

包装材料

魔芋葡甘聚糖缓冲包装材料的制备及性能

周灵青，王家俊，余丽萍，张艳萍
(浙江理工大学，杭州 310018)

摘要：目的 以魔芋葡甘聚糖(KGM)为原料,制备新型的可生物降解的缓冲包装材料并研究其性能。
方法 采用冷冻干燥法制备缓冲包装材料,利用扫描电镜和静态压缩实验来分析 KGM 质量分数、冷冻温度、冷冻时间对缓冲包装材料泡孔结构及力学性能的影响。**结果** 随着 KGM 质量分数的增加,缓冲包装材料的孔隙率降低,但孔径、弹性模量和屈服强度增大,材料的密实化阶段也有所提前;随着冷冻温度的降低,缓冲包装材料的孔隙率、孔径均降低,但弹性模量和屈服强度增大,同时材料的密实化阶段有所提前;随着冷冻时间的延长,缓冲包装材料孔隙率几乎没有变化,孔径略有增大,材料的力学性能变化不明显,弹性模量和屈服强度略有降低,材料的密实化阶段有所推迟。**结论** KGM 质量分数为 3%,冷冻温度为 -20 ℃,冷冻时间为 12 h 时,KGM 缓冲包装材料的最小缓冲系数为 2.79,最大静应力为 0.156 MPa,其最小缓冲系数及其对应的最大静应力与低密度发泡聚苯乙烯相近,具有实际应用的潜力。

关键词：魔芋葡甘聚糖；冷冻干燥法；缓冲包装材料

中图分类号：TB484.6 **文献标识码：**A **文章编号：**1001-3563(2016)13-0001-07

Preparation and Properties of Konjac Glucomannan Cushioning Package Material

ZHOU Ling-qing, WANG Jia-jun, YU Li-ping, ZHANG Yan-ping
(Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China)

ABSTRACT: The preparation technique of a novel biodegradable cushioning package material that took the Konjac glucomannan(KGM) as the raw material was developed and its properties were investigated. The freeze-drying method was used to prepare the cushioning package material. And the variations of KGM concentration, freezing temperature and freezing time influencing the cell structure and mechanical property were analyzed by scanning electron microscope and compression test. With the increase of the KGM concentration, the porosity of cushioning package material decreased, whereas the aperture, elasticity modulus and yield strength of cushioning package material increased. The densification stage of the material was also brought forward. With the fall of freezing temperature, both the aperture and porosity of cushioning package material decreased, but the elasticity modulus and yield strength increased. The densification stage of the material was also brought forward. Prolonging the freezing time had little effect on the porosity of cushioning package material, and the aperture slightly increased. The mechanical property showed no obvious change, the elasticity modulus and yield strength decreased slightly, and the stage of densification was slightly delayed. When the KGM concentration was 3%, the freezing temperature was -20 °C and the freezing time was 12 h, the minimum cushioning coefficient of about 2.79 and the maximum static stress of 0.156 MPa were obtained. The property of KGM cushioning package material at the concentration of 3% was similar to that of the low density expandable polystyrene.

收稿日期：2015-12-03

作者简介：周灵青（1990—），女，浙江台州人，浙江理工大学硕士生，主攻包装材料。

通讯作者：王家俊（1963—），男，浙江杭州人，博士，浙江理工大学教授、博导，主要研究方向为可降解包装材料、高分子与复合材料。

rene, which has the practical application potential.

KEY WORDS: Konjac glucomannan; freeze-drying method; cushioning packaging material

低密度发泡聚苯乙烯密度小，成形简单，价格低廉，被广泛用作缓冲包装材料。低密度发泡聚苯乙烯相对体积大，废弃后难以降解，燃烧则会严重破坏地球的臭氧层，造成二次污染。大量废弃的发泡聚苯乙烯缓冲包装材料已严重威胁到生态环境^[1-2]。开发一种以天然材料为原料，具有天然可降解特性的缓冲包装材料，来替代目前应用广泛的低密度发泡聚苯乙烯，具有重大意义。

