

# 肝脱氧核糖核酸蛋白(DNP)溶液黏弹性 对Maxwell方程拟合的研究

施永德

(复旦大学上海医学院生物物理学教研室, 上海 200032)

**摘要:** 目的 采用Maxwell黏弹性方程对猪肝脱氧核糖核酸蛋白(DNP)溶液的黏弹性进行检测, 将实验数据与该方程进行了拟合与修正。方法 从猪肝制备DNP, 采用美国Brookfield公司的程序性DV II 流变仪测定样品的黏弹性, 在Windows下应用该公司的软件, 编制自动采样程序, 作各种数据(切应力、切变率、温度、时间等)的自动采集、贮存与数据处理。结果 1、DNP溶液表观黏度、切变率、氯化钠浓度三者关系为: 表观黏度随氯化钠浓度增加而增加, 而随切变率的增加而下降。2、DNP溶于3 mol/L氯化钠溶液样本, 加载 $0.6 \text{ s}^{-1}$ 切变率矩形波时, 该应力上升线方程 $\tau = \tau_0(1 - e^{-t/\lambda})$ 与实验结果符合; 3、但当该切变率矩形波撤销后的应力衰减实验数值与该衰减线方程 $\tau = \tau_0 e^{-t/\lambda}$ 明显不符合; 4、然而用如下修正方程 $\tau = \tau_0 e^{-t/\lambda} + \Delta\tau(1 - e^{-t/\lambda})$ ( $\Delta\tau$ 为原方程式与实验数值平衡状态的差值), 即与实验结果符合。结论 1、Maxwell方程对该文采用DNP样本与条件其黏弹性在应力上升线上有良好的符合性。2、Maxwell方程是基于理想物质黏弹性体的, 但该文实验生物材料并非理想物质, 受力后有结构改变、滞后、损伤等, 故其应力下降线有明显不可逆恢复的误差。3、该文在下降线方程右侧加上“不可逆应力损失项”即修正了以上误差, 拟认为有理论与应用价值。4、不同的生物组织(如正常肝与肝癌)样本, 在方程参数 $\tau_0$ 、 $\Delta\tau$ 与 $\lambda$ 的医学生物学价值有待进一步揭示。

**关键词:** Maxwell方程; 黏弹性; 脱氧核糖核酸蛋白; 肝

中图分类号: Q6

文献标识码: A

文章编号: 1009-881X(2021)02-0151-07

## Studies on Fitting of Maxwell Equation to Visco-elasticity of Liver Deoxyribonucleoprotein (DNP) Solution

SHI Yong-de

(Department of Biophysics, Shanghai Medical College, Fudan University, Shanghai, 200032, China)

**Abstract: Objective** To carry out the fitting and modifying of Maxwell visco-elastic equation during visco-elasticity determination for deoxyribonucleoprotein (DNP) of pig liver. **Methods** DNP was prepared from pig liver tissue. The type DV-II + Programmable Rheometer (Brookfield Engineering Laboratories, Inc., USA) was used for determining visco-elasticity of DNP solution. The experimental datum (including shear rates, shear stress, viscosity, temperature etc) were automatically collected, reserved and treated by the computer program under Windows with the software provided by the Brookfield Engineering Laboratories. **Results** 1. Relationship among DNP solution apparent viscosity, shear rate and NaCl concentration shows that viscosity was increasing according to increasement of NaCl concentration and was dedreasing according to increasement of shear rates. 2. When DNP solution with 3 mol/L NaCl was subjected to a rectangular wave of shear rate  $0.6 \text{ s}^{-1}$ , the ascending limb of the stress-time ( $\tau$ -t) curve equation,  $\tau = \tau_0(1 - e^{-t/\lambda})$  was coincident to the experimental datum. 3. But when the rectangular wave of shear rate  $0.6 \text{ s}^{-1}$  was removed from the solution, the descending limb of the stress-time ( $\tau$ -t) curve equation,  $\tau = \tau_0 e^{-t/\lambda}$  was not coincident to experimental datum. 4. However, we modified the

descending limb of the stress-time ( $\tau$ - $t$ ) curve equation as  $\tau = \tau_0 e^{-t/\lambda} + \Delta\tau(1 - e^{-t/\lambda})$  by adding an “irreversible stress loss term” with  $\Delta\tau$ , which is the difference between the computed stress value from the original Maxwell equation and the observed experimental stress value when reaching equilibrium. It may be seen that the descending stress-time ( $\tau$ - $t$ ) curves are nearly in complete agreement between the theoretical computation and experimental results. **Conclusion** 1.The theoretical computation from Maxwell equation has fine coincidence to experimental datum with the ascending limb of the stress-time ( $\tau$ - $t$ ) curve in our given experimental condition. 2.Maxwell equation is derived with idea visco-elastic body, but our experimental material does not belong to the idea one, and so after subjecting to the shear stress action, there exists structural change, hysteresis, damage, etc. in the system, thus the descending limb of the stress-time ( $\tau$ - $t$ ) curve has deviation from the experimental datum. 3.We modify the descending limb of the stress-time ( $\tau$ - $t$ ) curve equation by adding an “irreversible stress loss term”, which correct the deviation, maybe which possesses theoretical and applied values. 4.Maybe in future it would reveal the values of equation parameters of  $\tau_0$ ,  $\Delta\tau$  and  $\lambda$  for various biological and medical samples (for example, normal liver tissue and cancer one).

