

超

塑

性

力

学

张德荣
理有亲

编译
审校

航空工业出版社

341506

超 塑 性 力 学

张德荣 编译

理有亲 审校



航空工业出版社

1990

内 容 提 要

本书主要论述恒温超塑性的条件及合金在超塑性状态下的力学特征,采用有关定律描述超塑性的三维理论,利用粘性蠕变断裂理论确定超塑性合金的成形极限,介绍超塑性状态下各种金属的成形方法、理论分析、实验数据,还介绍了超塑性挤压、拉拔、锻压方法以及非稳态反挤压的理论分析情况与实验数据。

本书还介绍了采用超塑性成形/扩散连接组合工艺将钛板制成结构件的理论与实验数据。

书后的附录具体分析了钛板超塑性成形以及应变速率优化控制情况。

本书可供工业大学金属加工专业作为参考教材使用,对工业部门,特别是航空、航天、造船工业部门从事金属工艺研究的广大读者也有一定的参考价值。

超 塑 性 力 学

张德荣 编译
理有亲 审校

航空工业出版社出版发行
(北京市和平里小关东里14号)
全国各地新华书店经售
航空工业出版社印刷厂

1990年1月第1版	1990年1月第1次印刷
787×1092毫米 1/16	印张:12
印数:1--2000	字数:210千字

ISBN 7-80046-178-5/Z·046

定价:7.80元

译 校 者 的 话

金属超塑性的应用已日趋广泛。在航空航天工业中，超塑性成形(SPF)技术，特别是超塑性成形与扩散连接(DB)的组合工艺(SPF / DB)的推广应用，尤其受到重视。甚至有人认为，在飞行器上有没有超塑性成形的构件，是目前衡量它在工艺上是否先进的一个重要标志。超塑性成形技术(包括SPF / DB)已在我国航空航天工业中开始研究，并在某些机种上获得实际应用。

超塑性力学对超塑性成形技术所起的作用，将象塑性力学对超塑性成形技术所引起的作用一样。然而，超塑性力学是诞生不久的一个应用力学分支，它还有许多处女地正等待人们去开垦。由于航空航天产品中薄壳结构较多，因而薄板超塑性气胀成形有着特殊的重要性，故在本书后面收进了与薄板气胀成形力学分析和优化控制有关的四篇文章作为附录，其中后三篇是译者编著的。这四篇附录在很大程度上可以弥补第四章和第八章在这方面的不足。

此编译本现在得以公开出版，是与航空航天工业部和航空工业出版社的大力支持分不开的。出版编辑为梅洲同志。在此，仅向有关同志致以衷心的感谢。

译校者

1988年10月4日

原 序

在一定的条件下,某些合金能够具有高达百分之几百或者更大的均匀延伸率而不断裂。这种现象称为超塑性。早在1934年,皮尔逊(C. E. Pearson)就研究过这种现象。那时曾把它看作实验室无法理解的异常现象。然而,在60年代,材料科学工作者重新对这个课题产生了兴趣,并着手研究用以成形难加工合金的工艺方法。两家英国公司,即英国勒兰德汽车公司(The British Leyland Motor Corporation)和里奥廷(The Rio Tinto Zinc Company),已经发展了一种商业上叫做普雷斯托尔(Prestal)的超塑性锌-铝合金,利用通常成形塑料的工艺,能够成形汽车车身外壳。

美国航空与航天工业的几个发展计划已经表明,超塑性成形与扩散连接工艺相结合,能制造复杂的钛合金零件,这些零件需作很大的延伸,因此不能用常规的工艺方法成形。这些计划还表明,与采用普通钛合金结构相比,可节约成本50%,减轻重量30%。

已经提出了几种关于超塑性合金的双相显微组织理论,但还没有一种得到公认。因此,本书要介绍的只是这个课题的唯象学研究。对此课题的物理基础感兴趣的读者,可参考现有文献。

与超塑性的金属物理学并行,超塑性的连续介质力学的研究也有很多进展。应用力学的这个分支的任务,就是对超塑性金属成形方法的各个方面,为工程技术人员提供一些进行估算的手段。本书试图介绍这个课题领域内的最新发展。

