

第1篇

基础理论篇

科学的真理不应在古代圣人的蒙着灰尘的书上去找,而应该在实验中和以实验为基础的理论中去找。真正的哲学是写在那本经常在我们眼前打开着的最伟大的书里面的。这本书就是宇宙,就是自然本身,人们必须去读它。

——伽利略

润滑是通过将润滑剂引入到相对运动的摩擦副间,构建具有高法向承载能力和低切向阻力的流体润滑膜,从而避免摩擦表面直接接触,达到减少摩擦阻力和降低材料磨损的目的,进而提高机器的使用性能和寿命并减少能源消耗。此外,润滑膜还具有散热、密封、除锈、减振和降噪等作用。

流体动压润滑理论主要是利用流体力学理论来分析流体润滑膜的形成机理和性能^[1]。润滑理论的研究是从19世纪80年代开始,至今已有100多年的历史。1883年Tower对火车轮轴轴承进行实验时首次观察到了流体动压现象^[2],开启了流体润滑理论的研究。随后,1886年Reynolds根据流体力学理论提出了求解润滑问题的关键方程——Reynolds方程,成功地描述了流体动压现象的机理,奠定了流体润滑理论的基础,开创了基于连续介质力学的润滑问题理论和实验研究^[3]。20世纪50年代以来,由Грубин提出将Reynolds流体润滑理论和Hertz弹性接触理论结合起来处理弹流润滑的方法^[4],以及后来Dowson和Higginson^[5]、Archard和Cowking^[6]、Cheng等^[7]陆续提出的弹流润滑问题的解,使流体润滑理论得到了进一步完善^[8]。与摩擦学中摩擦和磨损另外两个分支相比,因为准确和完善的数学表达,并结合计算技术的迅猛发展,润滑理论研究体系得到了极大的完善。

然而,非牛顿流体润滑问题一直是润滑领域困扰人们的一个难题。长期以来没有找到非牛顿流体润滑计算有效的求解方法,因此,寻求有效的求解非牛顿流体润滑问题的方法是润滑计算分析中的一个重要任务。本篇的主要内容就是要解决这一难点问题。

本篇共包含4章。在第1章中,首先介绍了各种非牛顿流体的类型,然后提出了关于非牛顿流体的总量黏度和增量黏度的概念,并举例分析了它们的差异。最后介绍了常用润滑剂流变性能测量装置——流变仪。大部分的流变仪是旋转式的,其中以锥板式应用最广。

第2章和第3章分别介绍了流体润滑基本方程和流体润滑 Reynolds 方程的假设、推导和边界条件。虽然不少摩擦学教材都含有这些内容,除了为了内容的完整性和连续性外,详细给出这些内容的主要目的还在于对比线性问题、非线性问题和非牛顿流体润滑问题之间的同异。在对比之后,用实例推导过程指出了试图推导非牛顿流体润滑 Reynolds 方程所存在的难以逾越的障碍。

第4章是本书的核心内容。在提出流速分离法的基础上,推导出求解流体润滑问题的普适流体润滑方程。流速分离法解决了推导非牛顿流体润滑统一方程的难点,普适流体润滑方程类似但是不同于 Reynolds 方程,表现为积分-微分方程的形式。它可方便地用于牛顿流体和非牛顿流体流体润滑问题的求解。本章的最后利用普适流体润滑方程给出了形式统一的多种常用的非牛顿流体本构的流体润滑求解方程。

孔子：学而不思则罔，思而不学则殆。

——《论语·为政》

1.1 概述

黏度是润滑剂的主要性能指标，它随着润滑膜所受压力和温度而变化，是流体黏滞性的度量，并用于描述流体内部的摩擦阻力^[1]。目前，根据流体黏度是否还受到剪应变率的影响可以将流体分成牛顿流体和非牛顿流体。牛顿流体的剪应力和剪应变率的关系曲线是一条通过原点的直线，这条直线的斜率就是黏度。牛顿流体的黏度只取决于温度和压力，与剪应变率无关。20世纪60年代，Crook等^[9]在使用矿物油与聚合物混合或者一些合成油研究弹流润滑时发现测量得到的润滑膜膜厚比基于牛顿流体的理论计算值要小很多^[10,11]，从而使人们更加重视润滑剂非牛顿特性的研究。一般来说，非牛顿流体的黏度不仅与温度和压力有关，还受到剪应变率的影响。