魔芋葡甘聚糖系魔芋的主要成分是一种较为丰富的可再生天然高分子资源，其水溶液具有凝胶性^[3-6]，具备加工成为缓冲包装材料的条件。冷冻干燥法作为一种新兴的发泡成孔技术，已有学者采用此法制备多孔支架材料，且制备出的多孔支架中的孔连通性较好^[7-9]，更有学者利用冷冻干燥法成功制得缓冲包装材料^[10]。冷冻干燥属于物理发泡方法，制备过程中以水等液体作为致孔剂，液体在冷冻阶段时结晶，所制备材料的泡孔大小以及形态由冰晶的大小与形态决定^[11]。溶液的质量分数、冷冻温度和冷冻时间是影响冰晶成核、生长的重要因素。这里将以 KGM 为原料，采用冷冻干燥法制备缓冲包装材料，研究 KGM 缓冲包装材料的结构和缓冲性能，并分析 KGM 质量分数、冷冻温度、冷冻时间变化对 KGM 缓冲包装材料的密度、孔隙率、孔径等的影响，及其对静态压缩性能的影响。

1 实验

1.1 材料与仪器

材料与试剂：魔芋葡甘聚糖，合肥博美生物科技有限公司；蒸馏水，实验室自制。

设备：手提式高速万能粉碎机(DFT-50)，浙江温岭市林大机械有限公司；冰箱(BCD-182C)，杭州华日电冰箱有限公司；高低温交变湿热试验箱，江苏淮安中亚实验设备有限公司；真空冷冻干燥系统(74200-30)，Labconco 公司；扫描电子显微镜(JCM6000)，日本 JEOL；微机控制电子万能试验机(RGL-214)，深圳市瑞格尔仪器有限公司。

1.2 制备方法

配制魔芋葡甘聚糖溶液，搅拌溶解后分别注入

模具中，静置 4 h；再放入冰箱中冷冻；最后放入冷冻干燥机(-84 °C, 0.8 Pa)中干燥至恒重。

配制质量分数分别为 1%，2%，3%，4%，5% 的魔芋葡甘聚糖溶液，其中冷冻温度为-20 °C，冷冻时间为 12 h。

冷冻温度分别为-20, -30, -40, -50, -60 °C，其中魔芋葡甘聚糖质量分数为 3%，冷冻时间为 12 h。

冷冻时间分别为 1, 3, 5, 7, 9 d，其中魔芋葡甘聚糖质量分数为 3%，冷冻温度为-20 °C。

1.3 性能测试

将测试样品在温度为(23±2)°C，相对湿度为(60±5)%的环境下处理 48 h，并在满足要求的环境下测试材料各项性能。

1.3.1 表观密度和孔隙率

表观密度参照 GB/T 6343—2009^[12]的方法进行测试。每组试样选取较规整的圆柱形试样 3 个，用分析天平称量试样，精确到 0.1 g，用游标卡尺测定试样直径和高度，计算试样体积，从而计算出试样表观密度 ρ^* 。

将试样粉碎到 0.15 mm 以下，称取试样粉末(m_s)放入比重瓶中，向其加入无水乙醇至刻线处，称量含有试样和乙醇的比重瓶质量为 m_1 。然后取一个相同的比重瓶，向其加入无水乙醇至相同刻线处，称量其质量为 m_2 。孔壁材料的密度 ρ_s 可由式(1)来计算：

$$\rho_s = \frac{m_s \rho}{m_s + m_2 + m_1} \quad (1)$$

式中： ρ 为无水乙醇的密度。以上实验重复 3 次，取平均值。

试样的相对密度为 ρ^*/ρ_s ，利用式(2)计算出孔隙率 θ ：

$$\theta = 1 - \frac{\rho^*}{\rho_s} \quad (2)$$

1.3.2 结构与形貌

参照 Guan 等^[13]的方法，切割一小块试样粘在制样板上，然后在真空下完成表面镀金。采用扫描电子显微镜来观察试样的表面形貌，其中加速电压为 15 kV。

1.3.3 孔径

利用 Nano Measurer 1.2 软件对试样扫描电镜

图进行分析,任意取扫描电镜图上的10个泡孔进行测量,得到试样的平均孔径作为试样的孔径。

1.3.4 静态压缩

参照GB/T 8168—2008^[14]的方法,通过电子万能试验机对试样进行静态压缩试验,其中加载速度为(12±3)mm/min。不同试样各取3个进行试验,取其平均值作为试验的结果。

2 结果与讨论

2.1 KGM质量分数的影响

2.1.1 表观密度和孔隙率

通过测量和计算得出不同质量分数的KGM缓冲包装材料表观密度、孔壁密度和孔隙率,见表1。

表1 不同质量分数的KGM缓冲包装材料的表观密度、孔壁密度和孔隙率
Tab.1 The ρ^* , ρ_s and θ of KGM cushioning package material with different concentrations

