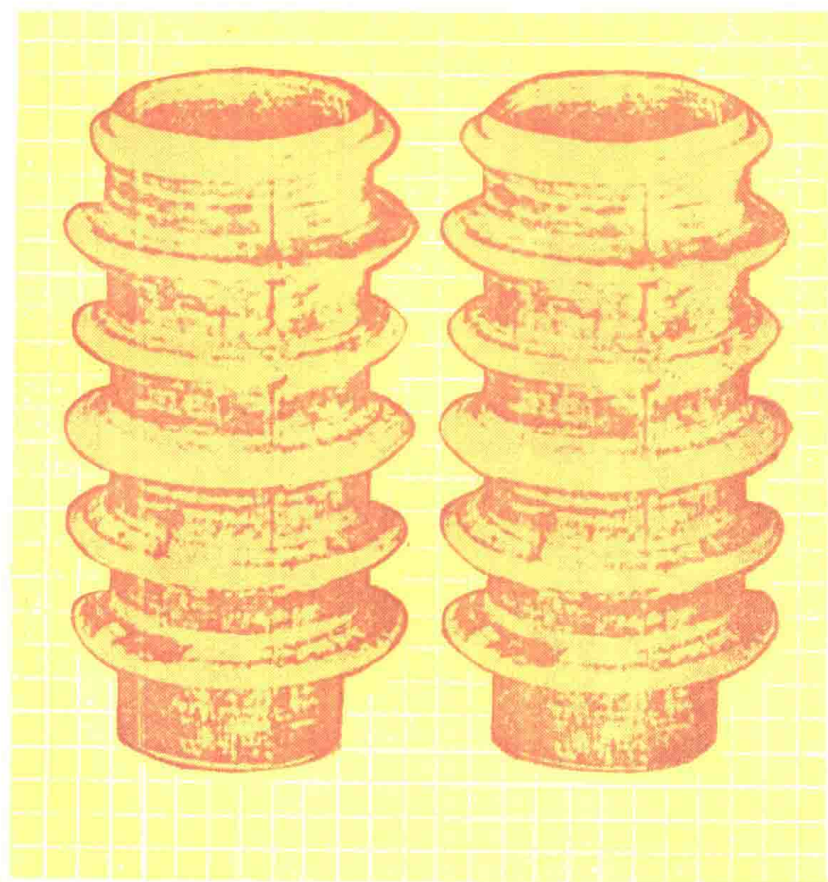


超塑性与 金属加工技术

〔日〕超塑性研究会 编



机械工业出版社

超塑性与金属加工技术

〔日〕 超塑性研究会 编

康达昌 等译



机械工业出版社

本书的前四章详细阐述了超塑性的基础理论知识及有关研究成果。后六章全面介绍了超塑性在各个金属加工领域（包括压力加工、铸造、焊接、粉末成形、机械加工、表面处理等）中的应用技术及有关应用研究的进展情况。

本书内容新、充实完备，它几乎汇总了世界各国，尤其是日本在超塑性研究方面的全部重要成果。

本书可供从事与金属材料有关的科研人员、工程技术人员及大专院校师生参考。

超塑性と金属加工技術

超塑性研究会 編

日刊工業新聞社昭和55年

* * *

超塑性与金属加工技术

〔日〕超塑性研究会 編

康达昌 等译

*

机械工业出版社出版（北京阜成門外百万庄南街一号）

（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 $87/8$ · 字数 191 千字
1985年11月北京第一版·1985年11月北京第一次印刷

印数 0,001—4,125 · 定价 2.15 元

*

统一书号：15033·6027

译者序

超塑性及其在金属加工中的应用，是近十几年内迅速发展起来的一种新技术。目前，超塑性技术虽在金属加工中尚未得到广泛的应用，仅适用于不太多的几种金属及其合金。但是由于它本身所具有的突出特点，即可得到非常大的塑性变形的同时，能在很低的应力作用下成形加工形状十分复杂的零件，在金属成形加工中已显示出很大的优越性，以致可以弥补其生产效率不高、生产用装置和操作都比较复杂等缺点。因此，超塑性技术的应用范围，正在逐步地扩展。

近来，我国在不到十年的时间里，在超塑性材料、变形机理、变形力学特性、塑性加工技术的研究与实用等方面，都取得了较快的进展。不仅对锌-铝合金超塑性材料及其塑性加工技术进行了广泛的研究，而且在铝合金、钛合金、镁合金、铜合金及各种钢铁材料的超塑性研究与实用技术方面也取得了十分可喜的成就。

