

蛋壳的强度：家禽科学家视为难题的实验力学

R. M. G. Hamilton P. W. Voisey

蛋壳的破裂同蛋壳的强度有关^[2]。影响蛋壳强度的因素很多^[4]。如母鸡品种、营养状况、鸡龄、环境温度、疾病情况、每天下蛋时刻等。因此，蛋壳破裂问题涉及多种学科，需要遗传学家、营养学家、工程师和其他方面专家的知识。本文从工程学观点讨论蛋壳的强度。

材料强度和结构强度 蛋壳抗破损的能力是蛋壳材料强度和结构强度的函数^[2, 18]。Garter^[2]断言如果蛋壳强度小于蛋壳招致破损的强度，蛋壳就破裂。这个断言虽然显而易见，但它强调了这样一个重要事实：蛋壳破裂同时取决于蛋壳的强度和破损的大小。由于蛋壳的形状是长球形，蛋壳材料又容易破碎，所以用古典方法测量蛋壳材料强度很困难^[18]。

结构强度取决于蛋壳形状、大小、厚度和分布。蛋的大小和壳厚不仅随小鸡下蛋头一年间的成熟程度而变（表1），而且是一天天变化的。一个蛋中各处壳厚也不相同^[10]，小端最厚，赤道面最薄，大端是中等厚度。

表1 蛋壳厚度随鸡龄的相对变化

鸡龄(天)	蛋重	蛋壳重	蛋壳厚
177	100.0	100.0	100.0
233	112.9	103.1	95.2
303	120.4	107.0	94.5
387	125.4	107.7	93.3
429	127.2	108.4	93.4

以177天鸡龄的蛋重（48.9克）、蛋壳重（4.88克）和蛋壳厚（328微米）为100。

理论上讲，结构强度或材料强度增大，或二者同时增大，都将提高蛋壳抗损伤的能力。但文献中发表的结果并不支持这点。Washburn^[7]指出，虽然棕蛋壳较薄，但它们的破损强度却比白蛋壳大。这说明材料强度是重要的。另一方面，Anderson等^[1]发现材料强度几乎没什么变化。通过遗传选择来提高蛋壳抗损伤能力是费时费钱的。

蛋壳强度测量 为提高蛋壳强度，家禽科学家需要准确、快速、省钱的测定大量鸡蛋强度的方法。本世纪提出的许多方法^[18]可分为直接法和间接法两大类。前者有冲击法和准静力压裂法。它们模拟现场情况下蛋的主要损伤型式^[4]，精确给出蛋壳破裂所需最大的力。但它们是破坏性测试，鸡蛋不能继续用于孵化。比重（SG）法、无损变形法和穿刺破裂法是常

用的间接法。它们是快速无损测试法，可对每个蛋进行多次测量，且测量后还可用于孵化。

现已专门研制出测量蛋壳无损变形、准静力压裂和穿刺破裂的仪器^[20]。这种便于携带的小巧设备（图1），在实验室或现场每小时可测蛋180—200个。此外，压缩力作用点与蛋的支持点成90°，因而支持蛋的方法不会影响测量或使之发生偏差。压缩头的速度可精确控制，例如每分钟移动20毫米。测量每一循环的无损变形及准静力压裂可用4900牛顿力的传感器以及信号调节和放大模块来进行。放大模块的输出连接到：1）峰值检测器，它检测压裂测量时最大的力；2）微分器，它检测力-时间曲线的斜率（变形或蛋壳刚度）；3）积分器，它检测蛋吸收的能量（力-变形曲线的积分）。准静力压缩的4个模块的输出由5位数字指示器记录。对于无损变形测量，一个连接到放大器的有限控制模块分别在作用于蛋的力达到0.98和10.74牛顿时依次开关6位数字的脉冲计数器。一个100赫的振荡器把信号馈给计数器。于是，精确测量鸡蛋恒速变形的时间，就测出了鸡蛋的刚度或变形。如果把平的压缩头换成直径为0.4毫米或更小的穿孔针，则可用于穿刺测量。

用一个单独的仪器来测量冲击破裂力^[13]。其中用一可调塑料托架来支托蛋体。托架位于长1.9米的悬挂铝杆的正下方，用测微仪调节，在整个测量过程中都使蛋体上表面与铝杆端部的距离保持不变。铝杆上端做成球形以利悬挂。该球端装配到与真空泵连接的球窝内。开启电磁阀使真空丧失，铝杆便自由落下，冲击鸡蛋。用压电传感器测量铝杆对鸡蛋的冲击。传感器的输出用峰值冲击计记录。峰值冲击计通过4位数字电压计示出一次冲击时传感器的最大输出。冲击鸡蛋时铝杆内产生的冲击波不要影响测量^[14]。改变杆长或杆材可克服这种影响。