KGM质量分数/%	$\rho^*/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	$\rho_s/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	$\theta/\%$
1	0.012	0.175	93.14
2	0.021	0.141	85.11
3	0.030	0.135	77.78
4	0.042	0.133	69.57
5	0.051	0.132	61.36

由表1可以看出,KGM缓冲包装材料的 ρ^* 随着KGM质量分数的增加而增大,孔隙率随着KGM质量分数的增加而降低。其中, ρ^* 关系到运输成本, ρ^* 越小,表示材料越轻便,运输成本越低。

2.1.2 结构与形貌

KGM缓冲包装材料的数码照片见图1,得到的KGM缓冲包装材料松软多孔,呈白色海绵状。



图1 KGM缓冲包装材料的数码照片

Fig.1 Digital photo of KGM cushion packaging material

经扫描电镜观察得到不同质量分数的KGM缓冲包装材料微观结构见图2。

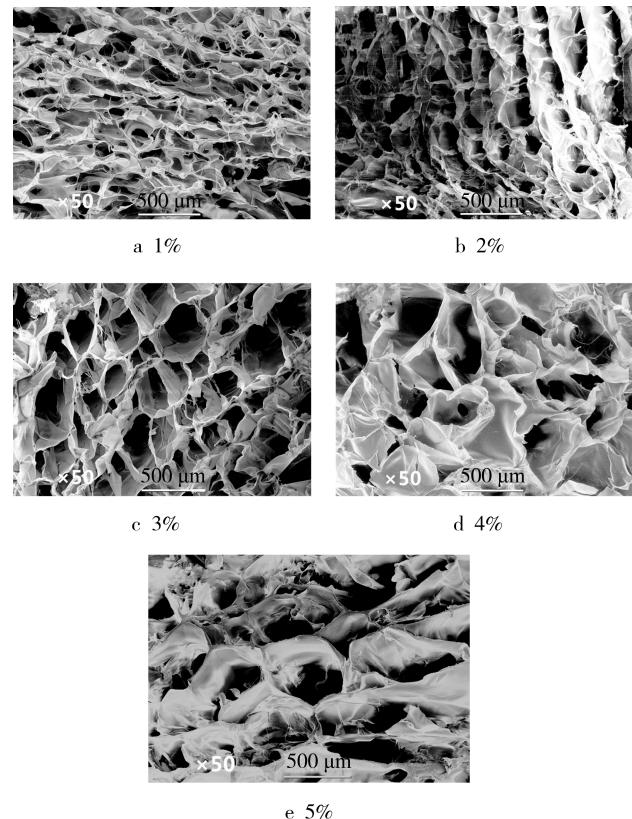


图2 不同质量分数的KGM缓冲包装材料的扫描电镜图片
Fig.2 The scanning electron microscope images of KGM cushioning package material with different KGM concentrations

由图2可以看出,KGM缓冲包装材料的微观结构呈现出均匀的多孔状,形状以椭圆形和圆形为主,而且呈开孔结构。这是因为采用冷冻干燥法制备KGM缓冲包装材料,以水作为致孔剂。当冷冻温度低于KGM溶液的共晶温度后,溶液开始结晶成冰晶,结晶过程由晶核形成过程和晶粒长大过程共同构成。然后经冷冻干燥将冰升华,原冰晶位置形成孔洞,便制得多孔缓冲包装材料。随着KGM浓度增加,孔壁逐渐增厚。这是由于在冷冻过程中,冰晶的生长将KGM挤压到冰晶间的孔隙,KGM的质量浓度越高,凝胶能力越强,对这种挤压的抵抗作用越强,从而形成较厚的孔壁。

2.1.3 孔径

由Nano Measurer 1.2软件测量得到KGM质量分数分别为1%,2%,3%,4%,5%的材料对应的孔径为218.37,288.84,411.49,493.81,581.71μm,可以看出,随着KGM质量浓度的增加,试样的孔径增大。这与冰晶的生长有关,因为KGM质量分数越大,溶液的共晶点越低,过冷度越小,则冰晶的成核速率越慢,生长速率越快,所以冰晶的直径