**Key words:** Maxwell equation; visco-elasticity; deoxyribonucleoprotein; liver

在流变学领域关于血液的研究发表很多,而对其他组织研究发表较少<sup>[1-5]</sup>。本文拟对肝脱氧核糖核酸蛋白(DNP)的流变学进行研究,也许今后对肝癌与其他肝病防治研究有好处。此外Maxwell黏弹性方程有一百多年历史,在上世纪引入生物科学研究,但认为该方程与实验数值不符<sup>[6]</sup>。本文拟对肝DNP的黏弹性进行检测,试图用该方程进行拟合。随着细胞分子生物学发展,已公认染色质组成的染色体,是控制着细胞的分裂、生长、发育、执行细胞功能的重要物质。而染色体在光学显微镜下的染色出现与细胞周期有关,它仅出现于细胞分裂期。染色体的出现是染色质浓缩有序的筑构,其逆向是松散成为光学显微镜下不可见的染色质。研究表明染色质是DNA与蛋白质有序结合的复合物,通常称为DNP。其核心结构研究表明是由(H2A,H2B,H3,H4)的8个聚体组蛋白及其外周缠绕的DNA双螺旋链构成的颗粒,其颗粒的DNA两头又被组蛋白H1锚联成为串珠状的结构,然后构成6个串珠一圈,直径为30 nm的超螺旋管的纤维结构,继之又由纤丝聚扎在核基质蛋白(即非组蛋白支架蛋白)柱体上,以绊环形式筑构成400 nm直径的超螺旋管单体,由两个相同的单体交叉成姐妹染色体对。交叉点称之为着丝点,单体端点称为端粒,这就是通常所描写的染色体结构。在细胞周期的不同阶段,染色体的浓集出现和松散消失的形态学变化形式,是与细胞执行功能如分裂、凋亡、死亡、激活、静止密切相关的。以上这两种变化之间在结构上如何体现出来,与什么因素有关,这是值得研究的问题,研究的方法有X线晶体衍射、多维

核磁共振、电子显微镜观察等。本文所报道的DNP黏弹性研究以及试图应用Maxwell方程的拟合也是一个提供信息的补充方法。

## 1 材料与方法

1.1 猪肝DNP制备 新鲜猪肝0℃~4℃下完成以下操作,将20 g猪肝组织放入400 mL的NaCl-EDTA溶液(内含0.15 mol/L NaCl与0.01 mol/L EDTA,以下称为NaCl-EDTA)中,用组织捣碎机打成匀浆,再用玻璃匀浆管研磨后,用4层纱布过滤,滤液用700 g离心30 min,弃上清液,将沉淀用NaCl-EDTA清洗4次。所得沉淀即为DNP,悬浮于NaCl-EDTA中,通过紫外光谱与化学分析属于DNP,纯度在95%以上<sup>[7]</sup>。

1.2 仪器 美国Brookfield公司的程序性DV II流变仪,在Windows下应用该公司的软件,编制自动采样程序,作各种数据采集、贮存、回归、拟合、数据处理。

1.3 操作方法 取DNP溶液2 mL,置于流变仪测量杯中,切变率值由仪器与电脑软件控制下自动采集切应力、切变率、温度、时间等数据<sup>[8]</sup>。测量温度控制在(20±0.1)℃。DNP浓度控制:相当于8 mg干DNP/mL的浓度。NaCl-EDTA基础上(内含0.15 mol/L NaCl与0.01 mol/L EDTA)氯化钠浓度的控制:用适合的氯化钠重量加入达到所需的浓度。

