

# 自然晾晒玉米显微结构分析

朱文学<sup>①</sup> 曹崇文

(机械工程学院)

**摘要** 自然晾晒玉米的胚乳中存在应力裂纹,应力裂纹的宽度、长度及深度比人工干燥玉米内部应力裂纹小,在灯光下无法从完整籽粒的外部观察到。应力裂纹的平均宽度小于 $15\mu\text{m}$ ,属于局部裂纹。应力裂纹大多数横穿过细胞壁,沿淀粉颗粒边缘扩展,但也出现了应力裂纹撕开淀粉颗粒的情况。应力裂纹不能扩展到皮壳,是籽粒内部裂纹。胚乳细胞也有轻微的破坏,细胞壁还存在一部分,粉质胚乳较角质胚乳破坏严重。

**关键词** 玉米;显微结构;应力裂纹

**中图分类号** S513.092

## Microscopic Structural Analysis of Corn Dried in Natural Air

Zhu Wenxue Cao Chongwen

(College of Machinery Engineering, CAU)

**Abstract** There are stress cracks in corn dried in natural air. Cracks exist only in the part area in endosperm, the width of cracks is not more than  $15\mu\text{m}$ . Compared to the cracks in corn dried artificially, the average width of the cracks in corn dried in natural air is more narrow, and the average length is shorter. They can not be observed by candling method. Most of cracks are crossing the walls of endosperm, and propagate along the boundary of starch granules, cracking of starch granules is observed. The cracks can not advance far enough to open up to the surface underneath the pericarp. It belongs to internal crack. The cells of endosperm are slightly damaged, the walls of cells retain partly. Compared to horn endosperm, the floury endosperm is destroyed seriously.

**Key words** corn; microscopic structure; stress cracks

自然晾晒玉米的品质被认为优于人工干燥玉米。自然晾晒的玉米裂纹率低,营养物质损失少,发芽率高,淀粉加工时淀粉得率高。进行人工干燥玉米的品质评定时,常与自然晾晒的玉米相比较。玉米自然晾晒过程也是质热传递过程。玉米籽粒从太阳辐射中获得热量,内部水分迁移到籽粒表面汽化干燥。干燥过程中籽粒也收缩,只是日光辐射强度低,玉米温升小,干燥速度低,收缩量小。干燥过程有可能造成玉米品质的变化,内部结构也有可能随着改变。目前有关自然晾晒干燥的传热传质过程研究不多,自然干燥过程对玉米品质的影响研究及微观组织分

收稿日期:1996-01-23

①朱文学,北京清华东路17号中国农业大学(东校区)50信箱,100083

析未见报道。研究自然晾晒时玉米品质的变化有助于评价自然晾晒和人工干燥玉米的品质,为人工干燥玉米品质的评定建立一个标准。对自然晾晒玉米微观组织的研究与分析有利于全面了解玉米的结构特性和力学特性,为玉米干燥工艺的制定与改进提供理论指导。

## 1 样品制备与试验设备

试验样品为秋天收获的马齿型玉米掖单 13。收获后脱粒,放入冰箱中保存。经检验证实,在冷冻状态下短时间储存不会影响玉米品质。晾晒时将玉米取出,在室内放置 24 h,使玉米温度与室温相平衡。在秋天晴朗无风的天气条件下在水泥地上将玉米含水率晾晒至 14%。晾晒时玉米的初始含水率为 35%,最高气温 28℃,连续晾晒 4 d。从干后玉米中随机选取完整、饱满、无损伤的玉米 10 粒作为试验样品。

应力裂纹是由玉米受热和失水引起的干燥应力造成的。传统的制样方法是将选定的样品浸泡后剖分,然后再干燥到原始水分<sup>[1]</sup>,这使样品再经历 1 次湿润和干燥过程,增加了籽粒的破损程度。现采用干切法制备样品。玉米籽粒较硬,干切时应注意用力强度和方向。用薄刀片轻轻切开表皮,一次将籽粒切开,然后用微风轻轻将散落在断面上的细小粉粒吹除。

试验样品分 2 组:一组横切(垂直长轴),断面位置在离冠部 3 mm 处;一组纵切,沿胚的中心线平行于长轴的方向切开。将切后的样品用导电胶粘在金属平台上,真空镀膜 3 h,镀膜厚度 100 μm。所用金属为铬,镀膜的目的是使样品获得导电表面。