越大，试样的孔径也就越大。

2.1.4 静态压缩

静态压缩试验得出不同质量分数的 KGM 缓冲包装材料的应力-应变曲线见图 3。

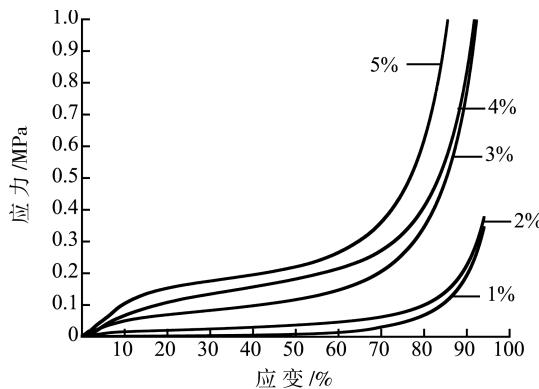


图 3 不同质量分数的 KGM 缓冲包装材料的应力-应变曲线

Fig.3 The stress-strain curves of KGM cushioning package material with different KGM concentrations

从图 3 可以看出，不同质量分数的 KGM 缓冲包装材料的应力-应变曲线分为 3 个阶段，即弹性阶段、屈服平台阶段和致密阶段。

1) 弹性阶段。这个阶段很短，在小应变时，缓冲包装材料处于线弹性区，骨架发生弹性变形，主要反映了孔结构的强度特性，弹性阶段的范围约为应变的 0~5%。随着 KGM 质量分数的增加，弹性阶段有所延伸。

2) 屈服平台阶段。这个阶段跨度较大，随着压力的增加，材料开始发生塑性变形并进入屈服平台区，在相当长的变形过程中，应变增加，但应力增长不多，基本上保持不变，这个过程主要反映了孔结构的压跨屈服，这也是材料吸收能量的主要阶段，屈服平台阶段在应变为 5%~80% 左右，KGM 质量分数越小，屈服阶平台段越宽。

3) 致密阶段。继续加压，KGM 缓冲包装材料进入致密区，这个阶段表明缓冲包装材料的孔隙几近压实，应变逐渐由 KGM 材料本身提供，导致应力增长迅速而应变较小。

可以看出，缓冲包装材料的质量分数越大，其初始弹性模量越大，同时屈服强度也较大，这与材料的孔隙率有关。孔隙率越小，孔壁所占体积越大，其抵抗变形和破坏的能力也相应增强。

2.1.5 能量吸收

KGM 缓冲包装材料主要通过泡孔的屈服破坏来吸收能量。在压缩变形的 3 个阶段中，弹性阶段

主要靠 KGM 的弹性形变来吸收能量，其吸收的能量只占总吸收能的一小部分；屈服平台阶段是能量吸收的主要阶段^[15]，变形主要来自泡孔结构的压缩屈服；当试样进入致密区，应变较小，其能量吸收介于前两者之间。不同质量浓度的 KGM 缓冲包装材料的缓冲系数见图 4。

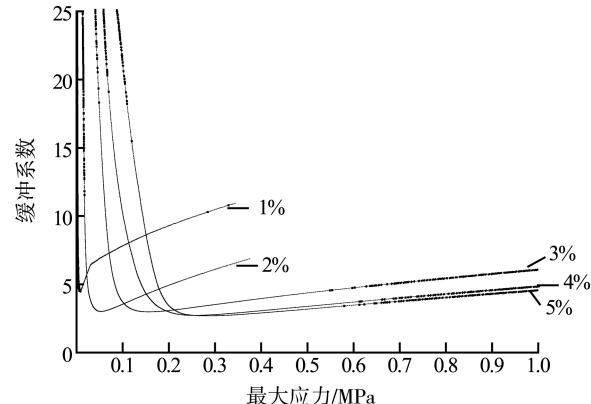


图 4 不同质量分数的 KGM 缓冲包装材料的缓冲特性曲线

Fig.4 The cushioning curves of KGM cushioning package material with different KGM concentrations

从图 4 中可以看出，质量分数为 3% 的 KGM 缓冲包装材料的最小缓冲系数为 2.79，最大静应力为 0.156 MPa，其最小缓冲系数及其对应的最大静应力与低密度发泡聚苯乙烯相似^[16]。

2.2 冷冻温度的影响

2.2.1 表观密度和孔隙率

通过测量和计算得出不同冷冻温度下 KGM 缓冲包装材料的表观密度、孔壁密度和孔隙率见表 2。

表 2 不同冷冻温度下的 KGM 缓冲包装材料的表观密度、孔壁密度和孔隙率

Tab.2 The ρ^* , ρ_s and θ of KGM cushioning package material at different freezing temperature

冷冻温度/℃	$\rho^*/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	$\rho_s/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	$\theta/\%$
-20	0.030	0.135	77.78
-30	0.044	0.160	72.56
-40	0.056	0.171	67.33
-50	0.066	0.179	63.03
-60	0.075	0.185	59.55

