

### 3. 金属的塑性

首席作者 R. J. Clifton

(Brown大学工程学院)

J. P. Hirth, E. Krempl和C.-c. Chu对初稿提出了宝贵意见。

**提要** 金属成型, 涡轮叶片寿命, 金属结构承载能力, 装甲侵彻, 以及结构金属抗断裂能力等方面的进展, 都取决于对金属塑性的深入了解。由于金属塑性响应的内在复杂性, 因此要获得这样的了解, 就需要持续不断地进行研究工作, 并需要在理论、实验和数值方法上有所创新。经典塑性理论虽然在对金属结构受到接近比例载荷的常规应用中具有很大价值, 但在涉及象大变形、循环载荷、高温、局部剪切或高应变率的许多重要应用中却不令人满意。必须有一个在物理学基础上发展起来的塑性理论, 来解决现代工程技术所面临的种类广泛的问题。发展这种理论, 需要有严格的实验, 以便揭示微观机理和宏观塑性响应之间的关系, 并为确定所提出理论的正确性提供根据。对于发展一个更全面的理论来说, 考虑率相关、大变形、非比例载荷、温度敏感性及晶界效应等是重要的。计算机的大小和速度的惊人的增长, 为利用更符合实际的塑性理论进行计算消除了障碍。放松对计算的约束条件, 给与塑性有关的工程技术问题的重大发展提供了一个特殊良机。由于晶粒旋转及空洞扩散之类的效应引起了软化, 因此要想适用于涉及这种软化的情况, 就需要有精确的有效计算机编码。尤其十分需要预测材料由于形成剪切带和由于空洞合并而引起的破坏的能力。在一般加载历史过程中, 必须确定控制损伤累积的物理原理, 并用计算机编码表示出来。

#### 3.1 背景和当前研究趋向

塑性变形不同于弹性变形, 它与加载的先后次序有关, 并且在作用应力去掉后仍然存在。而且, 尤其在高温下, 当作用载荷恒定时, 会产生塑性蠕变应变。塑性变形对应力路径、加载时间、温度的依赖关系, 以及塑性响应的非线性性质, 是我们在预测材料和结构的塑性响应时碰到的主要困难。

然而, 这个方面正在取得进展。我们已经知道, 塑性变形是由称之为位错的线状缺陷的运动产生的。当作用应力去掉时, 这些位错不能恢复到原来的位置。位错这个术语是50年前引进的, 用来解释固体的弹性极限应力一般小于固体的弹性模量1个或2个数量级的观察结果。位错的存在, 已经由许多透射电子显微镜直接观察到的结果充分地得到确认。此外, 我们还知道了象鉴别与滑移过程有关的晶面和方向, 以及静水压力下屈服应力的相对增强之类的定性特征。然而, 我们一般尚未得到可以定量描述任意加载历史过程中应力与应变之间的关系的本构关系。

缺乏公认的能得到广泛应用的本构方程，是塑性理论的一个主要的困难。这使塑性理论这门学科与具有已知本构方程的弹性理论、牛顿流体力学、电磁理论这些学科大不相同，研究的焦点在于改进求解各种边值问题的方法。

对于单晶的情况，研究上述这类本构方程已经取得进展。已经证实，在给定滑移面上主要导致引起位错运动的应力分量，是滑移面内剪切力在滑移方向上的分量。已经把宏观塑性应变率与不同滑移面族上的位错密度和位错运动建立了联系，最近并把这些运动学关系用公式形式表达了出来，用以计算在许多塑性变形情况下是非常重要的大变形和旋转。位错可动性与温度及等效剪切应力依赖关系的一般特性也建立了起来，并已对各种不同加载条件下的各种晶体得到了宏观应力-应变关系方面的大量实验结果。此外，与位错的运动、增殖及其相互作用有关的许多定性特征，已通过透射电子显微镜而得到，包括受应力试件中位错运动的真实观察结果。

然而，描述位错运动及可动位错密度依赖于宏观应力和依赖于其他一些表征现有位错构形变量的定量关系式，尚不足以用来预计所观察到的宏观响应。主要症结在于缺少可以计入加载历史对现有塑性响应的影响的满意的模型。加载历史之所以重要，是因为它对现有位错构形起着影响，即通过位错应力的相互作用而影响到以后的塑性变形。