流体动压润滑状态时，润滑膜所受的压力相对较小，润滑膜的膜厚较厚，所受的剪应力也较小，此时常用的工业润滑剂可以视为牛顿流体^[12]。但是在薄膜、重载或弹流润滑等润滑机理非常复杂的工况下，加之热效应、接触表面形貌、非稳态等共同作用的结果，润滑剂的非牛顿性将成为不可忽视的影响因素^[13]。一般情况下，在弹流润滑的接触区，滑动摩擦很大，此时的接触应力可以达到GPa量级，而且当润滑剂以小于毫秒的时间通过接触区的较小间隙时，润滑剂的剪应变率可能高达 $10^6 \sim 10^8 \text{ s}^{-1}$ ^[14]。在这种情况下，润滑剂的黏度将显著变化，润滑剂不能再简单地认为是牛顿流体，此时的润滑剂黏度不仅受到压力和温度的影响，更与剪应力和剪应变率有关。有研究表明，在弹流润滑中，不管润滑剂的分子质量是高还是低，都会发生剪切变稀等非牛顿流体效应，只是特征时间长短有别^[15]。

另外，一些特殊的润滑剂，如润滑脂，本身就具有显著的非牛顿流体特性。而且为了追求更好的润滑性能，润滑剂中常常加入具有抗磨等功能的添加剂，尤其是聚合物添加剂的使

用,使得润滑剂的非牛顿特性越来越普遍。因此,对非牛顿流体润滑问题的研究既具有很大的理论意义,也具有明显的应用背景。

1.2 牛顿流体黏度

1.2.1 黏度定义

流体一般没有固定的形状,是可以流动的。在流动过程中,流体最重要的特性之一就是黏度。流体流动时,由于流体与固体表面的附着力和流体内部分子间的作用,将使流体产生剪切变形,而流体的黏滞性则是流体抵抗剪切变形的能力。

牛顿最先提出黏性流体的流动模型,他认为流体的流动是许多极薄的流体层之间的相对滑动,如图 1-1 所示。在厚度为 h 的流体表面上有一块面积为 A 的平板,在力 F 的作用下以速度 U 运动,下表面 B 静止不动。由于流体的黏滞性,在相互滑动的各层之间将产生剪应力即流体的内摩擦力,由它们将运动传递到各相邻的流体层,使流动较快的层减速,而流动较慢的层加速,形成按一定规律变化的流速分布。当 A 、 B 表面平行时,各层流速 u 将按直线分布。

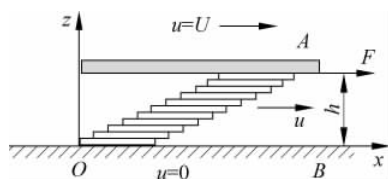


图 1-1 牛顿流体流动模型

牛顿提出了黏滞剪应力与剪应变率成正比的假设,称为牛顿黏性定律,即

$$\eta = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} \quad (1-1)$$

或

$$\eta = \frac{\tau}{\frac{du}{dz}} \quad (1-2)$$

式中,剪应力与剪应变率的比例系数 η 定义为流体的黏度或称为动力黏度; τ 为剪应力,即单位面积上的切向力, $\tau = F/A$; F 为切向力; $\dot{\gamma} = \frac{du}{dz}$ 为剪应变率,即剪应变随时间的变化率; u 为流体速度; z 为垂流速度方向的坐标。

