维普资讯 http://www.cqvip.com

第19卷第3期 西北农业大学学报 Vol.19 No.3
1991年9月 Acta Univ. Agric. Boreali-occidentalis Sept. 1991

苹果流变特性的研究

I. 蠕变特性的试验与研究

李小昱 王 为 孙 骊 冯国华*

（西北农业大学农工系，陕西杨陵）

摘 要 以秦冠苹果为试材，建立了蠕变现象的流变模型，计算出流变参数。结果表明，苹果的蠕变现象可用四元件的Burgers模型表示，苹果大小、载荷大小、果肉试样的不同对模型参数影响均不显著；当保证应力不变时，果肉试验与整苹果试验的参数很接近。

关键词 苹果，蠕变，生物流变学／流变特性

中图分类号 Q66

设计农副产品加工、冷却、贮藏、干燥、运输等机械及设备时，必须明确有关力学特性和确定其基本参数，只有这样才能使设计、计算具有理论性、准确性和实用性，逐步达到数量化的描述。果品的力学特性中有一重要流变特性就是蠕变特性。

近年来，美国、日本、苏联等国对农业物料特性的研究给予了高度的重视，利用电测技术开展了大量的研究工作[1]，我国这方面的研究尚处于初期阶段。本文对苹果的蠕变特性进行了测定与研究，为苹果的贮藏、运输、加工、保鲜提供一些必要的参数，同时也为进一步设计测试仪器提供一定的依据。

1 试验方法

1,1 试验材料

将贮藏期7～8月的秦冠苹果，按其重量、最大侧向直径分为大(重量190～230 g，ϕ78～85 mm)、中（重量121～146 g，ϕ67～70 mm）、小（重量92～107 g、ϕ60～63 mm）三级，以比较苹果大小对其流变参数的影响。

1,2 试验条件及装置

试验的环境温度为16～23℃，空气相对湿度为51%～72%，试验装置如图1。

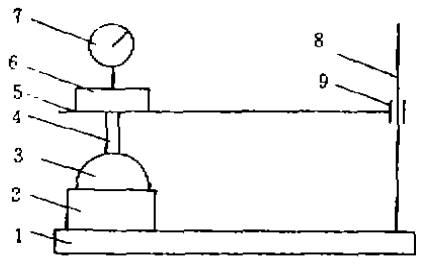

图1 蠕变试验测定装置示意图

1.底座；2.容器；3.苹果；4.加载模具；5.横梁；6.砝码；7.位移传感器；8.立柱；9.调整机构

1,3 试验方法

蠕变试验的加载模具有平板和压头两种，用砝码加载。平板为圆板，直径为43 mm；压头模具直径为6 mm。其直径的确定是为了保证其应力不变，在这里即接触面积不变，

*文稿收到日期：1990-12-18。

现在西乡县农机管理站工作。

维普资讯 http://www.cqvip.com

这时模具的半径应小于被试物体曲率半径的1／10[1]，所以根据被试苹果的大小确定出加载模具直径为6 mm，就能保证其应力不变。这样，用平板和压头压被试苹果时，一个是所受的力不变，一个是所受应力不变，都可叫做蠕变。

用整个苹果做蠕变试验时，苹果用石蜡固定，先将石蜡溶化，待其快要凝固时，将苹果放入石蜡中，石蜡充满苹果周围，待其自然冷却完全凝固后，再做试验。苹果不要放入蜡中太深，只要能固定苹果即可。用苹果果肉做试验时，不用固定，直接放在玻璃平面上。

1.4 试验设计

研究各因素对其流变特性参数影响的显著性，采用$L_9(3^4)$正交试验设计进行试验[2]，每工况重复3次。

平板压缩果肉试样试验因素水平表如表1，几种截面面积相等，均为314 mm²，圆形截面直径为20 mm，正方形截面边长17.7 mm，矩形截面长21.7 mm，宽14.5 mm。平板、压头压缩整苹果试验因素水平表如表2。

表1　平板压缩果肉试样试验因素水平表

水平	因素 A 截面形状	B 试样高度(mm)	C 载荷 (kg)
1	圆　形	35	0.5+0.26=0.76
2	正方形	25	1+0.26=1.26
3	矩　形	30	1.5+0.26=1.76

表2　平板、压头压缩苹果试验因素水平表

水平	A 苹果大小	B载荷 (kg) 平板	B载荷 (kg) 压头	C
1	小	1+0.26=1.26	1+0.19=1.19	
2	中	2+0.26=2.26	1.5+0.19=1.69	
3	大	3+0.26=3.26	2+0.19=2.19	

注：0.26，0.19为试验装置的横梁与加载模具之和。

2 试验结果与分析

2.1 数学模型[3]