第一章介绍超塑性的简史,并说明恒温超塑性的条件和超塑性状态下合金的力学特征。第二章介绍单向应力下超塑性的幂定律(The Power Law)、阿弗里-贝可芬定律(The Avery - Backofen Law)、帕克-谢尔拜定律(The Packer - Sherby Law)和帕顿定律(The Paton Law)的本构方程,还介绍了帕克-谢尔拜定律的力学模型和实验数据。对于实际应用而言,重要的是能够用二维或三维的参数来分析成形过程。因此,本章根据工程上的一些假设,利用幂定律和帕克-谢尔拜定律,以方程式表达出一种超塑性的三维理论。当然,也能对其他定律同样地加以组合。

对于从事制造的工程技术人员来说,非常希望知道材料的成形性极限。为此,在

第三章应用霍夫 (N. J. Hoff) 的粘性蠕变断裂理论来确定:

- (1) 恒定拉伸载荷作用下圆棒的断裂时间;
- (2) 受恒定内压力作用的长管的断裂时间;
- (3) 受恒定内压力作用的球壳的断裂时间;
- (4) 受单面均匀压力作用的圆平板的断裂时间。

对于情形(4), 还提供了验证理论分析的实验数据。

确定超塑性合金的成形性极限以后, 下一步自然要研究自由成形的过程。因此, 超塑性板材用单面压力的吹塑成形法 (“撑压内形法”或“胀形法”) 就成为第四章的主题。这一章介绍了贾旺 (F. Jovane) 和霍尔特 (D. L. Holt) 的工作, 不但包括实验数据, 还包括理论分析。

在超塑性状态下, 金属的各种成形方法, 例如拉拔、挤压、锻压和轧制等等都具有明显的优点。它可使成形力降低, 工件的精度提高, 破裂减少。因此, 在第五、六、七章中, 分别介绍了超塑性挤压 (包括稳态正挤压和非稳态的反挤压)、拉拔和锻压方法。非稳态反挤压的理论结果与实验数据非常符合。

采用超塑性成形与扩散连接组合工艺 (SPF/DB) 将钛板材料制成结构件, 在美国工业中, 是一项热门的研究和开发课题。第八章的内容就涉及到这个专题的理论分析和实验证明。

S. 唐 (S. Tang)

目 录

第一章	绪论	1
第二章	本构方程	4
第三章	拉伸断裂	11
3.1	圆棒	11
3.2	薄壁管	13
3.3	薄壁球	14
3.4	圆薄板	15
(A)	分析法	15
(B)	试验	20
第四章	板材的单面压力吹塑	23
4.1	均匀厚度	23
第一种情况:	恒定压力	25
第二种情况:	恒定应变速率	26
第三种情况:	分段加载过程	29
4.2	不均匀厚度	36
4.3	薄板在 $90^\circ V$ 型槽内的吹塑	39
第五章	正挤压与反挤压	42
5.1	通过模孔口的稳态挤压	42
(A)	矩形孔	42
(B)	圆孔	44
5.2	非稳态反挤压	46
(A)	分析法	46
(B)	与实验结果比较	49
第六章	有干摩擦的拉拔	54
6.1	圆柱体	54
(A)	有摩擦的拉拔和挤压	54
(B)	拉拔和挤压应力	58
(C)	拉拔和挤压时间	59
(D)	容积流动速率	60
(E)	数字实例	61
6.2	通过楔形模的板坯	64
(A)	有摩擦的拉拔和挤压	67
(B)	应力和模具压力的分布	71
(C)	材料流动速率	72
(D)	数字实例	73

第七章	圆板的锻压	78
7.1	无侧胀的实心圆板——等摩擦	78
	(A)平衡法	80
	(B)功率法	81
7.2	无侧胀的实心圆板——干摩擦	83
7.3	有侧胀的实心圆板	89
	(A)分析法	89
	(B)数字实例与结论	93
7.4	无侧胀的空心圆板	97
	(A)分析法	97
	(B)数字实例	99
第八章	钛合金的超塑性成形与扩散连接	104
8.1	钛合金的机械性能	105
8.2	环形截面梁组合件的分析法	106
8.3	与实验数据比较	109
附录 I	钛板浅帽形件超塑性成形的分析	112
附录 II	深帽形件超塑性吹塑成形的力学分析	120
附录 III	杯形件超塑性成形的力学分析	142
附录 IV	板料超塑性成形的应变速率优化控制	165

