

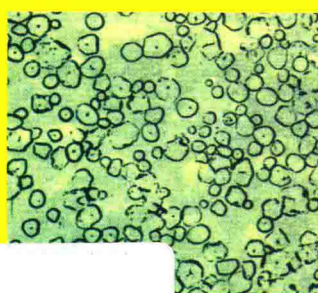
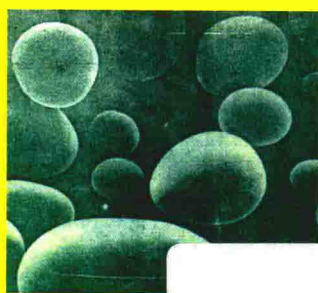
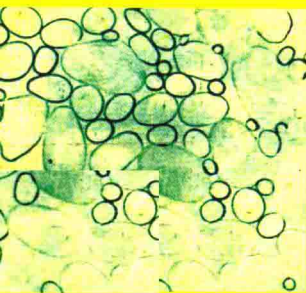
玉米

淀粉生产及 检测技术

YUMI

DIANFEN SHENGCHAN JI
JIANCE JISHU

主 编 / 巩发永 梁 彦 肖诗明



西南交通大学出版社
[Http://press.swjtu.edu.cn](http://press.swjtu.edu.cn)

玉米淀粉生产及检测技术

主 编 巩发永 梁 彦 肖诗明

副主编 李 静 胡建平 林 巧

吴 兵 曲继鹏 罗晓妙

图书在版编目 (C I P) 数据

玉米淀粉生产及检测技术 / 巩发永, 梁彦, 肖诗明
主编. —成都: 西南交通大学出版社, 2013.11
ISBN 978-7-5643-2747-7

I. ①玉… II. ①巩… ②梁… ③肖… III. ①玉米—
谷类淀粉—淀粉加工②玉米—谷类淀粉—检测 IV.
①TS235.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 261097 号

玉米淀粉生产及检测技术

主编 巩发永 梁彦 肖诗明

责任编辑	牛 君
封面设计	墨创文化
出版发行	西南交通大学出版社 (四川省成都市金牛区交大路 146 号)
发行部电话	028-87600564 028-87600533
邮 政 编 码	610031
网 址	http://press.swjtu.edu.cn
印 刷	成都勤德印务有限公司
成 品 尺 寸	185 mm × 260 mm
印 张	10
字 数	263 千字
版 次	2013 年 11 月第 1 版
印 次	2013 年 11 月第 1 次
书 号	ISBN 978-7-5643-2747-7
定 价	25.00 元

图书如有印装质量问题 本社负责退换
版权所有 盗版必究 举报电话: 028-87600562

前 言

玉米是谷物中单产最高的农作物，在世界粮食贸易中地位仅次于小麦，现已发展成为全世界重要的粮食、饲料、经济兼用作物，且富含大量的蛋白质、糖类、钙、镁、铁以及多种维生素等营养物质，其中碳水化合物的含量高达 70%。目前，随着技术的进步，国内外玉米深加工产品日趋丰富，由过去单纯的淀粉产品发展到现在各种发酵产品、玉米油、淀粉糖、变性淀粉和蛋白饲料等多种产品体系。

本书在介绍了淀粉颗粒的结构和化学组成、淀粉的分子结构、淀粉的物理性质的基础上，论述了玉米的生产及深加工概况和玉米消费趋势、玉米淀粉的生产原材料、玉米加工和玉米淀粉加工的通用工艺和设备以及玉米淀粉副产品的加工利用。对玉米淀粉理化检测方法（如水分含量、细度、酸度、灰分、斑点、白度、蛋白质、脂肪、二氧化硫等指标），淀粉黏度及糊化特性的测定、淀粉现代分析检测技术（如光谱分析法、色谱分析法、核磁共振波谱法、差热分析法），淀粉糖制品的理化指标（如水分测定、DE 值、酸度和 pH 值、灰分、糖浆浓度、色度和透光度、粉浆细度）的测定方法以及变性淀粉的检测技术也做了详尽介绍。

本书编写分工如下：第一章由巩发永编写，第二章、第三章由梁彦编写，第四章由李静、林巧编写，第五章由胡建平、曲继鹏编写，第六章由吴兵编写，第七章由罗晓妙编写，附录由肖诗明整理，全书由巩发永、肖诗明统稿。

