

挤压蒸煮操作参数对鱼蛋白高水分模拟产物组织化效果的影响

王 帅¹, 刘俊荣^{1*}, 傅润泽¹, 薛长湖²

(1. 大连海洋大学食品科学与工程学院, 辽宁 大连 116023;

2. 中国海洋大学食品科学与工程学院, 山东 青岛 266003)

摘要: 对高水分鱼蛋白的挤压组织化进行研究, 以双轴挤压设备操作参数中的进料水分、腔体温度、螺杆转速、进料速率和电机转速为影响参数, 挤压模拟产物的纤维化程度、硬度、弹性、咀嚼性和色泽为响应因素, 通过中心组合设计及响应面分析法, 探讨了高水分挤压重组技术对鱼蛋白模拟肉类产物特性的影响。结果表明: 首先, 高水分组织化模拟产物具有明显的天然肉类的纤维结构、方向性、弹性和口感。其次, 进料水分对产物的纤维化度、硬度和咀嚼性影响相当显著($P<0.01$), 对模拟物色泽中的 L^* 和 a^* 影响显著($P<0.05$), 进料水分的增加使产物的纤维化度、硬度、咀嚼性和 a^* 降低, 但提升产物 L^* ; 腔体温度对产物的咀嚼性和 a^* 影响特别显著($P<0.01$), 对硬度影响显著($P<0.05$), 升高腔体温度会增加的产物咀嚼性和 a^* , 硬度则先上升后下降; 进料速率对产物的纤维化度影响极其显著($P<0.01$)。

关键词: 鱼蛋白; 高水分挤压蒸煮; 组织化; 质构特性; 色泽

中图分类号: TS 254.8

文献标志码: A

食品挤压技术已发展了近 80 年, 但对于高水分($>40\%$)蛋白物料的挤压组织化研究, 直到 20 世纪 80 年代末期才开始起步^[1-2]。在高水分挤压蒸煮过程中, 蛋白类物料在双螺杆挤压机内部承受高温高压高剪切的环境, 从模口端挤出时突然变为常温常压, 挤出物发生闪蒸和膨胀, 瞬间脱去一部分水分, 形成多孔蓬松的物质, 因而属于膨化类产物^[3]。这类挤出物没有天然肉类明显的纤维结构, 口感以韧性为主, 缺少天然肉类具有的弹性。在挤压机的模口处增加冷却模头控制设备, 可以从根本上解决上述问题。高水分物料在挤压机腔体末端形成高温的熔融体后, 在冷却模头内部逐步减压、冷却和成型, 从而避免了高温产物直接暴露在常温常压下发生的闪蒸和膨胀^[1,4-5]。

植物蛋白, 尤其是大豆蛋白的高水分($60\% \sim 70\%$)挤压组织化的研究已较为成熟。利用带有冷却模头的双螺杆挤压机, 得到的质构重组产

物具有明显的纤维结构, 并沿轴向排列, 有很好的弹性和咀嚼感, 与天然肉类相似^[6-8]。此外, 高水分物料在整个挤压过程中基本没有水分流失, 挤压组织化后的产物仍具有较高的水分, 可直接食用或进一步加工调配成模拟食品。国内外对高水分动物蛋白的研究则相对较少^[9-10]。其中高水分鱼蛋白挤压组织化的原料水分大多在 $50\% \sim 60\%$, 且以膨化产物为主^[11-13]。国内在高水分动物蛋白热塑挤压组织化的研究上更是一片空白, 仍然没有得到具有明显天然肉类形态结构和质构特性的高水分模拟产物。

相对于传统的鱼糜、鱼糕等凝胶制品的加工技术对原料中蛋白质的冷冻变性要求较高, 挤压重组技术的适用性则更为广泛, 对于功能特性较差的原料也可进行加工利用。如果能利用带有冷却模头的双螺杆挤压机, 对低值鱼蛋白进行高水分($>60\%$)的挤压组织化, 得到口感和营养上更为接近

收稿日期: 2011-11-21 修回日期: 2012-05-03
资助项目: 国家科技支撑计划项目(2008BAD94B00)
通讯作者: 刘俊荣, E-mail: ljunrong@dlou.edu.cn

天然肉类的模拟产物, 不仅可以弥补低值鱼蛋白食用价值低的缺陷, 进一步提高其附加值, 还能够为低值鱼蛋白的开发和利用开辟新的途径。

中低水分鱼蛋白的挤压蒸煮组织化已经有了较为全面和系统的研究^[14-17], 本研究在此基础上, 对双轴挤压蒸煮机进行了冷却模头控制系统的安装调试, 以低值鱼蛋白的高水分挤压蒸煮组织化为出发点, 探讨了在新的挤压蒸煮系统下操作参数对鱼蛋白高水分模拟产物组织化效果的影响。重点针对增加冷却模头控制后所得到的挤出产物的纤维化程度、质构特性及色泽进行分析, 旨在为高水分鱼蛋白重组产品的开发及后续研究提供理论基础。

1 材料与amp;方法

1.1 实验材料及预处理

实验中所使用的冷冻狭鳕(*Theragra chalcogramma*)鱼片加工边料碎肉由大连融达海产食品有限公司提供, 大豆分离蛋白产自山东嘉华保健品股份有限公司。

