

金属的塑性和超塑性

〔苏〕O. A. 卡依勃舍夫 著

王燕文 译



机械工业出版社

本书列述了金属在较宽的变形温度-速度范围内的塑性和变形机理的研究结果，分析了金属的原始结构对超塑性效应的影响，探讨了相变超塑性。本书特别着重于超塑性变形机理的实验研究，在实验数据基础上论述了超塑性曲线不同阶段的微观变形机理模型，阐述了提高工业用合金的塑性的方法并指出了在此基础上改进零件制造工艺的可能性。

本书对象为金属学、金属物理、塑性理论和加工等方面的科技人员，同样也适用于高等院校相应专业的大学生和研究生。

Пластичность и Сверхпластичность Металлов

О. А. Кайбышев

Издательство «Металлургия», 1975

* * *

金属的塑性和超塑性

[苏]О. А. 卡依勃舍夫 著

王燕文 译

*

机械工业出版社出版 (北京阜成门内百万庄南街一号)

(北京市书刊出版业营业许可证出字第 117 号)

机械工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

*

开本 $787 \times 1092^{1/32}$ · 印张 $10^5/8$ · 字数 231 千字

1982 年 1 月北京第一版 · 1982 年 1 月北京第一次印刷

印数 0,001—5,300 · 定价 1.10 元

*

统一书号: 15033 · 5216

译 者 序

近十多年来，金属超塑性的研究取得了较重大的进展。大量的研究事实说明，金属和合金在一定的组织结构和变形温度-速度条件下，都有可能实现超塑性。显然，研究和发现这些超塑性金属，并使之应用于工业生产上是有很大的技术经济价值的。

本书对于金属超塑性方面的有关问题，作了比较系统的阐述。其中，尤其着重论述超塑性的机理及其试验研究方法。这对于深入了解超塑性的本质，以及进行这方面的科学研究来说是值得参考阅读的。

为便于阅读，在书中列有符号说明。另外，原书中的彩色照片（原图号为56），因印刷模糊，不宜翻印，因而删去。

本书承哈尔滨工业大学何绍元同志审校，谨此表示感谢。

译者

原 序

提高工业上广泛应用的金属和合金的塑性，是重要的科学任务也是重要的实际任务。近年来，由于能使金属转变到超塑性状态，从而提供了解决这个任务的现实前景。新的实验资料改变了过去认为超塑性仅是个别合金才有的这种概念。发现，只要具备了一定的显微结构和一定的变形温度-速度条件，很多金属和合金都能实现超塑性。金属超塑性在压力加工工艺上广泛应用的前景，也就是近年来注意研究超塑性现象的原因。

在一~四章中详细地讨论了不同显微组织的金属在较宽的温度-速度区段内的各种变形机理，分析了结构参数对金属塑性的影响（第二章）。第五章是与В. И. 柴姆勃尔日茨基（В. И. Замбржицкий）合写的，专讲金属变形过程中的相变超塑性。这部分中收集了中央黑色冶金科学院（ЦНИИЧМ）的金属学和金属物理研究所相变实验室同事们所获得的最新实验数据。提高实用合金的塑性和在此基础上改进零件生产工艺的可能性写于第六章。

此书的问世，还与很多科研工作者的劳动有关，如И. В. 卡萨契柯夫（И. В. Казачков），Е. Г. 高尔琴柯（Е. Г. Гордиенко），А. А. 马尔开洛夫（А. А. Маркелов），С. Я. 沙里赫夫（С. Я. Салихов），Г. А. 沙里谢夫（Г. А. Салищев），Р. З. 瓦里也夫（Р. З. Валиев），Ф. Ш. 萨里弗雅诺夫（Ф. Ш. Шарифьянов），В. В. 阿斯特尼（В. В. Астанин），Б. В.

