


材料科学及测试技术丛书

金属的超塑性

何景素 王燕文 编著

科学出版社

1986



内 容 简 介

本书比较全面系统地论述了金属的超塑性,分析和讨论了金属超塑性的组织特点、力学特性、影响因素、变形机理以及相变超塑性等方面的问题,详细地介绍了几种主要超塑合金的制备方法和超塑特性.对于金属超塑性在压力加工、热处理和焊接等方面的应用问题也进行了介绍.

本书可供金属学、塑性加工、金属热处理和金属物理等方面的科技人员阅读,也适合于高等院校有关专业的师生和研究生参考.

金 属 的 超 塑 性

何景素 王燕文 编著

责任编辑 顾锦梗

科学出版社出版

北京朝阳门内大街137号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1986年7月第一版 开本:787×1092 1/32

1986年7月第一次印刷 印张:10 1/2

印数:0001—8,400 字数:237,000

统一书号:15031·726

本社书号:4270·15—2

定价:2.45元

材料科学及测试技术丛书

出版说明

材料科学是现代技术的基础，是具有全局性的重要科学技术领域之一。在国民经济和国防现代化的进程中，往往由于在某些领域中材料的限制而受到影响。因此，必须发展材料科学和工程，促进材料工业为各个部门提供充足、优质、符合各种要求的产品。出版这套材料科学及测试技术丛书，目的在于促进科学技术人材的培养，为提高我国材料科研工作和材料生产的理论水平、技术水平服务。本丛书从内容上分为材料科学与测试技术两部分。材料科学部分主要介绍金属、非金属及其他新型材料的研究成果、原理与理论；测试技术部分主要介绍上述材料的宏观和微观组织与结构的观测技术，也介绍有关性能测试和过程机理。读者对象一般为从事材料科学的科研工作者和从事材料生产、应用和测试的工程技术人员以及有关专业的高等院校师生。在编写方法上，我们力求从书能反映我国材料科学研究工作者和材料工程技术人员的实践经验与成就，以及他们在材料科学与工程技术方面的见解；同时也要反映国外的最新发展经验和成果。

通过丛书的出版，我们不仅期望对我国的材料科学与技术的发展能起到一定的推动作用，并且对材料科学与技术领域内的科技工作者有所启发，从而进一步写出反映我国科学技术水平和发展方向的专著，以满足广大读者的需要。

材料科学及测试技术丛书编辑委员会

1979年10月

前 言

金属的超塑性是指金属在特定条件下具有极大的均匀变形的能力。这种现象虽然早在五十年前已经发现，但深入的研究与取得较大的发展，还是近十多年来的事。大量的试验研究已经探明，出现超塑性的特定条件并不是特殊的孤立的情况，而有其本身的规律，即金属只要具有等轴的微细晶粒组织及适当的外部条件都可以实现超塑性。遵循这种规律，已相继研制出近二百种超塑性合金。其中一些金属（如铝基合金，钛合金等）已在实际中获得应用。

在过去，有关金属材料的研究往往侧重于强度的提高方面。可是在超塑性现象被发掘以后，一方面改变了人们对塑性极限的认识，同时也大大地促进了塑性领域方面的研究工作。

近年来，我国的科技界和高等院校等也积极开展了超塑性的研究，并取得了一定的成绩，为了配合我国超塑性工作的开展，特编此书以供读者参考。本书从宏观力学观点讨论了超塑性的变形特点，介绍了几种超塑合金，探讨了超塑性变形机理，还介绍了相变超塑性和超塑性应用方面的问题。

还应当提到，书中的许多实验数据是与北京机电研究所的海锦涛、谢芸青、孙尚臣、公方忠等工程师，北京市有色金属与稀土金属研究所的汤德芬、吕绍琦、穆志佩等工程师及北京市有色金属公司陈三山工程师等共同完成的，上述同志还在本书的编写过程中给予了协助；本书完稿后，承中国科学院金属研究所张永昌同志提出修改意见，特此一并表示感谢。