冷冻的狭鳕下脚料在室温下解冻, 经斩拌机斩拌, 绞肉机绞碎后, 分批混匀, 根据所需的不同的原料水分, 分别按照一定的比例加入大豆分离蛋白, 再次混匀后备用。

1.2 仪器和设备

双轴热塑挤压蒸煮设备 Clextral BC-45 双轴挤压蒸煮机为法国 Clextral 公司生产的同向旋转完全啮合型自洁挤压机, 其有效工作螺杆长度为 1 000 mm, 长径比为 18:1, 共有 5 个腔段, 其中 4 个腔段可加热, 试验过程中的腔体温度是指末段腔体温度。挤压蒸煮机控制面板上可调节的参数包括螺杆转速、腔体温度、进料速率和进水量等, 其中进料速率的单位为%。水分含量为 72% 的原料, 10% 的进料速率约等于 27 kg/h。

蛋白质挤压蒸煮组织化冷却模头控制系统

冷却模头控制系统安装在双轴挤压设备末段腔体之后, 与双轴挤压蒸煮机无缝连接。冷却设备的主要部件包括不锈钢齿轮压力泵、变频电机、温度和压力传感器、变频器和温度控制器及冷却套筒。从挤压机末段腔体挤出的物料首先进入冷却系统中的不锈钢齿轮减压泵, 在变频电机的推动下, 缓慢通过冷却套筒, 达到冷却的效果。其中, 变频电机

的功率由电机转速(单位为 Hz)来调节, 冷却设备的总长度约为 5 m。

其他设备 WJ125 搅拌机(萧山商业机械有限公司); DP45 斩拌机(哈尔滨商业机械制造总厂); TJ12-H 绞肉机(广东恒联食品机械有限公司); BS-110S 分析天平(北京赛多利斯天平有限公司); 101-2-BS 电热恒温鼓风干燥箱(上海跃进医疗器械厂); TMS-Pro 质构分析仪(美国 Food Technology Corporation 公司); 4500s 色彩色差仪(HunterLab 公司)

1.3 分析测试

水分含量的测定 参照文献[18]的方法。

剪切值的测定 使用 TMS-Pro 质构分析仪测定重组产物的剪切值, 沿螺杆挤出方向的剪切值定义为纵向剪切, 垂直于挤出方向的为横向剪切。用取样器将挤出物切成边长约 1 cm 的立方体, 横向和纵向剪切均测定 3 个平行样品, 剪切速度为 60 mm/min。

纤维化度 纤维化结构是高水分蛋白质组织化模拟产物最明显的特征, 纤维化的程度可以在很大程度上反映挤压重组产物的组织化效果。产物的纤维化度定义如下:

$$\text{纤维化度} = \frac{\text{横向剪切值}}{\text{纵向剪切值}}$$

全质构分析(TPA) 用质构仪测定所得样品的硬度、弹性和咀嚼性, 每组平行测定 3 个样品, 样品高度约为 10 mm, 采用直径为 6 mm 的平底柱形探头 P/6。测定条件: 测前速率 60 mm/min; 测中速率 30 mm/min; 测后速率 60 mm/min; 压缩形变量为 30%。

色泽的测定 HunterLab 公司的 4500s 型色彩色差仪, 测定产品的亮度 (L*)、红绿值 (a*) 和黄蓝值 (b*)。

1.4 方案设计

双轴挤压蒸煮机在安装了冷却模头后增加了电机转速(冷却系统中)这一可调参数, 电机转速的改变能够影响挤出物在冷却模头中的流动速度, 挤压机腔体内部的压力以及物料在腔体内部的分布和滞留, 从而形成了新的挤压蒸煮系统。在新的系统中, 调节各操作参数对模拟产物基本肉类特性的影响程度以及具体的影响趋势, 需要进行较为系统的研究, 也是进行高水分鱼蛋白挤压组织化研究的基础工作。

因而,本方案以带冷却模头的双轴挤压蒸煮机的螺杆转速、腔体温度、冷却系统电机转速、进料水分和进料速率为输入参数,以产品的纤维化度、质构特性和色泽为响应因素,结合挤压机特殊的多输入多输出的系统特点,采用可旋转的中心组合设计,结合响应面分析法,研究了新的挤压蒸煮系统下的操作参数对挤压重组模拟产物的影响^[19-20]。每个自变量设有 5 个水平(表 1),采用

5(1/2 实施)设计,共 32 组实验^[21]。基于大量的摸索试验基础上,各操作参数水平的选取依据以下原则:第一,产物能够从冷却系统中顺利挤出;第二,新的挤压蒸煮系统能够平稳运行。

2 结果与讨论

按照表 1 中的试验方案得到了高水分鱼蛋白挤压重组制品的系列模拟产物,对产物的基本特

表 1 基于响应面的鱼肉双轴挤压蒸煮组织化试验设计方案

Tab. 1 Values assigned to extrusion cooking process parameters for response surface analysis

操作变量 process variable	编码 code	编码变量水平 code level				
		-2	-1	0	1	2
进料水分/% feed moisture	X_1	60	64	68	72	76
腔体温度/℃ barrel temperature	X_2	160	173	185	198	210
进料速率/% feed rate	X_3	5	7	9	11	13
螺杆转速/(r/min) screw speed	X_4	160	195	230	265	300
电机转速*/Hz motor rate	X_5	15.00	23.75	32.50	41.25	50.00

注:*电机转速为冷却系统电机转速。

Notes: The motor rate means the cooling die motor rate.