本书内容丰富、全面，不仅包括超塑性材料、超塑性机理、超塑性材料的塑性加工技术，而且也详尽地叙述了超塑性材料的铸造、接合、切削、热处理与表面处理等多种技术，甚至还涉及到运用超塑性现象的研究成果和得到的基本认识，来解决焊接结构件的变形与开裂等十分新颖的概念。因此，本书的翻译和出版，将对我国从事超塑性研究与生产的人员是十分有益的，而且对这项技术的发展也会起到很大的促进作用。

IV

从 1979 年宫川松男教授（本书的主编人）来我国讲学时开始，中国和日本在超塑性技术方面不断地开展了学术交流活动。这本书的翻译和出版，可以使我国的学者更加具体和细致地了解国际上，尤其是日本学者的研究工作成果与学术观点。当然，这也是中日两国间在超塑性技术领域进行学术交流的一个十分具体而有效的方式。我们热烈地期待着本书能在上述各项工作中起到积极作用。

参加本书翻译工作的是：康达昌、杨玉英、于连仲、王典钧等，并由李硕本、陈祝同负责校阅。由于我们的学术水平及外语水平所限，翻译中难免出现一些不当或错误之处，请广大读者批评指正。

译者

序 言

在十多年以前就开始听到超塑性这个名词，而且有人认为超塑性的利用，可能引起金属加工技术的根本性革命。

从超塑性这个名词本身含义去理解，立即会想到它在塑性加工方面得到的应用是很多的。此外，在接合、切削、铸造、粉末成形、热处理与表面处理等方面将有着更加广泛的应用，而且在复合加工方面也开创了一条新路。

当一种新型材料出现时，常常由于其特点引人注目，而在实用的基础资料与数据尚不完备的情况下就企图先行利用它，以致在实用过程中出现不少的失败事例。超塑性技术在各种金属加工中的应用，也经历了类似的过程。

即使是在塑性加工和其他现行加工技术领域里比较容易地得到应用的微细晶粒超塑性材料，在加工过程中必须解决的问题也是大量存在的，如其制品不能充分满足强度与刚度方面的要求；其加工速度很难提高到适应于生产要求的程度；其最佳加工温度高，因而润滑等操作条件变得严苛；有因回复现象较大而必须特别注意解决产品的精度问题等。

所幸，上述各种问题中有些已得到解决，成功的加工实例也在逐渐增多。由于这些问题的解决，使这种新的金属加工法——超塑性的应用范围在不断地扩大。在这个过程中，金属学和机械学两方面研究人员与技术人员的密切配合，并从各种相关技术角度出发进行综合性研究与探讨是十分必要的。由于研究领域和研究目的不同、在获得资料与数据的方法

法、分析与得到的结论等方面，时常存在着较大的差别，所以研究成果的交流和学术讨论是十分有益的。

对有关钢铁、铜、铝及其合金等的广泛而细致的研究与开发工作，将有利于超塑性的应用。在从各种不同角度去说明超塑性现象、积累加工过程所需的资料和数据以及在各种加工领域中的应用等方面，都可望在更加广泛的研究与开发工作上取得进展。

在日本机械学会内设立“超塑性材料加工性能调查研究分科会”之后，即由有志于推进这项技术的人员建立了“超塑性研究会”，决定把迄今为止的研究工作成果收集起来，编写并出版《超塑性和金属加工技术》一书。

本书收集了1977年以前的有关超塑性方面的研究与开发工作动向和国内外所有主要文献及其内容说明。当前国际上尚未见到这样的书籍，所以它可以作为永久性文献而具有非常大的意义。

我们希望本书能够在今后的研究与开发的进程中起到重要的作用。

超塑性研究会

目 录

译者序

序言

I. 微细晶粒超塑性的机理	1
1. 现象上的特点	3
1.1 变形特点	3
1.1.1 应力-应变曲线	3
1.1.2 变形应力与应变速度的关系	4
1.2 金相组织	8
1.2.1 微细等轴组织	8
1.2.2 晶界滑移与晶粒转动	10
1.2.3 织构	11
1.2.4 有无位错活动	13
2. 有关超塑性现象的主要问题	17
2.1 宏观现象的综述	17
2.2 微观现象的综述	18
2.3 应变速度的依存性和巨大的延伸率	20
3. 机理	20
3.1 诸学说的概要	20
3.2 晶界滑移和伴随现象的机理	21
3.2.1 伴有扩散的晶界滑移	23
3.2.2 伴有位错的晶界滑移	26
3.3 不均匀变形和塑性稳定性	29
II. 微细晶粒超塑性力学	32
1. 超塑性现象的力学表示	32
1.1 超塑性指数	32