在工程中,常常将流体的动力黏度 η 与其密度 ρ 的比值作为流体的另一黏度,这一黏度称为运动黏度,常用 ν 表示。运动黏度的表达式为

$$\nu = \frac{\eta}{\rho} \quad (1-3)$$

1.2.2 黏度单位

按黏度的定义可推出黏度的单位在国际单位制(SI)中为 $\text{N} \cdot \text{s}/\text{m}^2$,或写作 $\text{Pa} \cdot \text{s}$,如图 1-2 所示。

在工程应用中常采用 CGS 制,动力黏度的单位用 Poise,简称 P(泊),或 P 的 1%,即 cP(厘泊)。

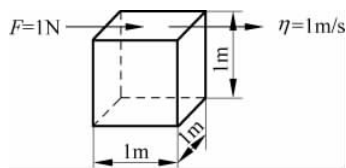


图 1-2 黏度的单位

$$1\text{P} = 1\text{dyne} \cdot \text{s}/\text{cm}^2 = 0.1\text{N} \cdot \text{s}/\text{m}^2 = 0.1\text{Pa} \cdot \text{s} \quad (1-4)$$

采用英制单位时,动力黏度的单位用 Reyn(雷恩)。

$$1\text{Reyn} = 1\text{lb} \cdot \text{s}/\text{in}^2 = 1.45 \times 10^{-5}\text{P} \quad (1-5)$$

各种不同流体的动力黏度数值范围很宽。空气的动力黏度为 $0.02\text{mPa} \cdot \text{s}$, 而水的黏度为 $1\text{mPa} \cdot \text{s}$ 。润滑油的黏度范围为 $2 \sim 400\text{mPa} \cdot \text{s}$, 熔化的沥青的黏度可达 $700\text{mPa} \cdot \text{s}$ 。

运动黏度在国际单位制中的单位为 m^2/s 。在 CGS 单位制中,运动黏度的单位为 Stoke,简称 St(斯):

$$1\text{St} = 10^2\text{mm}^2/\text{s} = 10^{-4}\text{m}^2/\text{s} \quad (1-6)$$

实际上,常用 St 的 1%,即 cSt 作为单位,称为厘斯,因而 $1\text{cSt} = 1\text{mm}^2/\text{s}$ 。

由于通常润滑油的密度 $\rho = 0.7 \sim 1.2\text{g}/\text{cm}^3$, 而矿物油密度的典型值为 $0.85\text{g}/\text{cm}^3$, 因此对这样的润滑油的运动黏度与动力黏度,可采用下面的近似换算式:

$$\eta = 0.85\nu \quad (1-7)$$

凡是服从牛顿黏性定律的流体统称为牛顿流体,而不符合牛顿黏性定律的流体为非牛顿流体,或称其具有非牛顿性质。

实际上,黏度会受到各种外界条件变化(温度、压力等)的影响,从而实际的黏度并不是常数。但是,外界因素引起的黏度变化,并不影响流体的特性。因此,外界引起的黏度变化不改变牛顿流体或非牛顿流体性质,即流体是牛顿流体还是非牛顿流体是由它的内部性质所决定的。

当黏度随流体的剪应力或剪应变率而变化时,这时黏度不再满足牛顿流体的黏度定义,因此需要建立非牛顿流体模型。

1.3 非牛顿流体流变特性

非牛顿流体是指不满足牛顿黏性实验定律的流体,即其剪应力与剪应变率之间不是线性关系的流体,它广泛存在于生活、生产和大自然之中。

由上面定义黏度过程中,对牛顿流体而言,黏度是一个常数。但是对非牛顿流体而言,却无法用一个单一常数来表示剪应力与剪应变率之间的变化规律,也就是并不存在一个常数为黏度。而是要通过非线性函数来表达剪应力和剪应变率之间的关系,称为流体的本构方程。