## 2 结果

2.1 DNP的表观黏度、切变率、氯化钠浓度三者关系 结果如表1所示，可见DNP溶液表观黏度值随氯化钠浓度增加而增加，而随切变率的增加而下降。

表1 DNP溶液表观黏度（mPa·s）、施加切变率、溶液中氯化钠浓度三者关系

| 切变率                 | 氯化钠浓度   |           |         |           |         |           |         |
|---------------------|---------|-----------|---------|-----------|---------|-----------|---------|
|                     | 0 mol/L | 0.5 mol/L | 1 mol/L | 1.5 mol/L | 2 mol/L | 2.5 mol/L | 3 mol/L |
| 0.6 s <sup>-1</sup> | 237     | 283       | 349     | 376       | 460     | 537       | 840     |
| 1.2 s <sup>-1</sup> | 178     | 207       | 260     | 283       | 349     | 383       | 493     |
| 3 s <sup>-1</sup>   | 122     | 132       | 170     | 186       | 228     | 272       | 360     |
| 6 s <sup>-1</sup>   | 61      | 85        | 104     | 125       | 148     | 185       | 251     |
| 12 s <sup>-1</sup>  | 17      | 55        | 72      | 92        | 107     | 136       | 183     |
| 24 s <sup>-1</sup>  | 21      | 45        | 55      | 63        | 75      | 92        | 149     |
| 60 s <sup>-1</sup>  | 11      | 27        | 38      | 48        | 62      | 79        | 120     |
| 120 s <sup>-1</sup> | 10      | 15        | 23      | 45        | 50      | 68        | 99      |

注：表中氯化钠浓度是指在原NaCl-EDTA溶液（内含0.15 mol/L NaCl与0.01 mol/L EDTA）基础上增加的浓度。表中表观黏度值为测定3次的平均值。

2.2 DNP溶液黏弹性实验数值与Maxwell方程的拟合 将图1中氯化钠浓度为3 mol/L的DNP样本，进行黏弹性的实验，其实验数据用Maxwell方程进行了拟合，发现当加载0.6 s<sup>-1</sup>切变率矩形波应力上升线方程： $\tau = \tau_0(1 - e^{-t/\lambda})$ （式中： $\tau$ 为应力，单位mPa； $\tau_0$ 为矩形波切变率作用后的平衡应力，单位也是mPa； $t$ 为作用时间，单位为s； $\lambda$ 为滞后时间，单位也是s； $e$ 为自然对数的底，即2.71828……）与实验结果基本符合（结果如图2所示，图中 $\tau_0=159$  mPa，是在测定应力第130s时的读数。 $\lambda=38$  s， $\lambda$ 为方程的参数，其单位与时间s

具有相同的量纲，系通过曲线回归求出的<sup>[9]</sup>。式中 $\tau_0$ 、 $\lambda$ 两个参数，从理论上决定了这方程上升曲线的走向）。

当该切变率矩形波撤销后的应力衰减实验数值与Maxwell的衰减线方程： $\tau = \tau_0 e^{-t/\lambda}$  相比是明显不可拟合的（结果如图1所示）。

本文作如下修正： $\tau = \tau_0 e^{-t/\lambda} + \Delta \tau (1 - e^{-t/\lambda})$ （说明： $\Delta \tau$ 为原Maxwell方程式与实验平衡状态数值在时间坐标250 s时的差值）。图2示实验结果与本文新改良方程符合（式中 $\Delta \tau = 46$  mPa， $\lambda = 10$  s）。

