



“十三五”
国家重点图书

食品加工过程安全控制丛书
Safety Control in Food Processing Series

Control in Food Processing



食品加工过程 安全优化与控制

Optimization and Control
of Food Safety in Food Processing

胡小松 谢明勇 等编著



化学工业出版社



“十三五”
国家重点图书

食品加工过程安全控制丛书
Safety Control in Food Processing Series



食品加工过程 安全优化与控制

Optimization and Control
of Food Safety in Food Processing

胡小松 谢明勇 等编著



化学工业出版社

· 北京 ·

热加工是极其重要的食品加工工艺之一,对食品的色、香、味、形等都有重要的影响,但是在加工过程中会生成多种对人体健康具有直接影响或潜在危害的化合物。本书共分9章,在理论研究的基础上,重点选取了食品加工过程中形成的丙烯酰胺、呋喃、杂环胺类化合物、氯丙醇酯、反式脂肪酸、羟甲基糠醛、亚硝酸盐及亚硝胺、食品中晚期糖基化终末产物,介绍了这些危害物在食品中的存在状况、分析方法、毒性及毒性作用机制、形成途径及控制措施等的研究进展,对推动本领域的科学研究具有一定的指导意义。本书将科学研究的理论成果和食品企业生产实践紧密结合,具有很强的理论性和实践价值。

本书可作为从事食品科学、食品工程、粮油加工、食品检验、卫生检验、外贸商检等相关工作人员的参考书。亦可作为农业、食品、生物、环境等各学科方向的有关研究人员、专业技术工作者、食品监督检验和管理人员及相关专业院校师生的参考资料。

图书在版编目(CIP)数据

食品加工过程安全优化与控制/胡小松,谢明勇等编著. —北京:
化学工业出版社, 2016.10
国家出版基金项目
“十三五”国家重点图书
(食品加工过程安全控制丛书)
ISBN 978-7-122-27958-3

I. ①食… II. ①胡…②谢… III. ①食品加工-生产过程控制 IV. ①TS205

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第206786号

责任编辑:赵玉清

文字编辑:周 侗

责任校对:王素芹

装帧设计:尹琳琳

出版发行:化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街13号 邮政编码100011)

印刷:北京永鑫印刷有限责任公司

装订:三河市胜利装订厂

710mm×1000mm 1/16 印张20 $\frac{3}{4}$ 字数362千字 2017年3月北京第1版第1次印刷

购书咨询:010-64518888(传真:010-64519686) 售后服务:010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

定 价: 78.00 元

版权所有 违者必究



《食品加工过程安全控制丛书》

编委会名单

主任委员：陈 坚

副主任委员：谢明勇 李 琳 胡小松 孙远明 孙秀兰
王 硕 孙大文

编委会委员：（按汉语拼音排序）

陈 芳	陈 坚	陈 奕	陈 颖	邓启良
邓婷婷	方 芳	胡松青	胡小松	雷红涛
李 冰	李 昌	李 琳	李晓薇	李 耘
刘英菊	聂少平	皮付伟	尚晓虹	申明月
石吉勇	苏健裕	孙大文	孙秀兰	孙远明
王俊平	王 盼	王鹏璞	王 婷	王 硕
王周平	吴 青	吴世嘉	肖治理	谢明勇
辛志宏	熊振海	徐 丹	徐小艳	徐振波
徐振林	杨艺超	袁 媛	张银志	张 英
张继冉	钟青萍	周景文	邹小波	



食品加工过程安全控制丛书
Safety Control in Food Processing Series

本书编写人员名单

(按汉语拼音排序)

陈 芳	中国农业大学
陈 奕	南昌大学
胡小松	中国农业大学
李 昌	南昌大学
聂少平	南昌大学
申明月	南昌大学
王 盼	中国农业大学
王鹏璞	中国农业大学
谢明勇	南昌大学
袁 媛	吉林大学
张 英	浙江大学