1.2 m 值的求法	36
1.2.1 速度变换法	37
1.2.2 蠕变试验法	39
1.2.3 各种测定方法的主要问题	39
2. 蠕变变形行为	40
2.1 定载荷的蠕变	40
2.2 定应力的蠕变	43
3. 高速拉伸的特性	46
4. 压缩特性	48
4.1 单向压缩特性	48
4.2 约束緻粗特性	53
4.3 高速压缩特性	54
5. 切口材料的拉伸特性	55
6. 超塑性变形的力学解析	57
6.1 拉伸时的塑性失稳	58
6.2 屈服条件	60
6.3 板材成形的变形解析	62
III. 微细晶粒超塑性材料	64
1. 合金成分及微细化处理	64
1.1 合金成分	64
1.2 微细化处理	65
1.2.1 共晶合金	65
1.2.2 共析合金	67
1.2.3 二相合金	71
1.2.4 粉末合金	71
2. 有色金属超塑性材料及其特性	73
3. 钢铁超塑性材料及其特性	78
4. 超塑性成形零件的性能	78
4.1 强度	78

4.2 抗腐蚀性	84
4.2.1 稳定电位随时间的变化	86
4.2.2 极化特性	86
4.2.3 腐蚀速度	87
4.2.4 腐蚀面及腐蚀生成物	88
IV. 相变超塑性及相变诱发塑性	92
1. 相变超塑性的基本特性	92
1.1 概论	92
1.2 一般特性	94
2. 钢铁材料的相变超塑性	94
2.1 纯铁及碳素钢	94
2.1.1 相变超塑性应变和应变速度	95
2.1.2 作用应力的影响	97
2.1.3 加热速度和冷却速度对加热应变和冷却应变的影响	98
2.1.4 相变超塑性流动曲线	100
2.2 铸铁	101
2.3 合金钢	102
3. 有色金属的相变超塑性	103
3.1 Ti-系合金	104
3.2 Al-系合金	104
4. 相变超塑性的理论	105
4.1 基于位错论的学说	105
4.2 粘性流动学说	106
5. 相变诱发塑性	107
6. 其他和相变超塑性类似的现象	108
V. 塑性加工	111
1. 一次加工(原材料的制造)	111
1.1 微细晶粒超塑性轧制及拉拔	111

X

1.2 微细晶粒超塑性挤压及锻造	120
1.3 相变超塑性轧制及拉拔	123
1.3.1 相变超塑性轧制	124
1.3.2 相变超塑性拉拔	125
1.3.3 相变超塑性微粗	126
2. 二次加工 (零件的制造)	127
2.1 微细晶粒超塑性合金的冷、温锻造及挤压	127
2.2 微细晶粒超塑性合金的薄板成形	134
2.2.1 真空成形和气压成形	135
2.2.2 冲压加工	145
2.3 管材的二次成形	155
2.3.1 胀形加工	155
2.3.2 无模拉拔加工	157
2.4 相变超塑性弯曲及成形	157
2.4.1 相变超塑性二次加工的几个问题	157
2.4.2 弯曲加工	158
2.4.3 扭曲加工	158
2.4.4 挤压成形	159
2.5 相变诱发超塑性二次成形	159
VI. 与铸造有关的技术	166
1. 微细晶粒超塑性材料的铸造及有关技术	166
1.1 坯料的制造方法	166
1.1.1 熔化和铸造方法	166
1.1.2 轧制加工法	168
1.1.3 晶粒细化处理	169
1.2 Zn-22Al 共析合金的铸造性能	170
1.3 铸造技术的应用	174
2. 相变超塑性在铸件材料方面的应用	174
2.1 灰口铸铁的相变超塑性和加工技术	175

