

“简单”复杂流体中发现暂态剪切带

普通的水是一种牛顿流体,其切应力与剪切变形速率成线性关系(此线性比例即为流体的黏度).牛顿流体的行为与特性可以通过纳维-斯托克斯(Navier-Stokes)流体方程组描述.但是很多我们日常生活中所见的液体物质,如泡沫材料、乳化剂和胶体等多属于非牛顿流体.这些复杂流体的行为至今尚未找到一种普适的理论去描述,只能对不同体系的共性来进行分类.其中的一类复杂流体为屈服应力流体,例如蛋黄酱、发胶和牙膏等均属之.屈服应力流体的特性是在较弱的切应力作用下能保持自身的形状,而在较强的应力下才会被流化.屈服应力流体又可分成触变性及非触变性两类:触变性屈服应力流体在连续流动时粘性会随时间减小;非触变性屈服应力流体则不会.

触变性屈服应力流体在均匀的切应力作用下,会形成剪切带,部分物质被流化,并随时间变化流动得越来越容易,其余部分则仍保持固态.剪切带是一种重要的可用于理解屈服应力流体的物理现象.

最近,法国里昂高等师范学校的 Manneville 和他的同事们^[1]在非触变屈服应力流体(或者称为“简单”屈服应力流体)中发现了暂态剪切带的存在.所谓“简单”屈服应力流体一般认为应该在屈服流化后均匀流动,不会形成剪切带,而 Manneville 等人出人意料地在聚羧乙烯胶体(一种发胶和药剂中的主要配料)中观测到了时间可延续到 1 分钟,1 小时,甚至 1 天以上的暂态剪切带.

因为“简单”屈服应力流体是没有理由不均匀流动的,Manneville 和他的同事们在实验之初并没有期望观察到任何剪切带的存在,他们原本期望通过实验了解屈服应力流体是如何产生并如何从固态转化到液态的.他们的实验是在库埃特(Couette)转筒流变仪中做的,如图 1(a)所示.库埃特转筒由两个同心圆柱构成,外筒固定,内筒以一个固定的角速度旋转.为了测量转筒中胶体的速度分布曲线,Manneville

等人采用了他们研发的超声散斑测速法^[2],在胶体中放置了微米尺寸的玻璃小球,用以散射声波.每隔 1ms 左右,对胶体发射一个超声波脉冲,由换能器记录下反射波信号.通过分析连续两脉冲信号间的相关性,得出胶体在不同位置与时间的速度分布.

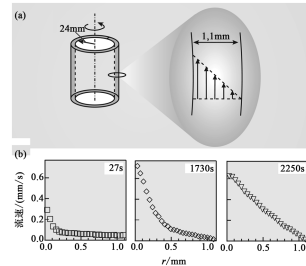


图 1 一组典型的速度分布实验结果 (a) 库埃特圆筒的几何结构; (b) 一组典型的速度分布

图 1(b) 的一组典型的速度分布显示,在 27s 时,在转筒内壁附近有一层薄的剪切带,但随着时间变化,剪切带逐渐变宽,在 2250s 之后转变为均匀流体,显示流化时间大于半个小时.重复实验,他们发现,随着旋转角速度的增加,流化也加快了,流化时间与转筒的旋转角速度的 2.3 次方成反比.改变胶体的层厚,流化时间与剪切率(内壁的线速度除以内外壁间缝隙的宽度)之间呈幂指数变化关系,但与内外壁的材质关系不大.指数为 2.3 的机理尚不清楚,但使用不同批量生产的聚羧乙烯胶体足以使指数由 2.3 变化到 3,因此应与材料性质有关.

这个实验的结果表明,“简单”屈服应力流体并不像想象的那样简单.如此长的流化时间意味着深刻理解稳态和暂态的界定在将来的屈服应力流体模型和实验中起着很重要的作用.

参考文献

- [1] Divoux T *et al.* Phys. Rev. Lett., 2010, 104:208301
 [2] Manneville S, Bécu L, Colin A. Eur. Phys. J.: Appl. Phys., 2004, 28:361

(中国科学院物理研究所 张因、厚美瑛 编译自 Physics Today, 2010, (7):18)