编著者

一九八三年十二月

目 录

第一章 概论	1
引言.....	1
1.1 金属超塑性的概念	3
1.1.1 大延伸	4
1.1.2 无缩颈	6
1.1.3 小应力	8
1.1.4 易成形	10
1.2 超塑性的分类	12
第二章 金属超塑性的力学特性	15
2.1 超塑性拉伸变形特性	15
2.2 超塑性变形的状态方程	16
2.3 应力与应变速率的关系——超塑变形的 S 特 性曲线	19
2.4 应变速率敏感性指数 m	22
2.4.1 m 与拉伸试样截面变化的关系	22
2.4.2 m 值与均匀变形的关系	23
2.4.3 m 值的测量方法	25
2.4.4 m 值和延伸率 δ 的关系	28
2.4.5 m 值与不均匀变形	32
2.5 典型超塑性合金(Zn-22%Al) 的变形行为.....	33
2.6 超塑性变形与蠕变	39
第三章 超塑性的影响因素	44
3.1 变形速度对有关参数的影响	44
3.1.1 应变速率对 m 的影响	46

3.1.2	应变速率对第 II 区有关参数的影响·····	48
3.1.3	关于黑色金属的 σ , m 与 $\dot{\epsilon}$ 的关系曲线·····	50
3.2	变形温度的影响·····	52
3.2.1	温度对 σ , m 及 δ 的影响·····	53
3.2.2	温度对 σ - $\dot{\epsilon}$ 及 m - $\dot{\epsilon}$ 曲线形态的影响·····	56
3.3	晶粒度的影响·····	59
3.3.1	晶粒度对 σ , m , $\dot{\epsilon}$ 相互关系的影响·····	61
3.3.2	σ , $\dot{\epsilon}$, d 之间的计算关系·····	64
3.3.3	晶粒度影响变形参数的原因·····	66
3.4	两相组织的影响·····	69
3.5	应变量对 m 值的影响·····	70
3.6	内应力的影响·····	72
3.7	应变硬化及应变软化·····	74
3.7.1	应变硬化·····	74
3.7.2	应变软化·····	76
3.8	晶粒分布的影响·····	80
3.9	其他影响因素·····	82
第四章	超塑合金(一)有色金属及合金的超塑性·····	83
4.1	Zn-Al 合金·····	86
4.1.1	Zn-Al 合金的化学成分与超塑性的关系·····	87
4.1.2	Zn-Al 共析型合金的转变·····	89
4.1.3	合金元素的影响·····	96
4.1.4	Zn-22% Al 合金的制备及超塑性获得的方法·····	98
4.1.5	Zn-22% Al 合金的拉伸试验·····	99
4.1.6	Zn-22% Al 合金的强化处理·····	103
4.1.7	Zn-22% Al 合金的时效·····	105
4.1.8	Zn-Al 合金的机械性能·····	112
4.2	铝基合金·····	116
4.2.1	Al-Mg-Si 系合金·····	118
4.2.2	Al-Mg 系合金·····	119

4.2.3	Al-Si 系合金	127
4.2.4	Al-Ca 和 Al-Zn-Ca 系合金	122
4.2.5	Al-Cu 系合金	125
4.2.6	Al-Cu-Zr 系合金	128
4.2.7	Al-Zn-Mg 系合金	138
4.2.8	Al-Zn-Mg-Cu 系合金	143
4.3	铜基合金	147
4.4	钛基合金	149
第五章 超塑合金(二)黑色金属及合金的超塑性		154
5.1	Fe-C 合金的超塑性	155
5.1.1	普通碳素钢的超塑性	155
5.1.2	超高碳钢的超塑性	160
5.2	低合金钢的超塑性	167
5.2.1	几种低合金钢的超塑性	170
5.2.2	低合金高碳铬钢的超塑性	173
5.2.3	Fe-Cr, Fe-Ni 合金的超塑性	186
5.3	不锈钢的超塑性	188
5.3.1	IN744 合金的超塑性	189
5.3.2	2Cr13 及 3Cr13 钢的超塑性	193
5.4	钢材获得细晶粒的几个途径	193
5.4.1	冶金学方法	193
5.4.2	压力加工方法	195
5.4.3	热处理方法	196
第六章 显微组织特征和变形机理		197
6.1	原始金相组织	197
6.2	变形过程中的组织变化	199
6.2.1	晶粒长大	199
6.2.2	晶粒边界圆弧化	200
6.2.3	动态再结晶	201
6.2.4	晶界折皱带	202