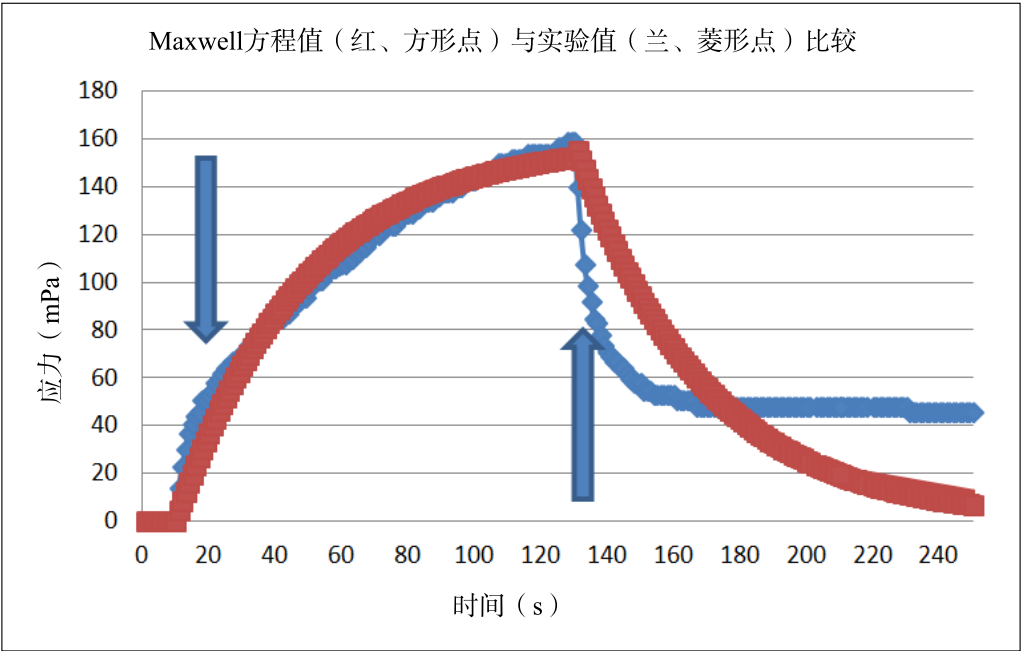


图1 Maxwell方程数值与实验数值之间的比较。图中横坐标为时间，前10 s为静止等待，箭头朝下处示给系统施加0.6 s<sup>-1</sup>的切变率120 s之始，箭头朝上示给该切变率的撤销后继续采样120 s。总采样时间为250 s，每秒采一数值样本。合计250个数字。图中可见在矩形波加载线（即上升线）Maxwell方程数值与实验数值之间基本符合（ $\chi^2$ 检验， $P>0.05$ ），但是切变率矩形波撤销后的衰减Maxwell方程数值与实验数值之间是不符合的（ $\chi^2$ 检验， $P<0.05$ ）。

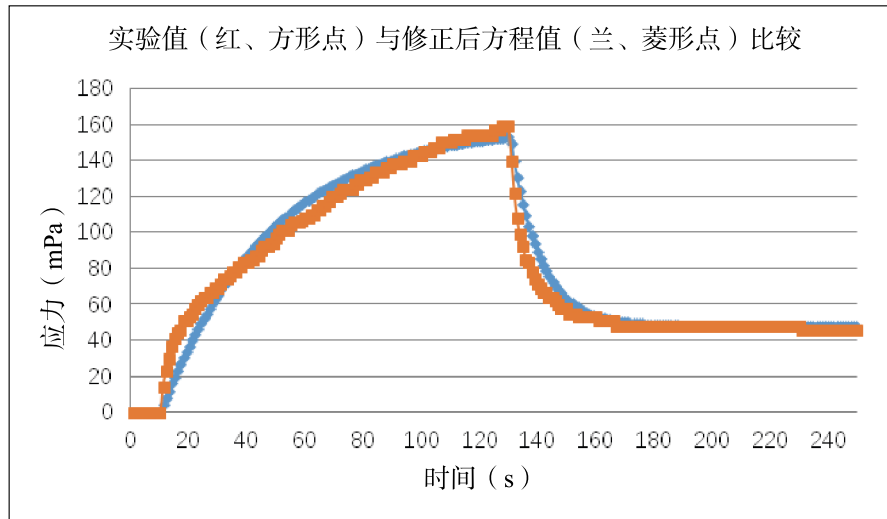


图2 实验数值与本文修正方程数值比较。可见在切变率矩形波撤销后衰减线实验值与修正方程值符合（ $\chi^2$  检验， $P > 0.05$ ）。

2.3 不同氯化钠浓度（0、1.5、3 mol/L）的DNP溶液、在不同矩形波切变率（0.6、3、12、60  $s^{-1}$ ）施加与撤销期间的应力-时间（ $\tau$ - $t$ ）上升线与衰减线的实验曲线观察

2.3.1 方程参数滞后时间 $\lambda$ 数值：结果如表2所示。滞后时间 $\lambda$ 数值的有无或大小，是判别物体是否属于黏弹性体的标志之一。如果 $\lambda$ 趋向于0 s，就不是黏弹性体，而是属于牛顿流体或触变性流体。如

表2 DNP溶液在不同矩形波切变率与氯化钠浓度下的滞后时间 $\lambda$ 数值（s）

| 氯化钠浓度     | 0.6 $s^{-1}$ 矩形波 | 3 $s^{-1}$ 矩形波 | 12 $s^{-1}$ 矩形波 | 60 $s^{-1}$ 矩形波 |
|-----------|------------------|----------------|-----------------|-----------------|
| 0 mol/L   | 0.7              | $\approx 0$    | $\approx 0$     | $\approx 0$     |
| 1.5 mol/L | 36.0             | 0.7            | $\approx 0$     | $\approx 0$     |
| 3 mol/L   | 38.0             | 4.3            | 1.4             | 0.7             |

2.3.2 方程参数平衡应力 $\tau_0$ 数值：结果如表3所示。一般情况下黏弹性溶液的应力随着切变率矩形波的施加的时间，应力由零逐步上升至一个平衡数值 $\tau_0$ 。本文记录的上升曲线的时间是120 s，可称之为应力上升曲线。当切变率矩形波撤销以后，剪切应力下降，可称之为应力衰减曲线。按照Maxwell

理论应该系统的应力逐步地释放出来，在撤销后的120 s时，应该恢复至0 mPa。表3中的 $\tau_0$ 数值（mPa）是Maxwell方程中的参数，是整个曲线的峰值高度（即矩形波施加120 s时的应力值）。从表3中数据展示，平衡应力 $\tau_0$ 数值（mPa）随着切变率的增加而增加，随着氯化钠浓度的增加而增加。