劳基诺夫 (Б.В.Родионов), Р.Р. 沙里赫夫 (Р.Р.Салихов), О.А. 伏尔柯夫 (О.А.Волков), Т.А. 索尔特诺娃 (Т.А.Султанова) 等, 主要的试验结果是与他们一起获得的。

作者向 В.М. 劳生别尔克 (В.М.Розенберг) 教授和 А.Н. 奥尔洛夫 (А.Н.Орлов) 教授在一些试验结果上提供的宝贵意见表示感谢, 同样也向评论家 И.И. 诺维柯夫 (И.И.Новиков) 教授在讨论手稿时提供的宝贵意见表示感谢。

目 录

译者序

原序

符号说明

绪论 1

第一章 塑性唯象学和变形机理 4

1.1 塑性唯象学 4

1.2 各种变形温度-速度条件下材料的测试方法 12

1.3 变形机理和金属塑性 22

1.4 变形温度和速度对金属变形机理的影响 36

第二章 特殊显微结构的超塑性 54

2.1 热变形时显微组织对金属塑性的影响 54

2.2 合金成分对超塑性效应的影响 70

2.3 预变形和结晶学织构对超塑性效应的影响 84

2.4 晶粒尺寸对金属变形机理的影响 101

第三章 超塑性流动条件下金属变形机理的
试验研究 114

3.1 超塑性变形时显微组织的变化 114

3.2 扩散过程在超塑性变形机理中的作用 140

3.3 超塑性流动时结晶学滑移的特点 164

3.4 晶界滑动和晶界迁移在超塑性变形中的作用 194

第四章 结构超塑性变形的显微机理 210

第五章 相变超塑性 239

第六章 提高金属和合金塑性的方法 269

X

$(\Delta\rho)_{\text{дисл}}$ ——位错引起的电阻变化

$(\Delta R/R)_{\text{рел}}$ ——松弛过程的电阻变化率

$(\Delta R/R)_{\text{упр}}$ ——弹性变形的电阻变化率

$(\Delta l/l)_{\text{упр}}$ ——弹性变形的伸长率

$(\Delta\rho/\rho)_{\text{псф}}$ ——变形时的电阻变化率

M_d ——马氏体转变温度上限

t_p^n ——再结晶开始温度

t_p^x ——再结晶终止温度

$I_{\text{в.р}}$ ——拉伸方向织构极大值强度

ρ_e ——攀移位错密度

σ_e ——作用于攀移位错上的应力

h_0 ——原始厚度

b_0 ——原始宽度

h_e ——变形后的厚度

b_e ——变形后的宽度

Z_M ——平均迁移路程

M_s ——马氏体点

绪 论

塑性是金属和合金的重要属性之一[⊖]。工程技术上以材料在外力作用下,无损而永久地改变形状的能力理解为塑性。在出现首批破断特征前,材料的变形程度越大,其塑性就越高。

近几十年来由于位错理论上的成就^[1-3],得以用位错运动来解释一般变形条件下的塑性流动过程。在位错运动学理论中,塑性流动是作为一种具有位错结构、织构和材料性能变化的复杂现象来研究的。

关于塑性的物理研究,大多数是在单晶体上进行的,这样就能在很多情况下获得塑性流动早期阶段的个别位错和位错总体行为的信息,从而以此作出塑性过程的定量说明^[4-7]。

关于多晶体塑性性能的研究就少得多。

到目前为止,尚没有形成充分利用金属和合金塑性潜力的明确的物理概念。同时,金属的低工艺塑性使压力加工过程复杂化:不得不采用中间退火和进行多次变形。在很多情况下,这就大大妨碍变形过程的强化和工艺的合理化。

各种关于调节金属和合金塑性方法的资料对于发展压力加工理论和实践都是非常重要的。金属物理的主要任务之一是确定金属结构与塑性性能之间的关系和研究多晶体的塑性变形机理。

⊖ 略去了原文开头的两句。——译者注

一系列合金在一定条件下出现的超塑性效应对进一步解决塑性课题来说是相当有利的。超塑性这个名词可以理解为金属和合金均匀变形百分之几百或百分之几千而不发生破坏的能力。此术语是由包赤瓦尔 (А. А. Бочвар) 提出的, 他以此来说明 1946 年在 Zn-22%Al 合金上发现的不寻常的极大且均匀的延伸〔8、9〕。