在编写过程中，参考了国内外许多著作和文章，同时吉林农业科技学院的李凤林教授为本书的编写提供了诸多翔实的资料，在此一并表示衷心的感谢。

由于编写人员的水平和经验有限，书中缺点在所难免，敬请批评指正。

编 者

2013 年 8 月

目 录

第一章 淀粉概论	1
第一节 淀粉的分子结构	1
第二节 淀粉颗粒的结构	4
第三节 淀粉的物理性质	7
第四节 淀粉颗粒的化学组成	9
第二章 玉米淀粉的生产工艺	11
第一节 玉米的生产及深加工概况	11
第二节 玉米淀粉生产原料	14
第三节 湿法生产玉米淀粉工艺流程	20
第四节 玉米的干法清理与浸泡	22
第五节 玉米破碎及胚芽的分离和洗涤	35
第六节 玉米精磨及纤维的分离、洗涤	44
第七节 淀粉与麸质分离及淀粉洗涤	49
第八节 淀粉乳脱水与湿淀粉干燥	57
第九节 玉米淀粉生产典型生产工艺	65
第三章 玉米淀粉副产品的加工利用	72
第一节 玉米浸泡液的加工利用	73
第二节 胚芽的加工利用	76
第三节 麸质的加工利用	81
第四节 玉米纤维的加工利用	85
第四章 淀粉理化检验方法	88
第一节 水分含量的测定	88
第二节 细度的测定	88
第三节 酸度和 pH 值的测定	89
第四节 灰分的测定	90
第五节 斑点的测定	91
第六节 白度的测定	92
第七节 蛋白质含量的测定	92
第八节 脂肪含量的测定	93
第九节 二氧化硫含量的测定	94

第五章 淀粉的测定技术	96
第一节 淀粉黏度及糊化特性的测定	96
第二节 淀粉现代分析检测技术	102
第六章 淀粉糖制品的理化检验方法	112
第一节 水分测定方法	112
第二节 DE 值的测定	115
第三节 酸度和 pH 值的测定	119
第四节 灰分的测定	120
第五节 糖浆浓度的测定	121
第六节 色度和透光度的测定	121
第七节 粉浆细度测定	122
第七章 变性淀粉的检测技术	123
第一节 预糊化淀粉 α 化度的测定	123
第二节 氧化淀粉羧基和羰基含量的测定	125
第三节 交联淀粉交联度和残留甲醛的测定	126
第四节 酯化淀粉取代度的测定	128
第五节 醚化淀粉取代度的测定	130
第六节 接枝淀粉接枝参数的测定	134
附 录	136
附录 A 淀粉（包括衍生物和副产品）术语（GB/T 12104—89）	136
附录 B 玉米淀粉乳浓度与波美度和相对密度关系表	145
附录 C 度量衡换算表	150
参考文献	152

第一章 淀粉概论

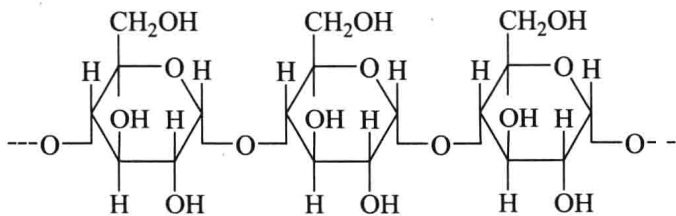
淀粉为葡萄糖的聚合体，即多聚葡萄糖。在适当条件下水解淀粉，通过完全水解反应，100份淀粉生成111份D-葡萄糖，没有其他单糖生成，这个事实证明，淀粉是由D-葡萄糖组成的多糖。葡萄糖分子式为 $C_6H_{12}O_6$ ，根据水解生成葡萄糖的化学增重关系，组成淀粉分子的葡萄糖单位是 $C_6H_{10}O_5$ ，所以淀粉的分子式即为 $(C_6H_{10}O_5)_n$ ， n 为一个不定数，表示淀粉分子是由许多个葡萄糖单位组成的。为区别于游离葡萄糖 $C_6H_{12}O_6$ ，常称 $C_6H_{10}O_5$ 为葡萄糖单位，即缩水葡萄糖单位。严格意义上讲，淀粉的分子式应当是 $(C_6H_{12}O_6)(C_6H_{10}O_5)_n$ ，因尾端的一个葡萄糖单位并没有脱去水，但因为 n 的数值很大，这个误差很小，为简便起见，用 $(C_6H_{10}O_5)_n$ 表示淀粉分子。

第一节 淀粉的分子结构

1940年，瑞士的K. H. Meyer和T. Schoch发现淀粉是由两种高分子组成的，即葡萄糖单位在淀粉分子中有两种连接方式，因而形成两种不同的淀粉分子——直链淀粉和支链淀粉。此外，现在的研究发现，在许多淀粉粒中还存在第三种成分，即中间物质。

一、直链淀粉的分子结构及聚合度

一般的研究认为，直链淀粉是一种线形多聚物，是由 α -D-吡喃葡萄糖基单元通过1 $\rightarrow$ 4糖苷键连接而成的链状分子（结构如下），呈右手螺旋结构，每6个葡萄糖单位组成螺旋的每一个节距，在螺旋内部只含氢原子，是亲油的，羟基位于螺旋外侧。现在的研究证明，除了直链淀粉（线形）分子外，还有一种在长链上带有非常有限的分支的分子，分支点是1 $\rightarrow$ 6糖苷键，平均每180~320个葡萄糖单位有1个支链，分支点1 $\rightarrow$ 6糖苷键占总糖苷键的0.3%~0.5%。直链淀粉分子中的支链有的很长，有的很短，但是支链点隔开很远，因此，它的物理性质基本上和直链分子的相同。