第一章 绪 论

超塑性合金的延伸率能达到百分之几百甚至几千而不破断。尽管还不完全了解这种特性的缘由,但是许多合金的这种力学性质,以及超塑性发生的条件,则是人们所熟知的。

合金超塑性变形的最早发现者之一是皮尔逊。1934年,当他研究铅-锡合金和铋-锡合金的某些力学性质时,发现有些试样的相对均匀延伸率竟高达2000%。

1945年,苏联学者A. A. 包契瓦尔和3. A. 斯维德尔斯卡娅引入一个术语,并为其他一些苏联学者所沿用,通常把它译为“超塑性”。现在这个术语在冶金学词汇中似乎已得到确认,特别是温德伍特(E. E. Underwood)在1962年和达维斯(G. J.

Davies)等在1970年对这个问题作了详细的述评以后。

超塑性用在工业技术上有几种可能^[5]:

(1) 当材料处于超塑性状态时,它易于成形,例如,塑料工业中的真空成形法也可用于金属工业;

(2) 当超塑性加工得到用于低温的高强度、高韧性材料时,便可研制一些精巧的结构;

(3) 用于高温蠕变工作状态,此时,就象在辐射条件下一样,晶界的脆性断裂很重要。

有两种不同类型的超塑性^[4]:一种称为相变超塑性,即对材料施加应力,同时温度在材料的相变点温度上、下循环变化。这种超塑性还没有立即在工业上应用;另一种称为恒温超塑性(或微晶超塑性),它在金属成形工业中的实际应用,有着巨大的潜力。本书要讨论的,正是这一种。

合金的恒温超塑性条件包括^[4~7]:

(1) 几微米大小的极细晶粒;

(2) 温度高于二分之一熔点温度(按绝对温度计算);

(3) 最适宜的应变速率范围;

(4) 主要合金成分的强度相近,同样,各组成物的熔点也需相近。

恒温超塑性的力学性质具有如下的特点^[6]:

(1) 有应变速率敏感性;

(2) 无屈服应力;

(3) 无应变硬化。

而这本身就意味着巨大的均匀延伸率。所有这些性质与“传统的”金属塑性是完全不同的。

实现超塑性成形之后, 问题就成为在材料承受设计载荷时, 如何改变这些超塑性状态下的性质。有两种办法可以实现这个目标^[8]。首先, 选择出现超塑性的温度比其正常工作温度高得多的材料。在这种情况下, 材料经过变形其温度降到正常的工作温度以后, 超塑性消失, 材料性能与常规合金一样, 它恢复了正常的强度和刚度。另一种办法是在材料经过超塑性变形之后, 改变它极细的晶粒度。运用这些思路, 就能生产出象玻璃或塑料那样成形起来既方便又便宜的金属。

参 考 文 献

1. Pearson, C.E., "The Viscous Properties of Lead-Tin and Bismuth-Tin", Journal of Institute of Metals, Vol.54, 1934, p.111.
2. Bochvar, A.A. and Sviderskaia, Z.A., "Superplasticity Phenomena in Zinc-Aluminum Alloys", Izv Akad Nank, SSSR, Otdel Telch Nank, Vol.9, 1945, p.821.
3. Underwood, E.E., "Review of Superplasticity", Journal of Metals, Vol.14, 1962, p.914.
4. Hayden, H.W., Gibson, R.C. and Brophy, J.H., "Superplasticity Metals", Scientific Americans, March, 1969.
5. Sherby, O.D., "Strength, Deformation and Fracture", Lecture Notes, Stanford University, Autumn, 1969.
6. Backofen, W.A., Turner, I.R. and Avery, D.H., "Superplasticity in an Al-Zn Alloy", ASM Trans. Quarterly, Vol.57, 1964, p.980.
7. Avery, D.H. and Backofen, W.A., "A Structural Basis for Superplasticity", ASM Trans. Quarterly, Vol.58, 1965, p.551.

8. Chaudhari, P., "Superplasticity", Science & Technology Sept. 1968, p.42.
9. Davies, G.J., Edington, J.W., Cutler, C.P. and Padmanabhan, K.A., "Superplasticity: A Review", J. of Mat. Sci., Vol.5, 1970, p.1091.

