

弛豫时间的测量

——脉冲核磁共振实验

卢宇婷

(复旦大学 光科学与工程系 上海 200433)

摘要

文章主要介绍脉冲核磁共振中，弛豫时间（ T_1 、 T_2 ）的测量结果及其影响因子，从而得出最佳测量条件和参数设置，以及对不同样品测量结果的分析。

关键字

弛豫时间，测量条件

The measurement of relaxation time in Magnetic Resonance Experiment

Lu Yuting (University Fudan, Shanghai)

Abstract: This article gives some results of the measurement of relaxation time in Magnetic Resonance Experiment. From these result, the relative factors in the measurement are discussed, and the best condition for the measurement is presented. Different results of different samples are also presented.

Key words: relaxation time, condition of the measurement

引言

自从 1945 年 Bloch 和 Purcell 发现核磁共振现象, Bloch 因此推导出求解核磁共振定量计算方程依赖, 核磁共振成像在许多方面都得到了巨大的应用。特别在医学上, 根据不同人体组织的磁共振弛豫时间的不同可以进行共振成像, 给予患者最安全最有效的观测治疗手段。对于不同组织弛豫时间不同的研究一直没有停止, 弛豫时间的最佳测量条件也有助于得出成像最清晰的条件、参数设置。

实验原理

弛豫过程及弛豫时间 T_1 、 T_2

原子核受射频脉冲作用, 发生共振且处在高能状态, 当脉冲停止, 将迅速恢复到低能状态。纵向磁化矢量 M_z 恢复到平衡状态的 M_0 和横向磁化强度 M_{xy} 衰减到零, 这两步同时开始但独立完成。纵向磁化强度分量 M_z 向平衡状态的恢复与时间的关系有

$$\frac{dM_z}{dt} = -\frac{M_z - M_0}{T_1} \quad \text{公式 1}$$

M_z 恢复的表达式为

$$M_z(t) = M_0(1 - e^{-t/T_1}) \quad \text{公式 2}$$

纵向弛豫时间 T_1 是组织的固有特性, 又称为自旋-晶格弛豫时间, 其大小取决于外磁场和质子与周围环境之间的相互作用 (即组织的性质)。

在射频脉冲作用下, 质子的相位沿相同的方向排列, 以相同的角速度绕外磁场进动, 形

成横向磁化强度矢量 M_{xy} 。射频脉冲停止后，同相位的质子彼此之间逐渐出现相位差，即失相位。最后在 xOy 平面形成以外磁场 B_0 为轴的均匀分布，横向磁化强度 M_{xy} 则逐渐衰减为 0。造成质子失相位的作用有两种，质子自旋-自旋相互作用和外磁场的不均匀性。

横向磁化强度矢量 M_{xy} 随时间变化规律

$$\frac{dM_{xy}}{dt} = -\frac{M_{xy}}{T_2} \quad \text{公式 3}$$

M_{xy} 恢复的表达式为

$$M_{xy}(t) = M_{xy \max} e^{-t/T_2} \quad \text{公式 4}$$

弛豫时间的测量

测量 T_1 有两种序列：反转恢复序列 (IR) 和饱和恢复序列 (SR)。反转恢复序列中， 180° 脉冲先将 M_0 翻转至 -Z 轴，则只有纵向弛豫，之后的 90° 脉冲用于记录弛豫后的 M_z 大小。饱和恢复序列利用横向弛豫时间小于纵向弛豫时间 (即 $T_2 < T_1$)，在 90° 脉冲后横向弛豫先完成，同样可以再用 90° 脉冲记录 M_z 大小。

横向弛豫时间 T_2 的测量：由 CPMG 序列产生回波，回波的峰值在逐渐衰减，当回波数目足够多，能够反映横向衰减全过程时，则可通过实验软件自带的 T_2 拟合功能进行拟合。拟合功能中有“双组份”和“单组份”两种拟合方式，不同拟合方式结果不同，随着材料不同，利用的拟合方式有不同。

实验结果

不同样品弛豫时间 (T_1 、 T_2) 的测量

结果分析：

1) 对于同一物质 (如油)，回波数 (C_1) 不同时获得的 T_2 不同， C_1 越大， T_2 越大。

2) 不同的物质弛豫时间不同。在上述几个样品中，水的弛豫时间相对其他

几样富含或本来就是油的物质的弛豫时间要长很多。同样，在人体中，含自由水的组织的弛豫时间较于含结合水的组织、脂肪组织的弛豫时间要长很多。

3) 双组份拟合中出现两个 T_2 值，大小相差很多，对比判断 ($T_1 \geq T_2 \geq T_2^*$)。较小的那个 ($T_2(1)$) 是 Bloch 方程下的弛豫时间。

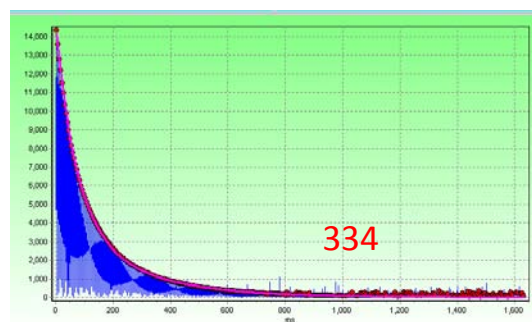
4) T_1 的测量中发现，由于实验仪器的限制，很多样品的 T_1 无法测量，特别是饱和恢复测量，会出现测量到的幅值变化范围较小，拟合结果欠佳的情况。反转恢复测得的值大于饱和恢复的值。

