http://pmse.scu.edu.cn

基于卡拉胶体系的凝胶性能及微珠制备

周 容[1]，喻明伟[2]，张军华[2]

（1. 四川三联新材料有限公司，四川 成都 610000；2. 高分子材料工程国家重点实验室 四川大学高分子研究所，成都 610065）

摘要：卡拉胶作为天然植物多糖，在水中加热溶解再冷却到室温过程中能够快速凝胶，利用这一特性，可以将卡拉胶体系作为食品中包覆风味物质的微珠壁材。卡拉胶的凝胶性能受其化学组成、结构、相对分子质量大小等影响，其中κ-型卡拉胶凝胶性能最好。卡拉胶水溶液形成凝胶还受到金属盐离子、其他多糖物质、温度、pH等因素的影响，根据包覆微珠的要求，可以通过调整这些影响因素改变凝胶性质。文中选取κ-型卡拉胶为凝胶体系的主要成分，探索其他多糖成分（海藻酸钠、阿拉伯胶）和钾离子对卡拉胶凝胶体系的影响，通过协同作用，利用单因素和正交试验优化选出合适的配方，用以制作微珠壁材。微珠制备方法为同心圆滴制，通过壁材的凝胶作用将被包覆物包裹在微珠中。结果发现，海藻酸钠对卡拉胶体系的黏度贡献较大，增加海藻酸钠浓度能显著增加胶液黏度；钾离子对体系的凝胶强度影响很大，增加钾离子浓度能明显增加凝胶强度；该体系能够制备成型性良好的微珠，卡拉胶体系微珠平均压力值范围为10~16 N，平均压陷量范围为1.1~1.6，样本标准差（*SD*值）范围为2.3~3.0。

关键词：卡拉胶；海藻酸钠；阿拉伯胶；微珠

中图分类号：TS201.7 **文献标识码**：A **文章编号**：1000-7555（2025）03-0069-10

卡拉胶是来自于植物的阴离子型线性多糖，可以分为7种主要类型，不同类型的差别体现在分子链的重复单元中分别含有1，2，3个硫酸酯基团[1~4]。卡拉胶常常作为食品添加剂使用，将其加热到70 ℃以上可以良好溶解于水中，冷却到室温后又可形成凝胶，因此可以作为果冻类食品或者增黏剂使用。不同类型的卡拉胶形成的凝胶性质也不一样，其中κ-型卡拉胶可以与钾离子作用形成坚固、脆硬的凝胶，ι-型可以与钙离子反应形成柔软具有弹性的凝胶，λ-型则无法形成凝胶[5~9]。

在食品中，添加包覆一定风味的微珠，具有增加风味和美观的功效[10]。通常微珠直径3~4 mm，内部包含一定量的油溶性香味物质，而微珠壁材一般都是水溶性的天然多糖化合物。在食品中，当微珠被压破或者咀嚼之后，包覆的风味物质逸出，而增加消费者的消费体验。多糖化合物的选择一般都是食品级天然高分子，需要具有加热能溶解，冷却后快速形成凝胶而固化的特性，才能将被包覆物快速固定在其中，否则要是凝胶时间，温度范围不匹配，将导致包覆失败，微珠破损。卡拉胶加热能溶解，冷却后能凝固，且在一价金属离子的作用下能够增加凝胶强度，非常符合微珠制备对壁材的技术要求。因此，在本文中，选择卡拉胶为主要研究对象，辅助以其他多糖及金属离子，研究了制备微珠的复合材料体系，并通过同心圆滴制机制备了包覆油溶性物质的微珠，对制备的微珠性能进行了表征。

1 实验部分

1.1 主要原料与设备

卡拉胶：食品级，海南文昌迈号南港卡拉胶厂；海藻酸钠：食品级，青岛明月海藻集团有限公司；阿拉伯胶：食品级，山东巨荣生物工程有限公司；氯化钾、辛癸酸甘油酯：分析纯，成都市科隆化学品有限公司；去离子水：实验室二次重蒸。

doi: 10.16865/j.cnki.1000-7555.2025.0046
收稿日期：2024-05-17
通讯作者：张军华，主要从事高分子合成及改性的研究，E-mail: zhangjh@scu.edu.cn

Tab. 1 Orthogonal experimental table

Level	Factor			
	A(Carrageenan concentration/%)	B(Sodium alginate concentration/%)	C(Arabic gum concentration/%)	D(KCl concentration/%)
1	1	0	0.5	0.1
2	1.5	0.5	1	0.2
3	2	1	1.5	0.3
4	2.5	1.5	2	0.4