6.2.5	晶粒的滑动, 转动和换位	203
6.3	超塑变形机制的几种理论	207
6.3.1	扩散蠕变机制	208
6.3.2	扩散流动机制——Ashby-Verrall 模型	209
6.3.3	位错蠕变机制	212
6.3.4	晶界变形模型	213
6.3.5	晶粒转出模型	214
第七章	相变超塑性	216
7.1	相变超塑性的概念	216
7.1.1	相变超塑性的现象	216
7.1.2	相变超塑性的特点	217
7.2	相变超塑性的变形特性	218
7.2.1	循环加热时的尺寸变化	218
7.2.2	一次温度循环的应变	220
7.2.3	应力-应变曲线	223
7.2.4	相变超塑性变形时的应变速率	225
7.2.5	相变超塑性流动特性曲线	227
7.2.6	加热应变与冷却应变	231
7.3	几种材料的相变超塑性	234
7.3.1	GCr15 钢的相变超塑性	234
7.3.2	纯铁和碳钢的相变超塑性	235
7.3.3	马氏体转变时的超塑性	240
7.3.4	相变超塑性对组织变化的影响	241
7.3.5	相变超塑性的变形机制	247
7.4	相变诱发塑性 (TRIP 现象)	249
7.4.1	诱发马氏体转变	249
7.4.2	相变诱发塑性 (TRIP) 的特征	252
7.4.3	TRIP 现象的应变硬化	255
7.4.4	伴随马氏体转变的应变硬化计算公式	256
7.4.5	TRIP 的影响因素	258

7.5 其他类型动的超塑性	263
第八章 金属超塑性的应用	265
8.1 压力加工方面的应用	265
8.1.1 压力加工的基本条件	266
8.1.2 变形抗力与变形速度的关系	268
8.1.3 m 值在压力加工中的作用	270
8.1.4 挤压加工和锻造	272
8.1.5 气压成形	278
8.1.6 几种气压成形装置	280
8.1.7 成形实例	284
8.1.8 超塑性成形与扩散连结	284
8.1.9 无模拉拔	287
8.2 相变超塑性在热处理方面的应用	289
8.2.1 应用相变超塑性改善材质	289
8.2.2 相变超塑性在表面热处理方面的应用	292
8.3 相变超塑性在焊接方面的应用	293
8.3.1 相变超塑性焊接 (TSW) 的工艺条件	294
8.3.2 相变超塑性焊接的实例	295
8.4 相变超塑性在切削与切断加工方面的应用	299
8.5 TRIP 的应用	299
结语	302
附表 1 超塑合金一览表	303
附表 2 单位换算表	312
参考文献	314

第一章 概 论

引 言

金属的塑性即永久变形而不破坏的能力。塑性是金属的重要属性之一，它有如下的特点：

1. 塑性的大小，标志材料的变形能量储备，对同种材料来说，塑性愈高表示使用中愈安全。
2. 塑性标志材料的冶金质量，塑性愈好表示材料的杂质愈少，纯度愈高。
3. 塑性标志在压力加工中的变形能力，塑性愈高愈容易进行成形加工，愈容易制造形状复杂的零件。

可是在纯金属中除去极少数的几种贵金属如金、银、铂具有较高的塑性之外，一般工业用金属及合金的塑性都不够理想。一般金属材料的塑性指标以拉伸试验的延伸率 $\delta(\%)$ 计，不超过百分之几十，黑色金属不超过 40%，有色金属也不超过 60%，即使在高温情况下也难于达到 100%。为了提高金属的塑性，材料工作者采用了各种办法，包括材料的提纯，改变冶炼方式，锻造，热处理手段等，但都未能大幅度地提高塑性。据统计从 1928 年到 1969 年四十年间工业用金属材料平均延伸率的提高不超过 10%，常规的冶金学对塑性的提高并未取得引人注目的变化。

可是自从“超塑性”这个特性被发现以来，情况有了很大的变化。有的“超塑合金”在一定条件下做拉伸试验时，延伸率可以达到百分之几百，甚至百分之几千，变形抗力则很小，

其变形状态是巨大的宏观均匀伸长而且不产生缩颈。这种特异的巨大塑性使人们对金属的机械性能有了新的认识。

在超塑性 (Superplasticity) 这个名词出现以前, 1934 年英国 C. Pearson^[1], 对 Pb-Zn (Pb-37%) 合金及 Bi-Sn (Sn-44%) 共晶合金用很慢的速度作拉伸试验时, 得到了 1900% 的延伸率, 很奇怪的是这种慢速大延伸的金属, 在落地实验中又呈脆性断裂。其特性有如沥青, 这是一个重大的发现, 但在当时只在部分人中得到很高的评价, 如 Turner 教授说“本研究是一系列研究的第一步。” Desch 博士说“是十分宝贵的工作, 即使不符合粘性流动的理论公式, 也不要失望”。可是并未引起广泛的注意, 当时的有关文献只见到两篇^{[2][3]}。这可能有两个原因使这一项工作被搁置下来。一是第二次世界大战, 二是当时的塑性加工技术还不够发达。而且对金属材料的研究往往着重于提高材料的强度。直到战后这个被延滞多年的课题才活跃起来。