根据测定的数据及特性曲线图（由于篇幅所限，曲线图以试验8①为例），以四元件*Burgers*模型作为三种蠕变试验的模型（见图2）。加载过程变形随时间的变化如下：

$$D(t)=\frac{F_0}{\gamma_0}+\frac{F_0}{\gamma_1}(1-e^{-t/\tau_1})+\frac{F_0}{\eta_2}t \qquad (1)$$

式中　$D(t)$——变形量(1×10^{-2}mm)；　γ_0,γ_1——弹簧常数 (kg／1×10^{-2}mm)；

F_0——定载荷(kg)；　　τ_1——延迟时间(s)；$\tau_1=\frac{\eta_1}{\gamma_1}$；

t——时间(s)；　　η_1,η_2——阻尼器粘性系数(kg·s／1×10^{-2}mm)。

卸载时恢复曲线：

$$D(t)=\frac{F_0}{\gamma_1}(1-e^{-t_1/\tau_1})e^{-(t-t_1)/\tau_1}+\frac{F_0}{\eta_2}t_1 \qquad (2)$$

式中，t_1为卸载时间。

以计算机对曲线进行解析拟合，求出其流变特性参数及相关系数，其相关系数在

维普资讯 http://www.cqvip.com

0.99以上，

2.2 数据分析

对参数进行统计分析，用三水平下重复3次时作分析计算，把空列作为第一类误差处理，并检验各因素对其流变特性参数影响的显著性。

由表3看出：果肉蠕变试验中果肉试样的截面形状、试样高度、所受载荷对参数影响均不显著。

由表4可看出：不论平板还是压头压缩整苹果时，苹果大小、所受载荷对参数影响均不显著。

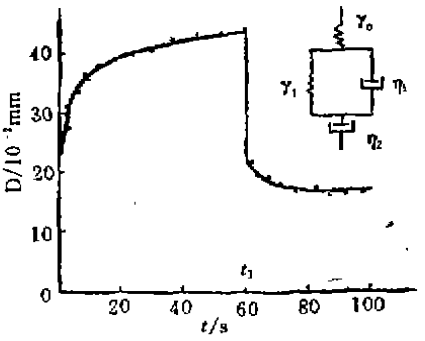

图2 Burgers模型蠕变曲线图

表3 苹果果肉蠕变试验参数方差分析

参 数	变差来源	平方和	自由度	平均平方	F值	显著性
γ_0	A间	0.4×10^{-4}	2	0.2×10^{-4}	0.67	不显著
	B间	2.0×10^{-4}	2	1.0×10^{-4}	3.3	不显著
	C间	1.2×10^{-4}	2	0.6×10^{-4}	2.0	不显著
	误差	5.8×10^{-4}	20	0.3×10^{-4}		
	总计	9.4×10^{-4}	26			
γ_1	A间	22.7×10^{-4}	2	11.4×10^{-4}	2.32	不显著
	B间	4.2×10^{-4}	2	2.1×10^{-4}	0.43	不显著
	C间	0.2×10^{-4}	2	0.1×10^{-4}	0.02	不显著
	误差	97.8×10^{-4}	20	4.9×10^{-4}		
	总计	124.9×10^{-4}	26			
τ_1	A间	2.19	2	1.10	2.50	不显著
	B间	1.02	2	0.51	1.16	不显著
	C间	1.17	2	0.59	1.34	不显著
	误差	8.84	20	0.44		
	总计	13.22	26			
η_2	A间	23.84	2	11.92	2.09	不显著
	B间	23.14	2	11.57	2.03	不显著
	C间	33.13	2	16.56	2.91	不显著
	误差	113.85	20	5.69		
	总计	193.96	26			

$F_{0.01}(2,20)=5.9$，$F_{0.05}(2,20)=3.5$

现对几种数据作一比较，由表5可看出，三种试验的延迟时间均为3秒多。平板压缩整苹果其参数γ_0、γ_1、η_2都比另两种大，这表明在受同样的力时，平板压缩果肉试样和压头压缩整苹果要比平板压缩整苹果瞬时弹性变形量大，而且延迟弹性变形量也大，这两种曲线上升趋势也快，后者则比较缓慢，这与我们的经验是一致的。虽然同样是平板压缩，但压缩果肉其实质是应力不变，而压缩整苹果时其应力在不断变化（因接触面积在不断变化），所以它们之间的参数值是不同的。同样，压头压缩整苹果和平板压缩整苹果之间的参数值也是不同的。

