

# 用于损伤研究的人造马铃薯\*

R. Parks G. Anderson

苏格兰农业工程中心

**提要** 本文概述了马铃薯块茎粘弹性行为的一个模型,它是构成人造马铃薯的基础。这种装置可测量某些参量,以便对马铃薯的损伤程度作出判断。本文简要介绍了这种装置的原理,并讨论了它们的优缺点,还综述了数据处理技术并提出了新的方法。对现有装置进行了校准试验,并指出其不足之处。回顾了过去已公开发表的工作并补充以前尚未发表的工作。与此同时提出了分布惯量在研究马铃薯块茎碰撞中具有重要作用的观点,对现有装置的基本结构原理提出了质疑,并指出在研制具有分布惯量的试验装置方面需作进一步的努力。

## 1 引言

苏格兰农业工程研究所 (Scottish Institute of Agricultural Engineering) 现名苏格兰农业工程中心 (Scottish Centre of Agricultural Engineering) 的研究工作者构思人造马铃薯大约已有15年之久了。这个项目一开始时提出的观点至今还是正确的,即从技术角度说数据处理是可行的,主要困难在于如何产生一个合适的信号,其强度能在任何情况下正确地代表马铃薯块茎的损伤程度。

如果一种装置能指示出某物体从高处跌落在一个硬的表面上,比从较低的高度上跌落到同样表面上所受到的损伤大,那么它将对某些跌落所造成的物体损伤作出定量的评价,例如比较一个物体从低处跌落于硬表面和从高度跌落于软表面或倾斜表面所受到的损伤哪个更大些。

早先人们用加速度计来制作这种装置。它有一些缺点,这一点人们已认识到了,但在了解和控制损伤方面始终没有重大突破。当时尽管人们已着手制作有很大难度的测量仪器,而且对它的成果也及时地进行了报道,但使用这些新手段而带来的在研究马铃薯损伤方面的新进展的论文却很少。

对设计制作这种专门测量仪器来说,重要的是能否找到一种更好的传感技术。苏格兰农业工程中心在这方面投入了很大的精力,他们现在已使用了一种特殊的方法(使用压电塑料)。这是个很大的进步,但仍不是完美无缺的,仍需进一步研究和做出艰苦的努力。

\* 来自英国、丹麦、法国、荷兰、比利时、葡萄牙、希腊、西班牙、爱尔兰以及欧洲经济共同体等的17名学者于1987年10月14—15日在丹麦举行了欧洲经济共同体召开的马铃薯损伤专题讨论会。与会专家对马铃薯的损坏机理、试验方法和仪器设备进行了探讨。本文作者P.Parks和G.Anderson长期从事马铃薯损坏机理和有关仪器设备的研究。这篇论文是有代表性的一篇,所介绍的方法和仪器对水果、蔬菜也有借鉴价值。译者曾在苏格兰农业工程中心进修一年,译出本文的目的是引起国内的注意,促进我国在这个领域研究的开展。——译者

## 2 模型的建立

马铃薯的物理性质是很复杂而且非均匀的。为了能使用现有的均匀材料制作一种人造马铃薯块茎，借助这种人造块茎去获得有用的测量结果，事先必须作一些简化假设。

作为第一次近似，假设块茎内部充满刚性物质而外面包着柔顺型材料，碰撞前碰撞物体一方或双方具有一定的动能，碰撞中动能按下面之一或数种情况重新分配：①能量消耗于相互摩擦，无损伤；②能量无损耗地作为弹性能贮存并返回；③能量耗尽于破坏块茎组织；④一方或双方在碰撞完了时有剩余动能。

研究一下这个简化了的马铃薯块茎与一个静止物体碰撞的时间历程也许是有用的。其关键是研究在与实际情况接近的速度之下相碰撞表面间的力-变形曲线。

初始速度决定第一个时间增量中的变形，同时产生该时间增量内的平均作用力。在第一个时间增量内施加于块茎质量的这个平均力，其减速作用决定第二个时间增量开始时新的（小一些的）速度。这个过程继续到所有动能被制动力的累积作用消耗完为止。然后被贮存的弹性能量返回给块茎，其中部分消耗于摩擦，其余的用于产生块茎回弹的速度。