四十到五十年代, 苏联和西德对 Zn-Al 系合金进行了一系列研究。1945 年, 苏联 Бочвар^[4] 等用 Zn-Al 共析合金在高温拉伸试验中得到了异常高的延伸率, 并应用了“超塑性”(Сверхпластичность) 这个词汇。研究的合金包括 Zn-Al, Al-Cu, Al-Si, Al-Fe, Cu-Zn 及 Cu-Ni 等系合金。

1962 年美国 Underwood^[5] 发表了一篇评论解说性文章。从冶金学的角度分析了实现超塑性的可能性、条件及基本原理。人们评价这篇文章是超塑性研究的总结。从此引起了人们越来越大的重视。

1964 年美国 Backofen^[6] 对超塑性的力学特性进行了分析研究, 并提出了具有重要意义的超塑性敏感性指数 m 值及其测量方法。

60 年代末, 由于 Zn-Al 超塑性合金及其他超塑性合金

的问世,以及英国里兰德汽车公司制出 Zn-Al 合金整体小汽车上盖而轰动一时。同时西德、法国、加拿大等国亦从事了这方面的研究。日本在 70 年代才开始活跃起来。中国 70 年代初期也开始了研究,并取得了一定进展^[7-14]。

特别引人注意的是,近十几年来金属超塑性已在工业生产领域中获得了应用。一些超塑性的 Zn 合金、Al 合金、Ti 合金等正以它们优异的变形性能和材质均匀等特点,在工艺品制造,仪器仪表壳罩件和一些复杂形状的构件和航空航天部门的零部件生产中崭露头角。同时超塑性金属的品种和数量也有了大幅度的增加。除了早期的共晶、共析型金属外,还有沉淀硬化型和高级合金;除了低熔点的 Pb 基, Sn 基和著名的 Zn-Al 共析合金外,还有 Mg 基、Al 基、Cu 基、Ni 基和 Ti 基等有色金属以及 Fe 基合金 (Fe-Cr-Ni, Fe-Cr 等)、碳钢、低合金钢以及铸铁等黑色金属,总数已达二百多种。同时,相变超塑性也得到了发展。

在这期间,还进行了大量的关于超塑性机理方面的研究,提出了许多新的见解和理论,虽尚无定论,但将有助于进一步深入地了解超塑性的物理本质。

1.1 金属超塑性的概念

究竟什么是金属的超塑性呢? 定义是什么?

到目前为止,还没有从物理本质上来说明超塑性的确切定义。人们从各种角度区分塑性和超塑性。有人以变形量划分 ($\delta\% > 200\%$), 有人以应变速度敏感性指数 m 来划分, ($m > 0.3$ 为超塑性), 也有人以抗缩颈能力大小来划分, 总之还很混乱。为了叙述方便,基于它的宏观变形特性,金属超塑性可归纳为以下几方面的特点: 即大延伸、无缩颈、小应力、

易成形。

1.1.1 大延伸

所谓大延伸是指拉伸试验的延伸率可达百分之几百甚至百分之几千的变形。一般金属的变形能力很差的原因之一是宏观均匀变形能力差,容易早期出现缩颈,并由于缩颈的发展而导致早期断裂。虽然有些金属如软钢或部分有色金属的最大可能延伸率也可达到 100%,甚至 200%(以缩颈处最大变形能力计算)。而超塑金属的特点之一是宏观均匀变形能力极好,抗局部变形能力极大,或者说对缩颈的传播能力很强。

以 Zn-22%Al 合金所作的拉伸试验为例,试棒拉伸后可获得均匀的无缩颈的延伸(见图 1-1 及图 1-2)。

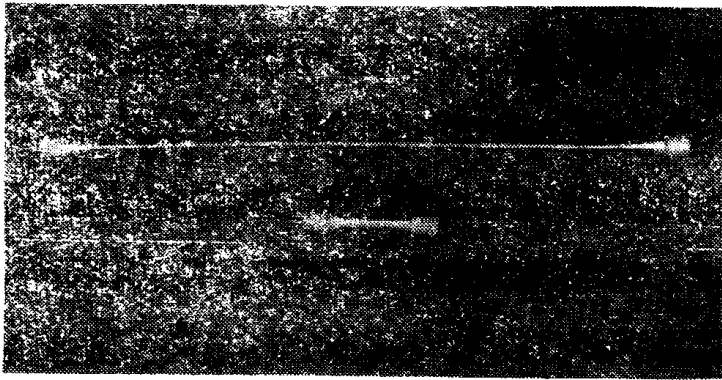


图 1-1 Zn-22%Al 合金超塑性拉伸的实物照片(圆形试棒)