直链淀粉分子

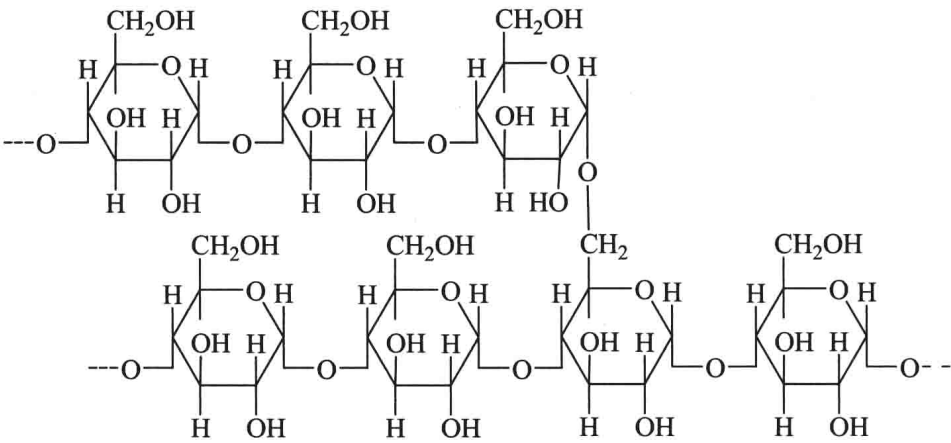
一般直链淀粉的相对分子质量为 5 万 ~ 20 万，相当于 300 ~ 1 200 个葡萄糖残基聚合而成。直链分子的大小也随淀粉的来源和子粒的成熟度而相差很大。玉米、小麦等禾谷类直链淀粉的分子较小，其聚合度（DP）一般不超过 1 000，马铃薯、木薯等薯类直链淀粉的分子则较大。此外，同一种天然淀粉所含直链淀粉的 DP 并不是均一的，而是一系列 DP 不等的分子混在一起，所以实际测出来的聚合度只是一个平均值。几种天然淀粉的直链淀粉聚合度如表 1.1 所示。

表 1.1 天然淀粉的直链淀粉聚合度（DP）

淀粉种类	平均 DP	表观 DP 分布	平均相对分子质量
玉米淀粉	930	400 ~ 15 000	2 400
马铃薯淀粉	4 900	840 ~ 22 000	6 400
小麦淀粉	1 300	250 ~ 13 000	
木薯淀粉	2 600	580 ~ 22 000	6 700

二、支链淀粉的分子结构及聚合度

一般的研究认为，支链淀粉是 α -D-吡喃葡萄糖基单元通过 1→4 或 1→6 糖苷键连接的高支化聚合物（结构如下）。



支链淀粉分子

关于支链淀粉的结构，20 世纪 40 年代主要有 Haworth 和其同事（1937 年）提出的层叠式结构，Staudinger 和 Husemann（1937 年）提出的梳子模型及 Meyer 和 Bernfeld（1941 年）提出的树枝状模型，其后，whelan（1970 年）对 Meyer 的模型进行了修正；在近期提出的众多模型中，有代表性的是 French（1972 年）、Robin（1974 年）以及 Manners 和 Matheson（1981 年）等提出的“束簇”支链淀粉模型，还有由 Hizukuri（1986 年）修正后的“束簇”模型。在如此众多的模型中，用 β -淀粉酶和脱支酶对支链淀粉进行酶解，对酶解产物进行分析，结果表明，Manners 和 Matheson 的支链淀粉结构模型相比之下更符合支链淀粉分支结构的实际（图 1.1）。

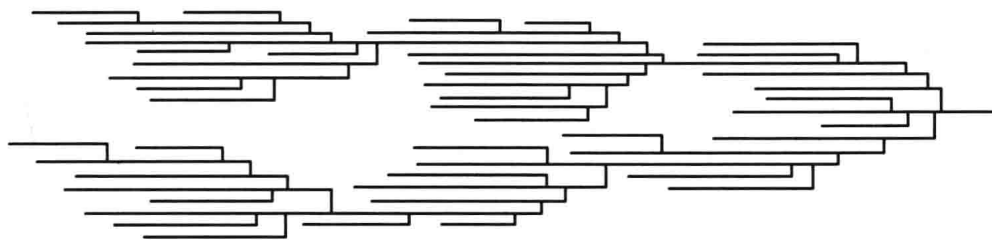


图 1.1 支链淀粉分子“束簇”结构模型 (Manners 和 Matheson)

从支链淀粉结构模型可以看出,淀粉分子由复杂的、多支的分支构成。构成淀粉分子的链可分成 A、B、C 三种,其中 A 链是还原性尾端经由 α -1,6-键与 B 链或 C 链相连接的链;B 链则是连有一个或多个 A 链,还原性尾端经由 α -1,6-键与 C 链相连接的链;C 链是指含有还原性尾端的主链,支链淀粉中仅含一条 C 链,因此,C 链一端为非还原性尾端,另一端为还原性尾端。对许多研究而言,通常 C 链被当作一个 B 链。

