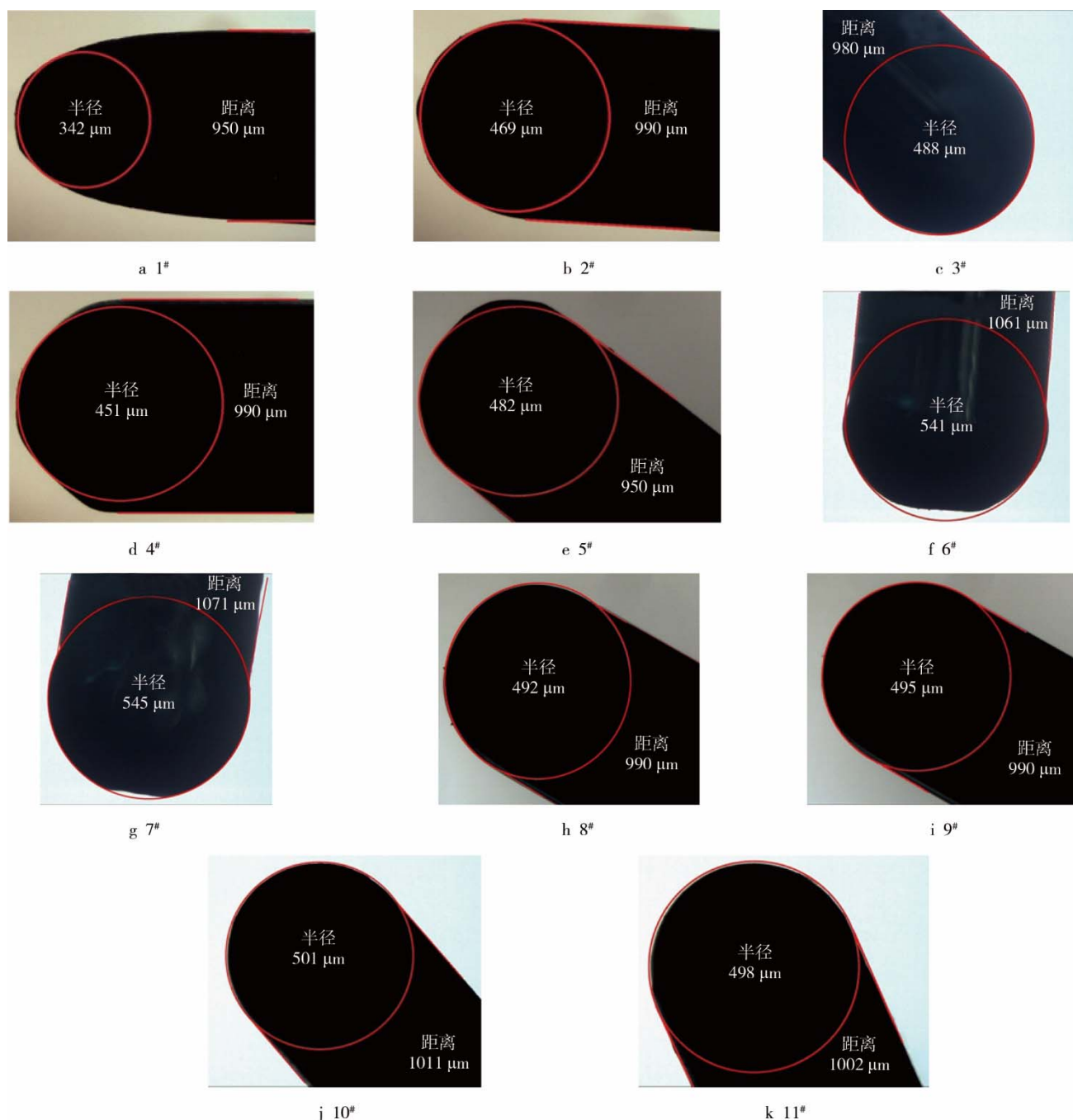


图2 不同穿刺针的显微镜图片

Fig.2 Microscopic charts of different puncture needles

表 1 穿刺针尺寸及相应穿刺力
Tab.1 Puncture needle size and their puncture force

穿刺针编号	标准直径/mm	针头直径/mm	直径偏差/mm	标准半径/mm	尖端半径/mm	半径偏差/mm	穿刺力/N
1 [#]	1.00	0.95	-0.05	0.50	0.342	-0.158	5.76
2 [#]		0.99	-0.01		0.469	-0.031	8.40
3 [#]		0.99	-0.01		0.488	-0.012	8.51
4 [#]		0.99	-0.01		0.451	-0.049	8.15
5 [#]		0.95	-0.05		0.482	-0.018	9.53
6 [#]		1.06	0.06		0.541	0.041	12.76
7 [#]		1.07	0.07		0.545	0.045	12.77
8 [#]		0.99	-0.01		0.492	-0.008	8.73
9 [#]		0.99	-0.01		0.495	-0.005	8.90
10 [#]		1.01	0.01		0.501	0.001	9.27
11 [#]		1.00	0.00		0.498	-0.002	9.05

表 2 不同针尖圆弧度穿刺针的试验结果对比
Tab.2 Puncture force of puncture needle with different tip arcs

编号	直径/mm	半径/mm	穿刺力/N						试验结果 标准偏差/N
			平行测试 结果1	平行测试 结果2	平行测试 结果3	平行测试 结果4	平行测试 结果5	平均值	