上: 超塑拉伸试样

试验温度: 250°C, 拉伸机卡头速度: 5mm/min,

延伸率: $\delta > 1000\%$;

下: 原始试样

标距: $\phi 6 \times 30\text{mm}$

图 1-1, 1-2 为超塑拉伸后的试样状态,由于设备长度容量不够,试样未能拉断,未能取得最大延伸率。从变形状态观察,还未形成宏观缩颈。尚处于均匀变形阶段。



图 1-2 Zn-22%Al 合金超塑性拉伸的实物照片 (板材试棒)

上: 超塑拉伸试样

试验温度: 250°C , 拉伸机卡头速度: $5\text{mm}/\text{min}$,
延伸率: $\delta > 1700\%$;

下: 原始试样

标距: $1.5 \times 5 \times 20\text{mm}$

一般说来,拉伸试验的延伸率与试样型式有关,超塑合金基于其变形机制的特点,其延伸率与试样尺寸的关系也很大。如果用短标距板状试样可以得到更大的延伸率。如图 1-3 中所示,同样的 Zn-22%Al 合金采用短标距试样后,延伸率可

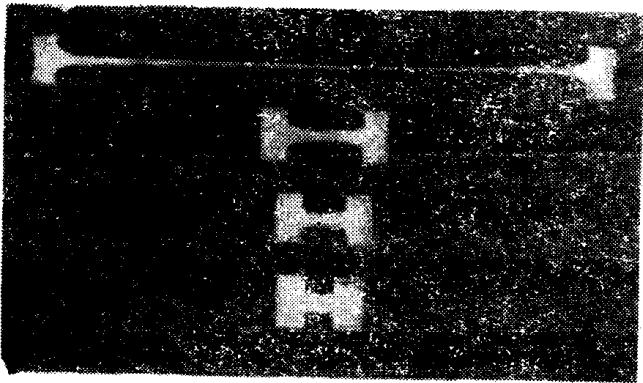


图 1-3 Zn-22%Al 合金板材短标距试样拉伸后的实物照片
(从上而下排列)

超塑拉伸试样: 试验温度 250°C , 卡头速度 $v = 5\text{mm}/\text{min}$;

粗晶粒拉伸试样: 拉伸温度 250°C ;

室温拉伸试样

原始试样: 标距 $2 \times 6 \times 10\text{mm}$

达 3120%。

另外从图 1-3 中可以看到小试样由于受肩部影响，平行部位仍未能充分变形。如以断口处截面计算延伸率，则最大可能延伸率超过 10000%。

除 Zn 基合金外，Al 基合金及 Ti、Cu、Mg、Sn、Pb 基合金等在超塑状态皆可获得很大的延伸率。

工业用轴承钢 GCr15 经超塑处理后，在 700℃ 拉伸亦可得到很大的延伸率。如图 1-4，最高延伸率可超过 500%，断面收缩率 > 90%。按断口处截面计算的最大可能延伸率为 1100%。

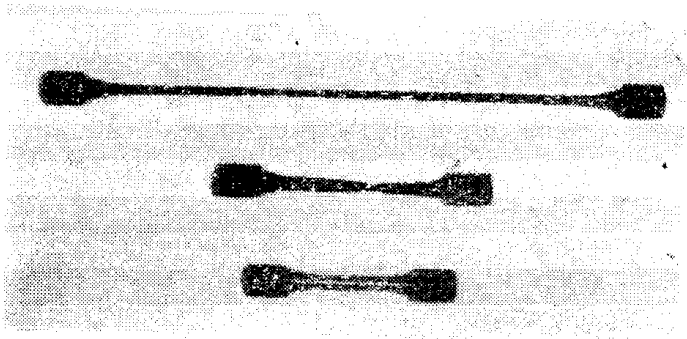


图 1-4 GCr15 钢拉伸后试样的实物照片

上：经超塑处理 700℃ 拉伸。 $\delta > 540\%$ 未断；

中：未经超塑处理 680℃ 拉伸。 $\delta < 100\%$ ；

下：原始样品： $\phi 6 \times 30\text{mm}$ 。

试验机卡头速度 0.5mm/min

1.1.2 无缩颈

一般金属材料在拉伸变形过程中，当出现早期缩颈后，则由于应力集中效应使缩颈继续发展，导致提前断裂。拉断后的样品具有明显的宏观缩颈。断口部位尚有相当尺寸的截面，但与均匀过渡变形部位的截面尺寸相差很大，因此变形梯