在支链淀粉束簇状结构模型中,A 链和 B 链结合形成许多束,束中各链相互平行靠拢,并通过氢键结合成簇状结构,一般每束的大小(沿分子链方向的长度)是 27~28 个葡萄糖残基。链的紧密结合所形成的结晶部分是排列为 12~16 个葡萄糖残基的短链。每条 B 链大多在 1~2 个束群中存在,贯穿 3 个以上束群的 B 链只占全部单位链的 1%~3%。A 链和 B 链的比值实际上反映了支链淀粉的分支化度,用酶解法分析 A 链和 B 链的结合情况是:最外层的 B 链能与 1~4 条 A 链结合,其中以 1 条 B 链结合 2 条 A 链的情况最多,而就整个支链淀粉分子而言,A/B₁₋₄ 的比值,蜡质玉米支链淀粉为 2.6,普通玉米支链淀粉为 1.7,糯米支链淀粉为 2.2,普通稻米支链淀粉为 1.5。

支链淀粉相对分子质量要比直链淀粉大得多,为 20 万~600 万,相当于 1 200~36 000 个葡萄糖聚合而成,一般聚合度为 4 000~40 000,大部分在 5 000~13 000。糯米的聚合度为 18 500,西米的聚合度 40 000,都是分子比较大的支链淀粉;小麦淀粉中的支链淀粉比较小,聚合度只有 4 800。

三、淀粉的直链、支链分子含量

天然淀粉粒中一般同时含有直链淀粉和支链淀粉,而且两者的比例相当稳定,多数谷类淀粉含直链淀粉为 20%~30%,比根类淀粉要高,后者仅含 17%~20%的直链淀粉。糯玉米、糯高粱和糯米等不含直链淀粉,全部是支链淀粉,虽然有的品种也含有少量的直链淀粉,但都在 1%以下。天然淀粉没有含直链淀粉很高的品种,只有一种皱皮豌豆的淀粉含有 66%的直链淀粉,人工培育的高直链玉米品种的淀粉中直链淀粉可高达 80%。文献上报道的淀粉中直链、支链淀粉含量常不一致,这是因为不同品种、不同成熟度和同一品种的不同样品间都存在差别(表 1.2)。一般水稻中的粳米要比籼米含直链淀粉高,而未成熟的玉米含有较多较小的淀粉颗粒,仅含 5%~7%的直链淀粉。

表 1.2 常见淀粉的直链、支链淀粉含量

淀粉种类	直链淀粉含量（%）	支链淀粉含量（%）
玉米	26	74
蜡质玉米	<1	>99
马铃薯	20	80
木薯	17	83
高直链玉米	50~80	20~50
小麦	25	75
大米	19	81
大麦	22	78
高粱	27	73
甘薯	18	82
糯米	0	100
豌豆（光滑）	35	65
豌豆（皱皮）	66	34
竹芋	20.5	79.5
西米	25.8	74.2

第二节 淀粉颗粒的结构

一、淀粉颗粒的形态

淀粉在胚乳细胞中以颗粒状存在,故可称为淀粉颗粒,玉米淀粉每千克含 17 000 亿个颗粒,即每克玉米淀粉含约 17 亿个颗粒。显微镜观察表明,不同来源的淀粉颗粒其形状、大小和构造各不相同。

1. 淀粉颗粒的形状

不同种类的淀粉颗粒具有各自特殊的形状,一般淀粉颗粒的形状为圆形（或球形）、卵形（或椭圆形）和多角形（或不规则形）,这取决于淀粉的来源。例如,小麦、黑麦、粉质玉米淀粉颗粒为圆形（或球形）,马铃薯和木薯为卵形（或椭圆形）,大米和燕麦为多角形（或不规则形）。

同一种来源的淀粉颗粒也有差异,如马铃薯淀粉颗粒大的为卵形,小的为圆形;小麦淀粉颗粒大的为圆形,小的为卵形;大米淀粉颗粒多为多角形;玉米淀粉颗粒有的是圆形,有的是多角形。

2. 淀粉颗粒的大小

不同来源的淀粉颗粒大小相差很大,一般以颗粒长轴的长度表示淀粉颗粒的大小,介于 2~

120 μm 之间。商业淀粉中一般以马铃薯淀粉颗粒为最大(15~120 μm),大米淀粉颗粒最小(2~10 μm)。非粮食类来源的淀粉中,美人蕉淀粉颗粒最大,芋头最小(平均为 2.6 μm)。另外,同一种淀粉,其大小也不相同,如玉米淀粉颗粒小的为 2~5 μm ,最大的为 30 μm ,平均为 10~15 μm ;小麦淀粉颗粒小的为 2~10 μm ,大的为 15~35 μm 。

淀粉颗粒的形状、大小常常受种子生长条件、成熟度、直链淀粉含量及胚乳结构等影响。例如,马铃薯在温暖多雨条件下生长,其淀粉颗粒小于在干燥条件下生长的淀粉颗粒。玉米的胚芽两侧角质部分的淀粉颗粒大多为多角形,而中间粉质部分的淀粉颗粒多为圆形,这是因为前者被蛋白质包裹得紧,生长时遭受的压力大,而未成熟的或粉质部分的生长期遭受的压力较小。玉米的直链淀粉含量从 27%增加至 50%时,普通玉米淀粉的角质颗粒减少,而更近于圆形的颗粒增多;当直链淀粉含量高达 70%时,就会有奇怪的腊肠形颗粒出现。