维普资讯 http://www.cqvip.com

表4　平板加载苹果蠕变试验参数方差分析

加载模具	参数	变差来源	平方和	自由度	平均平方	F值	显著性
平板	γ_0	A间	4.6×10^{-4}	2	2.3×10^{-4}	3.31	不显著
		B间	0.8×10^{-4}	2	0.4×10^{-4}	0.58	不显著
		误差	15.3×10^{-4}	22	0.7×10^{-4}		
		总计	20.7×10^{-4}	26			
	γ_1	A间	0.0295	2	0.0147	1.85	不显著
		B间	0.0056	2	0.0028	0.35	不显著
		误差	0.1754	22	0.0079		
		总计	0.2105	26			
	τ_1	A间	3.00	2	1.50	1.89	不显著
		B间	2.58	2	1.29	1.62	不显著
		误差	17.49	22	0.79		
		总计	23.07	26			
	η_2	A间	126.51	2	63.25	1.26	不显著
		B间	26.51	2	13.25	0.26	不显著
		误差	1107.44	22	50.34		
		总计	1260.46	26			
压头	γ_0	A间	0.4×10^{-4}	2	0.2×10^{-4}	1.00	不显著
		B间	0.8×10^{-4}	2	0.4×10^{-4}	2.00	不显著
		误差	3.3×10^{-4}	22	0.2×10^{-4}		
		总计	4.5×10^{-4}	26			
	γ_1	A间	66.29×10^{-4}	2	33.15×10^{-4}	1.69	不显著
		B间	102.87×10^{-4}	2	51.44×10^{-4}	2.62	不显著
		误差	431.26×10^{-4}	22	19.60×10^{-4}		
		总计	600.42×10^{-4}	26			
	τ_1	A间	10.48	2	5.24	2.25	不显著
		B间	7.37	2	3.69	1.59	不显著
		误差	51.13	22	2.32		
		总计	68.98	26			
	η_2	A间	129.92	2	64.96	3.38	不显著
		B间	129.16	2	64.58	3.36	不显著
		误差	422.74	22	19.22		
		总计	681.82	26			

$F_{0.01}(2,22)=5.7$；$F_{0.05}(2,22)=3.4$

表5　三种蠕变试验参数

试验项目	γ_0(kg/10^{-2}mm)		γ_1(kg/10^{-2}mm)		τ_1(s)		η_2(kg·s/10^{-2}mm)	
	T	$\bar{T}$	T	$\bar{T}$	T	$\bar{T}$	T	$\bar{T}$
平板压缩果肉	0.585 9	0.021 7	1.772 6	0.065 7	88.175 7	3.265 8	243.160 0	9.005 9
平板压缩苹果	0.975 2	0.036 1	4.068 4	0.150 7	83.469 9	3.091 5	634.370 0	23.495 2
压头压缩苹果	0.530 0	0.019 6	1.586 7	0.058 8	107.757 1	3.991 0	194.377 9	7.199 2

注：T为各次数据之和；均值$\bar{T}$为T／27。

比较平板压缩果肉和压头压缩整苹果时的参数，不难看出，尽管二者有差别，但差别不大，二者实质都是保证加载时应力不变，从而说明整个苹果和果肉试样之间的特性不是相差太远。上述结果建立在多次重复试验的基础上，所以，在必要时可以拿果肉试

维普资讯 http://www.cqvip.com

样来代替整苹果做试验。这样有很大的方便性。

3 结 论

1）秦冠苹果的蠕变现象可用四元件的Burgers模型表示，苹果大小、载荷大小、果肉试样的不同对模型参数影响均不显著。

2）平板压整苹果、平板压果肉的蠕变特性参数不同；用平板压整苹果和压头压整苹果二者的蠕变特性参数也有很大区别；但保证应力不变时，即平板压果肉和压头压整苹果时，果肉和整个苹果的参数较为接近。可以认为此时用果肉和整个苹果做试验没有多大区别。用果肉试样代替整苹果，有很大的方便性，同一苹果上可取多个果肉试样，有很强的可比性，且果肉试样容易取得，固定起来也方便，果肉试样形状简单，容易计算应变（应力）。

承蒙王乃值副教授在计算机计算中大力帮助，谨此致谢。

参 考 文 献

1 赵学笃，陈元生，张守勤编。农业物料学。北京，机械工业出版社，1987。4，42～43

2 关颖男等编译。试验设计方法入门。北京：冶金工业出版社，1985

3 小岛孝之。佐贺大学农学部汇报，第55号，1983，22～25

A Study on Rheological Characteristics of Apple

I. Testing Creep Properies

Li Xiaoyu Wang Wei Sun Li Feng Guohua

(Department of Agricultural Engineering, Northwest Agricultural University, Yangling, Shaanxi)

Abstract The rheological models of creep phenomena were established with Qinguan delicious as testing material to count rheological parameters in this paper. Results from the tests showed that the phenomena of apple creep can be expressed by Burgers model with four elements. The apple sizes, loadages and texture of fruit flesh had no significant effect upon the parameters of the models. When stress was stable, differences in parameters of tests of fruit fresh and whole apples were close to each other.

Key words apple, creep, biorheology／rheological characteristics