旋转黏度计：NDJ-5S，上海昌吉地质仪器有限公司；质构仪：TA.XT plus，英国Stable Micro Systems公司。

1.2 实验过程

1.2.1 胶液及凝胶制备：以卡拉胶为凝胶主材，添加海藻酸钠、阿拉伯胶、氯化钾等研究凝胶体系的胶液黏度及凝胶硬度和凝胶弹性。用分析天平将所需的样品称量后混合均匀，加入到适量的去离子水中，在80 ℃水浴加热1 h，300 r/min机械搅拌。溶解完成后将胶液置于250 mL烧杯中测量70 ℃时的胶液黏度，黏度测试结束后将胶液倒入圆柱形模具中，在室温自然冷却成凝胶，备用。

1.2.2 单因素试验：通过分别改变卡拉胶、海藻酸钠、阿拉伯胶、氯化钾的添加量，设置5个梯度，其余3个组分浓度固定。溶解温度固定为80 ℃，搅拌速率固定为300 r/min，溶解时间固定为1 h。

（1）卡拉胶浓度对凝胶体系的影响：设置5个等梯度的卡拉胶浓度实验组，其卡拉胶质量分数分别为1%，1.5%，2%，2.5%和3%。海藻酸钠质量分数为1%，阿拉伯胶质量分数为1%，氯化钾质量分数为0.2%。以胶液黏度及凝胶硬度和凝胶弹性为指标，探索卡拉胶浓度对凝胶体系质构性能的影响。

（2）海藻酸钠浓度对凝胶体系的影响：设置5个等梯度的海藻酸钠浓度实验组，其海藻酸钠质量分数分别为0，0.5%，1%，1.5%和2%。卡拉胶质量分数为1.5%，阿拉伯胶质量分数为1%，氯化钾质量分数为0.2%。以凝胶胶液黏度及凝胶硬度和凝胶弹性为指标，探索海藻酸钠浓度对凝胶体系质构性能的影响。

（3）阿拉伯胶浓度对凝胶体系的影响：设置5个等梯度的阿拉伯胶浓度实验组，其阿拉伯胶质量分数分别为0，0.5%，1%，1.5%和2%。卡拉胶质量分数为1.5%，海藻酸钠质量分数为1%，氯化钾质量分数为0.2%。以凝胶胶液黏度及凝胶硬度和凝胶弹性为指标，探索阿拉伯胶浓度对凝胶体系质构性能的影响。

（4）氯化钾浓度对凝胶体系的影响：设置5个等梯度的氯化钾浓度实验组，其氯化钾质量分数分别为0，0.1%，0.2%，0.3%和0.4%。卡拉胶质量分数为1.5%，海藻酸钠质量分数为1%，阿拉伯胶质量分数为1%。以凝胶胶液黏度及凝胶硬度和凝胶弹性为指标，探索阿拉伯胶浓度对凝胶体系质构性能的影响。

1.2.3 正交试验：在上述单因素实验的基础上，为了进一步探究卡拉胶浓度、海藻酸钠浓度、阿拉伯胶浓度、氯化钾浓度等因素对凝胶体系质构的影响，设计了四因素四水平的正交试验，选取正交表$L_{16}(4^4)$，实验设计见Tab.1。

1.2.4 微珠实验工艺流程：采用同心圆滴制法制备微珠。首先用去离子水溶解已混合均匀的壁材胶粉，胶粉质量分数为2.5%（包括卡拉胶、海藻酸钠、阿拉伯胶和氯化钾），进行水浴加热溶解。同心圆法制备微珠，外层为溶解好的卡拉胶基水溶性壁材材料，内层为油溶性包覆物（在本文中采用的是辛癸酸甘油酯），滴落到凝固浴（液体石蜡）中形成微珠，微珠经过滤收集，干燥即制得。微珠可以作为食品添加剂，添加到酸奶、果冻等中使用。

1.3 测试与表征

1.3.1 胶液黏度测试：使用型号为NDJ-5S的旋转黏度计对胶液进行黏度测试，测量范围为10~1000

mPa·s;转子型号为1,2号转子;转子转速为60 r/min。随着温度的降低,卡拉胶体系胶液黏度也会变化,测试黏度时将温度固定为70 ℃。每组试验记录70 ℃时的胶液黏度,重复3次取平均值。

1.3.2 *凝胶质构测试*:食品的质构特性是衡量食品质量的重要指标,综合了力学和流变学的物理性质[11]。全质构分析是指通过仪器对食品在口腔中的各种情形进行模拟,根据测试中得到的参数利用仪器来对食品进行感官评价[12]。在实验中对样品进行2次压缩得到客观的测试结果,能为改善食品性质的研究提供理论依据[13,14]。

用圆柱形模具将凝胶制作为底面直径10 mm,高度10 mm的圆柱体。使用质构仪TPA模式进行质构测试,探头选择P/36R;测前速度2.00 mm/s,测中速度0.50 mm/s,测后速度5.00 mm/s;应变设置为30%;停留时间为5 s;触发力5 g。同一样品平行测试3次取平均值,记录每个样品测得的凝胶硬度、凝胶弹性及其样本标准差(*SD*值)。