试验在中国农业科学院原子能利用研究所电镜室进行,试验设备为日立 S450 型扫描电子显微镜,观察时采用 10 kV 的加速电压。

## 2 自然晾晒玉米的品质特征

自然晾晒时玉米在日光照射下干燥,吸收太阳辐射热升温。环境中的微风和温差使气流在谷层表面流动,带走谷物表面所蒸发的水分。由于单位面积太阳辐通量小,只有  $1 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2}$ ,所以谷物温升低<sup>[2]</sup>。华北地区夏季最高气温一般为 30~35℃,谷物最高温升可达 45℃;秋季最高气温一般为 20~25℃,谷物最高温升可达 28℃。无风时,由温差引起的空气对流速度低,空气掠过谷物表面最大对流速度不超过  $0.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,即使在小风(1~3 级)天气,掠过谷层表面的最大风速也不超过  $1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ;因此,自然晾晒时谷物暴露在低温、低流速的介质环境中,干燥速率较低。夏末干燥春玉米时,初始含水率从 35%降到 14%需 2 d(脱粒以后干燥),折合干燥时间 12 h;秋季干燥玉米时,初始含水率从 35%降到 14%,需 4 d(脱粒以后干燥),折合干燥时间 20 h。玉米大多数在秋天收获和晾晒,可以认为玉米晾晒干燥时间为 20 h,比一般的人工干燥时间长;另一方面,日光照射强度在一天内不均匀,中午最高,晚间为零,干燥又是分几天进行的,谷物处在干燥条件始终在改变的低温环境中,有大量的缓苏时间。所以,在及时干燥条件下自然晾晒玉米的品质较高。

由观察实际干燥过程可知,自然晾晒玉米的收缩量小。对于马齿型玉米,其冠部的凹坑比顺流或逆流干燥时的浅;玉米色泽纯正,自然晾晒马齿型玉米色泽金黄,而用烘干机干燥的玉米色泽较差;利用灯箱法检测玉米的应力裂纹率时发现,自然晾晒玉米的应力裂纹率小于

1%, 裂纹类型为单裂, 属于短裂纹。同品种的玉米顺流干燥后, 其应力裂纹率在 40%~70% 之间, 龟裂率在 5%~30% 之间; 在玉米片生产实践中, 可发现自然晾晒玉米的大碴率比人工干燥玉米高 10%。