5 [#]	0.95	0.482	10.92	11.06	8.89	10.74	8.54	10.03	1.21
10 [#]	1.01	0.501	10.35	10.98	10.5	10.27	10.57	10.53	0.276

针)和高速钢(10[#]与11[#]穿刺针)分别制作穿刺针,并依次进行显微镜尺寸检验(如图2所示),确保每根穿刺针的针头直径、尖端半径与圆弧度符合指标,再分别对BOPET20薄膜样品进行多次平行性穿刺力试验并进行对比,测试结果详见表3。

结合图2及表3可发现参与验证的4根穿刺针尖端半球呈完好的圆球形,且针头直径与顶端半径偏差在±0.01 mm内,可有效进行穿刺力对比试验。分析表3数据可知,同为合金钢材质的8[#]与9[#]穿刺针5次平行测试的穿刺力逐渐增大,平行试验的标准偏差均大于1.0 N。采用高速钢材质制成的10[#]与11[#]穿刺针则无上述现象,各平行试验结果之间的标准偏差低于0.3 N,试验的重复性与准确性明显较为优异。造成上述现象与结果的原因主要是合金钢材质的穿刺针易发生形变,每次对具有较大穿刺力的薄膜样品进行穿刺时,针尖逐渐弯曲,造成穿刺力趋于增大。综

上所述,为确保穿刺力试验的准确性与重复性,仅要求穿刺针为钢材质是不够严格的,应进一步采用具有较好刚性、不易造成形变的钢材型号。

2.4 试样固定环的直径

现今,较多行业在研究薄膜穿刺力时采用试样固定环的尺寸与结构并不完全相同。选取3种不同尺寸与结构的试样固定环,分别以BOPET20与BOPP21薄膜为试验样品,再利用10[#]穿刺针依次进行不同试样固定环的验证试验。具体试验结果见表4。

对比表4中BOPET20薄膜的穿刺力发现,上下环直径均为50 mm的固定环所对应的穿刺力及5次平行试验结果的标准偏差均为最小,上下环直径均为45 mm的固定环对应的穿刺力最大,仅上环直径为50 mm的固定环对应的标准偏差最高。同样,BOPP21薄膜穿刺力测试结果也出现了上述现象与规律。据此初