表3 DNP溶液在不同矩形波切变率与氯化钠浓度下的平衡应力 $\tau_0$ 数值（mPa）

| 氯化钠浓度     | 0.6 $s^{-1}$ 矩形波 | 3 $s^{-1}$ 矩形波 | 12 $s^{-1}$ 矩形波 | 60 $s^{-1}$ 矩形波 |
|-----------|------------------|----------------|-----------------|-----------------|
| 0 mol/L   | 46               | 83             | 219             | 490             |
| 1.5 mol/L | 115              | 295            | 516             | 1 260           |
| 3 mol/L   | 150              | 382            | 914             | 1 880           |

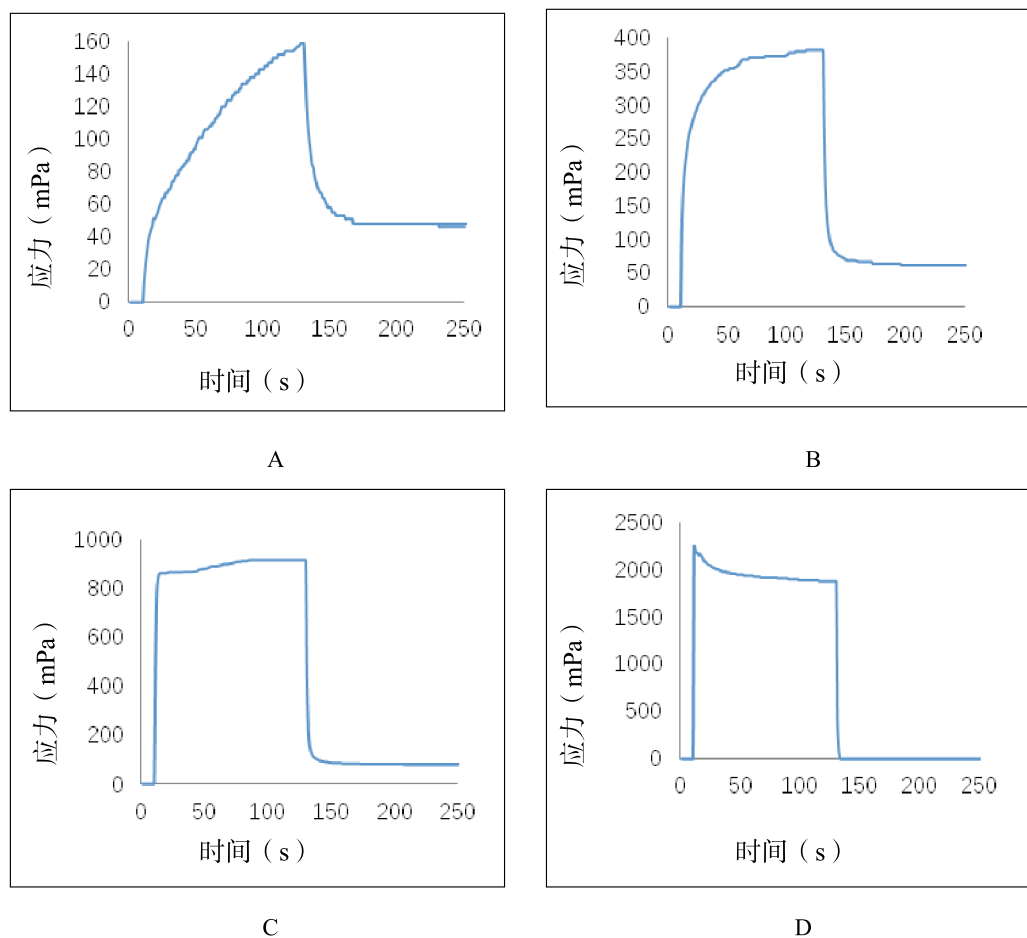
注：本表中的平衡应力 $\tau_0$ 数值（mPa）是在施加切变率矩形波120 s时读出的应力。

2.3.3 同一DNP溶解于3 mol/L氯化钠溶液，在不同切变率矩形波（0.6、3、12、60  $s^{-1}$ ）作用下有不同的应力-时间（ $\tau$ - $t$ ）上升与衰减曲线形状：结果如

图3所示。图3中A与B所接受的矩形波切变率是比較低的，它们是属于黏弹性体的曲线，其上升线可与Maxwell方程拟合，但是其衰减线不能够拟合，

而可用本文新建方程拟合。至于图3中C与D是接受较高矩形波切变率的,它们是不符合Maxwell方程的,而接近牛顿流体或触变性流体。由此可见同样一种溶液,可以因其接受的矩形波切变率的不同,其流体表现的黏弹性行为可以不同。从这里可以看