第二章 本构方程

为了描述恒温超塑性的力学特征,文献中引用了实验的单向应力-应变速率关系式

$$\sigma = K \dot{\epsilon}^m, \quad (2.1)$$

式中 σ 为真实压力, $\dot{\epsilon}$ 为实际应变速率, K 是常数,而 m 是应变速率敏感指数(等于 $\sigma - \dot{\epsilon}$ 对数曲线的斜率)。

关于颈缩抵抗力与应变速率敏感性的关系的唯象学解释,已由贝可芬及其同事给出[1~2]。利用真实应力的定义

$$\sigma = P/A \quad (2.2)$$

(式中 P 为拉伸载荷, A 为圆柱体的真实横截面面积)和不可压缩材料实际应变速率的定义

$$\dot{\epsilon} = dl/l dt = -dA/A dt \quad (2.3)$$

(式中 l 为圆柱体的真实长度),再联立方程(2.1)、(2.2)和(2.3),可得到

$$\frac{dA}{dt} = -\left(\frac{P}{K}\right)^{1/m} \cdot A^{(m-1)/m} \quad (2.4)$$

显然,当 $m=1$ 时,即为牛顿粘性流动, dA/dt 与 A 无关,而细颈的发展极小。通常,对低应力和低应变速率而言,许多超塑性合金的 m 值在0.4到0.8之间变化;而对于高应力和高应变速率而言, m 值在0.2到0.25之间变化。某些超塑性合金的 m 值示于表2-1。

阿弗里与贝可芬[2]利用两个竞争过程来解释超塑性,其中每一过程都对总变形独立地作出贡献:一是位错通过晶粒的攀移运动,即方程(2.5)中的第一项;另一过程是一种引起粘性流动的晶内空位迁移,即方程(2.5)中的第二项。

$$\dot{\epsilon} = A \sinh(B\sigma) + C\sigma \quad (2.5)$$

帕克和谢尔拜也采用了这种方法[3,4],根据韦特曼(J. Weertman)的推证[5,6],提出了一个普遍的一维方程,来描述在一个大的应变速率范围内超塑性金

表 2-1 超塑性合金*

材料 (%重量)	m	温度 (°C)
铝-铜 (67-33)	0.7	500
铝-硅 (88.3-11.7)	0.5	550
铝-锌 (几种成分)	0.5~0.8	250 及以上
铋-锡 (几种成分)	0.5~0.7	30
铁-锰-碳 (97.68-1.9-0.42)	0.5~0.6	750
几种不同成分的钢	0.35	800~900
镍-铬-铁-钛-铝 (48.25-39-10-1.75-1)	0.5	900
铅-锡 (82.6-17.4)	0.5~0.6	100
铅-锡 (几种成分)	0.5~0.6	30
钛-铝-钒 (90-6-4)	0.6~0.7	950
钛-铝-钒 (90-6-4)	0.4~0.5	1000
锆合金-4	0.4~0.5	900

* P. Chaudhari, "Superplasticity", Science & Technology, page 49, Sept. 1968.

属的力学特征。

$$\dot{\epsilon} = \frac{A' \sigma^2}{L^3} + B' \sigma^2 \sinh (\beta' \sigma^{2.5}) , \quad (2.6)$$

这里 A' 、 B' 和 β' 是材料常数； L 是晶粒尺寸； σ 和 $\dot{\epsilon}$ 是真实应力和实际应变速率。方程 (2.6) 右边第一项考虑了再结晶或晶界迁移过程，该项在低应力和低应变速率下是重要的；第二项涉及位错攀移控制的蠕变过程，该项在高应力和高应变速率下是重要的。为了在物理上更形象化，方程 (2.6) 可用一个力学模型来代表，该模型包括两个不同的、串联在一起的非线性阻尼器 (图 2-1)。

由阿弗里与贝可芬以及克莱因 (H. E. Cline) 与阿尔登 (T. H. Alden) 在实验中观察到的铅-锡共晶合金的应变速率 $\dot{\epsilon}$ 和应力 σ 之间的关系，复制于图 2-2 上。