我国食品工业已进入快速扩张与高速发展的战略期，但在连接农田与餐桌的食品加工过程中，丙烯酰胺（油炸烘烤食品，如薯片、方便面等）、呔喃（罐制食品、婴儿食品等）、杂环胺类化合物（肉制品）、反式脂肪酸（烘焙—烧烤食品、植脂末）等食品加工过程产生的化合物的安全问题逐渐成为世界各国关注的热点。这些化合物的共同特点是：在加工过程产生，特别是在易发生美拉德反应的高碳水化合物、高蛋白质食品、易产生油脂氧化以及异构化的高油脂食品和易产生胺（氨）类代谢物的发酵食品等加工体系中尤为突出。同时，这些化合物均具有不同程度的毒性，对消费者身体健康具有潜在风险或直接影响。因此，食品加工过程已经成为保障食品安全各个环节中最薄弱也是最迫切需要加强的环节。

本书从食品加工过程中典型危害物的存在、毒性及毒性作用机制、分析方法、形成途径及控制措施等角度解决食品加工过程中的关键问题，突出理论与食品生产实践相结合，具有极强的理论性和实用性，同时可为保障我国食品安全做出积极指导。本书可作为从事食品科学、食品工程、粮油加工、食品检验、卫生检验、外贸商检等相关工作人员的参考书。亦可作为农业、食品、生物、环境保护等各学科方向的有关研究人员、专业技术工作者、食品监督检验和管理人员及相关专业院校师生的参考资料。

本书编写人员均为食品化学安全领域的研究者，在食品加工危害物研究方面具有丰富的研究和教学经验。各章节编写分工如下：第1章由胡小松、陈芳编写；第2章由胡小松、袁媛编写；第3章由聂少平、申明月编写；第4章由陈芳、王盼编写；第5章由谢明勇、陈奕编写；第6章由谢明勇、李昌编写；第7章由袁媛、王鹏璞编写；第8章由袁媛编写；第9章由张英、袁媛编写。

限于编写人员的学识和写作水平，加之时间仓促，难免存在不足之处，恳请广大读者随时提出宝贵意见和建议，以便我们今后改正和进一步完善。

编著者

2016年5月于北京

1 绪论

1.1 食品热加工过程的工艺特点	2
1.1.1 食品油炸加工过程的工艺特点	2
1.1.2 食品焙烤加工工艺特点	4
1.1.3 食品挤压膨化加工工艺特点	7
1.1.4 食品烤制加工工艺特点	8
1.1.5 食品蒸煮加工工艺特点	10
1.2 热加工过程食品中成分的变化及易生成的污染物	11
1.2.1 碳水化合物、蛋白质、脂肪——非酶褐变反应	11
1.2.2 油脂——氢化、精炼	21
1.2.3 肉制品——腌制	24
参考文献	27

2 丙烯酰胺

2.1 热加工食品中的丙烯酰胺及暴露评估	32
2.1.1 丙烯酰胺的性质	32
2.1.2 热加工食品中丙烯酰胺的含量及其分布	32
2.1.3 各国人群丙烯酰胺暴露评估	35
2.2 丙烯酰胺的毒性	37
2.2.1 丙烯酰胺的吸收与代谢	37
2.2.2 急性毒性	38
2.2.3 慢性毒性	39
2.2.4 神经毒性	40
2.2.5 生殖毒性	42
2.2.6 发育毒性	44
2.2.7 遗传毒性	46
2.2.8 致突变性	48
2.2.9 致癌性	49

2.3 食品中丙烯酰胺的分析方法	52
2.3.1 食品样品的前处理技术	52
2.3.2 液相色谱分析方法	59
2.3.3 气相色谱分析方法	62
2.3.4 电化学分析法	64
2.3.5 酶联免疫吸附测定法	64
2.4 食品中丙烯酰胺形成途径	65
2.4.1 通过美拉德反应形成丙烯酰胺的途径	65
2.4.2 丙烯醛或丙烯酸途径	71
2.5 食品加工过程中影响丙烯酰胺形成的因素	72
2.5.1 丙烯酰胺形成规律	72
2.5.2 加工温度	72
2.5.3 加工时间	73
2.5.4 前体物质浓度	73
2.5.5 水分含量及水分活度	74
2.5.6 油脂氧化	74
2.5.7 其他因素	75
2.6 抑制热加工食品中丙烯酰胺的方法	76
2.6.1 控制食品加工单元操作	76
2.6.2 控制原料中前体物质的浓度	77
2.6.3 添加外源食品添加剂	79
2.6.4 天然植物源成分对丙烯酰胺的抑制作用	81
2.6.5 天然植物源成分对丙烯酰胺体内毒性的抑制作用研究	83
参考文献	86