出,作为肝脏DNP也好,或其他生物物质也好,要研究其黏弹性的非牛顿流体行为,采用高切变率条件,会把其黏弹性或非牛顿性淹没掉,外观上仅表现出是牛顿流体或触变性流体。

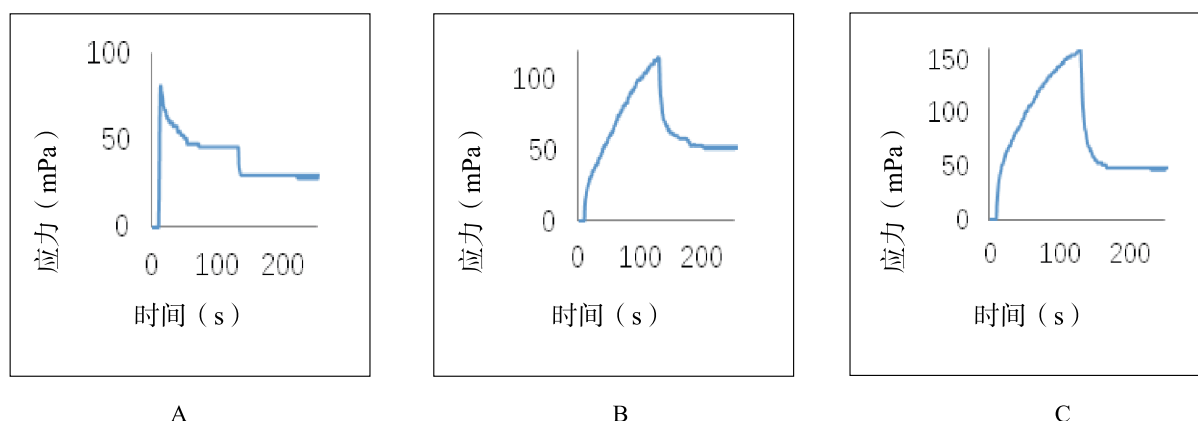


A: 矩形波切变率 $0.6\text{ s}^{-1}$ ; B: 矩形波切变率 $3\text{ s}^{-1}$ ; C: 矩形波切变率 $12\text{ s}^{-1}$ ; D: 矩形波切变率 $60\text{ s}^{-1}$ 。

图3 同一DNP溶解于3 mol/L氯化钠溶液样本,在不同切变率矩形波作用下具有不同的应力-时间( $\tau$ - $t$ )上升与衰减曲线

2.3.4 同一切变率( $0.6\text{ s}^{-1}$ )矩形波对DNP溶于三个不同氯化钠浓度溶液(0、1.5、3 mol/L)的不同应力-时间( $\tau$ - $t$ )上升线与衰减线的观察与比较:结果如图4所示。先看图4A,该溶液仅属于原NaCl-EDTA溶液(内含0.15 mol/L NaCl与0.01 mol/L EDTA),相当于生理盐水的氯化钠浓度,其中DNP仅是细胞核染色体中蛋白质与DNA互相紧密结合的颗粒,当施加切变率 $0.6\text{ s}^{-1}$ 矩形波时,其应力就冲顶,然后应力衰减至平衡值46 mPa,滞后时间 $\lambda$ 接近0 s,上升线不能与Maxwell方程拟合,下降线不能与本位方程拟合,应属于触变性流体。再看图4B,该溶液仅属于原NaCl-EDTA溶液基础上,再增加氯化钠浓度1.5 mol/L,其中DNP在增加氯化钠

浓度后,促进了DNP的吸水性,致使DNP体积膨胀化,当施加切变率 $0.6\text{ s}^{-1}$ 矩形波时,其应力缓缓上升,平衡值达115 mPa,滞后时间 $\lambda$ 为36 s,上升线能与Maxwell方程拟合,下降线能与本文建议方程拟合,属于黏弹性流体。再看图4C,该溶液在原NaCl-EDTA溶液上,再增加氯化钠浓度3 mol/L,其中DNP在如此增加氯化钠后,更加促进DNP的吸水性,致使DNP更加膨胀化,更成为黏弹性流体,当施加切变率 $0.6\text{ s}^{-1}$ 矩形波时,其应力缓缓上升,应力平衡值高达159 mPa,滞后时间 $\lambda$ 为38 s,上升线能与Maxwell方程拟合,下降线能与本位方程拟合,更明显属于黏弹性流体。从上可以看出凭曲线的形态就可看出黏弹性溶液特征。