对多晶体固体来说，把塑性变形过程中宏观应力与应变的历史联系起来困难，在于还必须计入构成宏观连续介质单元的单晶在取向上的差别。取向上的这些差别，影响着各种晶体中已作用的应力与正在作用在位错上的应力之间的关系。宏观应力和应变率的计算，必须从对应的单晶的数量，通过对现有晶体取向分布计算出适当的平均值来得到。建立关于多晶体材料宏观塑性响应的模型，由于晶界和晶体织构的影响而相当复杂。晶界有抑制位错运动的趋势，这是因为在晶界上的滑移面取向不一致——正是唯独这种多晶体效应是不能从对单晶的研究得到的。晶体织构具有构成宏观单元的晶体的择优取向，它是在塑性变形过程中由于不同的晶体在变形进行时受到不同的旋转所产生的。晶体织构对在金属成型及装甲侵彻时产生的大应变下的应力-应变关系有重大的影响。

对于以由位错的运动所引起的细观尺度滑移模型为基础的多晶体材料的塑性响应，在研究其宏观本构方程时，虽有显而易见的困难，但还是在取得稳步的进展。已经发展了在平均的意义上模拟相邻晶粒的刚度效应的方法。理想的但又符合实际情况的本构关系的数学结构已经建立起来了，在这里，给定的滑移系统的位错运动仅仅通过对等效剪切应力的依赖关系来依赖于应力场。超巨型计算机正在使计算晶粒取向的分布的平均值所需要的大规模计算变得轻而易举。

由于缺乏一个以位错力学为基础的完全令人满意的多晶体塑性变形理论，结果简化的唯象理论便发展起来了，已经证明这些理论可应用于多种用途。其中最简单、最常用到的理论是具有各向同性应变硬化的所谓  $J_2$  流动理论。根据这种理论，在有效剪切应力，或（等效地）弹性剪切畸变应变能，达到一个临界值时，塑性流动开始发生。这个临界值随等效剪应变的增加而增加，以便给出各向同性应变硬化的模型。假定塑性流动以这样的方式发生，即塑性体积变化为零，并在给定的应力条件下，塑性流动所耗散的能量相对于其他可能的流动而言是最大的。这个理论有一个漂亮的数学结构和使其适用于获得数值解的吸引人的数值特征。这个理论很容易推广到包括应变率和温度的影响，只要所施加的载荷大致是按比例增

加,而且应变并不太大,比方说小于40%,则这个理论的预计结果就同实验结果符合得相当好。然而,当加载方向突然发生变化时,所预计的刚度至少在一开始时似乎要比实验测得的大得多。这个较大的刚度使预计的塑性响应要比实验中观测到的稳定得多。例如,这个理论往往会造成过高估计压应力下壳体塑性屈曲所需的载荷,而不能预言象形成强局部剪切变形带(称为剪切带)那样造成的不稳定性。也不能说明不同加载条件下,不同晶体织构发展的原因,因而也就不能说明,例如,拉伸和扭转下金属大应变塑性响应的不同之处。

### 3.2 未来的研究方向

金属塑性理论要取得进展,要求在塑性流动的位错机理层次的物理解方面和宏观变形的数值模拟方面都要有所发展。由于在模拟位错运动和预计结构塑性响应之间尚有巨大的差距,还由于在预计结构塑性响应方面需要作更好的工作,因此,看来必须继续发展关于塑性流动的唯一理论,这些理论可以直接用来根据简单加载历史下测得的塑性响应来预计宏观塑性响应。然而,应该认识到这种方法的局限性,并在发展以位错力学为基础的塑性流动的物理论方面继续进行研究。<sup>1)</sup>

模拟工作应该着重于通过剪切应变的局部化和空洞的生长与并合来预测破坏。正确处理这些有限变形是这些模型的一个重要的要求。这些模拟工作既应当把塑性流动的主要物理特征结合起来,还应当发展工程上重要问题的精确的计算机解法。应当日益注意包括应变率依赖关系的分析方法,因为这些分析方法对于描述应变率范围很广的塑性变形有着潜力。应当高度重视可以用于研究涉及材料和结构不稳定塑性响应的问题的数值方法。尤其需要确保用来计算受动态载荷结构的大变形的计算机编码的可靠性。

需要用实验来指导对塑性流动与加载历史的依赖关系的模拟。在低应变率下,将伺服控制机中应力实验和循环载荷实验相结合是合适的。应当取大应变的变形,并且应当记录织构的变化。需要研究高温及高应变率的影响。需要在很广的应变率范围上确定绝热加温及热软化对剪切应变局部化的影响,尤其在高应变率下,但对 $10^{-1}$ — $10^{-3}$  s<sup>-1</sup>的低应变率也是如此。在这些低应变率范围内由于塑性变形而引起的加热,通常都忽略不计。为了对位错力学包括位错对不同滑移系统的相互作用有更深入的了解,应该对单晶体进行实验。微观观察应当是这些研究的一个必要部分,以便有助于把宏观塑性响应与微观机理联系起来。