最近几十年来出现了大量研究超塑性变形的文章。同时也弄清楚了与超塑性效应有关的各种因素: 原始结构及其在塑性流动过程中的变化和变形时的温度-速度条件。

但只是在最近几年才得以根据超塑性效应的表现, 划分出两大类: 1) 具有典型的显微组织, 即稳定的超细晶粒 (结构超塑性); 2) 变形过程中发生相变或其它组织变化的金属和合金〔10〕。

对于第一类材料特别感兴趣, 因为这种超塑性可以不作为一种个别现象, 而作为材料的某种状态来研究。

在此基础上可以研制出提高工业用合金, 其中包括难变形合金塑性的方法。因此, 迫切需要进一步研究原始组织 (晶粒尺寸, 织构)、成分和变形时的温度-速度条件对金属和合金塑性性能的影响。

为了探讨调节工业用合金与金属塑性的原则, 关键是要知道实现金属超塑性效应的变形机理。一般在 $T \geq 0.4T_{\text{熔点}}$ 和一定的应变速度 ($10^{-4} \sim 10^{-1} \text{秒}^{-1}$) 的热变形条件下出现结构超塑性。在此条件下, 在超细晶粒组织的材料中原则上可能有多种变形机理起作用: 扩散蠕变, 晶界滑动, 位错滑移及一系列在变形过程中伴生出的变形机理, 例如晶界迁移等。而且, 实际上不可能在缺乏实验数据的情况下武断认为主要的变形机理或是几种机理的综合变形机理可以保证超塑性流

动。关键是要要求这些数据是在研究不同组织金属在各种变形温度-速度条件下的变形机理时直接获得的。显然，对于探讨多晶材料的塑性和超塑性的物理理论来说，这类研究是完全必要的。由于传统的试验方法对于超细晶粒材料的研究没有多大成效，因此，只是在60年代中期，由于塑性变形研究方法的迅猛发展，如衍射显微镜，显微X光谱分析，扫描电镜，X光结构分析等，才有了研究超塑性变形机理的现实条件。

相变超塑性的研究要少得多。目前仅积累了很有限的关于这类变形时的外部特征的资料，实际上尚缺乏金属在这种条件下的变形机理特点的实验数据。因此，关于这类现象本质的所有概念，至今仍在争议中。

对于超塑性现象表现出很大兴趣的主要原因之一是由于工艺上应用了此现象，并获得了初步成效^[10、11]的缘故。

工艺上应用超塑性的主要优越性在于能极大地挖掘材料塑性潜力和大大降低变形力。由于实际上金属的压力加工主要是在压应力状态下进行的，则在大多数情况下，对于降低变形力感兴趣。在这种情况下可以降低所需变形设备的功率、作用在工模具上的负荷和它的磨损。因而工业界不仅对超塑性材料的应用感兴趣，还对提高一般工业用金属和合金塑性的方法感兴趣。只有在掌握了超塑性效应本质的基本规律时，才能在这方面获得显著的成就。

第一章 塑性唯象学和变形机理

塑性由多种因素所决定，一方面与材料结构和变形温度-速度条件有关，也就是具有固体结构敏感的性质；另一方面，还与应力状态及流变力学有关。关于应力状态的作用，可参考文献[12、13]。这些文献指出，在静液高压条件下，固体的塑性显著地提高。在这些研究成果的基础上就能进一步探讨低塑性材料变形方法[14]。在上述两种因素之间存在着一定的联系。因为，不论在哪一种情况下，塑性流动是通过一定的变形机理进行的。在全面压缩条件下，裂纹很难形成和扩展，因此塑性流动就能较充分地进行。

虽然这两种因素对于实现塑性变形来说都有很重要的意义[15]，但我们主要感兴趣的是它的物理本质，即塑性与显微组织和变形机理的关系。然而，由于高塑性意味着抵制形成缩颈的高稳定性，则为了了解这个过程的物理意义，首先要认真弄清楚唯象学参数对流动过程的影响[16]。