对简单材料和结构来说，力是线性地正比于变形的。马铃薯块茎组织中包含有许多相互嵌合的含有液体的囊状物，它们的劲度随着变形的增大而增大。Hertz 分析过的一个经典情况显示了一个撞击在平坦表面上的球体在基本几何变形方面非线性的主要原因。

粘弹性对马铃薯组织的影响有两种形式，用专门术语来说就是“松弛”和“粘性模量”。松弛作用主要表现为在载荷存在情况下有蠕变的趋势。例如，块茎表面产生了一个变形以后，我们可以发现接触力会随时间增长而减小，而且在开始的几十秒内相当明显，在以后的几小时或几天中继续减小到某种程度。这种作用与马铃薯的储存有关，但一般来说与马铃薯的传送损伤无关，传送损伤产生的时间只有 10—40ms。用只能加准静态载荷而不能加动态载荷的装置来测量弹性力-变形特性是有困难的。

弹性模量给出了应力与应变成正比的关系，而粘性模量则与应变率成正比。它们可以用“复合模量 (complex modulus)”一块进行分析 (Peterson & Hall 1974)。上述应力/应变或应变率的概念在单轴域中可以很容易地被理解，在三维坐标系统对球面接触进行精密的分析 (泊松比) 则比较复杂些。以充分实验为基础的理论 (Lichtenstieger 1982) 给出了变形、变形率和力的典型关系。

在这种以时间为横坐标的曲线图中，变形是由力产生的。粘性作用对碰撞的影响表现在力的峰值出现于变形的峰值之前。有关马铃薯损伤的本质问题归结为力是否达到了那样一种限度，即作用于马铃薯块茎组织上的应力超过了屈服强度。

## 3 力学特性

对测试球的基本要求是它的力学性质 (例如柔量，反弹性，表面摩擦等) 要与它所模仿的农产品相似，否则它就不能以同样的方式通过传送机械，也不能受到典型的碰撞。

对块茎的载荷-变形特性曲线来说，测试球与未受过碰撞的完好实物的很高程度相似是很重要的前提。对给定的初始速度和惯量，载荷-变形特性曲线决定了块茎运动的过程和碰撞力，特别是可能导致损伤的峰值力和峰值变形。对表面的柔量与马铃薯块茎组织基本相似的两个表面的典型碰撞来说，除非测试球的性质与马铃薯块茎组织的性质相当吻合，要得到有比较价值的据是不可能的。

因此,有关特性包括粘弹性,应该在造成轻度损伤的典型碰撞速度(大约是0.7至2m/s)下进行测定。

幸运的是,找到一种有合适粘弹性行为的材料并不太难,苏格兰农业工程中心已获得了基本满意的方案,这就是在一个较硬的内核上包裹一层约5mm厚的合成橡胶。

#### 4 加速度计测试球

人们自然会首先想到用加速度计来传感,特别是在研究物体作自由落体运动撞击一个静止物面时。测得的结果中最令人吃惊的是马铃薯块茎在实际传送过程中会承受到很高的减速度——超过500g。

简单的加速度计只有一个敏感方向,所以需要使用带有矢量相加功能的三轴系统。矢量相加可以在测试球里进行,也可以通过遥测法把信号传送出来,用其他设备进行相加运算。许多研究工作者在这方面所做的工作表明,无论使用哪种方法,都只是一个技术复杂程度和费用多少的问题,在技术上总是可以实现的。

必须认识到在马铃薯传送过程中存在着极大的随机性,绝不可能找到两个完全相同的过程,其中块茎受到的碰撞的大小和历程完全相同。这取决于很多因素,例如,块茎的数量,与其一同传送的其他物体的性质,以及块茎的取向等。所以必须试验多次,才能获得有效的计算结果并判断这些结果是否合理。