### 3.3 需要开展研究项目一览

下面列出最需要研究的一般领域。指出了每一领域中特别感兴趣的课题。

- 蠕变 在塑性变形的粘塑性模型中,蠕变的统一处理方法;包括卸载-再加载循环在内的非比例加载路径时的复合应力状态效应;通过微观与模拟相结合,将蠕变应变与基本机理研究联系起来;高温;空洞的扩张与扩散。

- 剪切带 剪切应变局部化的基本了解,包括几何软化、热软化和应变率敏感度的影响;剪切带的传播;发展本构模型和计算方法,这可以将例如金属成型中的剪切带的形成包括在计算之中。

- 大变形 了解织构和各向异性的发展;在连续介质理论中模拟这些影响,并把它们包括在有限元编码中。

1) 这里指的只是离散化的位错物理模型。对几十年来,在位错连续统理论方面取得的重要进展只字不提,似乎应该看成是个不小的疏忽。——校者

• 细观尺度到宏观尺度 根据单晶体的行为模拟多晶体的响应; 包括晶粒尺寸和晶粒内非均匀变形的影响; 织构的发展; 应变率效应; 塑性流动的统计研究和内在非均匀性; 疲劳裂纹的形成; 按规定的力学性能设计材料。

• 高应变率 高应变率下的流动应力, 包括它对温度的依赖关系; 绝热剪切带; 应用于动态断裂, 高速机加工和装甲侵彻。

• 结构动力学 动态塑性屈曲; 大挠度; 实验结果与工程近似以及与完全数值解的对比关系。

• 金属基体复合材料 用高强度纤维加强的软金属的变形机理; 包括纤维弹性伸展的影响; 粘接。

• 薄膜 固化和冷却过程中的蠕变和塑性流动; 残余应力; 屈服应力。

### 3.4 参考资料

- Argon, A S (Ed) (1975). *Constitutive equations in plasticity*. MIT Press, Cambridge MA.
- Asaro, R J (1983). Micromechanics of crystals and polycrystals. *Adv Appl Mech* 23, 1-115.
- Bushnell, D (1982). Plastic buckling. In *Pressure vessels and piping: Design technology—1982, a decade of progress*, S Y Zamrik and D Dietrich (Eds), ASME, New York.
- Chifton, R J (1982). Dynamic plasticity. *J Appl Mech* 50 (50th Anniversary issue), 941-952.
- Firth, J P and Lothe, J (Eds). *Theory of dislocations*, McGraw-Hill, New York.
- Hutchinson, J W (Ed) (1984). Viewpoint set no 6: Shear bands. *Scripta Met* 15, 421-458.
- Lee, E H, and Mallett, R I. (Eds) (1981). *Plasticity of metals at finite strain: Theory, computation and experiment*. Proceedings of Research Workshop, Stanford Univ, July.
- Needleman, A, and Tvergaard, V (1983). Finite element analysis of localization in plasticity. In *Finite elements—special problems in solid mechanics*, J T Oden and G F Carey (Eds), Prentice-Hall, Englewood Cliffs NJ, vol 5, pp 94-157.
- Nemat-Nasser, S (1983). On finite plastic flow of crystalline solids and geomaterials. *J Appl Mech* 50 (50th anniversary issue), 1114-1126.

董苏华译自: *Appl. Mech. Rev.*, 38, 10 (1985): 1261—1263. (段祝平校)

## 4. 聚合物和粘弹性

首席作者 R. M. Christensen

(复合材料和聚合物工程, Lawrence Livermore 国家实验室)

撰写时间 R. A. Schapery 及 J. L. Kardos 进行了商讨. C. J. Alcisio, R. B. Bird, J. F. Carley, S. Gratch, W. G. Knauss, R. I. Tanner 以及 J. R. Walton 对初稿提出了审阅意见。

**提要** 聚合物力学提出了包括由表述基本特性到模拟复杂生产过程的许多方面的迫切技术问题。尤其重要的是把损伤状态正在发展中的固体的非线性本构方程表达出来的方法。对聚物流体的相应表达形式, 将能够解决许多非牛顿流变学的重要问题。

### 4.1 引言

许多类型的材料表现出一种粘弹性的行为, 照字面来讲, 这就是说, 材料的行为既非理