由表 2 可以看出，KGM 缓冲包装材料的 ρ^* 随着冷冻温度的降低而增大，孔隙率随着冷冻温度的降低而降低。这是因为泡孔在形成过程中有不同程度的收缩，温度越低收缩越显著，形成的泡孔更小，故 ρ^* 增大、孔隙率降低。

2.2.2 结构与形貌

经扫描电镜观察所得不同冷冻温度下 KGM 缓冲包装材料微观结构见图 5。

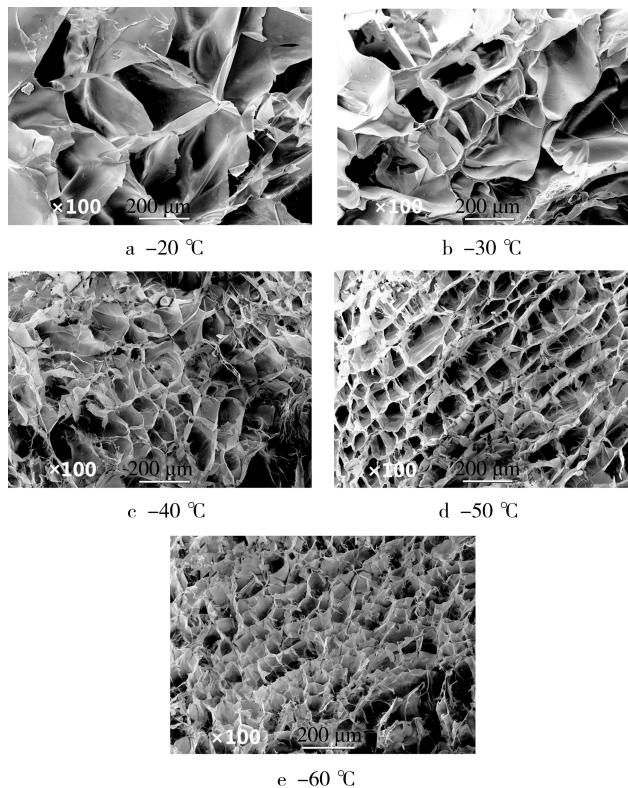


图 5 不同冷冻温度下 KGM 缓冲包装材料的扫描电镜图片
Fig.5 The scanning electron microscope images of KGM cushioning package material at different freezing temperature

由图 5 可以看出,这是因为冷冻温度越低,冰晶的成核速率高于生长速率,此时晶核数量就越多,晶核长大后形成的冰晶也就越多、越规整,冰晶升华后便形成泡孔;孔壁由冰晶排斥到冰晶边缘的 KGM 固化后形成,因此泡孔更加均匀规整,孔壁更薄。

2.2.3 孔径

由 Nano Measurer 1.2 软件测量得到冷冻温度分别为-20, -30, -40, -50, -60 °C 的材料对应的孔径为 411.49, 234.91, 178.74, 106.41, 71.40 μm,可以看出,冷冻温度越低,材料的孔径越小。这是因为冷冻温度越低,降温速率就越快,形成冰核晶数目较多而尺寸较小的冰晶^[17]。在冷冻干燥过程中,冰晶的形貌被保留下来,因此冷冻温度越低,孔径越小。

2.2.4 静态压缩

静态压缩试验得出不同冷冻温度下 KGM 缓冲包装材料的应力-应变曲线见图 6。

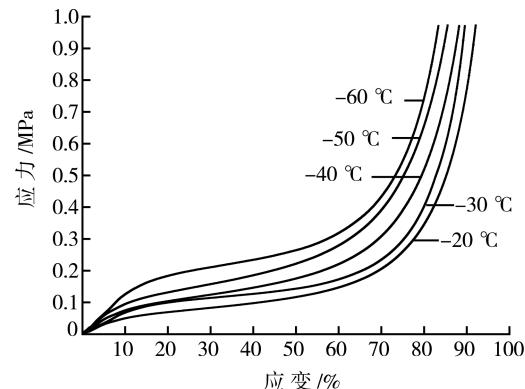


图 6 不同冷冻温度的 KGM 缓冲包装材料的应力-应变曲线
Fig.6 The stress-strain curves of KGM cushioning package material at different freezing temperature