小麦淀粉呈双峰的颗粒尺寸分布,即有大小颗粒之分,大的淀粉颗粒称为 A 淀粉,尺寸为 5~30 μm ,占颗粒总数的 65%;小的淀粉颗粒称为 B 淀粉,尺寸在 5 μm 以下,占颗粒总数的 35%。

二、淀粉颗粒的轮纹结构

在显微镜下细心观察淀粉颗粒时,可看到淀粉颗粒都具有环层形态,有的可以看到明显的环纹或轮纹,像树木的年轮一样,称为轮纹结构,以马铃薯淀粉粒的环纹最为明显。

轮纹结构是淀粉粒内部密度不同的表现,每层开始时密度最大,以后逐渐减小,到次一层时密度又陡然增大,一层一层地周而复始,结果便显示出环纹。

各层密度不同,是由于合成淀粉所需的葡萄糖原料的供应昼夜不同。白天光合作用比夜间强,转移到胚乳细胞的葡萄糖较多,合成的淀粉密度也较大,昼夜相间便造成轮纹结构。实验证明,在人工光照下,如小麦或玉米淀粉粒则看不到轮纹结构,因为在这种情况下没有昼夜之分;但是马铃薯淀粉颗粒在常温下生长,仍有轮纹结构,可能是因为它周期生理代谢强。

淀粉颗粒水分低于 10%时看不到环层结构,有时需要用热水处理或冷水长期浸泡,或用稀的铬酸溶液或碘的碘化钾溶液慢慢作用后,会表现出轮纹结构。

在轮纹结构中,各环层共同围绕的一点称为粒心或核。粒心位于中央的,称为同心轮纹,如禾谷类淀粉;粒心偏于一端的,称为偏心轮纹,如马铃薯淀粉。粒心位置和显著程度依淀粉种类而异。由于粒心部分含水较多,比较柔软,故在加热干燥时常常造成裂纹,根据裂纹的形态,也可以辨别淀粉粒的来源和种类,如玉米淀粉粒为星状裂纹,甘薯淀粉粒为星状、放射状或不规则的十字裂纹。

淀粉颗粒依其本身构造(如粒心的数目和环层的排列不同)又可分为单粒、复粒、半复粒三种。单粒只有一个粒心,如玉米和小麦淀粉颗粒。复粒由几个单粒组成,具有几个粒心。尽管每个单粒可能原来都是多角形,但在复粒的外围,仍然显出统一的轮廓,如大米和燕麦的淀粉颗粒。半复粒的内部有两个单粒,各有各的粒心和环层,但是最外围的几个环轮则是共同的,因而构成的是一个整粒。

在同一个细胞中,所有的淀粉颗粒可以全为单粒,也可以同时存在几种不同的类型。例如,燕麦淀粉颗粒除大多数为复粒外,也夹有单粒;小麦淀粉颗粒除大多数为单粒外,也有复粒;马铃薯淀粉颗粒除单粒外,有时也形成复粒和半复粒

三、淀粉颗粒的晶体构造

1. 淀粉颗粒的双折射性及偏光十字

双折射性是由淀粉颗粒的高度有序性（方向性）所引起的，高度有序的物质都有双折射性。淀粉颗粒配成的 1%淀粉乳，在偏光显微镜下观察，呈现黑色的十字，将颗粒分成四个白色的区域，称为偏光十字或马耳他十字，见图 1.2。偏光显微镜下的形态粒为球晶体的重要标志。十字的交叉点位于粒心，因此可以帮助定位粒心。

不同品种淀粉颗粒的偏光十字的位置、形状和明显程度不同，据此可鉴别淀粉品种。例如，马铃薯淀粉的偏光十字最明显，玉米、高粱和木薯淀粉明显程度稍逊，小麦淀粉偏光十字最不明显。



图 1.2 淀粉颗粒的偏光十字

2. 淀粉颗粒的结晶形态

淀粉颗粒不是一种淀粉分子，而是由许多直链和支链淀粉分子构成的聚合体，这种聚合体不是无规律的，它由两部分组成，即有序的结晶区和无序的无定形区（非结晶区）。结晶部分的构造可以用 X 射线衍射来确定，而无定形区的构造至今还没有较好的方法确定。

1937 年，Katz 等从完整的淀粉颗粒所呈现的三种特征性 X 射线衍射图上分辨出三种不同的晶体结构类型，即 A 型、B 型和 C 型。不同来源的淀粉呈现不同的 X 射线衍射图，如图 1.3 所示。