实验讨论

1、最佳回波数设定

大多数情况下， C_1 增大，回波峰值体现的衰

材料	回波数	拟合	$T_2(1)/ms$	$T_2(2)/ms$	T_1/ms (反转)	T_1/ms (饱和)
油	334	双组份	71.10	243.30		
油	226	双组份	68.55	232.45	166.0	130.8
油	135	双组份	63.77	221.73		
芝麻油	102	双组份	54.49	183.56		
黄豆	169	双组份	58.86	196.21	117.3	66.4 (舍)
黄豆	135	双组份	56.24	184.97		
水	205	单组份	1591.3		2397.0	测不出



减过程更完整，则拟合结果更接近真实值。但是从右边的三张图上可以看出，其实在回波数为 135 时已经可以大致体现整个衰减过程，而 226 个回波时，衰减过程很明显了。在 334 个回波时，有很大一部分的回波峰值都很低，已经是衰减到底了，这部分的点对于数据拟合没有好处，曲线右边每一个横坐标都对应有很多小点，影响拟合的准确性。且引进了更多的影响因素，如信号过小时的失真等。

因此，实验中不应该一味追求回波数的增大，只需要能够完整的表现出衰减过程即可。特别在衰减到峰值近零的部分，不要有太多的点堆积而影响拟合结果。所以在测量油的结果中，所以，这里回波数为 226 对应的弛豫时间的值最理想，最接近真实值。

2、双组份拟合与单组份拟合

实验中 T_2 的拟合出现双组份拟合，可能原因有两种：

1) 样品成分不单一，有不同成分，形成不同的弛豫时间。查资料可知：芝麻油中的中性脂质、聚脂和磷脂含量分别约为 94%,5.5%,0.5%，各种不同的脂质的晶格排列、距离，晶格内部各原子吸引力不同，导致自旋-自旋相互作用不同，横向弛豫时间不同。黄豆同样有各种不同成分的脂质，而水成分单一，核间的作用力情况单一，需用单组份拟合得到合适的结果。而 T_1 的拟合可能已经将两者结合共同拟合了。

2) 横向弛豫过程并不单单是 Bloch 方程所确定的那一种。较大的 T_2 值相对于较小的一个有大约 3 倍的关系，其中可能有更多需要更高等的量子力学来解释的弛豫过程。

3、 T_1 的两种测量方法对比

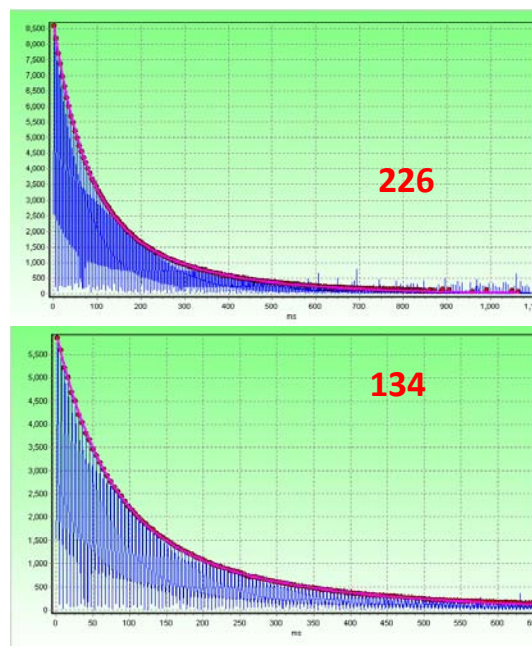
T_1 无法测量的原因主要有，所得幅值变化范围太小，不能体现整个弛豫过程（即纵向弛豫时间很长）；有些样品的反转恢复法可测，可是饱和和恢复法却无法测量。反转恢复包括正负两个区间，可取的点较多，而饱和和恢复可取的点都是在正区间，范围较小，容易出现点数不够无法体现整个趋势的情况。但是，反转恢复测量中，在零点附近的取值可能会出现较多偏离整个曲线的点，拟合的值和实际值有所偏差。可以对这部分的数据点进行取舍，或将这部分的测量间隔加大，获得更适合的曲线趋势进行拟合。

实验结论

要获得最接近真实值的 T_2 ，需要保证回波数足够体现完整的衰减过程，同时不会有太多已衰减区域的重叠点来影响曲线的拟合。根据样品的特性选取“单组份”或“双组份”拟合，分析样品中所含不同的成分。在样品纵向弛豫较大时，应选择反转恢复序列进行测量，可保证测量值更接近真实值。但是在接近零点附近的测量需要更仔细，拟合过程中可以舍弃不在曲线趋势上的多余点。以获得最佳的拟合曲线。

致谢

感谢实验期间我的搭档金明洲同学的通力合作，在我其他课程最忙的时候可以帮忙先规划我们的实验进程，使实验不至于因为我的特殊状况而有拖延。俞熹老师的细致讲解和资料



的提供给我带来很大的帮助。同时也感谢实验室老师们在我们做实验时给予充分的信任，使我们可以老师们不在办公室时继续做实验。最后，感谢自己选了这个实验，它教给了我很多很多的知识和寻找信息的手段。

参考资料

- 1、复旦大学物理教学实验中心 《近代物理实验 补充讲义》上海 2010
- 2、戴道宣 《近代物理实验》（第二版） 高等教育出版社 上海 2006
- 3、熊国欣 李立本 《核磁共振成像原理》 科学出版社 北京 2007
- 4、汪红志 张学龙 武杰 《核磁共振成像技术实验教程》 科学出版社 北京 2008
- 5、邓开野 武国君 于雷 任露泉 李玉 吴万镇 《中国和韩国产芝麻的化学成分比较研究》 中国林副特产 2005 年第 5 期