

身边力学的趣话·

奇妙的非牛顿流体

王振东

(天津大学力学系, 天津 300072)

摘要 本文介绍了在工业生产和日常生活中常遇到的形形色色的非牛顿流体, 以及非牛顿流体一些奇妙的性能及应用。

关键词 非牛顿流体, 射流胀大, 爬杆效应, 无管虹吸, 湍流减阻

牛顿 1687 年发表了以水为工作介质的一维剪切流动的试验结果。实验是在两平行平板间充满水时进行的(图 1), 下平板固定不动, 上平板在其自身平面内以等速 U 向右运动。此时附于上下平板的流体质点的速度分别为 U 和 0, 两平板间的速度呈线性分布。由此得到了著名的牛顿粘性定律

$$\tau = \mu \frac{du}{dy}$$

式中, τ 是作用在上平板流体平面上的剪应力, du/dy 是剪切应变率, 斜率 μ 是粘度系数。

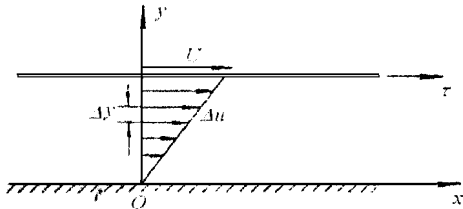


图 1 两块相对运动平板之间的流体

斯托克斯 1845 年在牛顿这一实验定律的基础上, 作了应力张量是应变率张量的线性函数、流体各向同性、流体静止时应变率为零的三项假设, 从而导出了广泛应用于流体力学研究的线性本构方程, 以及现被广泛应用的纳维-斯托克斯方程。

后来人们在进一步的研究中知道, 牛顿粘性实验定律(以及在此基础上建立的纳-斯方程)对于描述像水和空气这样低分子量的流体是适合的, 而对描述具有高分子量的流体就不合适了, 那时剪应力与剪切应变率之间已不再满足线性关系。为区别起见, 人们将剪应力与剪切应变率之间满足线性关系的流体称为牛顿流体, 而把不满足线性关系的流体称为非牛顿流体。

1 形形色色的非牛顿流体

早在人类出现之前, 非牛顿流体就已存在, 因为绝大多数生物流体都属于现在所定义的非牛顿流体^[1]。人身上的血液、淋巴液、囊液等多种体液以及像细胞质那样的“半流体”都属于非牛顿流体。现在去医院作血液测试的项目之一, 已不再说是“血粘度检查”, 而是“血液流变学检查”(简称血流变), 这就是因为对血液而言, 剪应力与剪切应变率之间不再是线性关系, 已无法只给出一个斜率(即粘度)来说明血液的力学特性。

近几十年来, 促使非牛顿流体研究迅速开展的主要动力之一是聚合物工业的发展。聚乙烯, 聚丙烯酰胺, 聚氯乙烯, 尼龙 6, PVS, 赛璐珞, 涤纶, 橡胶溶液, 各种工程塑料, 化纤的熔体、溶液等都是非牛顿流体。

石油, 泥浆, 水煤浆, 陶瓷浆, 纸浆, 油漆, 油墨, 牙膏, 家蚕丝再生溶液, 钻井用的洗井液和完井液, 磁浆, 某些感光材料的涂液, 泡沫, 液晶, 高含沙水流, 泥石流, 地幔等都是非牛顿流体。

非牛顿流体在食品工业中也很普遍^[2], 如番茄汁, 淀粉液, 蛋清, 苹果浆, 菜汤, 浓糖水, 酱油, 果酱, 炼乳, 琼脂, 土豆浆, 熔化巧克力, 面团, 米粉团, 以及鱼糜、肉糜等各种糜状食品物料。

综上所述, 在日常生活和工业生产中常遇到的各种高分子溶液, 熔体, 膏体, 凝胶, 交联体系, 悬浮体系等复杂性质的流体, 差不多都是非牛顿流体。有时为了工业生产的需要, 在某种牛顿流体中, 需加入一些聚合物, 在改进其性能的同时也将变成非牛顿流体, 如为提高石油产量使用的压裂液, 新型润滑剂等。