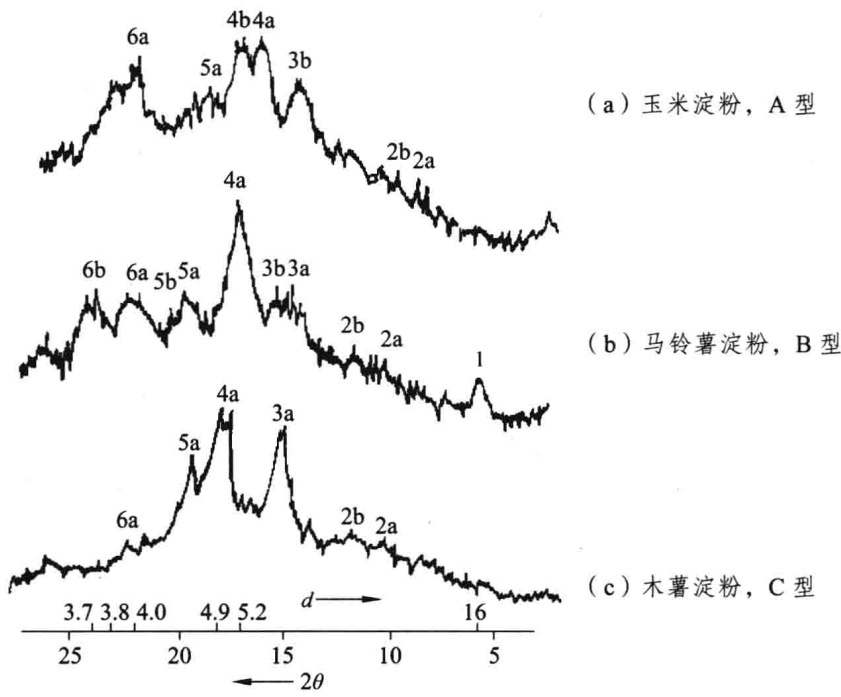


图 1.3 不同种类淀粉的 X 射线衍射图

大多数禾谷类淀粉具有 A 型图谱；马铃薯等块茎淀粉、高直链玉米和回生淀粉显示 B 型图谱；竹芋、甘薯等块根，某些豆类淀粉呈现 C 型图谱，当然也有例外。此外，淀粉与脂质物质形成的复合物则为 E 型，直链淀粉同各种有机极性分子形成的复合物为 V 型，叠加在 A 或 B 型上。

各种不同的晶型彼此之间存在相互转化作用，A 型结构具有较高的热稳定性，这使得淀粉在颗粒不被破坏的情况下就能够从 B 型转变成 A 型。例如，马铃薯淀粉在 110 °C、20% 的水分下处理，则晶型从 B 型转变为 A 型。

淀粉颗粒中水分参与结晶结构，此观点已通过 X 射线衍射图样的变化得到证实。测定干燥淀粉时，随水分含量的降低，X 射线衍射图样线条的明显程度降低；再将干燥淀粉置于空气中吸收水分，图样线条的明显程度恢复。180 °C 高温干燥，图样线条不明显，表明结晶结构基本消失，在 210 ~ 220 °C 干燥的淀粉的 X 射线衍射图样呈现无定形结构图样。

第三节 淀粉的物理性质

一、淀粉的润胀与糊化

1. 淀粉的润胀

淀粉颗粒不溶于冷水，但将干燥的天然淀粉置于冷水中，它们会吸水，并经历一个有限的可逆的润胀。这时候水分子只是简单地进入淀粉颗粒的非结晶部分，与游离的亲水基相结合，淀粉颗粒慢慢地吸收少量的水分，产生极限的膨胀，淀粉颗粒保持原有的特征和晶体的双折射。若在冷水中不加以搅拌，淀粉颗粒因其比重大而沉淀，将其分离干燥仍可恢复成原来的淀粉颗粒。天然淀粉颗粒的润胀，只有体积上的增大。润胀是从团粒中组织性最差的微晶之间无定形区开始的。有研究表明，将完全干燥的椭球形马铃薯淀粉颗粒浸于冷水中时，它们各向呈不均衡的润胀，在长向增长 47%，而在径向只增长 29%；而小麦淀粉的盘状团粒在润胀中发生明显的形变成为马鞍状，其厚度几乎没有变化；豌豆淀粉的椭球形团粒的润胀最为极端，长度收缩 2%，而径向膨胀 35%。

受损坏的淀粉颗粒和某些经过改性的淀粉颗粒可溶于冷水，并经历一个不可逆的润胀。

2. 淀粉的糊化

若把淀粉的悬浮液加热，达到一定温度时（一般在 55 °C 以上），淀粉颗粒突然膨胀，因膨胀后的体积达到原来体积的数百倍之大，所以悬浮液就变成黏稠的胶体溶液，这种现象称为淀粉的糊化（gelatinization）。淀粉颗粒突然膨胀的温度称为糊化温度，又称糊化开始温度。因各淀粉颗粒的大小不一样，待所有淀粉颗粒全部膨胀又有另一个糊化过程温度，所以糊化温度有一个范围，见表 1.3。

表 1.3 几种淀粉颗粒的糊化温度

淀粉种类	糊化温度范围（℃）	糊化开始温度（℃）
大米	58 ~ 61	58
小麦	65 ~ 67.5	65
玉米	64 ~ 72	64
高粱	69 ~ 75	69
马铃薯	56 ~ 67	56