表 2 高水分鱼蛋白挤压组织化模拟产物特性的分析结果

Tab. 2 Results of the analogs under high moisture extrusion cooking

试验编码 no.	Y_1	Y_2/N	Y_3	Y_4/mJ	Y_5	Y_6	Y_7
1	1.742	14.12	0.86	20.19	50.07	1.99	13.03
2	1.622	2.64	0.89	5.33	44.22	3.88	16.53
3	0.905	2.60	0.86	4.98	56.56	1.17	14.04
4	0.773	2.67	0.81	4.78	53.02	-2.00	10.97
5	4.101	6.38	0.84	12.47	31.66	3.98	13.61
6	5.518	6.70	0.87	13.69	51.68	1.13	11.87
7	2.793	7.65	0.89	15.38	47.16	0.47	10.26
8	2.031	7.07	0.88	14.99	45.73	2.09	13.43
9	1.569	9.03	0.86	9.21	47.70	1.08	11.19
10	1.569	9.03	0.86	9.21	47.70	1.08	11.19
11	0.644	1.57	0.76	2.69	65.06	-2.46	11.58
12	2.105	2.67	0.87	5.47	47.84	3.40	15.56
13	2.106	6.92	0.85	13.34	47.11	1.96	12.23
14	0.854	3.12	0.85	6.22	52.22	0.04	14.90
15	1.925	10.58	0.85	15.36	48.55	2.28	12.93
16	3.447	7.24	0.83	14.67	30.97	3.22	13.03
17	1.312	7.78	0.89	15.69	44.80	0.85	11.54
18	1.620	13.38	0.88	27.92	41.59	0.78	11.14
19	3.755	10.16	0.86	20.65	40.21	3.41	14.24
20	1.380	2.49	0.86	4.96	49.48	0.42	11.64
21	1.949	6.87	0.88	14.18	38.40	3.04	13.01
22	2.924	2.71	0.91	5.82	50.25	3.37	17.33
23	1.569	9.03	0.86	9.21	47.70	1.08	11.19
24	1.553	5.00	0.89	10.05	31.45	6.99	20.48
25	1.716	11.20	0.90	23.45	44.58	2.36	16.92
26	3.893	5.16	0.87	9.89	33.21	4.35	13.89
27	2.984	5.34	0.87	10.85	33.97	3.22	9.74
28	2.701	4.03	0.85	7.42	42.33	3.52	13.01
29	1.569	9.03	0.86	9.21	47.70	1.08	11.19
30	1.210	2.39	0.85	4.69	51.64	0.32	12.60
31	1.569	9.03	0.86	9.21	47.70	1.08	11.19
32	1.569	9.03	0.86	9.21	47.70	1.08	11.19

性进行分析, 得到了挤出产物的纤维化度(Y_1)、硬度(Y_2)、弹性(Y_3)、咀嚼性(Y_4)和色泽($Y_5=L^*$, $Y_6=a^*$, $Y_7=b^*$), 在此基础上, 采用 Design Expert 7.0 软件对数据进行分析, 探讨操作参数对挤出物组织化效果影响的规律。

2.1 冷却模头控制下的模拟肉类组织化效果

研究表明, 双轴挤压蒸煮处理鱼蛋白时, 在出口端增加模头冷却控制系统, 可以得到具有天然肉类纤维结构和口感的模拟产物(图 1, 图 2)。高水分鱼蛋白物料在挤压机套筒高温、高压、高剪切的作用下, 沿螺杆推动方向前进, 在挤压机的腔体末端形成熔融体, 通过冷却模头控制系统, 流动的物料逐步冷却、同时沿着轴向形成与天然肌肉相似的纤维化结构, 初步的咀嚼品评发现该产物具有明显的肉类制品的质感。图 1-a 是研究的主要原料即进口冷冻狭鳕, 经反复冻结再解冻已因冷冻变性

基本丧失了持水性。图 1-b 是鱼蛋白经挤压蒸煮重组后的模拟产物; 图 2 分别为不同挤压蒸煮操作参数下, 随机在线抽取的挤压组织化产物。可以很直观的看出, 重组后的产物具有天然的肌肉纤维丝状结构, 且纤维结构有明显的方向性, 纤维丝总体上沿轴向平行排列。

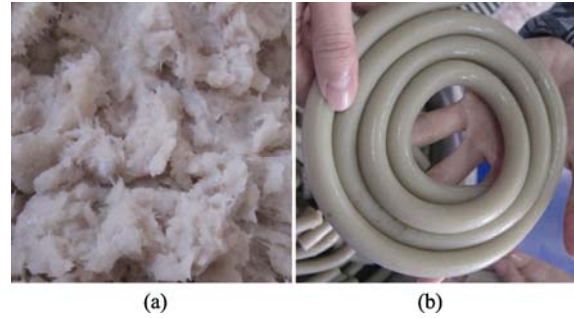


图 1 原料(a)和挤出产物(b)
Fig. 1 Raw material(a) and extrudate(b)