1.3.1 非牛顿流体类型

图 1-3 给出了几种常见流体剪应力随剪应变率变化的曲线。其中,直线 A 就是牛顿流体,它的表达式是剪切应力与剪应变率呈线性关系。对牛顿流体而言,它的黏度 η 虽然在一些情况下不是常数,如可以随温度、压力等环境条件而变化,但是剪应力随剪应变率变化仍然满足线性关系,否则不能称之为牛顿流体。

非牛顿流体的剪应力和剪应变率的关系呈非线性或是具有不为零的屈服应力,有些剪

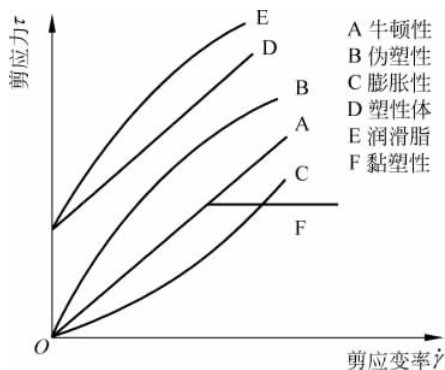


图 1-3 不同流体类型的剪应变率-剪应力曲线

应力和(或)剪切应变率还随时间变化。实验测量表明,非牛顿流体往往表现出伪塑性、膨胀性、黏弹性、具有屈服等不同的形式,如图 1-3 中 B~E 所示。

一些其他常见的非牛顿流体类型与特性如下:

1. 伪塑性

伪塑性又称剪切变稀,是非牛顿流体一种主要表现形式,如图 1-3 中 B 所示。大部分的合成润滑油都是剪切变稀流体,这种流体的黏度随着剪应变率的提高而变小,在相同工况下,具有剪切变稀性能润滑剂的膜厚必须变得更薄以增加承载能力。

2. 膨胀性

膨胀性也称剪切变稠,如图 1-3 中 C 所示。与剪切变稀流体相反,剪切变稠流体的黏度值随着剪应变率的提高而变大,在相同工况下,剪切变稠润滑剂的膜厚会更厚些。这种材料在国防及工业领域都有很大的发展前景。

3. 塑性体

如图 1-3 中 D 所示,宾汉塑性体取名自提出这种材料形式的 Eugene C. Bingham。宾汉塑性体是一个在低剪应力下表现为固体材料的刚性。而在高剪应力下,表现为流体材料的黏性。当其塑性屈服后,流体的剪应力和剪应变率呈线性关系。但这需要施加一个大于屈服应力的驱动得以实现。这样,它的剪应力-剪应变率直线不过原点。润滑剂的屈服应力是其性能以及压力和温度的函数。实验表明,塑性润滑油的屈服应力在 $4 \times 10^5 \sim 2 \times 10^7$ Pa。

如图 1-3 中 E 所示,润滑脂本构方程可以看作是宾汉塑性体和剪切变稀流体的叠加,它同时具有塑性体的屈服应力和剪切变稀流体的特性。同塑性体类似,当润滑脂静止时表面可以保持原有形状,而一般流体表面则是一个平面。

4. 触变性

触变性流体的剪应变率是时间的函数,随着时间的增加剪应力随剪切应变率的增加而逐渐变缓。与之相反,震凝性流体则需要逐渐提高剪应力来保持剪应变率不变。触变性流体可以看作极端情况的时变剪切变稀流体,而不是及时地对剪应变率做出改变。但是剪切变稀流体的黏度随着剪应力或者剪应变率的增加而减小的响应是及时且可重复的。触变性材料的黏度不仅随剪应变率变化,还随着剪切时间而变化的原因在于具有触变性的材料的

结构能被剪应力破坏。在足够大的剪应力下甚至可被彻底破坏。此时材料可以在一段时间内表现出牛顿流体的特性。当材料再次有足够长的时间处于低剪应力下时,这种结构又能恢复原状。实验表明,润滑脂也有一定的触变性。