二、淀粉的老化

淀粉稀溶液或淀粉糊在低温下静置一定的时间，浑浊度增加，溶解度减小，在稀溶液中会有沉淀析出。如果冷却速度快，特别是高浓度的淀粉糊，就会变成凝胶体（凝胶长时间保持时，即出现回生），好像冷凝的果胶或动物胶溶液，这种现象称为淀粉的老化或回生，这种淀粉称为回生淀粉（或称 β 淀粉）。

回生的本质是糊化的淀粉分子在温度降低时由于分子运动减慢，此时直链淀粉分子和支链淀粉分子的分支都回头趋向于平行排列，互相靠拢，彼此以氢键结合，重新组成混合微晶束。其结构与原来的生淀粉颗粒的结构很相似，但不呈放射状，而是零乱地组合。由于其所得的淀粉糊中分子中氢键很多，分子间缔合很牢固，水溶性下降，如果淀粉糊的冷却速度很快，特别是较高浓度的淀粉糊，直链淀粉分子来不及重新排列结成束状结构，便形成凝胶体。

三、淀粉糊与淀粉膜

1. 淀粉糊

淀粉在不同的工业中具有广泛的用途，然而几乎都必须加热糊化后才能使用。不同品种淀粉糊化后，糊的性质，如黏度、透明度、抗剪切性能及老化性能等，都存在差别（表 1.4），这显著影响其应用效果。一般来说，在加热和剪切下膨胀时比较稳定的淀粉颗粒形成短糊，如玉米淀粉和小麦淀粉糊丝短而缺乏黏结力；在加热和剪切下膨胀时不稳定的淀粉颗粒形成长糊，如马铃薯淀粉糊丝长、黏稠、有黏结力。木薯和蜡质玉米淀粉的糊特征类似于马铃薯淀粉，但一般没有马铃薯淀粉那样黏稠和有黏结力。

表 1.4 淀粉糊的主要性质

性 质	马铃薯淀粉	木薯淀粉	玉米淀粉	糯高粱淀粉	交联糯高粱淀粉	小麦淀粉
蒸煮难易	快	快	慢	迅速	迅速	慢
蒸煮稳定性	差	差	好	差	很好	好
峰黏	高	高	中等	很高	无	中等
老化性能	低	低	很高	很低	很低	高
冷糊稠度	长，成丝	长，易凝固	短，不凝固	长，不凝固	很短	短
凝胶强度	很弱	很弱	强	不凝结	一般	强
抗剪切	差	差	低	差	很好	中低
冷冻稳定性	好	稍差	差	好	好	差
透明性	好	稍差	差	半透明	半透明	模糊不透明

2. 淀粉膜

淀粉膜的主要性质如表 1.5 所示。马铃薯和木薯淀粉糊所形成的膜，其透明度、平滑度、强度、柔韧性和溶解性等性质比玉米和小麦淀粉形成的膜更优越，因而更有利于作为造纸的表面施胶剂、纺织的棉纺上浆剂以及用做胶黏剂等。

表 1.5 淀粉膜的性质

性 质	玉米淀粉	马铃薯淀粉	小麦淀粉	木薯淀粉	蜡质玉米淀粉
透明度	低	高	低	高	高
膜强度	低	高	低	高	高
柔韧性	低	高	低	高	高
膜溶解性	低	高	低	高	高

第四节 淀粉颗粒的化学组成

除淀粉分子外，淀粉颗粒通常含有 10%~20% (W/W) 的水分和少量蛋白质、脂肪类物质、磷和微量无机物。

一、水 分

淀粉的含水量取决于储存条件（温度和相对湿度）。淀粉颗粒中的水分是与周围空气中的水分呈平衡状态存在的，大气相对湿度（RH）降低，空气干燥，淀粉就失水；如果相对湿度增高，空气潮湿，淀粉就吸水。水分吸收和散失是可逆的。淀粉的平衡水分含量也取决于淀粉产品的类型，表 1.6 的水分含量是在相对湿度 65%、25℃时的数据，在同类条件下，多数商品天然淀粉含 10%~20% 的水分。例如，玉米淀粉在一般情况下（25℃、RH 50%）含水分约 13%，马铃薯、甘薯淀粉含水分约 20%。不同品种淀粉的水分含量有差别，源于多糖链密度与叠集的规则性上的差别，尤其是淀粉分子中羟基自行结合和与水分子结合的程度不同的缘故。玉米淀粉分子中羟基自行结合的程度较马铃薯淀粉高，所剩余的能通过氢键与水分子相结合的游离羟基数目相对地减少，则淀粉的水分含量较低。

表 1.6 淀粉的主要组成

组成	玉米淀粉	马铃薯淀粉	小麦淀粉	木薯淀粉	蜡质玉米淀粉
淀粉	85.73	80.29	85.44	86.69	86.44
水分 (RH 65%, 25℃)	13	19	13	13	13
类脂物 (%，干基)	0.8	0.1	0.9	0.1	0.2
蛋白质 (%，干基)	0.35	0.1	0.4	0.1	0.25
灰分 (%，干基)	0.1	0.35	0.2	0.1	0.1
磷 (%，干基)	0.02	0.08	0.06	0.01	0.01
淀粉结合磷 (%，干基)	0.00	0.08	0.00	0.00	0.00