2.1.1 灰口铸铁的相变超塑性	175
2.1.2 灰口铸铁的压缩加工	176
2.2 白口铸铁的相变超塑性和加工	178
2.3 球墨铸铁的相变超塑性和加工	179
2.4 与铸铁超塑性有关的其他问题	182
VII. 与接合、焊接有关的技术	184
1. 微细晶粒超塑性材料的接合	184
1.1 包铝超塑性材料	184
1.2 压接法	187
2. 在利用相变超塑性接合与焊接方面的应用	188
2.1 焊接中的相变超塑性	188
2.2 在压接中的应用	190
2.2.1 固相压接的基础与相变超塑性	190
2.2.2 相变超塑性压接的条件	191
2.2.3 实例	193
2.3 在熔焊中的应用	196
2.3.1 利用相变超塑性防止焊接裂纹	197
2.3.2 利用相变超塑性防止焊接变形	199
2.4 超塑性切断	199
VIII. 粉末成形	203
1. 微细晶粒超塑性材料的粉末成形	203
2. 相变超塑性和粉末成形	206
2.1 纯铁粉末的超塑性烧结	207
2.2 铸铁粉末的超塑性烧结及其他	209
IX. 切削和磨削加工	212
1. 切削和磨削时的特殊性问题	212
1.1 粘着性	212
1.2 剪应力与切削速度及温度的关系	213
1.3 振动的产生及防止方法	214

Ⅱ

2. 车削加工	215
3. 钻削加工	220
4. 磨削加工	225
4.1 砂带磨削	225
4.2 砂轮磨削	229
5. 高温切削时的相变超塑性	231
X. 表面处理	234
1. 微细晶粒超塑性材料的表面处理	234
1.1 电化学方法	235
1.2 化学方法	237
1.2.1 铬酸及磷酸盐处理	237
1.2.2 非电解镀镍-磷	239
1.3 涂漆	239
1.4 喷镀法等	241
1.5 压接法(金属包覆法)	241
2. 往一般材料上包覆微细晶粒超塑性材料	241
2.1 电化学方法	242
2.2 喷镀法	243
2.2.1 喷镀锌-铝合金	245
2.2.2 喷镀实例	245
2.3 热浸镀	246
2.4 喷射压涂法	247
附录(文献集览)	249

I. 微细晶粒超塑性的机理

在这一章里，叙述超塑性中关于微细晶粒超塑性的异常塑性所产生的特点、金属组织和变形行为，以及到目前为止已发现的几种超塑性机理。

超塑性产生的机理虽然还不十分明确，可是期望通过这一综述促进新的发展。

关于某种金属材料在低应力状态下变形，显示出异常大的塑性的报告，首先是 Rosenhain、Haughten、Bingham 等（1920 年）提出的〔1〕。他们发现如果将 Zn-Al-Cu 三元共晶合金脆性材料缓慢地弯曲成 180° ，即板材达到重合的程度也不破裂。虽然他们推断这种同加载速度密切有关的异常行为，是否是由于加工所生成的非晶质引起的，可是此后并没有见到进展。当时，除此之外，关于脆性材料的研究，还见到过两三份共晶合金的异常塑性和软化的报告，但是都只限于资料的提示。

Pearson 首先着眼于共晶合金的异常延伸进行了详细研究（1934 年）〔2〕。他提出出尽管是象坠落到坚硬地面上就能引起破碎的 Pb-Sn、Bi-Sn 共晶合金脆性挤压材料，用缓慢的拉伸实际得到的延伸率达 2000% 令人震惊的实物照片，并且公开发表了金相组织学的研究结果。而且明确地指出：异常延伸的材料具有异常微细的晶粒，在晶界产生滑移，尽管是巨大的延伸，但晶粒形状不发生变化。这种超出

常识的行为，当时引起部分人的极大反响，可是时值世界动乱的激烈动荡时期，材料的研究动向总的说来是服从于强韧化的方向。

把全世界卷入战火的第二次世界大战，终于在 1945 年结束了。当时以 Bochvar、Presnyakov 为首的苏联科学家们，采用“超塑性”这一新的称呼陆续公开发表了关于异常延伸的系统研究结果。他们从事研究的合金有 Al-Zn 共析合金、Al-Cu 共晶合金、四六黄铜，另外还有 Al-Si、Al-Ni、Al-Fe、Cu-Ni 等涉及范围很广，关于其机理提出各种学说。这些研究的集录^[3]于 1962 年由 Underwood 介绍，马上就引起欧美科学家们共同强烈的关注，并在各国进行活跃的研究。

作为致力于超塑性现象研究并在促进其发展方面作出巨大贡献的科学家，首先应该提到美国的 Backofen^[4]。他综览了苏联的一系列研究，注意到只是从“材料的强度”观点论述了超塑性，未进行对异常延伸的追求。这样，只从强度标准解释不产生细颈的异常延伸性质的说法，不合乎道理。为了不产生细颈，一定存在有某种“应变诱发的硬化”来抵消细颈部分的减弱作用。根据以往的研究资料，这是与应变速度依赖关系极密切的粘性的行为。因此，对抑制产生细颈起作用的硬化不是与应变速度有关吗？于是从借助于研究变形应力-应变速度的相互关系才可能揭示超塑性本质的观点出发，Nadai、Manjoine^[5]的应变速度敏感性的概念适用于超塑性现象。超塑性的异常延伸率与应变速度敏感性指数(m 值)显示出良好的对应关系，对于各种合金都业已明确。