1.1 塑性唯象学

作为物理实验，很容易在相同的应力-应变状态下进行材料试验。通过拉伸试验可得到这种试验的最简单的图形。哈脱(Hart)在文献[17、18]中详细地研究了非常均匀流动的超塑性拉伸现象的唯象学。

被试验材料的真实塑性流动应力值 σ 在塑性流动过程中连续变化，且在恒温条件下与变形程度 ϵ 及应变速度 $\dot{\epsilon}$ 有关。

$$\text{设} \quad \sigma = f(\varepsilon, \dot{\varepsilon}) \quad (1)$$

则变形时流动应力的变化可写成

$$\frac{d\sigma}{d\varepsilon} = \frac{\partial\sigma}{\partial\varepsilon} + \frac{\partial\sigma}{\partial\dot{\varepsilon}} \cdot \frac{d\dot{\varepsilon}}{d\varepsilon} \quad (2)$$

$$\text{由此得} \quad d\sigma = \sigma_\varepsilon d\varepsilon + \sigma_{\dot{\varepsilon}} \cdot d\dot{\varepsilon} \quad (3)$$

根据哈脱〔17〕, 可以认为 σ 的微小变化与 ε 及 $\dot{\varepsilon}$ 成线性关系。因子 σ_ε 和 $\sigma_{\dot{\varepsilon}}$ 不只是偏导数, 同时也是表示材料流动的某种唯象学参数。

为了确定材料均匀流动的条件, 必需认真估算拉伸时横截面的变化, 因为

$$\sigma = P/A \quad (4)$$

式中 P —— 变形力;

A —— 试样横截面。

变形力随时间的变化可写成

$$\dot{P} = \dot{\sigma}A + \sigma\dot{A} \quad (5)$$

设试样塑性变形时体积不变, 则应变速度为

$$\dot{\varepsilon} = \frac{1}{l} \frac{dl}{dt} = -\frac{1}{A} \frac{dA}{dt} = -\frac{\dot{A}}{A} \ominus \quad (6)$$

将公式 (3) 除以 dt , 得

$$\dot{\sigma} = \sigma_\varepsilon \dot{\varepsilon} + \sigma_{\dot{\varepsilon}} \ddot{\varepsilon} \quad (7)$$

应用公式 (6)、以 A 和它的导数表示二次导数 $\ddot{\varepsilon}$ 和以公式 (4) 除公式 (5) 后得:

$$\frac{\dot{P}}{P} = -\frac{\dot{A}}{A} [1 - \gamma + m] + \left(\frac{\ddot{A}}{A}\right) m \ominus \quad (8)$$

⊖ 原文误为 $\frac{\dot{A}}{A}$ 。——译者

⊖ 原文误为 $\left(\frac{\ddot{A}}{A}\right)^2 m$ 。——译者

$$\text{式中 } \gamma = \left(\frac{\sigma_i}{\sigma} \right); \quad (9)$$

$$m = \left(\frac{\dot{\epsilon}}{\sigma} \right) \sigma_i \circ \quad (10)$$

方程 (8) 可以描述不同情况的拉伸试验并给出 γ 和 m 的物理意义。当应变速度为常数时 $\dot{l} = 0$, 则方程 (8) 成为

$$\left(\frac{d \log P}{d \log l} \right)_{\dot{l}=\text{const}}^{\ominus} = \gamma - 1 - m \quad (11)$$

分析参数 m 和 γ 的物理意义:

$$\gamma = \frac{d\sigma}{\sigma d\epsilon} = \frac{n}{d\epsilon} \quad (12)$$

式中 n —— 硬化系数

$$n = \frac{d \log \sigma}{d \log \epsilon} \quad (13)$$

因此, γ 表示变形程度变化时硬化系数的变化。同样,

$$m = \frac{\dot{\epsilon}}{\sigma} \cdot \frac{\partial \sigma}{\partial \dot{\epsilon}}^{\ominus} = \frac{d \log \sigma}{d \log \dot{\epsilon}} \quad (14)$$