帕克和谢尔拜的方程(2.6)与这些数据吻合^[4] (图2-2中的实线), 材料常数在表2-2中给出。

这里必须指出, 帕克-谢尔拜定律, 即方程(2.6), 尚未被公认。

阿西拜 (M. F. Ashby) 与维洛 (R. A. Verrall) 发表了一篇论文^[8], 导出了一个扩散调节 (diffusion accommodated) 流动方程。所用模型建立在低应变速率下的晶粒转向机制与高应变速率下的幂定律蠕变 (位错蠕变) 模型相结合的基础之上。他们导出的方程十分复杂, 由帕顿 (N. Paton) 简化为如下的形式^[9]:

$$\dot{\epsilon} = K_1(\sigma - \sigma_0) + K_2\sigma^n, \quad (2.7)$$

式中 K_1 、 σ_0 、 K_2 和 N 都是常数。帕顿将这种形式的方程用于金属的高温流动, 发现由此得出的本构方程对于解决金属和合金在成形和锻造中的许多问题是有用的。

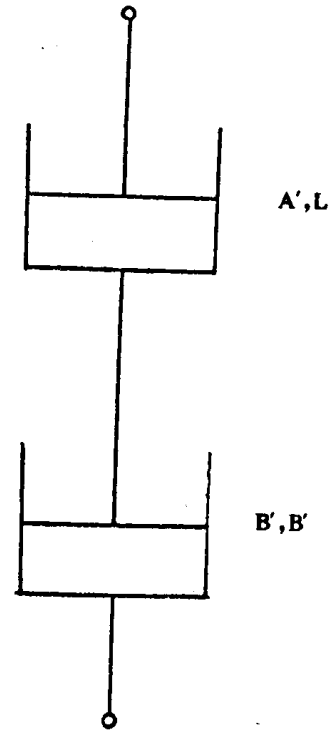


图 2-1 方程(2.6)的力学模型

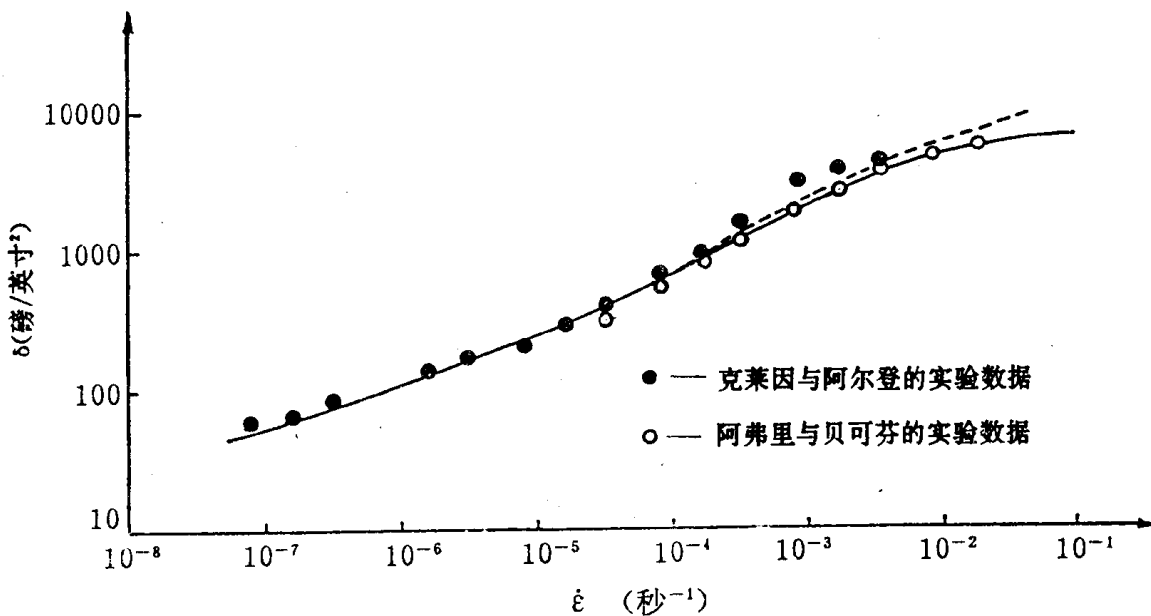


图 2-2 室温下铅-锡共晶合金的应力与应变速率的关系曲线

表 2-2 铅-锡共晶合金在室温下的材料常数

A'	1.8×10^{-22}	英寸 ⁷ /磅 ² -秒
B'	1.9×10^{-11}	英寸 ⁴ /磅-秒
L	1.0×10^{-4}	英寸
β'	1.1×10^{-9}	英寸 ⁵ /磅 ^{2.5}
K	1.0×10^4	磅/英寸 ² -秒