3

呔喃

3.1 概述	96
3.2 食品中呔喃的来源及暴露情况	97
3.2.1 食品中呔喃的主要来源	97
3.2.2 食品中呔喃的暴露情况	97
3.3 食品中呔喃的形成途径	101
3.3.1 通过氨基酸的降解形成呔喃	102

3.3.2	通过碳水化合物的降解形成呋喃	104
3.3.3	通过抗坏血酸的热氧化形成呋喃	104
3.3.4	通过多不饱和脂肪酸的热氧化形成呋喃	106
3.4	食品中呋喃的分析检测方法	107
3.4.1	顶空进样-气相色谱-质谱法	107
3.4.2	固相微萃取-气相色谱-质谱法	111
3.5	呋喃的健康隐患	113
3.5.1	呋喃的代谢	114
3.5.2	呋喃的毒性	115
3.5.3	呋喃的遗传毒性	115
3.5.4	呋喃的非遗传毒性	118
3.6	食品中呋喃的控制措施	119
3.7	未来展望	122
	参考文献	123

4 杂环胺类化合物

4.1	食品中杂环胺的种类及暴露评估	128
4.1.1	杂环胺类化合物的结构与分类	128
4.1.2	食品中杂环胺的基本性质	133
4.1.3	食品中杂环胺的含量及分布	134
4.1.4	杂环胺类化合物的暴露评估	134
4.2	杂环胺类化合物的毒性	139
4.2.1	杂环胺类化合物的代谢	139
4.2.2	杂环胺类化合物的致突变性	141
4.2.3	杂环胺类化合物的致癌性	143
4.2.4	杂环胺类化合物的心肌毒性	144
4.3	食品中杂环胺的分析方法	144
4.3.1	食品中杂环胺的分离富集方法	144
4.3.2	食品中杂环胺的检测方法	146
4.4	食品中杂环胺的形成途径与影响因素	148
4.4.1	食品中杂环胺的形成途径	148
4.4.2	影响因素	151

4.5 抑制食品中杂环胺的方法	153
4.5.1 腌制	153
4.5.2 微波	153
4.5.3 添加碳水化合物	153
4.5.4 添加抗氧化剂	154
4.5.5 添加植物提取物或香辛料	155
参考文献	155

5

氯丙醇酯

5.1 概述	164
5.2 氯丙醇酯的定义、理化性质和结构、分类	164
5.2.1 氯丙醇酯的定义和性质	164
5.2.2 氯丙醇酯的结构和分类	166
5.3 食品中氯丙醇酯的来源	166
5.3.1 食用油脂	166
5.3.2 其他热加工食品	167
5.3.3 包装材料	168
5.4 氯丙醇酯的形成机制	168
5.4.1 环酰氧鎗离子为中间体的亲核反应机制	168
5.4.2 直接亲核反应机制	169
5.4.3 缩水甘油酯为中间体的亲核反应机制	169
5.5 氯丙醇酯形成的影响因素	170
5.5.1 氯源	170
5.5.2 甘油酯	171
5.5.3 食品加工温度	172
5.5.4 加热时间	172
5.5.5 水分	172
5.5.6 其他因素	173
5.6 氯丙醇酯的分析检测方法	174
5.6.1 间接法	174
5.6.2 直接法	181
5.7 氯丙醇酯的转化、代谢及毒性	182

5.8 氯丙醇酯的暴露评估	184
5.9 氯丙醇酯的控制方法	186
5.9.1 油脂精炼前处理	186
5.9.2 油脂脱臭工艺改良	186
5.9.3 油脂精炼后处理	186
5.10 本章小结	187
参考文献	187