在需要进行多次试验的观点被接受后,单轴加速度计测试球就变得可信赖了,而且它的最可取之处是简单、费用低。实用表明这种测试球在咨询服务中是有价值的。

#### 5 压力测试球

实际上这是为研究马铃薯损伤最早出现的方案,但由于后来出现的加速度计测试球结构比它简单得多,加之制造上的实际困难,它被搁置了下来。

研制压力球的工作于1985年再次开始并制成了两种新型压力球,设计的着眼点是如何减小对压力球壳体的扰动。两种新压力球都暴露出共同的弱点,即球在变形过程中由于受挤压的情况不同,有时产生压力的增大,有时产生压力的减小。

当一个弹性空壳与一个刚性平板相碰而产生变形时会产生一种扩容作用(大多在接触区的周围),因此不难理解在某些碰撞位置上内压力为什么有所减小。于是很难说这两种测试球中哪一种更强些。

#### 6 漏孔测试球

另一种空壳球用所含液体的流失来指示损伤程度(Jenkins & Humphries 1982),其主要特征是读数的一次性。这种漏孔测试球一开始是充满了水而且称过重量的。测试完成后,再称一遍重量,看看在测试过程中被挤出了多少水。

这种漏孔球功能的根本问题与上面讨论过的空壳压力球一样,即它的内部容积的减小不一定与所加载荷有直接关系。

另一个造成不确定性的因素是无法得知水的总损失量是由一个大的碰撞造成的还是由若干较小的碰撞造成的。

再一个问题是材料的粘弹性不够稳定。漏孔球的壳体是乙烯基塑料制造的,它的劲度在马铃薯块茎传送作业的温度范围内有明显的变化。

#### 7 表面力传感法

新型压电塑料 (P VDF) 的出现使损伤传感技术的改进有了现实可能性。苏格兰农业工程中心已研究成功一种新的方法——直接传感表面碰撞力方法。

使用这种材料的主要设计难点是如何处理三个轴向的灵敏度。如果不能使一个轴向的灵敏度居于支配地位, 那就存在一种危险性, 即其他轴向的虚假信号有可能部分或全部抵销掉主信号。如果结构设计得很仔细, 减小这种不希望的信号的影响是可能的。

苏格兰农业工程中心的成功之处在于压电材料层的形状、弹性材料和与其相邻的刚性材料相结合的结构。这些正是目前申请专利的主要内容。

## 8 数据的采集和整理分析

一般来说上述各种测试球 (有些是例外) 是通过无线电遥测的方法把数据传送出来而进行整理分析的。在要求严格的情况下, 最好用录相机录下测试球的运动过程, 同时用录相带的音频通道录下它受到的碰撞信号, 但比较费时间。

苏格兰农业工程中心农业开发和咨询服务部在用电子马铃薯进行农场调查中使用过一种非常实用的方法。在测试过程中, 碰撞信号被记录于双声道盒式录音机的一个声道, 第二个声道用来记录观测人员有关实况的语言报道。这样就减小了现场测试时所携设备的体积, 并且可在现场重放录音, 用绘图仪把信号表现在纸面上。这种方法提供的信息是有根有据的, 农场主在观察被画出曲线的同时能听到试验过程的详细情况如电子马铃薯的位置以及随之一同运动的其他东西等。这种方法的缺点是加速度传感器的输出信号曲线并不总是很明晰的, 有时需要有经验的人才能解释得清楚。

日新月异的新技术总是把人们的思路引向更新的境界, 现在已经是考虑使用固态存储器实现在板采集 (on board logging) 的时候了。在无线电遥测手段行不通的场合下, 在板采集数据也具有吸引力。

在收获机的振动铲附近, 以及分选设备的出口通道部分, 无线电遥测手段都是难以工作的。还有一种情况就是天线的方向图, 一个单体天线在它的两极方向各有一个死区, 在电子马铃薯滚动和与其他马铃薯发生碰撞过程中, 这两个死区将随机地面向接收机。使用多发射机和天线系统 (Mitchell 1977) 耗资较大, 倒不如用同样的钱去改进传感方法。

测试球里可以装上足够容量的存储器, 记录某一时间内的碰撞历程。这个方法的麻烦之处是需要把所有这些数千字节的数据传送到一个可以随时访问和进行整理分析的设备中去。然而这却使人们有可能对那些与改善马铃薯传送方法有关的重要数据反复地进行研究。