2　结果与讨论

2.1　卡拉胶浓度对凝胶体系的影响

在卡拉胶体系单因素试验中,固定海藻酸钠质量分数为1%,阿拉伯胶质量分数为1%,氯化钾质量分数为0.2%,改变卡拉胶浓度探究对凝胶体系胶液黏度和凝胶质构的影响,测得实验数据见Fig.1和Fig.2。

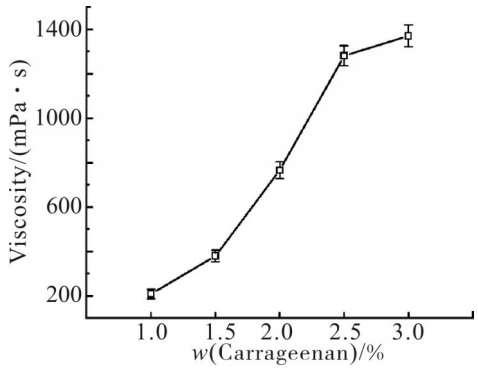


Fig. 1　Effect of carrageenan concentration on viscosity of solution

由Fig.1可知,随着卡拉胶浓度的增加,体系的黏度迅速上升;在卡拉胶浓度较低时,对体系胶液黏度的影响较大;随着卡拉胶浓度的升高,当卡拉胶质量分数达到2.5%后,体系胶液黏度的增加程度开始减缓。卡拉胶溶于水之后,由于其长分子链会对水分子产生束缚作用,这样会使水分子的运动受到阻碍,这种阻碍就是使卡拉胶具有黏稠性的原因。随着卡拉胶浓度的升高,其大分子链数目增加,对水分子的阻碍作用增强,表现出来就是体系胶液黏度迅速升高,在达到一定程度之后趋近于饱和,黏度增加的程度开始减缓。

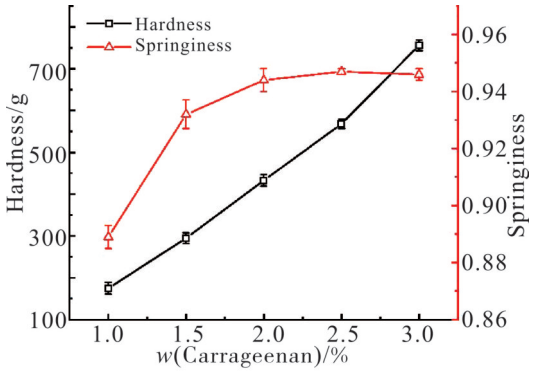


Fig. 2　Effect of carrageenan concentration on texture of gel

由Fig.2可知,体系凝胶硬度随着卡拉胶浓度的增加呈现线性增长,可见卡拉胶浓度对凝胶体系的凝胶硬度具有非常大的影响。体系凝胶弹性随着卡拉胶浓度的增加,先增大到一个峰值后开始趋于不变,在卡拉胶浓度较低时对体系凝胶弹性的影响较大,随着卡拉胶浓度的升高,对凝胶弹性的影响就变得很小。

卡拉胶在高温时其分子链均匀分散在水中形成聚合物水溶液[15]。随着溶液温度的降低,卡拉胶分子链会在氢键的作用下相互靠近,形成螺旋状结构,温度继续降低,形成的螺旋状结构越来越多,最终发展成三维网状结构,变成水凝胶状态,具有一定的硬度和弹性。当卡拉胶浓度增加时,其大分子链在水中的数目增加,分子链之间的氢键相互作用力变得更强,所形成的凝胶表现出硬度更大,弹性增加。

2.2　海藻酸钠浓度对凝胶体系的影响

在卡拉胶体系单因素试验中,固定卡拉胶质量分数为1.5%,阿拉伯胶质量分数为1%,氯化钾质量分数为0.2%,探究海藻酸钠浓度对凝胶体系胶液黏度和凝胶质构的影响,所测实验数据见Fig.3和Fig.4。

由Fig.3可知,在其他组分浓度不变的情况下增加海藻酸钠浓度,会导致体系黏度明显增加,与卡拉

胶浓度改变时有所不同，当海藻酸钠浓度较低时对体系黏度影响较小，随着海藻酸钠浓度的增加，体系黏度增加程度也在加剧。海藻酸钠是一种常见的食品添加剂，与卡拉胶一样具有增稠性，其大分子链在水中分散后会阻碍水分子的运动导致溶液的黏度增加。海藻酸钠相比卡拉胶具有更好的增稠性，对凝胶体系的黏度影响较大。

