

# §4.1 流变学实验测量——概论

2024年3月18日 星期一 23:08

我打算在这部份介绍哪些内容?

△ 什么是“流变仪”(vs 粘度计), 流变仪总体要满足什么研究目的?

△ 各个流变仪的

1) 仪器硬件原理, 用什么传感器, 测量哪个位置的什么物理量?

2) 仪器控制的流场理论上的不均匀性和近似做法(设计)

3) 仪器使用实际会带来的进一步偏离 (略, 学生没有体验)

尽管在 §2 中我们介绍的形变类型不区分流体还是固体, 但本章主要介绍适用于流体的仪器——流变仪。只不过, 在流变学视阈下“流体”或“固体”又依赖  $De$  数。因此所谓“适用于流体”也包含“在  $De \ll 1$ ”这层意思。

## § 概论——流变测量学

在前面的介绍中我们明确了以下认识:

1) 材料的流变性质是应力与应变之间的一般关系。

2) 应力和应变都是张量场。

3) 材料的本构关系要能够预测某一材料任意应力(度)历史的应变(力)响应。

可见我们所学认识的问题是复杂的。

如果我们大胆地提出以下假设:

4) 虽然 2) & 3), 但大部分信息是冗余的, 其实只要确定如某一标量值的时间函数之间的关系, (例如  $\epsilon(t) \leftrightarrow \sigma(t)$ ) 就足以确定材料的本构关系, 用于预测复杂流动行为。

5) 而且, 可以通过仪器测试, 来确定任一复杂流体的上述标量值应力应变关系。

(请注意, 尽管物理学理论涉及到的物理量有许多是向量甚至是张量(而且还有复数)但实验测量得到的总是标量正实数, 所以 4) 的要求就是指向 5) 的。)

理论上能否实现? 如何实现? 这个问题是流变学里的大问题, 值得冠以“某学”的称号。它叫流变测量学 (rheometry)

我们在 §2 中了解了 12 种简单形变场。它们有如下特点:

6) 应变分布是均匀的, 即只需一个标量参数值就可以完整描述应变场分布

因此, 只要我们能使材料发生一种满足 6) 的均匀形变, 就已经实现了将应变化为标量描述。剩下的问题仍然是严峻的:

7) 在这一简单形变下, 应力又是能否简化成标量值呢?

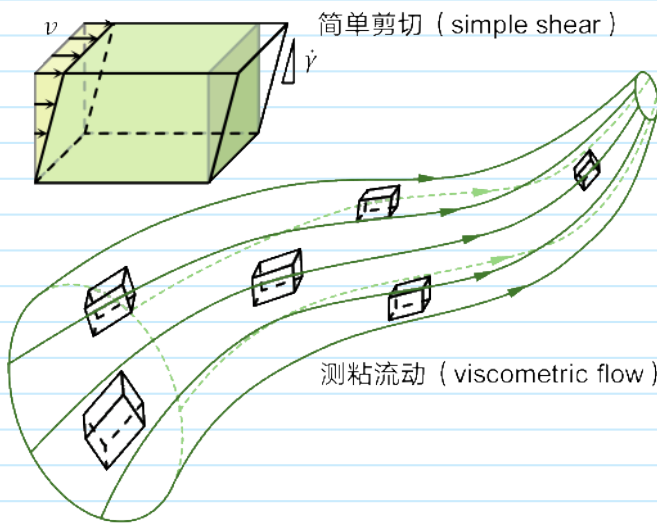
8) 在这一简单形态下得到的标量值应力-应变关系, 是否满足4)?

9) 怎么设计相应的仪器, 并解决由此带来的非理想性?

幸运的是, 测粘流 (viscometric flow) 的概念和相关理论, 基本为我们解决了7)和8)这些理论问题, 给了4)和5)一个肯定的、令人满意的答复, 且成为了研究或开发9)的理论基础。总而言之, 测粘流理论使流变学从“看问题的角度”式的廉价哲学真正成为凡所言皆可实证的现代科学。

但是测粘流理论本身基于理性力学, 远之超出了本课范围。这里只介绍来自测粘流理论的有效结论如下:

V1) 所谓测粘流, 是指一大类时时处处均属于简单剪切场的连续变化的流场。



在这里, 各处的简单剪切场除剪切速率值  $\dot{\gamma}$  外, 方向和范围不必处处相同, 只要它们随空间的变化是连续的即可。  $\dot{\gamma}$  值本身可随时间变化, 只要不太大以致测粘流无法保持 (例如雷诺数太高)。

V2) 对于几乎一切不可压缩复杂流体, 在简单剪切场下, 应力张量可简化为以下分量:

$$\text{剪切应力: } \tau_{22} = \tau_{22}(\dot{\gamma}, t)$$

$$\text{第一法向应力差: } N_2 \stackrel{\text{def}}{=} \tau_{11} - \tau_{22} = N_2(\dot{\gamma}, t)$$

$$\text{第二法向应力差: } N_2 \stackrel{\text{def}}{=} \tau_{22} - \tau_{33} = N_2(\dot{\gamma}, t)$$

它们在 §2 中已经介绍过。这里强调的是, 它们在简单剪切场下, 除了是时间  $t$  的函数外, 就仅是剪切速率  $\dot{\gamma}$  的函数。  $\dot{\gamma}$  本身也随时间变化, 一种特殊的情况是  $\tau_{22}(\dot{\gamma}, t) = \tau_{22}(\dot{\gamma}(t))$ ,  $N_2, N_2$  也类似, 即应力各分量随时间的变化完全来自  $\dot{\gamma}$  随时间的变化。更特殊地, 当  $\dot{\gamma} = \text{常数}$ ,  $\tau_{22} = \tau_{22}(\dot{\gamma})$ ,  $N_2, N_2$  也类似, 我们称此情况为稳态 (steady state) 测粘流。

结论 V1) 和 V2), 给了问题 7) 以简单回答, 尽管仍然没能回答问题 8), 但已经是心为实验 9) 和流变学的实验研究开辟了广大的天地。也就是说, 就算我们不清楚, 测粘流条件下的以下标量函数关系:

$$\dot{\gamma}(t), \dot{\gamma}(t) \longleftrightarrow \begin{cases} \tau_{22}(t) \\ N_2(t) \\ N_2(t) \end{cases}$$

是否唯一地独立地确定了被测样的流变学本构关系, 意即, 仅由上述标量关系是否可预测试样在复杂流场的关系, 那也不是不能为理论上提出一些本构模型并考察它们是否与实验结果相符, 哪怕可能会有不同类型的本构模型同时符合同一实验结果。

更何况, 大部分工业实际涉及到的流场都是近似测粘流 (如管道流), 测粘流测试结果直接具有参考价值, 不必去拷问其是否具备更一般的代表性。

因此最终关心的问题9), 它要求我们设计仪器时解决以下基本问题:

△如何实现一种测粘流场? 尤其是剪切速率  $\dot{\gamma} = \dot{\gamma}(t)$  随时间变化的测粘流场。

△如何测出  $\tau_{22}$ ,  $N_{11}$  和  $N_{22}$  及其随时间  $t$  和剪切速率  $\dot{\gamma}(t)$  变化的数据。

满足以上功用的仪器叫做 **流变仪 (rheometer)**。