由图 6 可以看出,不同冷冻温度的 KGM 缓冲包装材料的应力-应变曲线也分为 3 个阶段,即弹性阶段、屈服平台阶段和致密阶段。随着冷冻温度的降低,弹性模量和屈服强度增大,同时材料的密实化阶段有所提前也相应增强。这与材料的孔隙率和孔径有关,孔隙率越小,孔壁所占体积越大,其抵抗变形和破坏的能力也相应增强;孔径越大,其抵抗变形和破坏的能力越弱。

2.2.5 能量吸收

不同冷冻温度的 KGM 缓冲包装材料的缓冲特性曲线见图 7。

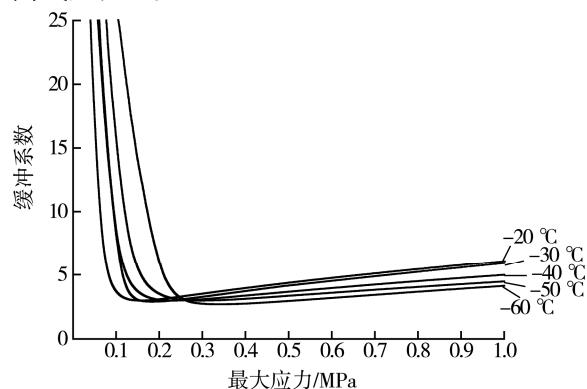


图 7 不同冷冻温度的 KGM 缓冲包装材料的缓冲特性曲线
Fig.7 The cushioning curves of KGM cushioning package material at different freezing temperature

从图 7 中可以看出,试样的缓冲系数是一个迅速减小继而缓慢增大的过程,其中冷冻温度为-20 °C 的最小缓冲系数最小,值为 2.79,最大静应力为 0.156 MPa。

2.3 冷冻时间的影响

2.3.1 表观密度和孔隙率

通过测量和计算得出不同冷冻时间的 KGM 缓

冲包装材料表观密度、孔壁密度和孔隙率见表3。

表3 不同冷冻时间后的KGM缓冲包装材料的表观密度、孔壁密度和孔隙率
Tab.3 The ρ^* , ρ_s and θ of KGM cushioning package material with different freezing time

冷冻时间/d	$\rho^*/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	$\rho_s/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	$\theta/\%$
1	0.030	0.136	78.01
3	0.032	0.149	78.52
5	0.033	0.158	79.11
7	0.033	0.164	79.87
9	0.033	0.167	80.22

由表3可以看出,冷冻时间对KGM缓冲包装材料的 ρ^* 和孔隙率影响不大。

2.3.2 结构与形貌

经扫描电镜观察所得不同冷冻时间后的KGM缓冲包装材料微观结构见图8。

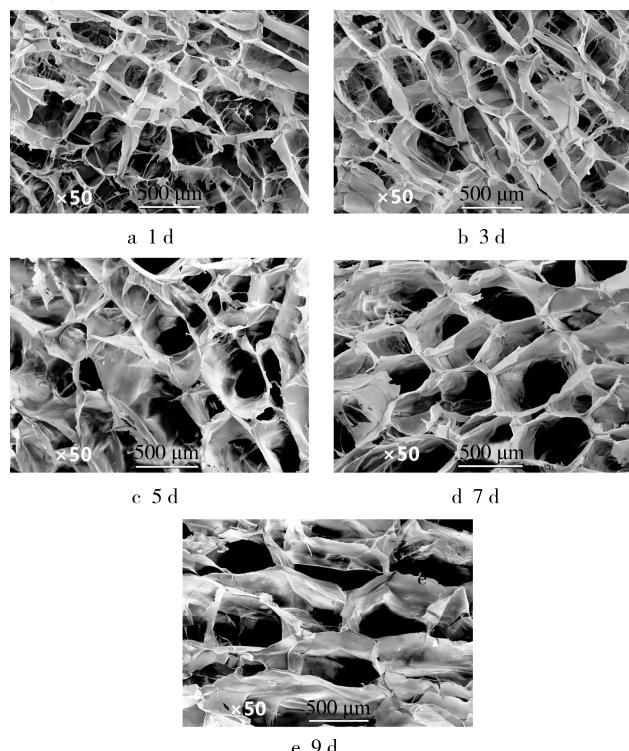


图8 不同冷冻时间的KGM缓冲包装材料的扫描电镜图片

Fig.8 The scanning electron microscope images of KGM cushioning package material with different freezing time