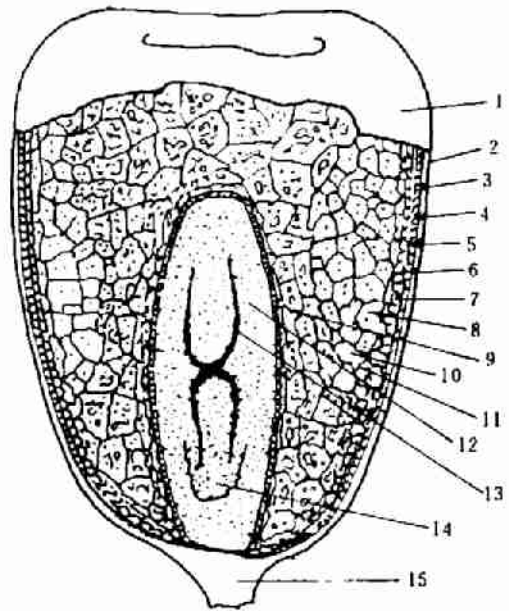
### 3 自然晾晒玉米的显微结构分析

一般玉米(指相对自然晾晒的玉米而言, 下同)籽粒典型的显微结构如图 1 所示, 其组成和各组成部分的特点与功能见文[2~6]。

#### 3.1 组织形态

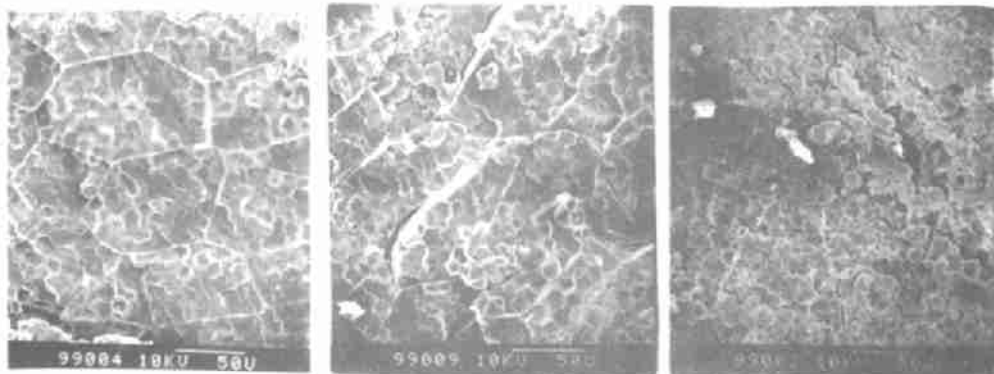
通过扫描电子显微镜观察, 自然晾晒玉米的内部组织显微结构与一般玉米(未经干燥, 直接切片观察)比较接近。

自然晾晒的玉米籽粒, 其内部显微结构与一般玉米差别较大的是胚乳部分。在一粒晾晒干燥的玉米内部, 胚乳部分的组织形态在不同区域显示出不同的变化趋势。在接近皮壳的角质胚乳区域, 胚乳细胞已经解体, 显微镜下的组织形态为淀粉颗粒互相结合在一起, 很难观察到细胞壁。紧靠这一层的角质胚乳区域出现了多样的形态特征: 有些局部区域, 细胞结构保存完好, 有明显的细胞壁, 淀粉细胞紧密地排列在一起, 细胞内充满淀粉颗粒, 如图 2(a)所示; 有些局部区域, 细胞接近解体状态, 部分细胞正处在解体的过程中, 细胞壁断裂, 淀粉颗粒之间的结合也遭到破坏, 淀粉粒从细胞内散落出来, 部分细胞的细胞



1. 皮壳; 2. 表皮层; 3. 中果皮; 4. 横细胞; 5. 管状细胞; 6. 种皮; 7. 糊粉层; 8. 角质胚乳; 9. 粉质胚乳; 10. 淀粉颗粒; 11. 细胞壁; 12. 子叶; 13. 胚芽; 14. 初生根; 15. 脐

图 1 一般玉米的籽粒纵切面



(a) 角质胚乳(未破坏)

(b) 角质胚乳(初步破坏)

(c) 粉质胚乳

图 2 胚乳结构的显微形态

壁与相邻细胞的细胞壁开始分离,出现裂纹,部分细胞保持完好,细胞轮廓清晰,淀粉颗粒结合紧密,如图2(b)所示。在粉质胚乳区域,胚乳细胞基本解体,大量的球状淀粉颗粒裸露出来,颗粒之间的结合很松散,存在大量的间隙。在该区域内还存在着细胞壁的残迹,据此可大致判断细胞的大小及形状,如图2(c)所示。

总的来说,自然晾晒玉米的胚乳结构已遭到轻微破坏,但比人工干燥玉米的胚乳结构破坏程度小。自然晾晒玉米胚乳结构产生上述变化的根本原因在于自然晾晒时的频繁升温 and 降温及胚乳的结构强度差别。假设干燥到安全水分需晾晒4d,那么就有4次升温 and 降温过程。遭受升温 and 降温影响最敏感、最严重的区域是皮壳附近的角质胚乳。在升温 and 降温过程中,皮壳附近的胚乳温度变化最快,产生的温度梯度最大,形成的热应力也最大。角质胚乳在热应力的作用下扭曲、拉伸和收缩,导致细胞壁破裂和消失及淀粉颗粒离散。粉质胚乳细胞中淀粉颗粒的结合较弱,整个细胞的抗破裂强度低,容易在干燥时形成的湿热应力下失效。

种皮的显微图像显示,皮壳为纤维状组织,层层结合紧密,无破坏的痕迹,如图3所示,但皮壳与胚乳之间的结合比较薄弱,在个别区段出现了 $5\mu\text{m}$ 以下的裂纹,时断时续,图3中左下角即为裂纹。这说明皮壳与胚乳之间的结合容易被破坏。种皮与胚乳收缩率和膨胀率不同,在不连续的干燥过程中,产生反复拉压,破坏了胚乳与皮壳之间的结合,出现裂纹。皮壳和胚乳之间的裂纹不与胚乳中的裂纹连贯。