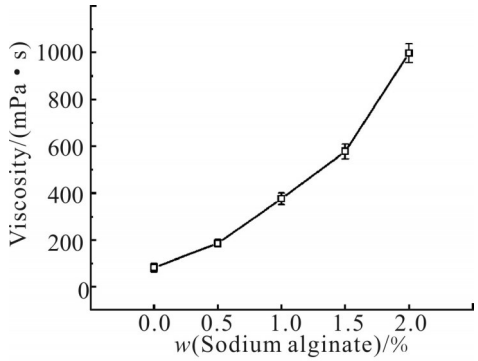


Fig. 3 Effect of sodium alginate concentration on solution viscosity

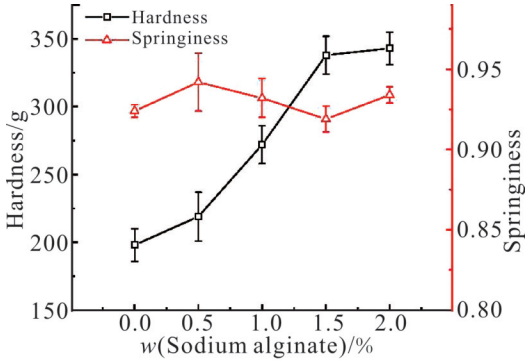


Fig. 4 Effect of sodium alginate concentration on texture of gel

由Fig.4可知，随着海藻酸钠浓度的增加，体系凝胶硬度有所增加，但增加的程度并不大，且海藻酸钠质量分数达到1.5%后，体系凝胶硬度几乎保持不变。在误差范围内，海藻酸钠浓度的增加对体系凝胶弹性几乎没有影响。虽然海藻酸钠与卡拉胶一样属于高分子多糖聚合物，但是其自身的水溶液并不具备凝胶性，随着溶液温度的降低，其分子链也不会产生螺旋状结构和三维网状结构。海藻酸钠浓度的增加，使得凝胶硬度略有增加，可能是因为其分子链上的羟基与卡拉胶分子链上的羟基产生了相互作用，使卡拉胶形成的三维网状结构更加牢固，进而让凝胶硬度增加。

2.3 阿拉伯胶浓度对凝胶体系的影响

在卡拉胶体系单因素试验中，固定卡拉胶质量分数为1.5%，海藻酸钠质量分数为1%，氯化钾质量分数为0.2%，探究阿拉伯胶浓度对凝胶体系胶液黏度和凝胶质构的影响，所测实验数据见Fig.5和Fig.6。

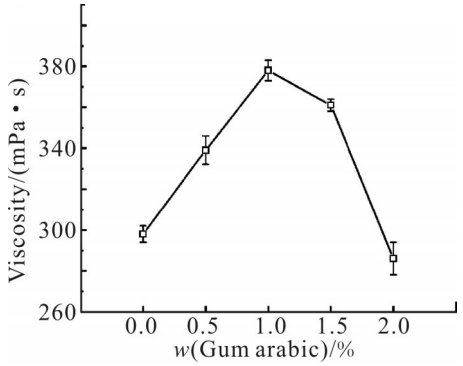


Fig. 5 Effect of Arabic gum concentration on viscosity of solution

由Fig.5可知，与卡拉胶，海藻酸钠不同的是，随着阿拉伯胶浓度的增加，体系胶液黏度呈现先增加后降低的趋势；当阿拉伯胶质量分数达到2%时，体系黏度降低明显，甚至低于未添加阿拉伯胶时体系的黏度。阿拉伯胶属于聚合物多糖中的植物胶，与其它高分子多糖不同的是阿拉伯胶在水中的溶解度很大。当阿拉伯胶浓度增加到一定程度时，可能减少了卡拉胶和海藻酸钠对水分子的束缚作用，使得体系胶液黏度呈现降低的趋势。

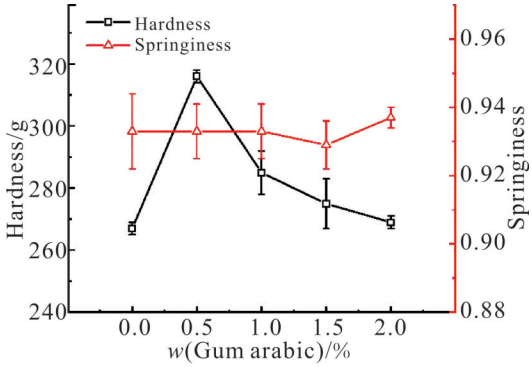


Fig. 6 Effect of Arabic gum on texture of gel

由Fig.6可知，阿拉伯胶浓度的增加让体系的凝胶硬度先增加后降低，在阿拉伯胶质量分数为0.5%时达到峰值；从图中可以看出，阿拉伯胶对凝胶硬度的影响轻微，随着其浓度的逐渐增加，对体系凝胶硬度的降低也比较有限。随着阿拉伯胶浓度的增加，体系凝胶弹性几乎没有变化。阿拉伯胶本身不具备凝胶性，因此对整个体系凝胶硬度和凝胶弹性的影响有限。阿拉伯胶溶解后链上带有蛋白质链，有部