2 非牛顿流体的奇妙特性及应用

2.1 射流胀大

如果非牛顿流体被迫从一个大容器流进一根毛细管, 再从毛细管流出时, 可发现射流的直径比毛细管的直径大(图 2)。射流直径与毛细管直径之比称为薄片胀大率(亦称为挤出物胀大比)。对牛顿流体, 它依赖于雷诺数, 其值约在 0.88 ~ 1.12 间。而对于高分子

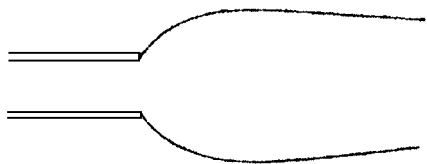


图 2 射流胀大

熔体或浓溶液, 其值大得多, 甚至可超过 10. 一般来说, 模片胀大率是流动速率与毛细管长度的函数.

模片胀大现象在口模设计中十分重要. 聚合物熔体从一根矩形截面的管口流出时, 管截面长边处的胀大比短边处的胀大更加显著, 在管截面的长边中央胀得最大(图 3). 因此, 如果要求产品的截面是矩形的, 口模的形状就不能是矩形, 而必须是像图 4 所示的那种形状.

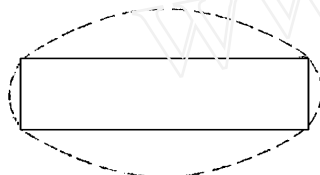


图 3 矩形截面管口的射流胀大

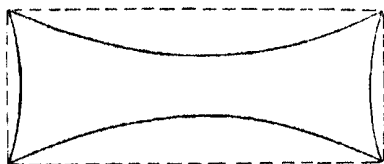


图 4 口模的设计形状

这种射流胀大现象也叫 Barus 效应或 Merrington 效应.

2.2 爬杆效应

1944 年 Weissenberg 在英国伦敦帝国学院公开表演了一个有趣的实验. 在一只有粘弹性流体(非牛顿流体的一种)的烧杯里, 旋转实验杆. 对于牛顿流体, 由于离心力的作用, 液面将呈凹形(图 5(a)); 而对于粘弹性流体, 却向杯中心运动, 并沿杆向上爬, 液面变成凸形(图 5(b)). 甚至在实验杆的旋转速度很低时, 也可以观察到这一现象.

爬杆效应也称为 Weissenberg 效应. 在设计混合器时, 必须考虑爬杆效应的影响. 同样在设计非牛顿流体的输运泵时, 也应考虑和利用这一效应.

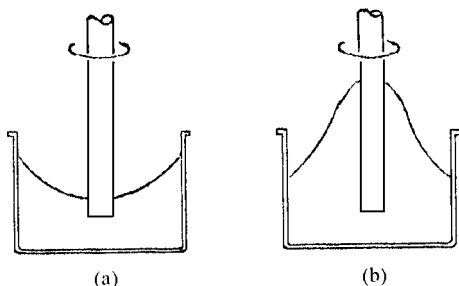


图 5 爬杆效应实验

2.3 无管虹吸

对牛顿流体来说, 在虹吸实验时, 如果将虹吸管提高液面, 虹吸马上就会停止. 但对高分子液体, 如聚异丁烯的汽油溶液和 1% POX 水溶液, 或聚醚在水中的轻微凝胶体系等很容易表演无管虹吸实验. 将管子慢慢地从容器里拔起时, 可以看到虽然管子已不再插在流体里, 流体仍源源不断地从杯中抽起, 继续流进管里(图 6). 甚至更简单地, 连虹吸管都不要, 将装满该流体的烧杯微倾, 使流体流下, 这过程一旦开始, 就不会中止, 直到杯中流体都流光(图 7). 这种无管虹吸的特性是合成纤维具备可纺性的基础.