胚组织的显微图像没有异常现象,胚组织细胞均匀地、紧密地结合在一起,无裂纹及破损现象存在。子叶与胚乳的结合紧密,没有分离现象,胚乳中的应力裂纹没有延伸至子叶,靠子叶附近的胚乳组织状况良好。

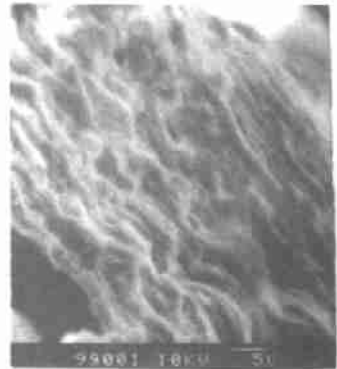


图3 皮壳的显微结构

### 3.2 胚乳中应力裂纹的显微形态

从表面观察,自然晾晒玉米的裂纹率极低(小于1%),但在扫描电子显微镜下,即使是无应力裂纹玉米(灯箱观察)的胚乳中也存在大量的应力裂纹,只是裂纹的宽度和长度比较小,不存在人工干燥玉米中的那种中央宽大裂纹<sup>[7]</sup>。

应力裂纹广泛分布于粉质胚乳和角质胚乳中。

粉质胚乳中的裂纹由于淀粉颗粒松散,颗粒之间存在大量的空气间隙,裂纹轮廓比较模糊,较难观察,但也能大致看出裂纹的宽度及走向。裂纹大致呈以籽粒中心为中心的放射状分布。由于淀粉颗粒的影响,测量粉质胚乳中应力裂纹宽度和长度比较困难,如图2(c)所示。

角质胚乳中的应力裂纹则明显得多,属于局部裂纹,即在某一区域内存在短裂纹。应力裂纹无统一方向,其中大致以粉质胚乳为中心呈放射状分布的占大多数。裂纹轮廓线曲曲折折,裂纹宽度小于 $15\mu\text{m}$ ,长度一般在 $0.2\sim 1.0\text{mm}$ 之间。出现应力裂纹时,只是裂纹两侧的胚乳组织遭到破坏,其他部位组织状态良好,无更小的微裂纹存在,如图4所示。

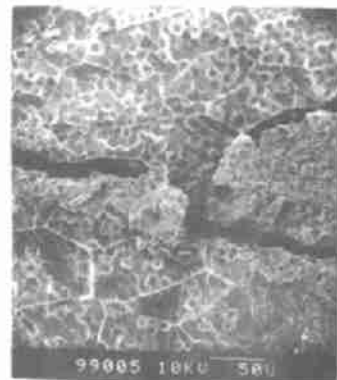


图4 角质胚乳中应力裂纹的显微形态

### 3.3 胚乳中应力裂纹的扩展

自然晾晒玉米内部应力裂纹在胚乳中的扩展与人工干燥玉米相似。由于不存在中央宽大裂纹,只存在局部裂纹,而且裂纹的延伸方向不一致,所以裂纹的生成位置和扩展方向较难判定。观察皮壳附近的应力裂纹,可看出裂纹离皮壳越近,裂纹越窄,又根据大部分应力裂纹相对于籽粒中心呈放射状分布;因此可以认为应力裂纹在离皮壳较远的区域生成,然后向皮壳扩展,但没有能力越过糊粉层,撕裂皮壳,如图5(a)所示。

大多数自然晾晒玉米内部应力裂纹扩展的路径是越过细胞壁,

沿淀粉颗粒边缘扩展。这与人工干燥玉米内部应力裂纹扩展的路径是一致的,但也有例外,部分应力裂纹不仅沿淀粉颗粒边缘扩展,而且也撕开了一些淀粉颗粒,将淀粉颗粒切成2个部分,如图5(b)所示。