另一方面，各种电子显微镜的发展，有可能进行微观的组织分析，即使是超塑性方面也形成了许多新的知识。其

次，位错理论的发展，促进金属塑性变形尤其是蠕变理论方面的发展。查对金相组织学、塑性学、力学各方面的研究成果，正在继续孜孜不倦地努力企图说明超塑性机理。然而至今其神秘的面纱，仍未揭开。

超塑性的特点是在低应力下显示出巨大的塑性。利用高压、高速或者超声波的叠加也可能增大塑性。但是，那是从外界供给多余的能量强制地使变形能力增大的结果，并非材料本身的塑性。即所谓超塑性是材料本身具有的内部因素和外界因素保持合理平衡的结果所产生的塑性，其实质最终是内、外因素协调的稳定状态的动态过程。

以上叙述了超塑性现象的发展背景，下面介绍超塑性现象的特点和主要问题，并概要地说明其机理。

1. 现象上的特点

微细晶粒超塑性的特点，在于异常的变形行为和组织上的变化。下边结合具体实例加以说明。

1.1 变形特点

1.1.1 应力-应变曲线 图 I·1[6] 是 Zn-22% Al 共析合金在 250°C 时的抗应力-应变曲线，以及组织和含 Mg 量对其影响的研究结果。图中符号 FC 表示材料随炉冷却呈现珠光体组织，不显示超塑

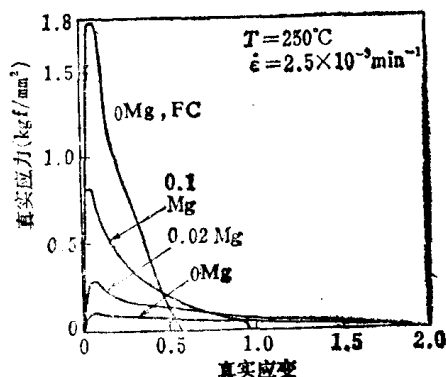


图 I·1 Zn-22% Al 共析合金在 250°C 时的拉应力-应变曲线 (竹岡、爱尔兰勒盖、和泉)

性。另外，含 Mg 量增加，使超塑性降低。不含 Mg 的材料经过快速冷却具有等轴的微细晶粒组织，在稳定的低应力状态下显示出无细颈的异常的延伸。这样的超塑性变形的应力-应变曲线的特点是低应力下的稳定状态变形，不产生加工硬化。

图 I·2〔7〕是相同 Zn-Al 共析合金的扭转试验结果，反映出扭转速度的影响。变形速度对超塑性变形有敏锐的影响，即使变形速度略微增大，变形应力（变形抗力）也要急骤上升。

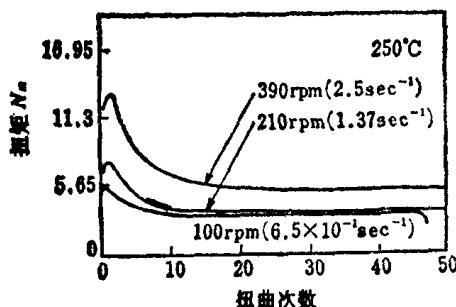


图 I·2 应变速度对 Zn-22% Al 共析合金在 250°C 时的扭矩-扭曲次数的影响 (Naziri, Pearce)

1·1·2 变形应力与应变速度的关系 如前所述，作为抑制产生细颈的主要因素，Backofen〔4〕引入了影响变形应力的应变速度敏感性指数 (strain-rate sensitivity index) m 值。稳定状态变形时，变形应力 σ 和应变速度 $\dot{\epsilon}$ 的关系用下式表示：

$$\sigma = K \dot{\epsilon}^m \quad (\text{I} \cdot 1)$$

式中 K ——常数；

m ——应变速度敏感性指数。

m 值越大，对应于应变速度的微小变化，变形应力 σ 的变化就越大。也就是说，如果产生细颈，由于细颈处应变速度 $\dot{\epsilon}$ 的增加，变形应力 σ 也急骤增加，从而阻止细颈的发展。 m 值的求法示于图 I·3。即把以速度 v 拉伸变形的试