度是很大的。超塑性材料的变形却类似于粘性物质的流动，没有（或很小）应变硬化效应，但对变形速度敏感，有所谓“应变速度硬化”效应，即当变形速度增加时，材料会强化。因此，超塑材料变形时虽有初期缩颈形成，但由于缩颈部位变形速度增加而发生局部强化，于是其余未强化部分继续变形，若再形成缩颈，同样由于缩颈部位变形速度的增加而局部强化，这样便使缩颈传播开去，结果获得了巨大的宏观均匀的变形。因此可以说，超塑性的无缩颈是指宏观的变形结果，并非真的没有缩颈。例如有些试样在超塑变形时，由于材料或其它因素的不均匀性，也有可能形成几个初期缩颈，然而正是由于缩颈部位应变速度硬化效应而造成的传播作用，并不发生某一缩颈严重发展而导致早期断裂的结果。因此试样仍可获得带有几个缩颈的巨大的宏观均匀变形。产生超塑变形的试样，由于断裂不是由于缩颈严重发展引起的，所以断口部位的截面尺寸与均匀部位的相差很小，整个试样的变形梯度缓慢而均匀，对于典型超塑合金 Zn-22%Al 来说，断口部位可达到头发丝那样细的程度，此时断面收缩率 ($\phi\%$) 可以说接近于 100%。因此超塑材料的变形具有宏观“无缩颈”的特点，而这种无缩颈的均匀变形必然导致很小的断口截面。

这里应当指出，脆性材料也会是无缩颈的断裂，但在这种情况下，断口截面很大，其断面收缩率接近于零。

由于超塑性材料具有均匀变形的特点，为了能更好的表示材料塑性潜力及与非超塑性材料的区别，在计算 $\phi\%$ 时，除初始截面 A_0 及断口截面 A 外，可以引入一个新的参数，即均匀变形部位的截面 A_g 。这样对于不同类型的材料可表达如下：

脆性材料：

$$A \approx A_g \approx A_0$$

$$\phi(\%) = \frac{A_0 - A}{A_0} \approx 0\%$$

一般塑性材料:

$$A \ll A_g < A_0 \quad \phi(\%) \approx \text{百分之几十}$$

超塑性材料:

$$A \approx A_g \ll A_0 \quad \phi(\%) \approx 100\%$$

上面提到的一般塑性材料的断面收缩率为百分之几十, 在大多数情况下低于 60%, 即使高温下也难达到 90%。而对于超塑性材料, 我们认为有必要计算三种断面收缩率:

1 常规断面收缩率: $\phi = \frac{A_0 - A}{A_0} \times 100\%$

2 均匀截面收缩率: $\phi_g = \frac{A_0 - A_g}{A_0} \times 100\%$

3 比截面收缩率: $\phi_{0g} = \frac{A_g - A}{A_g} \times 100\%$

比截面收缩率 (ϕ_{0g}) 实际上是 ϕ 与 ϕ_g 之差, 可以看出 ϕ_g 增大时, 表示超塑性变形能力增大; ϕ_{0g} 减小时, 同时也表示了超塑性变形能力的增大。

1.1.3 小应力

由于超塑性金属具有粘性流动的特性, 在变形过程中, 变形抗力很小, 往往是非超塑状态下的几分之一或十几分之一乃至几十分之一。例如在最佳变形条件下 Zn-22%Al 的最大流动应力仅 0.2kg/mm² 左右, Ti-6Al-4V 合金的最大流动应力则仅 0.15kg/mm², GCr15 钢也仅 3kg/mm² 左右。但是, 前面已提到过, 超塑材料是速度敏感材料, 在相同的温度下, 变形速度的改变将明显地影响流动应力的改变。应变速率 ($\dot{\epsilon}$) 增大, 流动应力 σ 增高。几种超塑性材料的流动应力与应变速率的关系示于图 1-5^[15], 可以看到 Zn-Al 合金, 在