到目前为止，没有一个对超塑性状态下所有合金都适用的简单方程。在超塑性状态下，一些典型的应力与应变速率关系曲线示于图 2-3。基本的幂定律方程 (2.1) 对于分析 m 近似为常数的、小的应变速率范围内的成形过程，仍然是一个非常有用的工具。

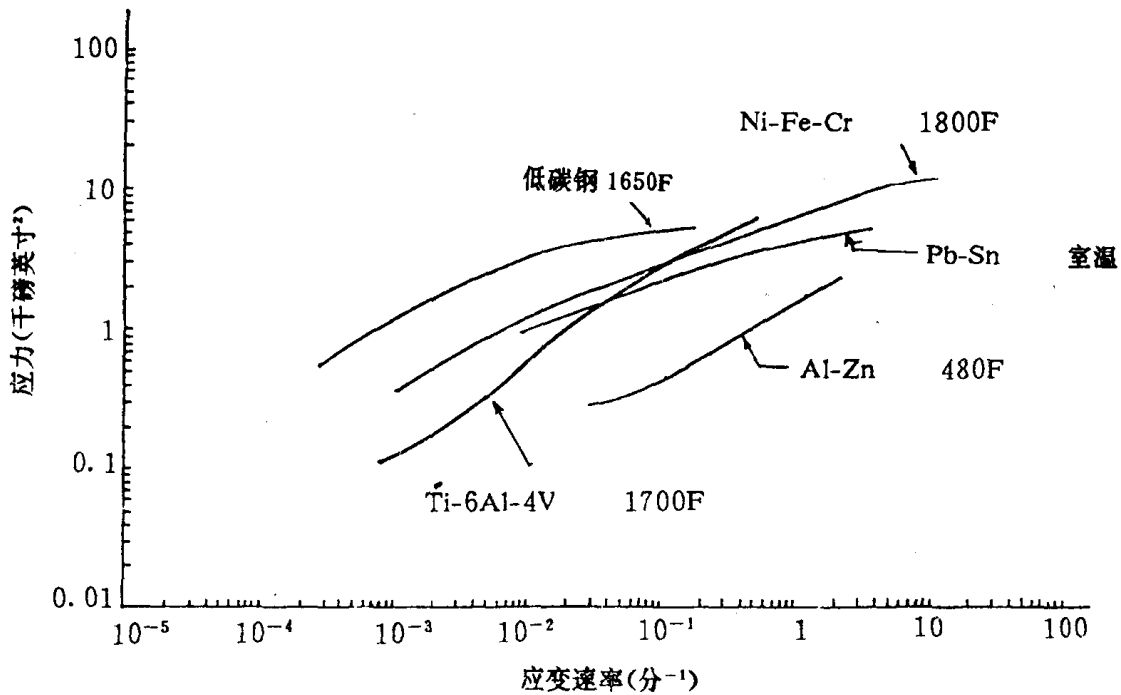


图 2-3 在超塑状态下金属的典型应力-应变速率曲线

对工程应用而言，重要的是将这种分析法推广到三维应力状态。仿效奥德奎斯特 (F. K. G. Odqvist) [10]，可对超塑性材料作如下假设：

- (1) 材料在超塑性变形时，体积不变；
- (2) 应变速率与附加的流体静压力无关；
- (3) 存在着一种流动势；

(4) 材料是各向同性的；

(5) 方程(2.1)适用于单向应力的特殊情况。

根据上述假设，方程(2.1)可以推广为下面的三维形式 [10]：

$$S_{ij} = \frac{2}{3} K (\dot{\epsilon}_e)^{(1-n)/n} \dot{\epsilon}_{ij}, \quad (2.8)$$

而相应的应变速率与应力的关系为

$$\dot{\epsilon}_{ij} = \frac{3}{2} \left(\frac{\sigma_e}{K} \right)^{n-1} \frac{S_{ij}}{K}, \quad (2.9)$$