分乳化功能,因此易插入卡拉胶和海藻酸钠分子链中,降低黏度。

2.4　氯化钾浓度对凝胶体系的影响

在卡拉胶体系单因素试验中,固定卡拉胶质量分数为1.5%,海藻酸钠质量分数为1%,阿拉伯胶质量分数为1%,探究氯化钾浓度对凝胶体系胶液黏度和凝胶质构的影响,所测实验数据见Fig.7和Fig.8。

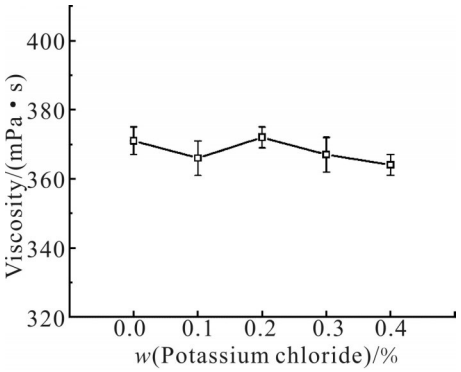


Fig. 7　Effect of potassium chloride concentration on viscosity of solution

由Fig.7可知,在其他组分浓度不变的情况下,随着氯化钾浓度的增加,体系黏度几乎没有变化。氯化钾属于金属盐离子添加物,其中金属钾离子与卡拉胶等多糖化合物会产生相互作用[15],从图中得知,这些相互作用并不影响卡拉胶和海藻酸钠对水分子的束缚作用,因此体系胶液黏度在氯化钾含量增加时没有明显变化。

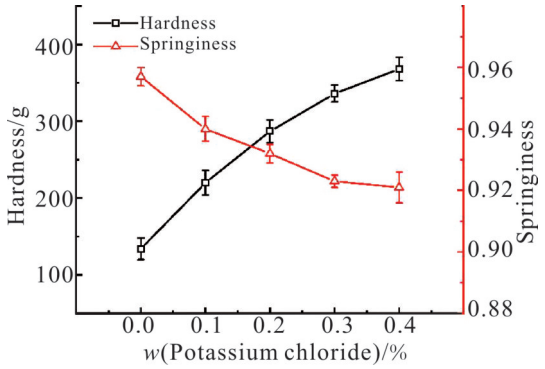


Fig. 8　Effect of potassium chloride concentration on texture of gel

由Fig.8可知,氯化钾与卡拉胶间的相互作用会显著影响体系凝胶硬度和凝胶弹性。随着氯化钾浓度的增加,体系凝胶硬度几乎呈直线上升,体系凝胶弹性呈现直线下降的趋势。氯化钾可以在卡拉胶水溶液中与卡拉胶分子链产生较强的作用力,加快卡

Tab. 2　Results of orthogonal experiment L_{16} (4^4)

Exp. number	A (Carrageenan concentration/%)	B(Sodium alginate concentration/%)	C(Arabic gum concentration/%)	D(KCl concentration/%)	Viscosity/（mPa·s）	Gel hardness/g	Gel elasticity
1	1(1.0)	1(0)	1(0.5)	1(0.1)	44	63	0.968
2	1	2(0.5)	2(1.0)	2(0.2)	75	123	0.914
3	1	3(1.0)	3(1.5)	3(0.3)	165	200	0.908
4	1	4(1.5)	4(2.0)	4(0.4)	360	210	0.915
5	2(1.5)	1	2	3	73	298	0.922
6	2	2	1	4	182	331	0.921
7	2	3	4	1	360	211	0.936
8	2	4	3	2	700	281	0.939
9	3(2.0)	1	3	4	138	552	0.888
10	3	2	4	3	235	467	0.926
11	3	3	1	2	627	431	0.935
12	3	4	2	1	1140	368	0.949
13	4(2.5)	1	4	2	205	707	0.915
14	4	2	3	1	581	420	0.955
15	4	3	2	4	1120	648	0.918
16	4	4	1	3	1320	622	0.919