用食盐溶液使蛋浮起的比重测量法得到广泛的应用。每级增加比重0.002或0.004，达到的比重范围1.062—1.102。用液体比重计来测盐溶液的比重。把蛋依序放入不同比重溶液中，而将不同比重的蛋分别收集在一起。比重与温度有关，所以测量时应保持盐溶液温度不变^[12]。

影响蛋壳强度测量的因素 在用准静力方法和冲击方法测量时应注意：1）如表2所示，施力快慢必须恒定，因为蛋壳材料是“应变率敏感的”^[8, 16]，是脆性的；2）记录力的响应的设备必须合适^[12]；3）蛋壳破裂力和蛋壳温度有关^[22]。蛋的比重和无损变形也受温度的影响。应当指出，直到最近还不清楚试验条件对蛋壳强度测量的影响，因而无法加以控制；因而对过去的许多数据必须小心加以评价。表3概括了测得的蛋壳性能、应控制的因素以及用直接法和间接法测量蛋壳强度的变化范围。

测量蛋壳强度的理想条件应标准化。在未达到这点以前，下列因素应和蛋壳强度数据同时列出：1）记录设备的响应快慢；2）所用变形速度及其精细程度；3）测量时记录力和变形的精度；4）接触蛋的元件的表面粗糙度；5）测量设备内的偏差范围；6）测量时的蛋温和蛋龄。

表2 压缩快慢对蛋壳强度的影响^[22]

压缩快慢 (厘米/分钟)	破裂时的力 (牛顿)
0.05	27.4
0.5	30.0
5.0	30.4
10.0	31.8
20.0	33.1

表3 蛋壳强度的直接测量和间接测量

方 法	性 质	所测蛋壳性能	应 控 制 的 因 素	平均范围;变化率
准静力压缩	破 坏	材 料	压缩快慢; 记录器灵敏度	26.5—48.0牛顿; 14—25%
冲 击	破 坏	结 构	杆长; 落下高度; 记录器灵敏度	51.0牛顿; 18%
穿 刺	破 坏	材 料	穿孔针直径; 压缩快慢	14.6—15.5牛顿; 14.6—15.2%
比 重	无 损	物 理	溶液温度; 比重	1.079—1.085; 0.5—0.9%
变 形	无 损	结 构	载荷 (0.98—10.74 牛顿); 记录器灵敏度	370—760微米; 10—25%

直接测量和间接测量间的关系 直接测量和间接测量间有一定的关系。例如表 4 所示, 比重和压裂力间的关联系数 r 为 0.61, 这就是说, 只有 37% ($r^2 = 37$) 的变化率是由这两个变量间的有关响应引起的。当把几种间接测量值同时化为直接测量值时, 这些关系几乎没有什么

表 4 蛋壳强度间接测量和直接测量间的关系^[19]

	比 重	变 形	壳 厚
蛋壳变形	-0.78		
蛋壳厚度	0.75	-0.74	
破 裂 力	0.61	-0.62	0.69

改进^[5, 11, 18]。蛋壳厚度和破裂力间的低关联系数 ($r = 0.69, r^2 = 0.48$) 表明, 除蛋壳材料强度方面的变化外, 蛋壳的破裂还含有其他的机制。理论上壳厚和破裂力间应有一高关联系数^[14]。

直接测量和间接测量间的关系并不总是线性的, 因为 Voisey 和

Hamilton^[11] 发现, 在无损变形 D 和压裂力 F 之间最适当的关系是二次方程

$$F = aD^2 - bD + c$$

已发现母鸡品种和鸡龄都会影响无损变形和压裂力间的关系^[5]。

蛋壳强度和蛋壳破裂 有限的文献资料表明, 蛋壳强度和破裂之间存在一个曲线关系^[4]。[23] 发现所有的蛋, 比重 < 1.043 时都是破的, 比重 ≈ 1.053 时有 50% 是破的, 比重 > 1.087 时没有破的。

结语 需作进一步的研究来确定, 直接法和间接法中哪种方法是现场条件下测定蛋壳破裂的最好方法。需要阐明在蛋上施加准静力或冲击力时的蛋壳破裂的机制。需要回答家禽饲养者和营养学家的如下基本问题: 是否应加强蛋壳的材料性能或结构性能, 或二者同时加强。为了有效解决这些问题, 家禽科学家应具有材料科学工程师、农艺工程师、电子显微镜工作者等等的专门知识。

董务民 摘译自: Engineering Applications of Mechanics (Proc. 5th Symp. on Eng. Appl. of Mech.; 16—17 June, Canada); 155—159.