A: DNP溶解于0 mol/L NaCl中, 应力冲顶, 应力平衡值46 mPa, 滞后时间 $\lambda$ 接近0 s, 上升线不能与Maxwell方程拟合, 下降线不能与本位方程拟合, 属于触变性流体; B: DNP溶解于1.5 mol/L NaCl中, 应力缓缓上升, 应力平衡值115 mPa, 滞后时间 $\lambda$ 接近32 s, 上升线能与Maxwell方程拟合, 下降线能与本位方程拟合, 属于黏弹性流体; C: DNP溶解于3 mol/L NaCl中, 应力缓缓上升, 应力平衡值159 mPa, 滞后时间 $\lambda$ 接近38 s, 上升线能与Maxwell方程拟合, 下降线能与本位方程拟合, 属于黏弹性流体。

图4 同一切变率 ( $6 \text{ s}^{-1}$ ) 矩形波对于DNP溶解于三个不同氯化钠溶液样本 (0、1.5、3 mol/L), 对其应力-时间 ( $\tau$ -t) 上升线与衰减线的观察与比较。

### 3 讨论

DNP溶液表观黏度值随氯化钠浓度增加而增加, 其原因在于氯化钠的离子成分能够促进原DNP浓缩的紧密结构吸入离子与水分, 并与DNP分子链上某些基团结合, 致使DNP分子所占的体积在空间膨胀延伸, 成为膨胀化具有黏弹性的流体。DNP溶液表观黏度值随施加切变率增加而下降, 原因在于剪切作用致使DNP分子的纤维顺着剪切力排列方向排列, 减少了流动的阻力, 或通过剪切作用而把分子某些支链剪断, 减少分子间的互相牵拉作用, 成为剪切稀化的流体。正由于如上两个作用, 致使本文设计高氯化钠浓度 (如3 mol/L) 的DNP溶液在本文用最低切变率矩形波 ( $0.6 \text{ s}^{-1}$ ) 作用下, 显示其明显黏弹性体行为, 其应力上升线可以被Maxwell黏弹性方程拟合, 并具有38 s的滞后时间 $\lambda$ 参数值。

至于为什么当施加切变率矩形波撤销以后, 其应力衰减线的数值, 不能够与Maxwell黏弹性方程拟合, 原因在于该方程是基于理想黏弹性物体的, 而DNP溶液不是理想的、应力完全可逆的流体, 在施加切变率矩形波的上升线过程中, DNP分子受到应力剪切的历史, 有不可恢复的改变或损伤的“记忆”, 因此不能按照原方程恢复至起始原点应力

为0的状态。本文加入“不可逆应力损失项 $\Delta \tau (1 - e^{-t/\lambda})$ ”就与实验结果符合。上述上升线与衰减线相比, 应该说前者更接近物体的本身性质。如果抛弃上升线, 而仅仅采用衰减法, 采集科学数据是不明智的做法。

Maxwell方程的应力-时间 ( $\tau$ -t) 曲线的形状与走向, 从理论上是由应力平衡值 $\tau_0$ 与滞后时间 $\lambda$ 这两个参数决定着的。其中滞后时间 $\lambda$ 决定了该曲线的陡度, 而其中应力平衡值 $\tau_0$ 决定了该曲线的峰值高度。

Maxwell方程中的参数“滞后时间 $\lambda$ ”, 是液体牛顿黏度 ( $\eta$ ) 与固体胡克刚性系数 ( $G$ ) 的比值 ( $\eta/G$ ), 液体牛顿黏度 ( $\eta$ ) 的量纲是 $\text{mPa}\cdot\text{s}$ , 固体胡克刚性系数 ( $G$ ) 量纲是 $\text{mPa}$ , 其比值 $\eta/G$ 的量纲则是时间s。此参数 $\lambda$ 是由实验数据利用方程回归出来的。从表2和图4可见, DNP溶液具有较大数值的滞后时间 $\lambda$ 的条件有两个: 较高的氯化钠浓度与较低的切变率矩形波, 例如在高达3、1.5 mol/L的氯化钠浓度与低至 $0.6 \text{ s}^{-1}$ 切变率矩形波条件下, 溶液具有30 s以上的滞后时间, 而其他条件下则滞后时间 $\lambda$ 数值比较低或甚至接近于0 s。应该说滞后时间 $\lambda$ 数值接近于0 s, 其曲线是很陡的, 就不是黏弹性流体, 而是触变性流体或牛顿流体。因此滞后时间 $\lambda$ 数值大小或有无, 是判别是否属于黏弹性流体的标志。

平衡应力  $\tau_0$  数值是Maxwell方程中的参数之一，它确定了曲线的峰值高度，随矩形波切变率的增加而增加，随着氯化钠浓度的增加而增加，但它的大小不是黏弹性的决定因素（因为非弹性体也有），而仅是决定曲线平衡值高度而已，决定黏弹性的有无与程度应是滞后时间  $\lambda$  数值。