Tab. 3 Range analysis of viscosity of solution

Exp. number	A (Carrageenan concentration/%)	B(Sodium alginate concentration/%)	C(Arabic gum concentration/%)	D(KCl concentration/%)	Viscosity/(mPa·s)
1	1(1.0)	1(0)	1(0.5)	1(0.1)	44
2	1	2(0.5)	2(1.0)	2(0.2)	75
3	1	3(1.0)	3(1.5)	3(0.3)	165
4	1	4(1.5)	4(2.0)	4(0.4)	360
5	2(1.5)	1	2	3	73
6	2	2	1	4	182
7	2	3	4	1	360
8	2	4	3	2	700
9	3(2.0)	1	3	4	138
10	3	2	4	3	235
11	3	3	1	2	627
12	3	4	2	1	1140
13	4(2.5)	1	4	2	205
14	4	2	3	1	581
15	4	3	2	4	1120
16	4	4	1	3	1320
mean value k_1	161.00	115.00	543.25	531.25	
mean value k_2	328.75	268.25	602.00	401.75	
mean value k_3	535.00	568.00	396.00	448.25	
mean value k_4	806.50	880.00	290.00	450.00	
Range R	645.50	665.00	312.00	129.50	

拉胶螺旋状和三维网状结构的形成，并且使形成的凝胶具有更大的凝胶硬度，同时降低凝胶的弹性。

2.5 正交试验结果与分析

为了更好的探究卡拉胶浓度、海藻酸钠浓度、阿拉伯胶浓度和氯化钾浓度对卡拉胶凝胶体系的影响，在单因素试验的基础上选取实验点进行四因素四水平正交试验，所得实验数据见Tab.2。

通过对胶液黏度的极差分析（Tab.3）可以看出，胶液黏度影响因素的主次为B>A>C>D，即海藻酸钠浓度>卡拉胶浓度>阿拉伯胶浓度>氯化钾浓度。其中海藻酸钠浓度与卡拉胶浓度所对应的极差相差不大，说明二者对体系胶液黏度的影响都比较大；氯化钾浓度对应的极差最小，说明氯化钾浓度对体系胶液黏度的影响很小。与前面单因素试验所得结果相同。

若想取得卡拉胶凝胶体系最大胶液黏度，最优组合为$A_4B_4C_2D_1$，即卡拉胶质量分数为2.5%，海藻酸钠质量分数为1.5%，阿拉伯胶质量分数为1.0%，氯化钾质量分数为0.1%；若想取得卡拉胶凝胶体系最小胶液黏度，最优组合为$A_1B_1C_4D_2$，即卡拉胶质量分数为1.0%，海藻酸钠质量分数为0%，阿拉伯胶质量分数为2.0%，氯化钾质量分数为0.2%。

Tab.4是对卡拉胶凝胶体系正交试验凝胶硬度的极差分析表，从表中可以得知，对体系凝胶硬度的影响因素主次为A>D>C>B，即卡拉胶浓度>氯化钾浓度>阿拉伯胶浓度>海藻酸钠浓度。其中卡拉胶浓度所对应的极差远大于另外3个因素所对应的极差，可知卡拉胶对体系凝胶硬度的影响很大，与前面单

Tab. 4 Range analysis of gel hardness

Exp. number	A (Carrageenan concentration/%)	B(Sodium alginate concentration/%)	C(Arabic gum concentration/%)	D(KCl concentration/%)	Gel hardness/g
1	1(1.0)	1(0)	1(0.5)	1(0.1)	63
2	1	2(0.5)	2(1.0)	2(0.2)	123
3	1	3(1.0)	3(1.5)	3(0.3)	200
4	1	4(1.5)	4(2.0)	4(0.4)	210
5	2(1.5)	1	2	3	298
6	2	2	1	4	331
7	2	3	4	1	211
8	2	4	3	2	281
9	3(2.0)	1	3	4	552
10	3	2	4	3	467
11	3	3	1	2	431
12	3	4	2	1	368
13	4(2.5)	1	4	2	707
14	4	2	3	1	420
15	4	3	2	4	648
16	4	4	1	3	622
mean value k_1	149.00	405.00	361.75	265.50	
mean value k_2	280.25	335.25	359.25	385.5	
mean value k_3	454.50	372.50	363.25	396.75	
mean value k_4	599.25	370.25	398.75	435.25	
Range R	450.25	34.75	39.5	169.75	

因素试验所得结果相同。在卡拉胶凝胶体系中,得到最大凝胶硬度的最优组合为$A_4B_1C_4D_4$,即卡拉胶质量分数为2.5%,海藻酸钠质量分数为0%,阿拉伯胶质量分数为2.0%,氯化钾质量分数0.4%。

从Tab.5可得知,4个因素对卡拉胶凝胶体系凝胶弹性的影响作用主次为D>C>B>A,即氯化钾浓度>阿拉伯胶浓度>海藻酸钠浓度>卡拉胶浓度。从体系凝胶弹性正交试验所得极差结果来看,4个因素对凝胶弹性的影响除了氯化钾浓度以外都比较小。若想在卡拉胶凝胶体系中获得最大凝胶弹性,最优组合为$A_2B_4C_1D_1$,即卡拉胶质量分数为1.5%,海藻酸钠质量分数为1.5%,阿拉伯胶质量分数为0.5%,氯化钾质量分数为0.1%。