从图8可以看出,KGM缓冲包装材料的微观结构呈现出均匀的多孔状,且冷冻时间越长越易形成柱状结构。这是因为KGM的阻碍作用冰晶会形成树枝状结构,长时间的冷冻容易形成柱状的微观结构。

2.3.3 孔径

由Nano Measurer 1.2软件测量得冷冻温度为分

别为-20, -30, -40, -50, -60℃的材料对应的孔径为423.73, 450.73, 462.56, 498.62, 508.57μm。可以看出,随着冷冻时间延长,试样的孔径略有增大。这是因为冷冻时间也会影响冰晶的生长,如在恒温的条件下延长冷冻时间,冰晶会一直生长,小冰晶与小冰晶相遇形成大冰晶,在冷冻干燥过程中,冰晶的形貌被保留下,所以冷冻时间越长,孔径越大。

2.3.4 静态压缩

静态压缩试验得出不同冷冻时间的KGM缓冲包装材料的应力-应变曲线见图9。

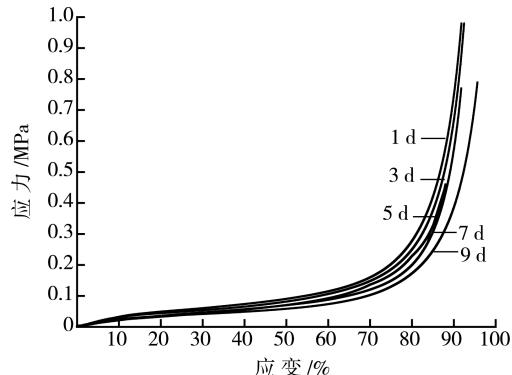


图9 不同冷冻时间的KGM缓冲包装材料的应力-应变曲线

Fig.9 The stress-strain curves of KGM cushioning package material with different freezing time

从图9可以看出,不同冷冻时间的KGM缓冲包装材料的应力-应变曲线同样也为3个阶段,即弹性阶段、屈服平台阶段和致密阶段。随着冷冻时间的延长,材料的力学性能变化不明显,弹性模量和屈服强度略有降低,材料的密实化阶段有所推迟。这与材料的孔径有关,孔径越大,其抵抗变形和破坏的能力越弱。

2.3.5 能量吸收

不同冷冻时间的KGM缓冲包装材料的缓冲系数见图10。

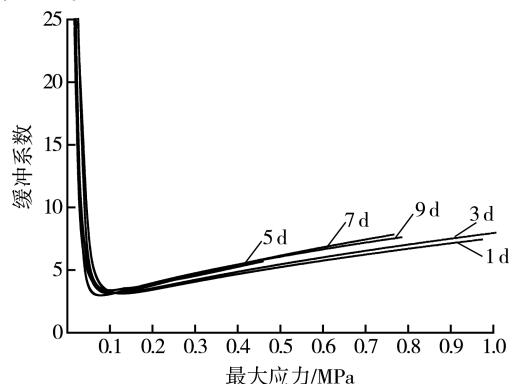


图10 不同冷冻时间的KGM缓冲包装材料的缓冲特性曲线

Fig.10 The cushioning curves of KGM cushioning package material with different freezing time

从图10中可以看出,试样的缓冲系数也是一个迅速减小继而缓慢增大的过程,其中冷冻时间为9 d的材料最小缓冲系数最小,值为2.97,对应的最大静应力为0.078 MPa,其最大静应力比低密度发泡聚苯乙烯小。

3 结语

随着KGM质量分数的增加,KGM缓冲包装材料的孔隙率降低,孔径增大,且孔壁增厚。弹性模量和屈服应力均增大,密实化阶段有所提前。

随着冷冻温度降低,KGM缓冲包装材料的孔隙率、孔径减小,孔壁变薄。弹性模量和屈服应力均增大,密实化阶段有所提前。

随着冷冻时间延长,KGM缓冲包装材料的孔隙率几乎无变化,孔径略有增大。弹性模量和屈服应力略有降低,密实化阶段有所推迟。

KGM质量分数为3%,冷冻温度为-20 °C,冷冻时间为12 h时,KGM缓冲包装材料的最小缓冲系数为2.79,最大静应力为0.156 MPa,其最小缓冲系数及其对应的最大静应力与低密度发泡聚苯乙烯相近,具有实际应用的潜力,可用于产品质量和脆值较小的电子类、精密仪器等产品的缓冲包装。

参考文献:

- [1] 武娟娟,康勇刚.淀粉-纤维复合发泡缓冲材料的研究[J].包装工程,2011,32(3):39—42.
WU Juan-juan, KANG Yong-gang. Development of Starch-fiber Composite Foaming Cushion Material[J]. Packaging Engineering, 2011, 32(3):39—42.
- [2] 王玲,赵全成,文静,等.干热自然环境对聚苯乙烯表面结构的影响[J].表面技术,2014,43(3):68—73.
WANG Ling, ZHAO Quan-cheng, WEN Jing, et al. Effect of Dry-heat Environment on the Surface Structure of Polystyrene[J]. Surface Technology, 2014, 43 (3):68—73.
- [3] ZHOU Y, CAO H, HOU M, et al. Effect of Konjac Glucomannan on Physical and Sensory Properties of Noodles Made from Low-Protein Wheat Flour[J]. Food Research International, 2013, 51(2):879—885.
- [4] JIMENEZ F, COFRADES S, HERRERO A M, et al. Konjac Gel Fat Analogue for Use in Meat Products: Comparison with Pork Fats[J]. Food Hydrocolloids, 2012, 26(1):63—72.
- [5] LIU J H, WANG X P, DING Y T. Optimization of Adding Konjac Glucomannan to Improve Gel Properties of Low-Quality Surimi[J]. Carbohydrate Polymers, 2013, 92(1):484—489.
- [6] IGLESIAS-OTERO M A, BORDERIAS J, TOVAR C A. Use of Konjac Glucomannan as Additive to Reinforce the Gels from Low-Quality Squid Surimi[J]. Journal of Food Engineering, 2010, 101(3):281—288.
- [7] WU X, LIU Y, LI X, et al. Preparation of Aligned Porous Gelatin Scaffolds by Unidirectional Freeze-Drying Method[J]. Acta Biomaterialia, 2010, 6(3): 1167—1177.
- [8] QIAN L, ZHANG H F. Controlled Freezing and Freeze Drying: a Versatile Route for Porous and Micro-/ Nano-Structured Materials[J]. Journal of Chemical Technology and Biotechnology, 2011, 86(2):172—184.
- [9] NIE L, CHEN D, SUO J P, et al. Physicochemical Characterization and Biocompatibility in Vitro of Bi-phasic Calcium Phosphate/Polyvinyl Alcohol Scaffolds Prepared by Freeze-Drying Method for Bone Tissue Engineering Applications[J]. Colloids and Surfaces B-Biointerfaces, 2012, 100(1):169—176.
- [10] 张星云,周灵青,鄂玉萍,等.海带发泡材料的制备及性能研究[J].浙江理工大学学报,2015,33(6):53—59.
ZHANG Xing-yun, ZHOU Ling-qing, E Yu-ping, et al. Preparation of Laminaria Japonica Cushioning Materials and the Research on Its Properties[J]. Journal of Zhejiang Sci-Tech University, 2015, 33(6):53—59.
- [11] ANDRIEU J, HOTROT A, VESSOT S. Freeze-Drying of Pharmaceuticals in Vials: Influence of Freezing Protocol and Sample Configuration on Ice Morphology and Freeze-Dried Cake Texture[J]. Chemical Engineering and Processing, 2007, 46(7):666—674.
- [12] GB/T 6343—2009, 泡沫塑料及橡胶表观密度的测定[S].
GB/T 6343—2009, Cellular Plastics and Rubbers-Determination of Apparent Density[S].
- [13] GUAN J, HANNA M A. Functional Properties of Extruded Foam Composites of Starch Acetate and Corn Cob Fiber[J]. Industrial Crops and Products, 2004, 19 (3):255—269.
- [14] GB/T 8168—2008, 包装用缓冲材料静态压缩试验方法[S].
GB/T 8168—2008, Testing Method of Static Compression for Package Cushioning Package Materials[S].
- [15] 刘瑛.泡沫塑料可压缩的塑性力学性能研究[D].天津:天津大学,2006.
LIU Ying. Investigations on Compressible Plastic Mechanical Properties of Foam Plastic[D]. Tianjin: Tianjin University, 2006.
- [16] 刘乘,任亚东.几种常用缓冲材料的性能研究[J].包装工程,2010,31(7):117—119.
LIU Cheng, REN Ya-dong. Research on Properties of Several Cushion Materials[J]. Packaging Engineering, 2010, 31(7):117—119.
- [17] LI W, LU K, WALZ J. Freeze Casting of Porous Materials: Review of Critical Factors in Microstructure Evolution[J]. International Materials Reviews, 2012, 57 (1):37—60.