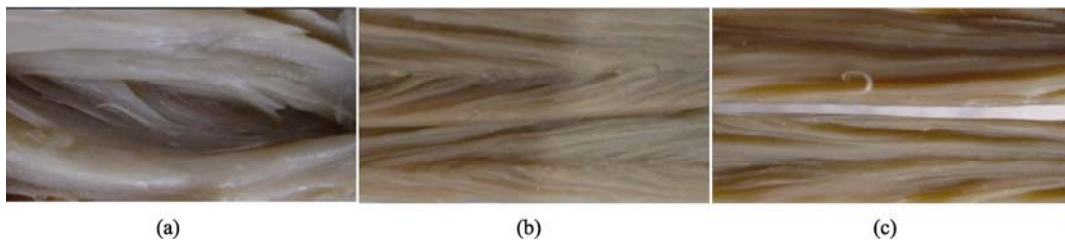


图 2 不同操作参数下挤出产物的剖面图

(a)、(b)和(c)的操作参数(依次为进料水分、腔体温度、螺杆转速、进料速率和电机转速)分别为 72%、198 °C、265 r/min、11%和 41.25 Hz; 68%、185 °C、230 r/min、5%和 32.50 Hz; 64%、173 °C、265 r/min、7%和 23.75 Hz。

Fig. 2 Profile of the extrudate under different process parameters

The process parameters, including feed moisture, barrel temperature, screw speed, feed rate and motor rate, are respectively: 2%, 198 °C, 265 r/min, 11%, 41.25 Hz and 68%, 185 °C, 230 r/min, 5%, 32.50 Hz and 64%, 173 °C, 265 r/min, 7% and 23.75 Hz(2-a, 2-b and 2-c in order).

2.2 操作参数对模拟肉类产物纤维化程度的影响

重组后的蛋白质模拟产物具有一定的纤维组织结构, 但不同操作参数下模拟物的纤维化程度也不相同(图 2)。由于纤维制品的力学性质具有方向性, 而不同操作参数下的纤维化程度也不一致, 因此可以通过力学测定在一定程度上判断挤压重组产物的组织化程度和效果^[22]。

对产物的纤维化度进行分析, 得到的方差分析结果如表 3 所示。从表中可以看出, 此模型显著, 可以很好的反映出操作参数对产物纤维化度的影响。进料水分和进料速率对产物的纤维化度影响特别显著($P<0.01$), 腔体温度和电机转速的影响次之, 但并不显著($P>0.05$), 螺杆转速对产物的纤维化度影响最小。此外, 只有进料水分和腔体温度的交互

作用对产物的影响显著, 其它交互作用均不显著。结合响应曲面图(图 3)可以更直观的看出, 在研究过程中, 产物的纤维化度随着进料水分的增加而降低, 调节进料水分、螺杆转速和电机转速对这一趋势并没有影响。当原料含有较高的水分时, 纤维化度随腔体温度的升高而增加, 原料含水量较低时则相反。随着进料速率的增加, 产物的纤维化度先降低后升高。不同水分含量的原料所得到的挤压重组产物, 在达到相同的组织化程度时, 低水分原料需要的温度较低, 而高水分原料需要的温度较高。一方面可能是由于原料中含水量的增加使得组织化的难度加大, 但也有可能是混合原料中的大豆分离蛋白可以促进物料的组织化和蛋白质的质构重组。

表 3 操作参数对模拟产物纤维化度影响的方差分析表
 Tab. 3 ANOVA of process parameters on fibrination degree of analogs

纤维化度 fibrination degree	平方和 sum of squares	自由度 df	平方差 mean squares	F 值 F-value	P 值 P-value	
模型 model	33.68	20	1.68	5.07	0.0042	significant
X ₁ -进料水分 feed moisture	6.92	1	6.92	20.83	0.0008	
X ₂ -腔体温度 barrel temperature	0.56	1	0.56	1.68	0.2215	
X ₃ -进料速率 feed rate	5.60	1	5.60	16.88	0.0017	
X ₄ -螺杆转速 screw speed	0.23	1	0.23	0.68	0.4278	
X ₅ -电机转速 motor rate	0.42	1	0.42	1.26	0.2858	
X ₁ X ₂	4.06	1	4.06	12.23	0.0050	
X ₁ X ₃	0.49	1	0.49	1.47	0.2505	
X ₁ X ₄	0.47	1	0.47	1.42	0.2577	
X ₁ X ₅	0.46	1	0.46	1.39	0.2625	
X ₂ X ₃	0.93	1	0.93	2.81	0.1219	
X ₂ X ₄	0.30	1	0.30	0.91	0.3598	
X ₂ X ₅	0.42	1	0.42	1.27	0.2845	
X ₃ X ₄	0.24	1	0.24	0.74	0.4088	
X ₃ X ₅	0.00	1	0.00	0.00	0.9838	
X ₄ X ₅	0.66	1	0.66	1.98	0.1869	
X ₁ ²	0.03	1	0.03	0.10	0.7610	
X ₂ ²	0.02	1	0.02	0.07	0.7996	
X ₃ ²	11.11	1	11.11	33.45	0.0001	
X ₄ ²	0.68	1	0.68	2.06	0.1788	
X ₅ ²	0.17	1	0.17	0.52	0.4876	
残差 residual	3.65	11	0.33			
失拟度 lack of fit	3.65	6	0.61			
纯误差 pure error	0.00	5	0.00			
总和 cor total	37.33	31				