2.6 卡拉胶体系微珠壁材

通过上述单因素试验与正交试验,选取具有合适黏度的凝胶体系配方进行微珠制备。所得结果见Tab.6。

微珠质量测试中重要指标有压力值、压陷量、*SD*值等,压力值表示微珠的抗压强度,压力值越大表示微珠强度越大,比较坚硬;压陷量表示微珠的抗压韧性,压陷量越大表示微珠韧性越大,比较韧;*SD*值表示微珠强度的波动大小,*SD*值越小,表示微珠质量越稳定,合格率高。通过对卡拉胶体系壁材配方调整,可以稳定滴制食品级微珠。

Tab. 5 Range analysis of gel elasticity

Exp. number	A (Carrageenan concentration/%)	B(Sodium alginate concentration/%)	C(Arabic gum concentration/%)	D(KCl concentration/%)	Gel elasticity
1	1(1.0)	1(0)	1(0.5)	1(0.1)	0.968
2	1	2(0.5)	2(1.0)	2(0.2)	0.914
3	1	3(1.0)	3(1.5)	3(0.3)	0.908
4	1	4(1.5)	4(2.0)	4(0.4)	0.915
5	2(1.5)	1	2	3	0.922
6	2	2	1	4	0.921
7	2	3	4	1	0.936
8	2	4	3	2	0.939
9	3(2.0)	1	3	4	0.888
10	3	2	4	3	0.926
11	3	3	1	2	0.935
12	3	4	2	1	0.949
13	4(2.5)	1	4	2	0.915
14	4	2	3	1	0.955
15	4	3	2	4	0.918
16	4	4	1	3	0.919
mean value k_1	0.9263	0.9233	0.9358	0.9520	
mean value k_2	0.9295	0.9290	0.9258	0.9258	
mean value k_3	0.9245	0.9243	0.9225	0.9188	
mean value k_4	0.9268	0.9305	0.9230	0.9105	
Range R	0.0050	0.0072	0.0133	0.0415	

Tab. 6 Carrageenan system wall material test

Carrageenan system	Viscosity /(mPa·s)	Dripping process	Pressure value/N	Indentation value	*SD* value
Experiment 1	480	Dripping speed slow and poor formability	13.90	1.55	2.47
Experiment 2	85	Microbeads are prone to eccentricity and unevenness	14.83	1.43	2.32
Experiment 3	155	Dripping process went smoothly	15.30	1.52	2.96
Experiment 4	235	Dripping process went smoothly	10.72	1.16	2.65

3 结论

本文为了制备稳定食品级微珠，壁材选用水溶性天然高分子材料，包覆油溶性物质，通过同心圆滴制方法成功制备微珠。壁材以卡拉胶为主要成分，是因为卡拉胶具有加热溶解，冷却凝胶的性质，辅助以海藻酸钠、阿拉伯胶及氯化钾，调配出了适合微珠制备的胶液组成。海藻酸钠和阿拉伯胶可以调整胶液的黏度，氯化钾可以调整胶液冷却后凝胶的硬度和弹性。优选适合微珠壁材的组成，卡拉胶质量分数2.5%，海藻酸钠质量分数1%，阿拉伯胶1%，氯化钾0.2%的最佳体系，制备出了合格的微珠。卡拉胶体系壁材配方微珠表现出的平均压力值范围为10~16 N，平均压陷量范围为1.1~1.6，样本标准差（*SD*值）范围为2.3~3.0。

参考文献:

[1] 胡亚芹, 竺美. 卡拉胶及其结构研究进展[J]. 海洋湖沼通报, 2005(1): 94-102.
Hu Y Q, Zhu M. Study progress of carrageenans and their structure [J]. Transactions of Oceanology and Limnology, 2005(1): 94-102.

[2] Prajapati V D, Maheriya P M, Jani G K, *et al*. Carrageenan: a natural seaweed polysaccharide and its applications.[J]. Carbohydrate Polymers, 2014, 105: 97-112.

[3] Chen J W, Hu Y D, Gao P, *et al*. Effect of κ-carrageenan on the physicochemical and structural characteristics of ready-to-eat Antarctic Krill surimi gel[J]. International Journal of Food Science and Technology, 2024, 59: 3711-3722

[4] 王娜, 杨菲, 张静, 等. 卡拉胶包覆APP微球阻燃水性环氧树脂[J]. 高等学校化学学报, 2019, 40(2): 385-392.
Wang N, Yang F, Zhang J, *et al*. Inflame-retardant water-borne epoxy resin of APP microsphere with carrageenan cladding[J]. Chemical Journal of Chinese Universities, 2019, 40(2): 385-392.