表 3 不同钢材型号穿刺的试验结果对比
Tab.3 Puncture force of puncture needle with different steel

材质	编号	直径/mm	半径/mm	穿刺力/N						试验结果 标准偏差/N
				第1次	第2次	第3次	第4次	第5次	平均值	
合金钢	8 [#]	0.99	0.492	11.21	11.87	13.06	13.34	13.48	12.59	1
	9 [#]	0.99	0.495	11.04	11.79	12.47	12.78	13.71	12.36	1.01
高速钢	10 [#]	1.01	0.501	10.35	10.98	10.5	10.27	10.57	10.53	0.276
	11 [#]	1	0.498	10.38	11.05	10.73	10.86	10.69	10.74	0.246

表 4 不同类型试样固定环相应穿刺力的结果对比
Tab.4 Puncture force of fixed rings with different structures

固定环 类型	试样	穿刺力/N					平均值	试验结果 标准偏差/N
		平行测试 结果1	平行测试 结果2	平行测试 结果3	平行测试 结果4	平行测试 结果5		
仅上环直径 为50 mm	PET20	11.76	10.69	11.45	9.41	11.31	10.92	0.93
	BOPP21	10.87	9.46	9.05	10.83	9.54	9.95	0.84
上下环直径 均为50 mm	PET20	10.35	10.98	10.5	10.27	10.57	10.53	0.28
	BOPP21	8.94	9.68	9.24	9.51	8.97	9.27	0.33
上下环直径 均为45 mm	PET20	11.82	11.09	11.27	10.89	10.49	11.11	0.49
	BOPP21	9.87	10.09	9.57	10.43	10.62	10.12	0.42

步分析，上下环直径较小时，薄膜样品受到固定环的夹持力较大，从而造成穿刺力偏大，同时也会导致测试结果重复性略差；上下环直径不一致时，固定环夹持薄膜样品就不够紧致，易引起样品轻微变形或松脱，从而导致平行测试的结果重复性较差。综上所述，上下环直径均为 50 mm 是保证穿刺力结果具有较高精确性与重复性最为理想的固定环结构。

3 结语

穿刺针针头直径偏差及顶端半径偏差越小，引起的穿刺力偏差就越小。穿刺针自身具有不易形变的较好刚性，针尖尖端半球呈现完好的圆球形，并配合采用上下环直径均为 50 mm 的试样固定环，则可很好地保证穿刺力结果的重复性与准确性。测试装置与方法条件虽不能改善薄膜耐穿刺性，但是合乎标准的方法条件与更加精密严格的测试装置可有效降低试验误差，可在薄膜生产、应用以及检测领域内形成精准的一致性评价。

参考文献：

[1] 杨文忠, 伍杰锋, 冯润财, 等. 聚乙烯薄膜加工方法及 BOPE 新产品[J]. 塑料工业, 2013, 41(3): 116—119.
YANG Wen-zhong, WU Jie-feng, FENG Run-cai, et al. Process of Polyethylene Film and BOPE New Product[J]. China Plastics Industry, 2013, 41(3): 116—119.

[2] 冯润财, 伍杰锋, 张广强, 等. 双向拉伸聚乙烯薄膜的研制[J]. 塑料工业, 2013, 41(4): 102—108.
FENG Run-cai, WU Jie-feng, ZHANG Guang-qiang, et al. Development of Biaxial Oriented Polyethylene Film[J]. China Plastics Industry, 2013, 41(4): 102—108.

[3] 曾碧榕, 陈国荣, 王荣贵, 等. 双向拉伸多层共挤复合薄膜的生产制备和进展[J]. 高分子材料科学与工程, 2017, 33(5): 184—190.
ZENG Bi-rong, CHEN Guo-rong, WANG Rong-gui, et

al. Preparation and Development of Multilayer Coextrusion Composite Film by Biaxially Orientation [J]. Polymer Materials Science and Engineering, 2017, 33(5): 184—190.

[4] 刘东芳, 陈欣, 于佳佳. 镀铝复合膜包装与方便面面饼相容性的研究及分析[J]. 包装工程, 2013, 34(19): 29—33.
LIU Dong-fang, CHEN Xin, YU Jia-jia. Compatibility between Aluminum Composite Film and Instant Noodle[J]. Packaging Engineering, 2013, 34(19): 29—33.