参数 m 表示材料硬化与应变速度的关系。借助参数 n 和 m 写出方程:

$$\sigma = \text{const} \epsilon^n \dot{\epsilon}^m \quad (15)$$

此式即为众所周知的粘性-塑性物态方程^[16]。此方程的普遍形式为什维道夫-宾加姆 (Шведов-Бингам) 方程式。

材料发生变形强化时, 会有两种局部情况: 如

⊖ 原文误为 $\left(\frac{d \log P}{d \log l} \right)_{\dot{l}=\text{const}}$ 。——译者

⊖ 原文误为 $\frac{\partial \sigma}{\partial \epsilon}$ 。——译者

$$\sigma = \text{const} \dot{\epsilon}^m \quad (16)$$

则材料为粘性的，当 $m = 1$ 时，为典型的牛顿变形形式，即 σ 与 $\dot{\epsilon}$ 成正比。如

$$\sigma = \text{const} \dot{\epsilon}^n \quad (17)$$

则材料为理想塑性体，此时 σ 与应变速度的关系比由于变形程度增大而引起的强化关系要小得多，可以不予考虑。

上述各式仅适用于均匀变形情况。下面讨论此种变形的必要条件。显然，塑性流动过程中试样每一部位的截面可能不同，如果变形的条件能使各截面的差别不再增加，则此种变形为均匀（或稳定）变形。在均匀变形条件下，由于不存在局部变形和缩颈，材料就会呈现高塑性。

为了确定均匀变形的条件，就须计算横截面函数增量 δA 的变化速度 $\delta \dot{A}$ 。由于试样每一点上的 P 都是一样的，则微分公式（4），得

$$0 = \sigma \delta A + A \delta \sigma \quad (18)$$

按前述方法计算，得

$$\left(\frac{\delta \log \dot{A}}{\delta \log A} \right)_p = -(1 - \gamma - m) / m \ominus \quad (19)$$

$$\text{如} \quad \left(\frac{\delta \dot{A}}{\delta A} \right)_p \leq 0 \quad (20)$$

则为均匀变形。

由于拉伸时 \dot{A}/A 是负值，则当

$$\left(\frac{\delta \log \dot{A}}{\delta \log A} \right)_p \geq 0 \quad (21)$$

时能满足均匀变形的条件。用唯象学参数的术语来表示时，

⊖ 原书误为 $(1 - \gamma - m)/m$ 。——译者

相应的条件为

$$\gamma + m \geq 1 \quad (22)$$

显然，这种概念与理想塑性和理想粘性物体的经典概念一致。对于理想粘性物体来说，其 $m = 1$ ，即这种牛顿粘滞性材料具有极限的均匀性。由此概念可得出一个重要结果——普通塑性材料的极限塑性。对于这种材料来说 m 比 n 要小得多，其均匀变形的条件为

$$\gamma = \frac{n}{\epsilon} \geq 1 \quad (23)$$

由于一般的硬化系数值 $n = 0.2 \sim 0.5$ ，则这类材料的伸长率不大于 $\delta = 50\%$ 时便产生缩颈。由公式 (23) 可知，粘性流动时塑性可大大提高。由公式 (16) 和公式 (3) 的关系，可以得出非均匀性的扩展速度。

$$\frac{-dA}{dt} = \left[\frac{P}{K} \right]^{1/m} \left[\frac{1}{A \frac{(1-m)}{m}} \right] \quad (24)$$

方程式 (24) 可作图表示于图 1 [19]。显然， $m = 1$ 时，截面变化速度与它的不均匀性无关。 m 值减小时，与平均截面的差异将表现在拉伸时截面的变化速度上。并且 m 越小，局部不均匀的截面减小得越快。换言之， m 值可以表示材料产生缩颈的倾向性。此结果具有简明的唯象学解释。形成缩颈时，颈部的应变速度比试样的其它部位快，而在高应变速度敏感性情况时，这就造成颈部材料的硬化。