式中 S_{ij} 是偏应力张量

$$S_{ij} = \sigma_{ij} - \delta_{ij} \sigma_{kk} / 3; \quad (2.10)$$

σ_e 是等效应力

$$\begin{aligned} \sigma_e &= [3 S_{ij} S_{ij} / 2]^{1/2} \\ &= [\sigma_{11}^2 + \sigma_{22}^2 + \sigma_{33}^2 - \sigma_{11} \sigma_{22} - \sigma_{22} \sigma_{33} - \\ &\quad - \sigma_{33} \sigma_{11} + 3(\sigma_{12}^2 + \sigma_{23}^2 + \sigma_{31}^2)]^{1/2}; \end{aligned} \quad (2.11)$$

$\dot{\epsilon}_e$ 是等效应变速率

$$\begin{aligned} \dot{\epsilon}_e &= [2 \dot{\epsilon}_{ij} \dot{\epsilon}_{ij} / 3]^{1/2} \\ &= (2/3)^{1/2} [\dot{\epsilon}_{11}^2 + \dot{\epsilon}_{22}^2 + \dot{\epsilon}_{33}^2 + 2(\dot{\epsilon}_{12}^2 + \dot{\epsilon}_{23}^2 + \dot{\epsilon}_{31}^2)]^{1/2}; \end{aligned} \quad (2.12)$$

δ_{ij} 是克隆尼克 (Kroneker) 记号 ($i = j$ 时, $\delta_{ij} = 1$; $i \neq j$ 时, $\delta_{ij} = 0$ — 译者注); n 与 m 的关系为

$$n = 1/m; \quad (2.13)$$

K 是材料常数; 而 $\dot{\epsilon}_{ij}$ 为应变速率张量。根据不可压缩的假设(1), 应变速率张量 $\dot{\epsilon}_{ij}$ 必须满足下面的条件

$$\dot{\epsilon}_{kk} = 0. \quad (2.14)$$

按照同样的方法, 也可将一维的帕克 - 谢尔拜定律推广为三维的关系式 [11]

$$\dot{\epsilon}_{ij} = \frac{3}{2} \left\{ \frac{A'}{L^3} \sigma_e + B' \sigma_e \sinh(\beta' \sigma_e^{2.5}) \right\} S_{ij}. \quad (2.15)$$

实际伸长应变或对数伸长应变与对数剪切应变的定义为 [12]

$$\varepsilon_i = \ln(1 + e_i) ; \quad \bar{\gamma}_{ij} = \ln(1 + \gamma_{ij}) . \quad (2.16)$$

式中 e_i 与 γ_{ij} 是按经典定义的应变

$$\left. \begin{aligned} e_i &= u_{i,i} , \quad \text{对 } i \text{ 不求和,} \\ \gamma_{ij} &= u_{i,j} + u_{j,i} . \end{aligned} \right\} \quad (2.17)$$

此处 u_i 是位移分量。

应当指出, 有时以物体尺寸的变化代替位移作为因变量会更方便一些。

就稳态过程而言, 与变形状态有关的应力平衡方程可以写成

$$S_{ij,j} + \delta_{ij} \sigma_{kk,j} / 3 + F_i = 0 . \quad (2.18)$$

将方程 (2.17) 代入方程 (2.16), 就得到六个应变 - 位移关系式, 加上六个 (原文误为三个 — 译者注) 本构方程 (2.9) 或 (2.15) 与三个平衡方程 (2.18), 就有对应于 σ_{ij} 、 ε_i 、 γ_{ij} 、 u_i 这十五个未知量的十五个方程。这十五个方程再加上适当的初始条件和边界条件, 就可以成为描述一种超塑性的三维理论。

参 考 文 献

1. Backofen, W.A., Turner, I.R. and Avery, D.H., "Superplasticity in Al-Zn Alloy", ASM Trans. Quart., Vol.57, 1964, p.980.
2. Avery, D.H. and Backofen, W.A., "A Structural Basis for Superplasticity", ASM Trans. Quart., Vol.58, 1965, p.551.
3. Packer, C.M. and Sherby, C.D., "An Interpretation of the Superplasticity Phenomenon in Two-Phase Alloy", Trans. ASM., Vol.60, 1967, p.21.
4. Packer, C.M., "Superplasticity in Metals", Ph.D. Dissertation, Stanford University, Dec. 1967.
5. Weertman, J., "Theory of Steady-State Creep Based on Dislocation Climb", J. Appl. Phys., Vol.26, 1955, p.1213.