由自然晾晒玉米内部应力裂纹的扩展情况与人工干燥的玉米相比较可知,自然晾晒时,由于谷物温升高,干燥速度低,产生的湿热应力小,淀粉颗粒收缩量小,对淀粉颗粒与蛋白质间质组合的网络结构影响不大,淀粉颗粒与蛋白质间质的结合依然比较紧密。蛋白质间质和淀粉颗粒的结合强度与淀粉颗粒内部的抗破裂阻力差别不大,以至在晾晒的过程中,干燥应力作用在淀粉颗粒上时,有时把淀粉颗粒之间的蛋白质间质撕开,有时则把淀粉颗粒撕开。

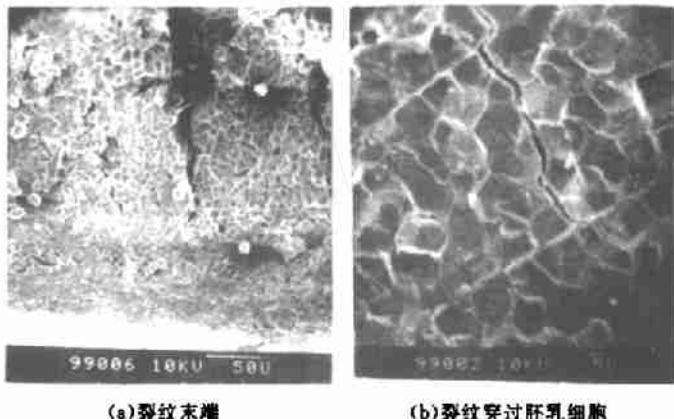
由干燥过程中胚乳细胞的细胞壁大量消失和应力裂纹都能切开细胞壁扩展的事实,可以推断胚乳细胞的细胞壁是比较脆弱的,经受剪切应力的能力极小,以至很容易被切断;另一方面的原因是胚乳细胞比较大,呈多角形,很容易受到扭曲、挤压和拉伸。细胞壁与淀粉颗粒或蛋白质间质之间的结合则比较紧密,干燥应力很难撕开它们之间的结合;即使应力足够大,在撕裂细胞壁与淀粉粒之间的结合之前细胞壁组织已经断裂,裂纹沿断裂的缺口向前发展。

## 4 结 论

1)自然晾晒干燥速度低,但干后的玉米籽粒中也出现轻微的结构损伤,一部分胚乳细胞解体,细胞壁消失,淀粉颗粒之间的结合被破坏,出现细小应力裂纹。胚乳组织中无中央大裂纹,只存在局部裂纹。粉质胚乳较角质胚乳破坏严重。

2)在自然晾晒干燥的玉米籽粒中,应力裂纹切断细胞壁,沿着淀粉颗粒边缘扩展,或撕开淀粉颗粒扩展。裂纹不能越过糊粉层,到达皮壳,属于内部裂纹。

3)自然晾晒干燥的玉米籽粒,其胚乳中应力裂纹的宽度小于 $15\ \mu\text{m}$ ,长度在 $0.2\sim 1.0\ \text{mm}$ 之间,利用灯箱在皮壳外不能观察到。皮壳与胚乳之间也存在 $5\ \mu\text{m}$ 以下的裂纹,但与胚乳中的裂纹不相连贯。



(a) 裂纹末端

(b) 裂纹穿过胚乳细胞

图5 应力裂纹的生成位置和扩展方向

### 参 考 文 献

- 1 Gunasekaran S, Deshpande S S, Paulse M R, et al. Size characterization of stress cracks in corn kernels. *Trans of the ASAE*, 1985, 28(5): 1668~1672
- 2 Proctor D L. Grain Storage techniques. *FAO Agricultural Services Bulletin* 109, 1994
- 3 戴俊英. 玉米形态与超显微图谱. 沈阳: 辽宁科学技术出版社, 1990. 2~46
- 4 Macmasters M M. Important aspects of kernel structure. *Trans of the ASAE*, 1962, 20(3): 550~557
- 5 霍斯尼 R K. 谷物科学与工艺学原理. 李庆龙译. 北京: 中国食品出版社, 1989. 11~26
- 6 Wolf G M, Buzen C L, Macmasters M M, et al. Structure of the mature corn kernel. *Cereal Chemistry*, 1952, 29(5): 321~333
- 7 Balastreire L A, Herum F L, Blaisdell J L. Fracture of corn endosperm in bending. *Trans of the ASAE*, 1982, 22(4): 1062~1065