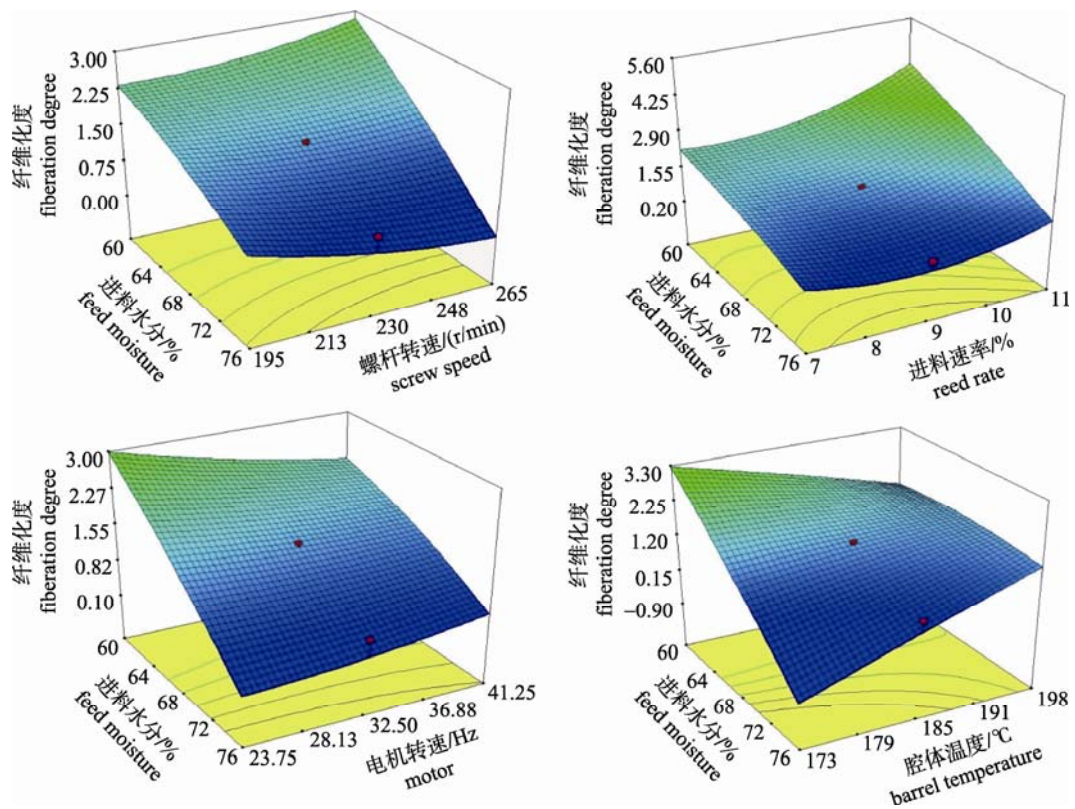


图 3 操作参数对模拟产物纤维化度的影响
 Fig. 3 Effect of process parameters on fibrination degree of analogs

在挤压过程中还发现, 挤出物的纤维化度过低时, 基本观察不到产物的纤维状结构, 但肉粒感明显, 具有很好的咀嚼感; 挤出物的纤维化度过高时, 产物的纤维状结构不明显。此外, 虽然产物的纤维化度较为相近(图 2-a,c) 但产物在质感上有很大的区别, 因而以纤维化度评判组织化效果具有局限性, 只能在一定程度上反映产物的组织化效

果。如果需要判断模拟产物的组织化效果, 必须综合考虑产品的其它指标。

2.3 操作参数对模拟产物质构特性的影响

蛋白质高水分挤压重组制品能否被消费者所认可, 关键在于其质感或口感。感官可接受性依赖于产物的质构特性, 产品的硬度、弹性和咀嚼感则是模拟肉类产物的质构特性最直接的表现。

表 4 操作参数对模拟产物硬度、弹性、咀嚼性影响的方差分析表
Tab. 4 ANOVA of process parameter on hardness, springiness and chewiness of analogs

硬度 hardness	平方和 sum of quares	自由度 df	平方差 mean squares	F 值 F-value	P 值 P-value	
模型 model	303.15	20	15.16	3.31	0.0227	significant
X ₁ -进料水分 feed moisture	112.04	1	112.04	24.49	0.0004	
X ₂ -腔体温度 barrel temperature	28.24	1	28.24	6.17	0.0303	
X ₃ -进料速率 feed rate	3.03	1	3.03	0.66	0.4332	
X ₄ -螺杆转速 screw speed	6.82	1	6.82	1.49	0.2475	
X ₅ -电机转速 motor rate	2.01	1	2.01	0.44	0.5212	
咀嚼性 chewiness	平方和 sum of quares	自由度 df	平方差 mean squares	F 值 F-value	P 值 P-value	
模型 model	961.44	20	48.07	3.87	0.0126	significant
X ₁	486.27	1	486.27	39.13	< 0.0001	
X ₂	135.04	1	135.04	10.87	0.0071	
X ₂ X ₅	69.60	1	69.60	5.60	0.0374	
弹性 springiness	平方和 sum of quares	自由度 df	平方差 mean squares	F 值 F-value	P 值 P-value	
模型 model	0.014	20	0.00	0.85	0.6349	not significant
X ₁	0.002	1	0.00	2.43	0.1476	
X ₂	0.003	1	0.00	3.87	0.0749	

注: 只列出对产物质构特性有显著影响的因素。

Notes: Only the significant parameters to the texture property were listed.