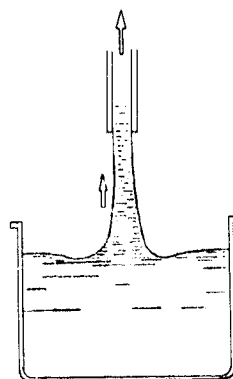


图 6 无管虹吸

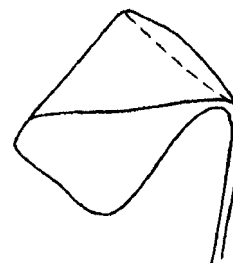


图 7 无管虹吸

2.4 湍流减阻

非牛顿流体显示出的另一奇妙性质是湍流减阻.

人们观察到,如果在牛顿流体中加入少量的聚合物,则在给定的速率下,可以看到显著的压差降.图8给出了两种不同浓度的聚乙烯的氧化物溶液的管摩擦系数 f 对于雷诺数 R 的关系曲线.湍流一直是困扰流体力学界未解决的难题,然而在牛顿流体中加入少量高聚物添加剂,却出现了减阻效应.有人报告在加入高聚物添加剂后,测得猝发周期加大了,认为是高分子链的作用.

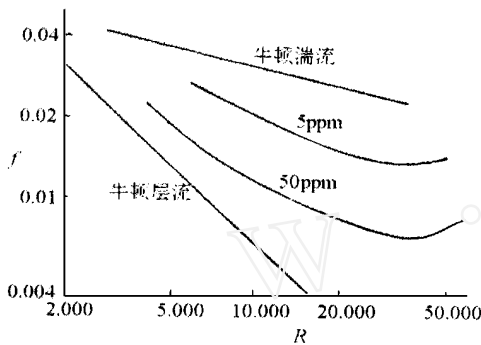


图8 湍流减阻

减阻效应也称为 Toms 效应,虽然道理并未弄得很清楚,但已有不错的应用.在消防水中添加少量聚乙烯氧化物,可使消防车龙头喷出的水的扬程提高一倍以上.应用高聚物添加剂还能改变气蚀发生过程及其破坏作用.

非牛顿流体除具有以上几种有趣的性质外,还有其他一些受到人们重视的奇妙特性,如连滴效应(其自由射流形成的小滴之间有液流小杆相连),拔丝性(能拉伸成极细的细丝,可见笔者另一文“春蚕到死丝方尽”^[3]),剪切变稀,液流反弹等,有兴趣的读者可从有关文献进一步了解^[4].

由于非牛顿流体涉及许多工业生产部门的工艺、设备、效率和产品质量,也涉及人本身的生活和健康,所以越来越受到科学工作者的重视.1996年8月在日本京都国际会议中心召开的第19届国际理论与应用力学大会(IUTAM)上,非牛顿流体流动是大会的6个重点主题之一,也是流体力学方面参与最踊跃的主题^[5]. Crochet 邀请报告的观点正是高分子溶液和熔体的特性远异于牛顿流,并认为这些异常特性的研究都是带有挑战性的课题.

参 考 文 献

- 1 莱顿. 生物系统的流体动性. 北京: 科学出版社, 1980
- 2 陈克复等. 食品流变学及其测量. 北京: 轻工业出版社, 1989
- 3 王振东. 春蚕到死丝方尽 - - - - - 谈液体的拉丝现象. 力学与实践, 1994, 16(1): 75 ~ 77
- 4 陈文芳. 非牛顿流体力学. 北京: 科学出版社, 1984
- 5 王仁, 何友声等. 第19届国际理论与应用力学大会(IUTAM)情况介绍. 力学与实践, 1997, 19(1): 57 ~ 64

(本文于1997年6月15日收到)

(上接第71页)

3) 在现有的内变量、微极、方向子、梯度、非局部等理论的基础上,贯彻宏观微观关联的思路,建立考虑到材料真实内结构和尺度效应的新的连续介质力学.

4) 连续介质力学从现有的欧几里德(Euclidean)几何下的拉格朗日体系,转换到辛(Symplectic)几何下的哈密顿体系,在此基础上实现求解方法的现代化.

总之,强调理性力学是采用和发展严密而又统一的方法,处理力学基本问题、寻求力学基本规律的学科,则理性力学始终面临着对力学本身最具活力的一些领域的大量重要问题的基本规律的研究.因此,理性力学有着源源不断的新的学科生长点.

(待续)