这种重要数据就是如下的两个数值: 一是在一个测程中的最大瞬时碰撞, 另一是发生这个最大碰撞的位置。位置数据很难取得, 但测程的计时不难, 因此可以用时间去判断位置。

## 9 校准

不管是监测信号的大小, 还是确定一个或若干阈值, 所有种类的测试球都是建立在这样一种概念基础上的: 信号的大小应该与马铃薯在某种传送过程中的损伤程度有关。

对任何一种农产品来说, 造成其组织破坏的碰撞强度与很多因素如品种、产地、季节以及储存条件有关。还应注意到即使在同一批量中, 各个试样之间也存在着很大的差异。

现在介绍“马铃薯测试器”和“人造马铃薯”这两个仪器。它们是一对互相补充的测试工具。上面说到的个别马铃薯之间的差异可以用马铃薯测试器 (如摆锤或跌落测试器) 来测定, 其方法是施加标准碰撞, 进行无人干预的测量。“人造马铃薯”实际上是作为一个不

受这些差异影响的样品，用来比较实际上发生的碰撞强度。碰撞强度的阈值要根据经验或对农产品的测量来确定。

如果马铃薯之间的差异可以忽略不计，或用统计学的方法对足够大的批量进行处理，那么理想的校准方法可能是按标准的规则使一些马铃薯样品和测试球受到一系列不同强度的碰撞。只有这样，才有可能把测试球的信号直接与损伤相比较。

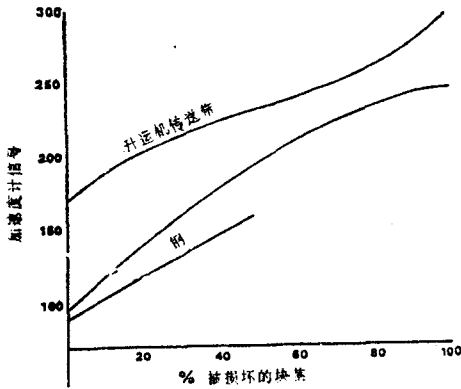


图1 加速度计型测试球的校准曲线

Hallee (1981) 公布了一系列校准试验的数据，这些数据是在不同的碰撞表面情况下得出的，并且忽略了所选用的试验样品具有多大代表性的问题。根据这些数据所绘制的曲线（见图1）表明，他所用的测试球有一个很典型的缺点，即碰撞表面不同时，测试球的信号与损伤程度的关系也不同。如果试验数据这样明显地受诸如碰撞表面的性质等因素的影响，那就大大限制了测试球的使用范围，甚至有人会说，如果我们得到的是这类数据，不是和不使用测试球一样吗？我们把这个曲线图看作性能判决试验结果

(crucial test of performance)，而我们的主要目标是如何减小在不同碰撞表面条件下各曲线之间的差异。

不知道测试球碰到什么物体上，或不知道测试球碰撞到什么表面上，要准确预测出损伤程度是极为困难的。不管是用加速度计方式还是用其他形式的表面力传感方式，所获得的信号总是代表接触面积上积分的总力而不是某一点上的力或压力。我们不可能说出一个信号是由作用于小面积上的大的力产生的呢，还是由作用于大面积上的小的力产生的。

上面曾讨论过，对于一定惯量和冲击速度来说，力值是由两接触表面的力-变形曲线来确定的。如果测试球撞在一个尖角上而不是一个平坦的面上，那么力-变形曲线的斜率将较小，这意味着整个碰撞过程中受到较小的瞬时力和较小的损伤。但实际上如果按块茎组织破坏程度来分析，则由于应力峰值大，因而在给定同样大小的总力下受到较大损伤的可能性也较大。

恐怕我们不得不面对这样一个严酷的问题：如果一个人造马铃薯跌落在平板上和跌落在升运带杆条上所得数据出乎意料地使人们无所适从，那么花力气去研制这样的人造马铃薯还值得不值得呢？