5. 黏塑性

黏塑性流体是在大剪应变率下流体呈现非牛顿流体现象后的一种简化,类似弹塑性力学中的弹塑性。它在初始的小剪应变率时,由于黏性占主导,表现为流体的黏性特性,相当于牛顿流体。但是随着剪应变率的增加,塑性成为主要影响因素,特别是在流体与固体接触的界面处,由于剪切应力不再随剪应变率增加而增加,而产生界面滑移。在弹流润滑中,由于黏压效应和表面效应的存在,润滑剂会产生相变,表现出固体特性;同时因为润滑剂流过接触区的时间非常短,且由于润滑膜很薄时,流体容易表现为黏塑性体。许多学者提出了多种剪应力有界非牛顿流体模型。

6. 黏弹性

黏弹性流体的研究始于 20 世纪晚期合成聚合物的出现。黏弹性体会同时表现出固体的弹性性质和流体的黏性性质,它的主要表现形式是蠕变和应力松弛。对黏弹性非牛顿流体润滑的研究具有很重要的应用价值。尽管没有详尽的实验验证,但是一般认为黏弹性对流体动压润滑膜厚的影响并不太大。

现将非牛顿流体分类及其特点总结如表 1-1 所示。

表 1-1 非牛顿流体分类及其特点

分类	类型	特点	对应润滑剂
黏性流体	剪切变稀	黏度不随时间变化,随着剪应变率增加而减小	硅油、大部分合成润滑油
	剪切变稠	黏度不随时间变化,随着剪应变率增加而增大	玉米粉水溶液等
黏塑性流体	宾汉塑性体	具有屈服应力,当剪应力大于屈服应力时才发生流动	瓷土、石墨、油漆
	润滑脂	具有屈服应力,黏度随剪应力的增加而减小	润滑脂、一些乳化液
时变流体	震凝性	黏度随着剪应力施加时间的延长而变大	打印机油墨、石膏糊
	触变性	黏度随着剪应力施加时间的延长而变小	蓖麻油、滑液、泥浆
	黏弹性	具有弹性和黏性流变参数,有与时间有关的应力松弛和蠕变现象	一些特殊润滑剂

1.3.2 非牛顿流体黏度

黏性自然是流体的最重要特性。而描述黏性的参数即为黏度。牛顿流体的黏度定义非常明确,就是剪应力与剪应变率的比值:

$$\eta = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} \quad (1-8)$$

目前,对非牛顿流体的黏度的定义比较模糊。一般对流体的理解是:不是牛顿流体,就是非牛顿流体。例如,常常会认为在图 1-3 中,除曲线 A 以外的流体均为非牛顿流体,但是事实上这样的理解与线性问题和非线性问题不完全一致。例如,常被理解成非牛顿流体的

图 1-3 中的曲线 D 却是线性函数(在 $du/dz \geq 0$ 区间)。造成这一差别的原因在于在数学上的线性与否是根据曲线的斜率是否为常数而确定的。为此,我们下面详细讨论非牛顿流体的黏度问题。

为了方便今后的讨论,且不至于造成混乱,也保持与数学上线性定义一致,我们在这里给出非牛顿流体黏度的两种不同的定义:总量黏度和增量黏度。

1. 总量黏度

非牛顿流体总量黏度(或称为表观黏度)的表达式形式上与牛顿流体黏度的式(1-8)相似:

$$\eta_0 = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} = \frac{f(\dot{\gamma})}{\dot{\gamma}} \quad (1-9)$$

式(1-9)中的 $f(\dot{\gamma})$ 为非线性函数。

总量黏度 η_0 相当于作当前点 $(\dot{\gamma}, \tau)$ 与坐标系原点 $(0,0)$ 的连线,并认为该连线的斜率即为当前流体的黏度。以总量黏度判断流体的非牛顿性时,图 1-3 中的曲线 D 中即便是剪应力仍是剪应变率的线性函数,但是由于直线不过原点,因此 η_0 不是一个常数。所以用总量黏度判断时,斜直线流体本构方程仍然会被认为是非牛顿流体。