[5] 江纬, 林宇, 曾令兴, 等. 锂电池隔膜的性能参数与测试方法[J]. 绝缘材料, 2018, 51(3): 7—14.
JIANG Wei, LIN Yu, ZENG Ling-xing, et al. Performance Parameters and Their Measurement for Lithium-ion Battery Separators[J]. Insulating Materials, 2018, 51(3): 7—14.

[6] HUANG X S. Separator Technologies for Lithium-ion Batteries[J]. Journal of Solid State Electrochemistry, 2011, 15(4): 649—662.

[7] 周英. 线型聚乙烯薄膜专用树脂的生产与应用[J]. 炼油化工, 2015, 26(6): 7—9.
ZHOU Ying. Production and Application of Special LLDPE Resin for Film[J]. Refining and Chemical Industry, 2015, 26(6): 7—9.

[8] 王耀松, 赵黎明, 吴艳清. 壳聚糖/乳清蛋白复合可食性膜的物理性能研究[J]. 食品与机械, 2015, 31(6): 7—10.
WANG Yao-song, ZHAO Li-ming, WU Yan-qing. Physical Properties of Edible Composite Films Based on Chitosan and Whey Protein Isolate[J]. Food and Machinery, 2015, 31(6): 7—10.

[9] HAMDİ M, PUOPOLO M, PHAM H, et al. Experimental and FEM Analysis of Scratch Behavior on Polypropylene Thin Films: Effect of Film Orientation and Ethylene Monomer Content[J]. Tribology International, 2016, 103: 412—422.

[10] 蔡传伦, 张晓红, 赖金梅, 等. 抗穿刺线型低密度聚乙烯薄膜的制备[J]. 石油化工, 2014, 43(5): 566—570.
CAI Chuan-lun, ZHANG Xiao-hong, LAI Jin-mei, et al. Preparation and Characterization of Puncture-resistant

- Linear Low Density Polyethylene Film[J]. Petrochemical Technology, 2014, 43(5): 566—570.
- [11] 周皖岳, 张江伟, 姚汪兵, 等. 锂离子电池隔膜物化性能变化趋势研究[J]. 电源技术, 2015, 39(9): 1835—1837.
ZHOU Wan-yue, ZHANG Jiang-wei, YAO Wang-bing, et al. Study on Changing Trend of Separators Physicochemical Performance in Li-ion Battery[J]. Chinese Journal of Power Sources, 2015, 39(9): 1835—1837.
- [12] 运新华, 侯秀红, 张玉梅, 等. 溶胀对 UHMWPE 锂电池隔膜性能的影响[J]. 塑料工业, 2016, 44(7): 147—152.
YUN Xin-hua, HONG Xiu-hong, ZHANG Yu-mei, et al. Effect of UHMWPE Swelling on Properties of Lithium Battery Separator[J]. China Plastics Industry, 2016, 44(7): 147—152.
- [13] GB/T 10004—2008, 包装用塑料复合膜、袋干法复合、挤出复合[S].
GB/T 10004—2008, Plastic Laminated Films and Pouches for Packaging-dry Lamination and Extrusion Lamination[S].
- [14] 王彦荣, 景政红. 1-己烯共聚与 1-丁烯共聚 LLDPE 的性能对比[J]. 合成树脂及塑料, 2010, 27(1): 71—74.
WANG Yan-rong, JING Zheng-hong. The Contrast between Properties of 1-hexene and 1-butene LLDPE [J]. China Synthetic Resin and Plastics, 2010, 27(1): 71—74.
- [15] 魏耀富, 程前, 蒋晗. 基底材料和残余预张应力对低密度聚乙烯 (LDPE) 薄膜抗刮擦性能影响的实验研究[J]. 实验力学, 2018, 33(1): 24—30.
WEI Yao-fu, CHENG Qian, JIANG Han. Experimental Study of the Effect of Substrate Material and Residual Pretension Stress on Scratch Resistance of Low Density Polyethylene(LDPE) Film[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2018, 33(1): 24—30.