Maxwell方程曲线上升的陡度形状是由滞后时间  $\lambda$  数值决定的，观察曲线的形状可以判别溶液是否属于黏弹性流体。图3展示同一DNP溶解于3 mol/L氯化钠溶液的样本，在不同切变率矩形波作用下具有明显不同的应力-时间（ $\tau$ -t）上升与衰减曲线。当该样本所接受的矩形波切变率是比较低（如0.6、3 s<sup>-1</sup>）时，是属于黏弹性体的曲线的，其上升线可与Maxwell方程拟合，其衰减线可用本文新建方程拟合。当接受较高矩形波切变率（如12、60 s<sup>-1</sup>）时，它们是不符合Maxwell方程的，而接近牛顿流体或触变性流体。可见同一样本，可因其接受的矩形波切变率的不同，其流体表现的黏弹性行为可不同。

同一切变率（0.6 s<sup>-1</sup>）矩形波对DNP溶于三个不同氯化钠浓度溶液（0、1.5、3 mol/L）的不同应力-时间上升线与衰减线观察展示，当DNP溶于0 mol/L氯化钠溶液中，当施加该切变率矩形波时，其应力就冲顶，滞后时间  $\lambda$  接近0 s，上升线不能与Maxwell方程拟合，下降线不能与本文方程拟合，应属于触变性流体。当DNP溶于1.5 mol/L氯化钠浓度，当施加切变率0.6 s<sup>-1</sup>矩形波时，其应力缓缓上升，平衡值达115 mPa，滞后时间  $\lambda$  为32 s，上升线能与Maxwell方程拟合，下降线能与本文建议方程拟合，属于黏弹性流体。当DNP溶于3 mol/L氯化钠浓度，当施加切变率0.6 s<sup>-1</sup>矩形波时，其应力缓缓上升，应力平衡值高达159 mPa，滞后时间  $\lambda$  为38 s，上升线能与Maxwell方程拟合，下降线能与本文方程拟合，它是更明显地属于黏弹性流体。

从这里可看出，作为肝脏组织DNP也好，或其他生物物质也好，要研究其黏弹性的非牛顿流体行为，采用高达几百切变率的条件，就会把生物物质原具有的黏弹性或非牛顿性质破坏掉或淹没掉。茅福成<sup>[10]</sup>通过调查提出，流变仪种类繁多，方法原

理不一，仪器设置参数、软件性能等方面不规范导致同一血样在不同医院的检测结果不同。指出有的公司有软件新旧之分，虽然检测原理相同，因参数设置、软件特点不同，造成检测结果不一。因此提出对此种仪器应有生产规范和质量检查标准。同时对生物黏弹性行为的数值测量，工作者也需要有良好的流变学理论与技能基础，因为测定数值依赖于所处的化学、物理、力学的条件，如果条件不同，所获得的结果与结论也不同，这也是科技工作者应该注意的。

本文以上报道的理论与应用价值，如不同的生物样本（如正常肝与肝癌），或其他生物样本，在方程参数  $\tau_0$ 、 $\Delta\tau$  与  $\lambda$  的医学生物学价值应有待进一步揭示。

#### 参考文献

- [1] Shi Yong-de. Horizons in Hemorheology (Part I. Basic Concepts)[M]. Shanghai: Shanghai Scientific and Technological Literature Publishing House, 1990: 1-174.
- [2] Shi Yong-de. Horizons in Hemorheology (Part II. Clinical Concepts)[M]. Shanghai: Shanghai Scientific and Technological Literature Publishing House, 1992: 1-156.
- [3] Shi Yong-de. Horizons in Hemorheology (Part III. Constitutive Concepts and Their Utilization in Medicine) [M]. Shanghai: Shanghai Scientific and Technological Literature Publishing House, 1995: 1-193.
- [4] 施永德. 血液的屈服应力[J]. 中国血液流变学杂志, 2013, 23(2): 199-202.
- [5] 施永德. 血液的屈服应力与衰老[J]. 中国血液流变学杂志, 2016, 26(2): 135-142.
- [6] 冈小天. 生物流变学[M]. 吴云鹏, 陶祖莱, 译. 北京: 科学出版社, 1980: 117-118.
- [7] 郑葆芬, 陶鸿根, 潘小平, 等. X-射线对大白鼠胸腺及脾脏中脱氧核糖核酸氢键的破坏作用[J]. 生物化学和生物物理学报, 1963, 3(3): 301-311.
- [8] Shi YD, Pan LF, Yang FK, et al. A preliminary study on the rheological properties of human ejaculate and changes during liquefaction[J]. Asian J Androl, 2004, 6(4): 299-304.
- [9] 施伟, 矫树魁, 杨景文, 等. 非线性血液滞后环曲线的连续反应动力学数值解[J]. 中国血液流变学杂志, 2016, 26(4): 389-396.
- [10] 茅福成. 血液流变学检测现状调查及对策的思考[J]. 上海医学检验杂志, 1999, 14(5): 306-307.