6 反式脂肪酸

6.1 概述	192
6.2 反式脂肪酸的化学性质	192
6.2.1 结构	192
6.2.2 熔点	193
6.2.3 紫外光谱	193
6.2.4 红外光谱	194
6.2.5 NMR 谱	195
6.3 反式脂肪酸的来源及形成机理	195
6.3.1 反刍动物制品中天然存在	195
6.3.2 食品热加工	195
6.3.3 油脂氢化	198
6.3.4 油脂的精炼脱臭	200
6.3.5 日常饮食中的反式脂肪酸含量分布	201
6.4 反式脂肪酸的流行病学及健康隐患	202
6.4.1 心血管疾病	202
6.4.2 糖尿病	203
6.4.3 癌症	204
6.4.4 其他方面的影响	205
6.5 反式脂肪酸的风险评价及政策监管	205
6.5.1 暴露评估	205
6.5.2 各国的政策监管	206
6.6 反式脂肪酸的分析及检测方法	207
6.6.1 气相色谱法	208

6.6.2	气相色谱-质谱法	211
6.6.3	红外光谱法	212
6.6.4	Ag ⁺ -TLC/HPLC	214
6.6.5	毛细管电泳法(CE)	215
6.7	反式脂肪酸的控制及抑制措施	215
6.7.1	食品热加工过程中的控制	215
6.7.2	油脂氢化过程中的控制	216
6.8	低反式脂肪酸食品的生产技术	221
6.8.1	酯交换	221
6.8.2	油脂的分馏/分提	225
	参考文献	225

7

羟甲基糠醛

7.1	热加工食品中的羟甲基糠醛及暴露评估	234
7.1.1	羟甲基糠醛的基本性质	234
7.1.2	热加工食品中羟甲基糠醛的含量及分布	235
7.1.3	羟甲基糠醛的暴露评估	236
7.2	羟甲基糠醛的毒性	237
7.2.1	羟甲基糠醛的代谢	237
7.2.2	羟甲基糠醛的毒性	237
7.2.3	羟甲基糠醛的毒理学	238
7.2.4	羟甲基糠醛药理作用研究现状	239
7.2.5	羟甲基糠醛的安全性评价	240
7.3	食品中羟甲基糠醛的分析方法	241
7.3.1	紫外分光光度法	241
7.3.2	液相色谱分析法	242
7.3.3	超高速液相色谱分析方法	243
7.3.4	液相色谱-串联质谱分析方法	244
7.4	食品中羟甲基糠醛的形成途径及影响因素	246
7.4.1	形成途径	246
7.4.2	羟甲基糠醛制备过程中的影响因素	249
7.5	抑制热加工食品中羟甲基糠醛的方法	252

7.5.1 阻止羟甲基糠醛形成	252
7.5.2 生成羟甲基糠醛后的阻断途径	253
参考文献	254

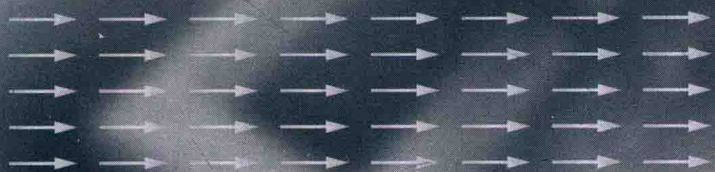
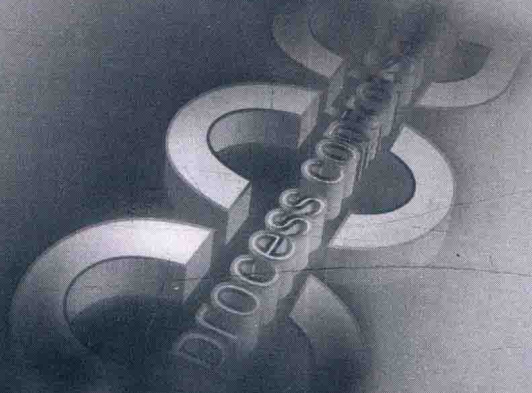
8 亚硝酸盐及亚硝胺