## 10 实际应用

荷兰 IMAG 研究所的 De Konig 和 Lerink 在 1981 年进行的实验工作很有意义。他们使用的是三轴加速度计测试球，可把各矢量相加，用无线电遥测法传送数据。该测试球曾用来比较四种不同的旨在减小马铃薯装车时碰撞损伤的技术措施。试验工作包括校准是一项很有价值的研究生题目的一部分 (Lerink 1981)。试验结果表明，该研究所开发的一项廉价技术与其他几项耗资大的技术效果相同。

让测试球跌落在拖车车厢钢底板上，在底板上无缓冲物及有缓冲物（如气袋、草袋或布

垫)两种情况下,测试球所感受到的减速度峰值显著不同。但是令人奇怪的是,只要在底板上有一单层马铃薯存在,那么缓冲物的有无不会造成碰撞力峰值的显著不同。这就提出了一个问题,即在这种情况下,马铃薯块茎的组织是否受到了破坏?

虽然他们在实验中使用的测试球并不理想,即它的外壳很坚硬,不具有与块茎相似的柔量,但仍然可以得出如下基本结论:在这种碰撞情况下,由于马铃薯块茎的惯量、柔量及粘度,冲击能量几乎完全被吸收,只有很小一部分变成车厢底板的反弹力;紧靠车厢底板的一层马铃薯块茎的重心在冲击下移动不大,而相碰撞的两个块茎之间的相对运动能量转变成了碰撞接触区的变形。因此,如果一个加速度计式测试球正好夹杂在紧靠车厢底板的一层马铃薯块茎中,那么当一个实物马铃薯块茎跌落在它上面时,即使碰撞力很大,这个测试球也只能输出一个很小的信号甚至没有信号输出。

我们可以把马铃薯近似地看成一个具有集中惯量,其表面具有柔量和粘度的物体。如果这种模型的马铃薯碰撞在一个刚性平坦表面上,那么暂态力的波形将近似于一个正弦半波。然而实验表明,这个暂态力的波形却十分不同于这种理想化的波形。把块茎放在一个止挡中,当另一个块茎(主动块茎)跌落在它上面时,主动块茎碰撞面上的暂态力的波形并非象预料的那样是一个正弦半波,而是两个幅度大体相等的尖峰,止挡上受的力很小并且明显地滞后于主动块茎上的力。如果止挡里放的是新鲜的马铃薯块茎,那么止挡所受脉冲力的波形与主动块茎上的双峰形式差不多;但如果止挡里放的是干瘪块茎,则止挡上受的力却近似于单个正弦半波。如果没有止挡,那么马铃薯块茎被撞击后就会跑掉,并且主动马铃薯上只受到单峰力的作用。看来应该精心设计一种人造马铃薯,让它具有块茎组织的分布惯量和柔量特性,才能更好地解释上述现象。

## 11 结 论

已经制出若干种不同原理的测试球并投入使用。尽管它们在某种程度上能满足使用要求,但都还存在一定不足之处。问题的关键是要找到一种合适的手段,用来比较各种形式的碰撞对块茎所造成的损伤危害程度,以便采取措施去对付带来最大危害的因素。

测试球的性能应该用碰撞信号与块茎损伤关系图来评价,关键是如何减小在不同碰撞表面情况下各曲线之间的差异。

现有测试球的悬而未决的主要问题是,在平坦表面上进行的碰撞校准对尖角(或升运带杆条)不适用。

尽管已用比典型块茎硬得多的测试球进行了有益的研究工作,但如果把它的柔量做得与真实块茎一样,那么碰撞情况将会更接近于实际。需要研制具有分布惯量、柔量和粘度的测试球,因为实验已表明,这样一种装置对测定峰值应力及损伤危害程度起重要作用。

必须进一步进行研究工作来使测试球的力学特性严格模仿马铃薯块茎的分布惯量和柔量特性。同时,表面5—10mm以内深度的局部变形传感技术也有待进一步研究。

## 参考文献(7篇,略)

210014南京农业部南京农业机械化研究所 衷 征译自作者  
1987年10月的打字稿(董务民校)