以幂函数非牛顿流体为例,图 1-4 给出了不同幂指数下的总量黏度 η_0 的变化趋势。其中 $n=1$ 的流体即为牛顿流体,其总量黏度 η_0 为常数。

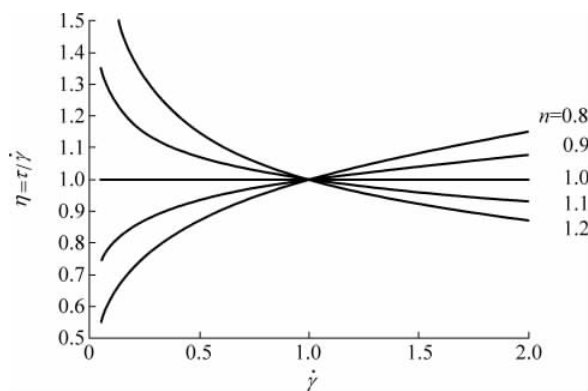


图 1-4 幂函数流体的总量黏度随剪切应变率变化曲线

2. 增量黏度

非牛顿流体增量黏度则将黏度表示成是剪应力的微分与剪应变率的微分的比值,即剪应力对剪应变率的导数:

$$\eta = \frac{d\tau}{d\dot{\gamma}} = f'(\dot{\gamma}) \quad (1-10)$$

式中, $f'(\dot{\gamma}) = \frac{df(\dot{\gamma})}{d\dot{\gamma}}$ 。

增量黏度 η 的定义与数学中的线性定义一致,即:曲线的斜率不变时是直线,对应的流体是牛顿流体,这时它的增量黏度是一个常数。对于用增量黏度定义的非牛顿流体,其曲线的斜率是变化的,因此其黏度一定不是常数。

对不同幂值的幂函数流体来说,我们按增量黏度的定义算出它们的黏度,并在图 1-5 给出其增量黏度的变化趋势。

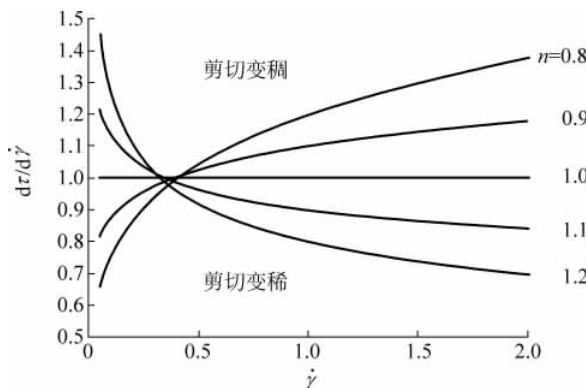


图 1-5 幂函数流体的增量黏度变化曲线

3. 两种黏度对比

从图 1-4 和图 1-5 可以看出:从趋势上来看,总量黏度与增量黏度的变化基本一致:

(1) 对于膨胀性流体而言,开始的黏度较低,随着剪应变率的增加,其黏度不断增加,但是增加的趋势有所减缓;

(2) 对于伪塑性或剪切变稀流体来说,开始两种黏度值均较高,随着剪应变率的增加,其黏度不断降低,但是降低的趋势也是在不断减缓;

对牛顿流体而言,总量黏度与增量黏度是一致的,但是对非牛顿流体来说就会表现出明显的差异。

(1) 增量黏度的变化要比总量变化更快,这是因为总量黏度当前黏度值受到了开始黏度的影响,而增量黏度则仅取决于当前时刻的变化率。

(2) 对存在剪应力常数的一些非牛顿流体,如计算图 1-3 中曲线 D 表示的 Bingham 流体,两种黏度的曲线如图 1-6 所示。随着剪应变率的增加,总量黏度是从 $\infty \rightarrow 1$ 的一条曲线,所以被认为是非牛顿流体。但是,如果采用增量黏度计算,曲线 D 的黏度却是一个常数。