[5] 王露. 卡拉胶/明胶混合体系的相行为研究[D]. 武汉: 湖北工业大学, 2015.
Wang L. Study on the phase behavior of carrageenan/gelatin mixture[D]. Wuhan: Hubei University of Technology, 2015.

[6] 王晓婧. 卡拉胶-明胶凝胶特性及其复配的研究与应用[D]. 天津: 天津科技大学, 2017.
Wang X J. Study on gel properties of carrageenan-gelatin combination and its application[D]. Tianjin: Tianjin University of Science and Technology, 2017.

[7] 魏玉. κ-卡拉胶的凝胶化作用及其与魔芋胶协同作用特性研究[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2010.
Wei Y. Study on the gel properties of κ-carrageenan and synergistic effect of κ-carrageenan and konjac gum[D]. Changsha: Central South University of Forestry and Technology.

[8] 桑璐媛, 袁超, 刘亚伟, 等. 不同盐离子对κ-卡拉胶凝胶质构及流变学性质的影响[J]. 中国食品添加剂, 2017(2): 65-69.
Sang L Y, Yuan C, Liu Y W, *et al*. Effect of various salt ions on gel texture and rheological properties of kappa-carrageenan[J]. China Food Additives, 2017(2): 65-69.

[9] Song J, Li J X, Zhong J P, *et al*. An oral gel suitable for swallowing: the effect of micronization on the gel properties and microstructure of κ-carrageenan[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 271: 132708.

[10] Wirzeberger D, Peleg-Evron O, Davidovich-Pinhas M, *et al*. Controlled dissolution of physically cross-linked locust bean gum κ-carrageenan hydrogels[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 275: 133353.

[11] Da Silva L B, Queiroz M B, Fadini A L, *et al*. Chewy candy as a model system to study the influence of polyols and fruit pulp (açai) on texture and sensorial properties[J]. LWT-Food Science and Technology, 2016, 65: 68-274.

[12] Cheryl C, Olson K, Degner B, *et al*. Textural properties of model food sauces: correlation between simulated mastication and sensory evaluation methods[J]. Food Research International, 2013, 51: 310-320.

[13] Thrimawithana T R, Young S, Dunstan D E, *et al*. Texture and rheological characterization of kappa and iota carrageenan in the presence of counter ions[J]. Carbohydrate Polymers, 2010, 82: 69-77.

[14] Bartkuviene I, Kersien M, Petrikaite V, *et al*. Modulation of pea protein isolate hydrogels by adding kappa-carrageenan: gelling properties and formation mechanism[J]. International Journal of Food Science and Technology, 2024, 59: 6598–6610.

[15] 张建丰. κ-卡拉胶基功能性水凝胶的构建[D]. 太原: 中北大学, 2003.
Zhang J F. Construction of κ-carrageenan based functional hydrogel[D]. Taiyuan: North University of China, 2003.

Gel Properties and Beads Preparation Based on Carrageenan System

Rong Zhou[1], Mingwei Yu[2], Junhua Zhang[2]

(*1. Sichuan Sanlian New Materials Co., Ltd, Chengdu 610000, China; 2. State Key Laboratory of Polymer Materials Engineering, Polymer Research Institute of Sichuan University, Chengdu 610065, China*)

ABSTRACT: Carrageenan, as natural plant polysaccharide, can quickly gel when it is heated and dissolved in water and then cooled to room temperature. With this characteristic, the carrageenan system can be used as wall material of micro beads to coat flavor substances in food. The gel performance of carrageenan itself is affected by its chemical composition, structure, molecular weight and so on, and the *κ*-carrageenan gel has the best performance. The formation of gel from carrageenan aqueous solution is also affected by metal salt ions, other polysaccharide substances, temperature, pH and other factors. According to the requirements of coating beads, the properties of gel can be changed by adjusting these factors. In this paper, *κ*-carrageenan was selected as main component of the gel system to explore the influence of other polysaccharide components (sodium alginate, Arabic gum) and potassium ions on the carrageenan gel system. Through the synergistic effect, single factor and orthogonal experiments were used to optimize and select the appropriate formula for the purpose of making micro bead wall materials. The preparation method of the microbeads is concentric round drop, and the coated material was wrapped in the microbeads through the gel effect of the wall material. The results show that sodium alginate contributes significantly to the viscosity of the carrageenan system, and increasing the concentration of sodium alginate could significantly increase the viscosity of the gel solution; potassium ion has a great influence on the gel strength of the system. Increasing the concentration of potassium ion can significantly increase the gel strength; this system can prepare micro beads with good formability. The average pressure range of carrageenan system micro beads is 10~16 N, the average indentation range is 1.1~1.6, and the sample standard deviation (*SD* value) range is 2.3~3.0.

Keywords: carrageenan; sodium alginate; Arabic gum; micro beads