由数据分析可得表 4, 不同操作参数对产物硬度和咀嚼性影响的模型均显著。在此模型中, 进料水分对产物的硬度影响极其显著($P < 0.01$), 腔体温度对产物的硬度影响显著($P < 0.05$), 螺杆转速、电机转速和进料速率对产物的硬度影响均不显著($P > 0.01$), 任意两个参数之间的交互作用对产物的影响也不显著。由图 4 可以看出, 进料水分的增加使产物的硬度明显下降, 腔体温度的上升则会适当的增加产物的硬度。进料水分和腔体温度对产物咀嚼性的影响都特别显著($P < 0.01$), 电机转速、进料速率和螺杆转速对咀嚼性的影响依次减小, 但均不显著。腔体温度和电机转速的交互作用对咀嚼性的影响显著($P = 0.0347 < 0.05$), 其余交互作用均不显著。图 4 表明, 进料水分和腔体温度对产物咀嚼性的影响与对产物硬度的影响基本一致, 原料

中水分含量的增加会降低重组制品的咀嚼性, 腔体温度的升高对咀嚼性也有一定程度的提升作用。当电机转速较高时, 腔体温度的升高会使产物的咀嚼性大幅提高。电机转速在低温区和高温区对咀嚼感的影响相反, 在低温区随着转速的升高, 咀嚼性降低, 高温区反而上升。

相对于其它模拟制品, 在模拟天然肉类时, 对产物的弹性有着更高的要求。对挤压重组模拟产物的弹性指标进行分析, 所得到的模型并不显著($P > 0.05$)。但进料水分对产品弹性的影响仍然很明显, 进料水分的增加会显著降低产品的弹性。试验过程中, 大部分挤压重组产物的弹性都超过了 0.85。为了更直观的对产品的弹性进行诠释, 在同一测试条件下, 对市售的猪肉火腿肠和鱼肉火腿肠也进行了全质构分析, 所得到的弹性分别为 0.90

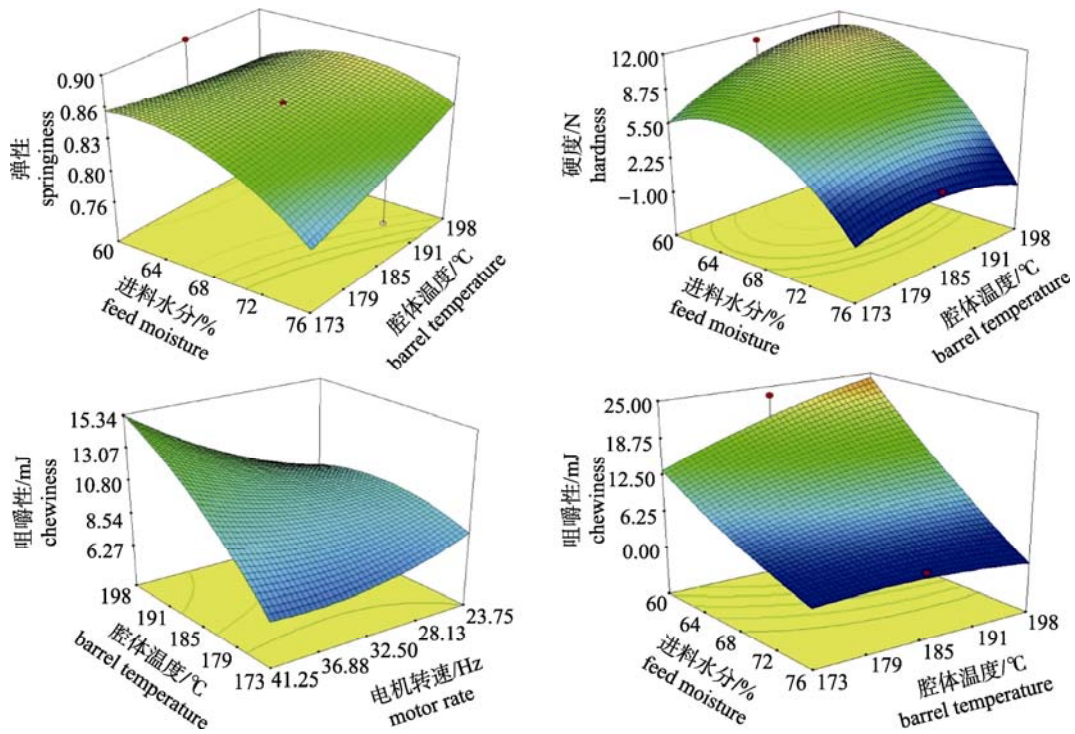


图 4 操作参数对模拟产物质构特性的影响

Fig. 4 Effect of process parameters on texture properties of analogs

和 0.89。以此为依据, 综合操作参数对重组产物质构特性的影响, 可以对下一步的产品开发提供更详细和直观的指导。

2.4 操作参数对模拟产物色泽的影响

组织化模拟产物的色泽是变化的 (图 2), 食品的色泽是人们感官评价食品品质的一个重要因

素, 分析高水分鱼蛋白挤压重组产物的色泽后得到表 5, 进料水分对产物的 L*和 a*影响显著, 腔体温度对产物的 a*和 b*影响显著, 进料水分和腔体温度的交互作用对产物的 L*和 a*影响显著, 其它操作参数及操作参数间的交互作用对产物的色泽影响均不显著。