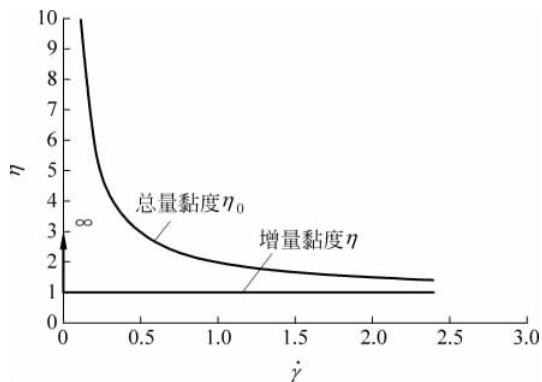


图 1-6 Bingham 流体的两种黏度比较

另一种常见的流体——黏塑性流体存在极限剪应力 τ_L ，即在剪应变率达到一定值后，流体内部的剪应力不再继续增加，所以它的剪应力-剪应变率特性曲线是由一条斜率一定的直线和一条水平线构成的，见图 1-3 中的曲线 F。绘出其总量和增量黏度时，在达到极限剪应力前，两者是重合的。但是当超过极限剪应力后，总量黏度是连续的，将逐渐下降，并趋于 0；而增量黏度即为 0，在达到极限剪应力处，增量黏度存在间断，这与数学上的导数不连续是一致的，如图 1-7 所示。

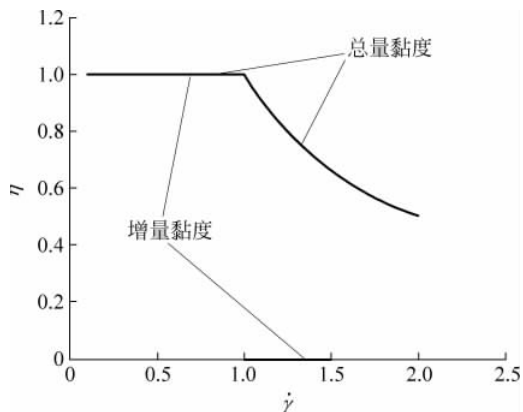


图 1-7 黏塑性流体的两种黏度随剪切应变率的变化

另外，要注意的是：对黏塑性流体来说，当剪应变率越来越大时，总量黏度趋于 0，增量黏度等于 0，这说明：剪应力不再随剪切应变率的增加而增加，这将导致流体动压不再增加，即流体的承载力将也不会再增加，这会导致润滑失效。更详细的分析将在第 5 章给出。

4. 负(增量)黏度问题

用增量黏度还能发现一些反常的现象，如负黏度。我们知道流体黏度是形成流体动压和造成流体摩擦损耗的主要原因。相应的剪应力-剪应变率本构曲线始终是位于 0 轴上方。利用总量黏度 η_0 定义计算的黏度值始终是正数。

但是，如果剪应力-剪应变率特性曲线不是一条单调增的曲线时，用增量黏度定义得到的即时流体黏度值 η 就有可能为 0 或为负值，见图 1-8。

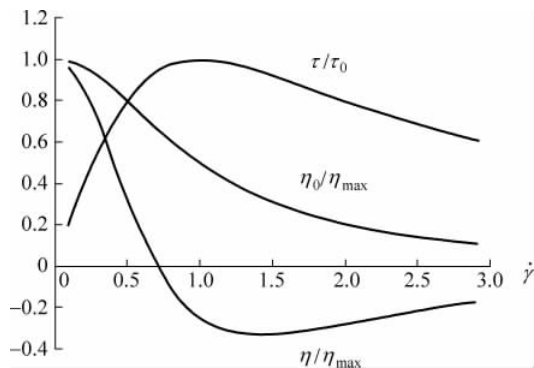


图 1-8 屈曲流体本构方程及两种黏度比较