8.1 食品中的亚硝酸盐	258
8.1.1 食品中亚硝酸盐的来源	258
8.1.2 食品中亚硝酸盐的含量和分布	260
8.1.3 食品中亚硝酸盐对人体的危害	261
8.1.4 食品中亚硝酸盐的检测方法	263
8.1.5 腌制蔬菜中亚硝酸盐形成的影响因素	267
8.1.6 食品中亚硝酸盐的控制技术	269
8.2 食品中的 N-亚硝胺类化合物	273
8.2.1 食品中的 N-亚硝胺类化合物的种类和理化性质	273
8.2.2 食品中的亚硝胺类化合物的来源	275
8.2.3 不同食品中亚硝胺的含量	276
8.2.4 食品中的亚硝胺类化合物的危害	276
8.2.5 食品中的亚硝胺类化合物的检测方法	279
8.2.6 肉品中的亚硝胺类化合物的形成途径	283
8.2.7 食品中的亚硝胺类化合物的控制措施	284
参考文献	287

9 食品中晚期糖基化终末产物

9.1 食品中晚期糖基化终末产物的结构及来源	293
9.1.1 结构	293
9.1.2 晚期糖基化终末产物在食品中的含量及分布	294
9.2 晚期糖基化终末产物与人类健康的关系	296
9.2.1 食品加工过程中最重要的反应之一——美拉德反应	296
9.2.2 美拉德反应的不利方面及其伴生危害物	296
9.2.3 晚期糖基化终末产物的生化特性	297
9.2.4 晚期糖基化终末产物在人体内的细胞受体	297

9.2.5	食品中晚期糖基化终末产物在体内的代谢	298
9.2.6	食源性晚期糖基化终末产物对人类健康的影响	299
9.3	晚期糖基化终末产物的检测方法	304
9.3.1	荧光法	304
9.3.2	ELISA 法	304
9.3.3	液相色谱及液质联用技术	305
9.3.4	气质联用法	306
9.4	晚期糖基化终末产物的形成途径	307
9.4.1	传统形成途径	307
9.4.2	非传统形成途径	308
9.5	晚期糖基化终末产物的控制措施	309
9.5.1	添加外源抑制剂	309
9.5.2	控制食品加工单元操作	312
	参考文献	312
	索引	315



1

绪论

1.1 食品热加工过程的工艺特点

1.1.1 食品油炸加工过程的工艺特点

1.1.1.1 油炸

油炸 (frying) 过程就是在高温下将食物浸在油中, 油中的高温为食物提供热量, 使得食物表面温度升高, 食物内部的水分迅速汽化并且从食物的内部向食物外部转移, 同时食物内部的孔隙被煎炸油取代的过程。油炸过程中, 以油脂作为传热介质, 热量先从热源传递到油炸容器中, 容器表面的热量通过油脂的吸收再传递到食物表面; 食物表面的热量一部分是以传导的形式由食物表面传递到内部, 另一部分则是由油脂直接带入食物内部, 从而使食品发生蛋白质变性、淀粉糊化和水分蒸发等变化, 进而使食品受热成熟。

1.1.1.2 食品油炸加工工艺及特点

食品油炸主要有以下几种方式: 常压高温油炸、水油混合常压油炸和真空油炸。

常压高温油炸是指在常压下进行油炸加工, 一般油炸温度在 160°C 以上。这种油炸方式存在一定的缺陷: 首先, 持续高温下煎炸用油很快发生氧化、水解和聚合反应而使其变质, 色泽、黏度以及风味等方面均会发生变化, 导致油脂品质劣化, 且固体残渣长时间滞留在油中会加速油脂的劣变; 其次, 长时间高温下的油炸易生成不饱和脂肪酸的过氧化物, 影响产品中蛋白质的吸收, 且在氧化了的油脂中煎炸, 产品品质会受到影响; 另外, 常压高温油炸过程中产生的一些有毒有害物质会伴随油烟一起冒出或滞留在产品内部, 对消费者健康存在一定的风险。