在相对湿度为 20% 时, 淀粉水分含量为 5% ~ 6%; 而在绝干空气中, 相对湿度为零时, 淀粉的水分含量也接近于零。在饱和湿度条件下, 吸水量多, 并引起颗粒膨胀, 玉米、马铃薯、木薯淀粉的吸水量分别达到 39.9%、50.9%、47.9% (干基淀粉计), 颗粒直径分别增大 9.1%、12.7%、28.4%。

二、脂类化合物

谷类淀粉的脂类化合物含量较高, 达 0.8% ~ 0.9%。玉米淀粉含 0.5% 的脂肪酸和 0.28% 的磷脂。马铃薯和木薯淀粉的脂类化合物含量则低得多, 仅为 0.1% 或更低。

谷类淀粉中的脂类与直链淀粉能形成螺旋包合物, 其是不溶解的, 但加热到高于一定的温度就会离解, 离解温度的高低取决于络合剂种类和结合键的强度。一般在 125 °C 以上才能分解螺旋包合物结构, 使直链淀粉的组分溶解。

玉米、小麦淀粉中高含量脂类化合物的存在会造成下列情况发生: ① 抑制玉米和小麦淀粉颗粒的膨胀和溶解; ② 直链淀粉-脂类螺旋包合物会使淀粉糊和淀粉膜的不透明度或浑浊度增加, 影响糊化淀粉增稠能力和黏合能力; ③ 不饱和脂类化合物在储存期因氧化作用而酸败, 影响其应用。

三、含氮物质

含氮物质包括蛋白质、缩氨酸、酰胺、氨基酸、核酸和酶。因蛋白质含量最高, 所以通常习惯把含氮物质含量说成蛋白质的含量, 其含量是通过实测含氮量乘 6.25 来计算的。

马铃薯、木薯淀粉仅含少量蛋白质 (0.1%), 谷类淀粉蛋白质含量相对较高, 为 0.35% ~ 0.45%。蛋白质含量高会带来许多不利的影响, 如使用时会产生臭味或其他气味, 蒸煮时易产生泡沫, 水解时易变色等。

四、灰 分

灰分是淀粉产品在特定温度下完全燃烧后的残余物, 它由淀粉所含有少量或微量无机物构成。因此, 马铃薯淀粉因含有磷酸酯基团, 灰分含量相对较高, 而其他品种淀粉的灰分含量就相对较低, 其灰分主要成分是磷酸钾、铜、钙和镁盐。

第二章 玉米淀粉的生产工艺

第一节 玉米的生产及深加工概况

一、玉米的生产概况

玉米又称玉蜀黍，禾本科玉米属一年生草本植物，起源于南美洲，学名 *Zea mays* L.。玉米是世界三大粮食作物之一，又是重要的饲料，由于其单产高，增产潜力大，在农业生产中占有重要的地位。作为工业原料，玉米比甘薯含有更高的脂肪和蛋白质，因而自 20 世纪 50 年代以来，世界上的淀粉、淀粉糖、酒精工业，越来越多地用玉米代替甘薯做原料，这也大大促进了玉米生产的发展。

根据美国农业部报道，以 2008/2009，2009/2010 年度产量计算，美国的玉米产量占全球产量的 41%，位居首位，同时也是全球最大的玉米出口国，出口量占全球玉米出口份额的 65%。产量中国占 20%，排名第二；之后是阿根廷、巴西、墨西哥，合计约占 12% 的份额。

玉米在我国布局广泛，各个省份均有种植。我国玉米生产又具有相对集中的特点，主要分布在东北、华北和西南地区，形成一个从东北到西南的狭长玉米种植带，这一带状区域集中了我国玉米种植总面积的 85% 和产量的 90%。其中，东北春玉米区包括辽宁、吉林、黑龙江、内蒙古和河北北部，是我国玉米、大豆轮作区。该区土壤肥沃，光、热、水资源丰富且时空分布合理，与玉米生育期进程同步，生产条件最为优越，玉米种植面积、产量约占全国的 35%。黄淮海夏玉米区包括北京、天津、河北、山西、山东、河南 6 个省市，气候和农田基本条件较好，有效灌溉面积达 50% 以上。该区玉米播种面积、产量均占全国的 33% 左右。近年来，东北和黄淮海地区玉米种植面积和产量不断增长，而西南和其他地区基本稳定或小幅下降。

吉林、河北、山东、河南、黑龙江、内蒙古、辽宁、四川、云南、陕西是玉米播种面积最大的 10 个省份（自治区），其中吉林、河北、山东的种植面积均占全国的 10% 以上。

二、玉米消费结构及其变化趋势

玉米具有广泛的利用价值，主要用于食用、饲用和工业加工。世界玉米总产量中直接用作食粮的只占 1/3，其余大部分用于其他方面。

从全球总体来看，65%~70% 的玉米消费是用作饲料，但随着近年来全球玉米深加工行业