表 5 操作参数对模拟产物色泽影响的方差分析表
Tab. 5 ANOVA of process parameter on color of analogs

L*	平方和 sum of quares	自由度 df	平方差 mean squares	F 值 F-value	P 值 P-value	
模型 model	1266.32	20	63.32	2.83	0.0399	significant
X ₁ -进料水分 feed moisture	671.73	1	671.73	30.02	0.0002	
X ₂ -腔体温度 barrel temperature	55.43	1	55.43	2.48	0.1438	
X ₃ -进料速率 feed rate	8.38	1	8.38	0.37	0.5531	
X ₄ -螺杆转速 screw speed	5.50	1	5.50	0.25	0.6299	
X ₅ -电机转速 motor rate	24.95	1	24.95	1.11	0.3137	
X ₁ X ₂	140.11	1	140.11	6.26	0.0294	
a*	平方和 sum of quares	自由度 df	平方差 mean squares	F 值 F-value	P 值 P-value	
模型 model	84.85	20	4.24	3.23	0.0248	significant
X ₁	15.37	1	15.37	11.71	0.0057	
X ₂	21.99	1	21.99	16.75	0.0018	
X ₂ X ₅	11.04	1	11.04	8.41	0.0145	
b*	平方和 sum of quares	自由度 df	平方差 mean squares	F 值 F-value	P 值 P-value	
模型 model	133.75	20	6.69	1.83	0.1521	not significant

X_2	26.57	1	26.57	7.26	0.0208
-------	-------	---	-------	------	--------

由图 5 可以看出, 当原料水分从 60% 增加到 76% 时, 挤出物的亮度逐渐提升, a^* 不断下降, 产物的色泽偏向于亮绿色。随着挤压腔体温度的升高, 产物的亮度下降, a^* 和 b^* 加大, 重组产物不断的变

暗, 并变红发黄。但是在低水分区域, a^* 随着腔体温度的升高而下降, 但并不明显。电机转速对产物 b^* 的影响程度仅次于腔体温度, 随着电机转速的降低, 产物 b^* 下降。

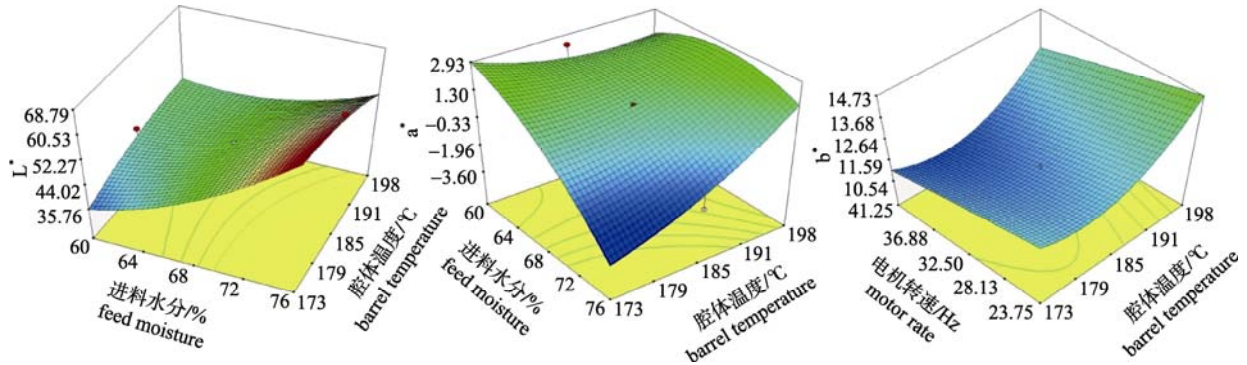


图 5 操作参数对模拟产物色泽的影响

Fig. 5 Effect of process parameters on color of analogs

在研究操作参数对产物色泽影响的挤压过程中, 原料中水分含量越多, 鱼肉比例越高, 腔体温度越低, 挤压重组产物的亮度越高。当腔体温度处于较高的水平时, 产物从视觉上变得更黄, 这些现象都与上面的分析结果一致。在进行产品研发时, 可以根据模拟产物色泽的变化规律, 开发不同色泽需求的产品。

3 结论与展望

本研究在双轴挤压机配备冷却模头控制系统的基础上, 较为全面和系统的探讨了热塑挤压蒸煮过程中操作参数对鱼蛋白高水分重组产物的组织化效果的影响。研究表明: ①通过增加冷却模头控制系统, 挤压机腔体内的高温高压物料从出口端进入冷却控制腔段, 其高温高压得到缓慢的释放, 同时水分得以保持, 最终得到了水分高达 70% 以上且与天然肉类纤维结构和口感十分相似的模拟产物, 是高水分鱼蛋白挤压组织化研究的重点。②原料的水分含量是安装了冷却系统的高水分挤压组织化技术的重要操作参数, 对挤出模拟产物的纤维化度、质构特性和色泽均有显著的影响。③挤压腔体的温度和进料速率对于产物的部分特性有较大的影响。④新增加的操作参数即冷却系统电机转速对产物的纤维化度和质构特性影响不大, 但对模拟产物的色泽影响较大。

操作参数对组织化模拟产物影响的规律是进

一步研究高水分鱼蛋白挤压组织化的前提, 也是本研究的重点, 在此基础上, 将针对带有冷却模头控制系统的双轴挤压蒸煮系统的功耗问题、滞留时间分布问题以及模拟产物的营养特性等开展系统研究。此外, 今后在对产物的组织化效果进行评定时, 应该结合产品的感官评定、质构特性和色泽等因素, 建立客观、可靠和规范的评价标准。

特别感谢中国海洋大学刘建宝老师对挤压机冷却设备的安装调试以及后续试验工作中给予的指导。感谢大连海洋大学机械学院的杨君德老师和杨勇老师在解决设备运行和维修中提供的帮助和支持。感谢食品挤压技术实验室的同学们对试验的大力支持和参与。

参考文献:

- [1] Noguchi A. Extrusion cooking of high moisture protein foods[M]//Extrusion Cooking. American Association for Clinical Chemistry, 1989: 343-361.
- [2] Isobe S, Noguchi A. High moisture extrusion with a twin-screw extruder: fate of soy protein during the repetition of extrusion cooking[J]. Nippon shokuhin Kogyo Cakkaishi, 1989, 34(5): 456-461.
- [3] 刘俊荣. 热塑挤压蒸煮技术对鱼肉蛋白质组织化的应用研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2005: 79-82.
- [4] Harper J M. Extrusion of Foods[M]. Boca Raton, Florida: CRC Press, 1991: 203-212.
- [5] Liu K S, Hsieh F H. Protein-Protein interactions during high-moisture extrusion for fibrous meat analogues and comparison of protein solubility methods using different

- solvent systems[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2008, 56(8): 2681–2687.
- [6] Lin S, Huff H E, Hsieh F. Extrusion process parameters sensory characteristics and structural properties of a high moisture soy protein meat analog[J]. *Journal of Food Science*, 2002, 67(3): 1066–1072.
- [7] Chen F L, Wei Y M, Zhang B, *et al.* System parameters and product properties response of soybean protein extruded at wide moisture range[J]. *Journal of Food Engineering*, 2010, 96(9): 208–213.
- [8] Li S Q, Zhang H Q, Jin Z T, *et al.* Textural modification of soya bean/corn extrudates as affected by moisture content, screw speed and soya bean concentration[J]. *International Journal of Food Science and Technology*, 2005, 40(7): 731–741.
- [9] Hüya A. Review: High moisture food extrusion[J]. *International Journal of Food Science and Technology*, 1999, 34(2): 195–207.
- [10] 孙照勇, 陈锋亮, 张波, 等. 植物蛋白高水分挤压组织化技术研究进展[J]. *农业工程学报*, 2009, 25(3): 308–312.
- [11] Gogol B K, Oswalt A J, Choudhury G S. Reverse screw elements and feed composition effects during twinscrew extrusion of rice flour and fish muscle blends[J]. *Food Science*, 1996, 61(3): 590–595.
- [12] Suknak K, Phillips R D, Huang Y W. Tapioca-Fish and Tapioca-Peanut snacks by twinscrew extrusion and deep-fat frying[J]. *Food Science*, 1999, 64(2): 303–308.
- [13] 刘俊荣, 汪秋宽, 叶于明. 鱼肉脱脂对双轴挤压组织化的影响[J]. *水产学报*, 1999, 23(3): 283–289.
- [14] 刘俊荣, 薛长湖, 佟长青, 等. 鱼肉蛋白质热塑挤压组织化中过程参数的优化模型[J]. *水产学报*, 2005, 29(5): 700–705.
- [15] 路红波, 刘俊荣. 热塑挤压蒸煮对鱼肉蛋白质营养价值的影响初探[J]. *水产科学*, 2005, 24(2): 29–30.
- [16] 刘俊荣, 路红波. 热塑挤压蒸煮技术在鱼蛋白综合开发方面的应用[J]. *渔业现代化*, 2006(2): 42–43.
- [17] 刘俊荣, 薛长湖, 俞微微, 等. 鱼肉蛋白质挤压蒸煮过程中操作参数对挤出物水分含量及堆积密度的影响[J]. *水产学报*, 2006, 30(6): 818–823.
- [18] 魏广东. 水产品质量安全检验手册[M]. 北京: 中国标准出版社, 2005.
- [19] Jowit R. Extrusion cooking technology[M]. London and New York: Elsevier Applied Science publishers, 1983: 51–74.
- [20] Meuser F, Lengerich B. System analytical model for the extrusion of starches[M]. London and New York: Elsevier Applied Science Publishers, 1984: 175–179.
- [21] 王钦德, 杨坚. 食品实验设计与统计分析[M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2002: 416–420.
- [22] 李里特. 食品物性学[M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2001: 179–182.

Effects of process parameters on fish protein texturization under high moisture

WANG Shuai¹, LIU Jun-rong^{1*}, FU Run-ze¹, XUE Chang-hu²

(1. College of Food Science and Engineering, Dalian Ocean University, Dalian 116023, China;

2. College of Food Science and Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266003, China)

Abstract: For the purpose of reconstructing the fish protein with high moisture and making meat analog, the central composite design and response surface method were used. Five extrusion process parameters including feed moisture, barrel temperature, screw speed, feed rate and motor rate of the cooling die were taken as the dependent factors, while fibration degree, hardness, springiness, chewiness and color of the meat analogs as independent parameters. Firstly, the extrudate obtained have well-defined fiber formation along the axial direction and resemble natural meat in springiness, visual and taste sensation. The results also indicated that the feed moisture had very distinct influence ($P < 0.01$) on fibration degree, hardness and chewiness, and significant impact ($P < 0.05$) on L^* and a^* of the color. The increase of the feed moisture will lead to the decrease of fibration degree, hardness, chewiness and a^* and the improvement of L^* . The barrel temperature affected chewiness markedly while it affected hardness, a^* and b^* significantly. Higher barrel temperature will increase the chewiness and a^* and the hardness increases first and then decreases. Feed rate also has remarkable effect on fibration degree.

Key words: fish protein; high moisture extrusion cooking; texturization; texture property; color

Corresponding author: LIU Jun-rong. E-mail: ljunrong@dlou.edu.cn