培考芬 (Backofen) [20] 最先指出了高 m 值与超塑性之间的关系。他在研究 Zn-22% Al 合金时发现， m 与塑性之间的关系与很多因素有关。

文献 [21] 从理论上较详细地讨论了各种 m 值材料流动的

唯象学。分析了带有均匀分布方形空洞的平面固体模型，这些空洞表现为应力集中区和缩颈源。已知模型的分析结果表明，只有当 m 值超过临界值时，才能产生超塑性流动。

文献[22]研究了由 520 个元件组成的试样变形模型，这些元件能沿各种方位滑移。电子计算机计算表明， m 值越高，截面变化速度越低，则该模型的塑性越高。试图创制能描述塑性的经验公式[23]：

$$\delta_{\max} \approx \left[\left(\frac{1 - \beta^{1/m}}{1 - \alpha^{1/m}} \right)^m - 1 \right] \times 100\% \quad (25)$$

式中 δ_{\max} ——最大伸长率 (%)；

α 和 β ——经验常数。

发现，此公式能圆满地描述 Pb-Sn 共晶体在不同 m 值情况下的塑性。莫利松 (Morrison)[24]应用此公式分析了试样大小和环形应力集中区对塑性的影响。计算所得的最大伸长值与实验数值相当一致。

然而应当指出，设想把 m 和 δ 值定量地在精确公式中联系起来，并没有得到多大进展。文献[25]分析了各种合金的 m 与 δ 之间的关系。其结果列于图 2。从图中可知，在各种合金中， m 与最大塑性之间存在着一定的相互关系。在一般

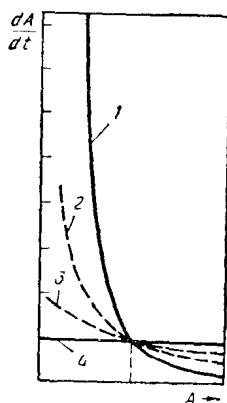


图 1 不同 m 值时，截面变化速度与 A 值的关系

1— $m = 1/4$ 2— $m = 1/2$ 3— $m = 3/4$ 4— $m = 1$

变形时, $m < 0.2$, 而在超塑性条件下 $m > 0.3$ 。因此, 高应变速度敏感性成为超塑性的必要条件之一。

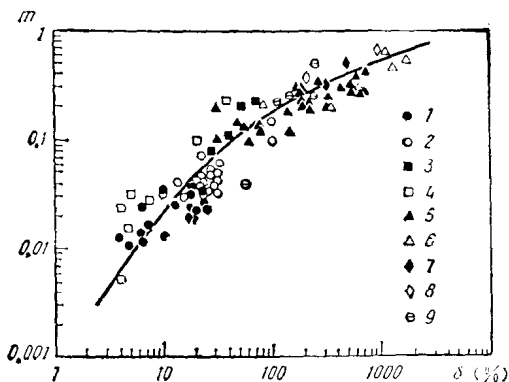


图2 各种合金的伸长率和 m 值之间的关系^[26]

- 1—Fe-1.3%Cr-1.2%Mo 2—Fe-1.2%Mo-0.2%V 3—Ni
4—Mg-0.5%Zr 5—Pu 6—Pb-Sn 7—Ti-5%Al-2.5%Sn
8—Ti-6%Al-4%V 9—铝合金-4(пиркалой-4)

然而 m 值不可能是塑性大小的唯一指标。因为在伸长率和 m 值之间, 并不总是存在着——对应的关系。某些情况下, 低 m 值的材料表现出相当高的伸长率。诚然, 伸长率本身也并不是塑性的很完善的指标。因为伸长率还和试样几何尺寸^[23, 24]及晶粒大小有关。

文献^[26]指出, 伸长率与晶粒大小有很大关系, 如晶粒度增大, 则甚至在 $m = \text{const}$ 时伸长率也会降低。有这样一些例子, 具有高应变速度敏感性的材料, 在不大的伸长率下断裂了^[24, 27]。这很可能是变形过程中结构发生了变化的缘故。 m 值至多只表示了获得高塑性的可能性, 而不是塑性的绝对值(见第二章)。