水油混合常压油炸工艺是指在同一容器内加入油和水 (图 1-1), 相对密度较大的水在容器的底端, 相对密度较小的油在容器上部, 在油层中部水平安装加热管, 当加热管开始作用, 调温器、温控器自动调整温度, 使油温控制在预设温度, 这样可有效地控制炸制过程中上下层油温的变化。在传统的常压高温油炸过程中, 会产生大量的食品残渣, 这些残渣不仅使煎炸油变得浑浊, 同时也会污染油炸食品。而水油混合油炸过程中, 油炸食品一直在滤网上方的榨油中, 食品残渣会沉入底部的水中, 底部的水经散热管散热后处于低温状态, 残渣从高温榨油到低温水中的同时, 残渣上的油可与残渣分离处于油层中, 因此可以缓解油脂的

氧化。这种油炸方式的特点是：炸制食品质量高，风味好；炸制过程中产生的固体残渣从高温油中沉入低温水中并随水排出，因此炸制的食品不会出现焦化和炭化的现象，保证了产品的品质；另外，水油混合油炸方式可有效延缓炸油的劣变，从而延长炸油的使用时间。

真空油炸是将油炸和脱水作用有机地结合在一起，其原理主要是在真空状态下食品中的水分沸点降低。食物与油在负压条件下加热，当油温达到水的沸点时，原料中的水分变成蒸汽大量逸出，在此过程中，随压力的下降，水的沸点逐渐下降。通过该加工过程，即使油温不是很高，也能使食物在短时间内脱水。在 1330~13300Pa 真

空度下，纯水的沸点在 10~55℃ 范围之内。因此，与前两种油炸方式相比，低温真空油炸有以下优势：低温下油炸可使食物中营养成分损失减少。一般常压油炸温度在 160℃ 以上，而真空油炸温度一般在 100℃ 左右，可使食物中的营养成分尤其是热敏性成分得到较好的保留。低温真空油炸可延缓油脂的劣变。由于温度较低且煎炸体系中缺少氧气，因此炸油与氧接触较少，发生氧化、聚合等反应过程相对缓慢，可有效延缓油脂劣变，延长油脂使用时间，同时还可以尽量避免使用抗氧化剂等添加剂。低温真空油炸还可以有效保留食物的颜色和风味。低温和缺氧的条件下使得油炸食品不易发生褐变，可保持其本身的色泽；同时在密封条件下油炸，由于原料中的呈味成分大多为水溶性，不溶于油脂，随原料的脱水，这些呈味成分进一步浓缩。另外，真空可以形成压力差，能加速物料中分子的运动和气体的扩散，从而提高对物料的处理速度，在减压状态下，物料中的水分急剧汽化膨胀，产生一定的膨松结构，因此经低温真空油炸的食物复水性很好（张治国，2010；马涛，2011）。

1.1.1.3 油炸过程中的化学变化

(1) 油脂的变化

油脂在煎炸过程中经过长时间的高温加热，会发生一系列的化学变化，其中最主要的是油脂的水解、氧化和聚合反应等。油脂的水解是指当食物在油脂中煎炸时，食物中的水分进入到油中，攻击油脂中三酰甘油的酯链，然后产生单酰甘油、二酰甘油、甘油和游离脂肪酸的过程。油脂在煎炸过程中与空气中的氧发生

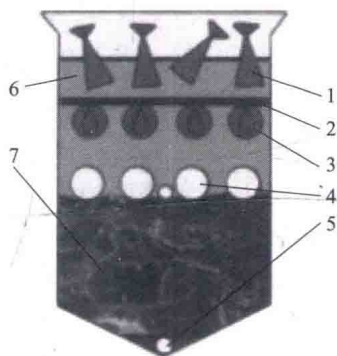


图 1-1 水油混合油炸机原理图

- 1—食品；2—滤网；
3—加热管；4—散热管；
5—放水阀；6—油；
7—水