

Zn-Al共晶合金 的 超塑性

李世春 著



石油大学出版社

国家自然科学基金资助项目

Zn-Al 共晶合金的 超 塑 性

**Superplasticity of Zn-Al
eutectic alloy**

李世春 著

石油大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

Zn-Al 共晶合金的超塑性/李世春著. —东营:石油大学出版社,1998.9

ISBN 7-5636-1135-5

I. Z… II. 李… III. 锌基合金:铝基合金-机械性能,超塑性 N.TG146.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(98)第 21062 号

Zn-Al 共晶合金的超塑性

李世春 著

出版者:石油大学出版社(山东 东营,邮编 257062)

印刷者:山东东营新华印刷厂印刷

发行者:石油大学出版社(电话 0546-8392563)

开本:850×1168 1/32 印张:5.625 字数:150千字

版次:1998年8月第1版 1998年8月第1次印刷

印数:1—500册

定价:18.00元

内 容 提 要

超塑性是一种普遍存在的物理现象,对超塑性进行原子和电子层次的研究不仅有希望从物理解释超塑性,而且还可以为超塑性的应用开辟新的领域。本书采用 SEM、TEM、DSC、X 射线衍射以及表面电镀和施加电场等多种实验方法,对 Zn-Al 共晶合金的超塑性进行了比较全面系统的研究。发现了超塑性的表面效应、量子效应和反常的电塑性效应。在表面能、晶界能和储能等概念的基础上,对超塑性进行了能量分析,根据非平衡态热力学理论,初步建立了超塑性的耗散结构模型。在将 EET 电子理论和 TFDC 电子理论沟通的基础上,分析了超塑性变形过程中电子和点阵的相互作用。

关键词:超塑性;耗散结构;电子理论;Zn-Al 合金;能量



作者简介

李世春,男,1956年生于山西。1976年任民办教师,1978年考入吉林大学物理系,主修物理学,毕业后任教于华东石油学院(即现在的石油大学(华东)),从事普通物理的教学工作。1985年考入吉林大学材料科学系,主修固体物理学,1988年获理学硕士学位。之后,于石油大学(华东)从事材料的教学与科研工作。1993年被晋升为副教授。讲授过“工程材料”、“金属物理分析技术”等课程。先后负责完成国家自然科学基金项目“超塑性的耗散结构模型和金属物理研究”以及山东省科委项目“稀土超塑性材料的研究”。

目前正从事“超塑性的电子理论”方面的研究,先后得到国家自然科学基金、中国石油天然气总公司中青年创新基金和山东省科委的资助。

在所从事的领域里,已发表论文30篇,出版著作2部。

前 言

超塑性的发现与发展来源于人们对几种共晶和共析合金的研究。共晶(包括共析)问题是金属材料最基本、最普遍的问题。到目前为止,人们共研究出了 900 余种二元合金相图,其中涉及共晶问题的就占 850 多种。另外,根据美国 Dialog 信息系统的检索结果,全世界每年涉及共晶主题的文章有 400 多篇。

共晶(共析)不仅对传统的钢铁材料至关重要,共晶问题还是新学科和新材料的生长点。例如,超塑性的发现与发展就与共晶、共析合金(Zn-22Al 、 Zn-5Al 、 Pb-62Sn 、 Bi-54Sn 等)密切相关。另外, Pb-Sn 共晶合金(焊料)被认为是未来超大规模集成电路元件之间直接对焊的关键性材料。

共晶问题的本质是相界面—异类原子的界面问题。因此,共晶问题的普遍性其实就是异类原子界面问题的普遍性。像有关缺陷、杂质以及复合材料的微观结构,其本质上都是异类原子的界面问题。

几年来,作者对 Zn-Al 共晶、 Zn-Al 亚共晶和 Zn-Al 过共晶合金进行了系统的研究,发现了超塑性的量子效应、表面效应和反常电塑性效应。这些发现丰富了超塑性的内涵。

本书虽然冠以《 Zn-Al 共晶合金的超塑性》的名称,但其内容已远远超出了现有超塑性的研究领域。例如,从表面效应的实验到超塑性的能量分析;从量子效应的实验到电子理论的应用;从反常电塑性效应的实验到电子与点阵相互作用的

分析;从巨大延伸率的获得到耗散结构的解释,等等。因此,内容丰富是本书的一个特点。

本书的另一个特点是实验数据(图表)详实。实验数据的获得,从时间跨度看,一般都经历了 5~8 年;从空间跨度看,本书的大量数据都是在北京一流的开放实验室获得的,而加电场的实验是在美国完成。

本书的第三个特点是新。除量子效应、表面效应和反常电塑性效应作为短论文分别发表外,其它所有的数据和结果均未发表过。因此,本书的基本内容都是第一次公诸于世。

此外,本书在绪论中提到一些超塑性研究的新课题,如岩石的超塑性,非晶态合金的超塑性,等等。对这些问题还没有进行详细的论述,只是给出有关参考文献,供感兴趣的读者去进一步查阅。

由于本书内容涉及面广,再加作者水平有限,难免有错误和不妥之外,敬请广大读者批评指正。

李世春

1998 年 4 月

目 录

1

绪 论	(1)
§ 1.1 超塑性研究概况	(2)
1.1.1 超塑性概念及其意义	(2)
1.1.2 超塑性拉伸的延伸率	(4)
1.1.3 材料超塑性变形的应变速率谱	(5)
1.1.4 超塑性的状态方程	(7)
1.1.5 超塑性变形的微观特征	(11)
1.1.6 超塑性的物理特征	(12)
1.1.7 小结	(15)
§ 1.2 超塑性 Zn-Al 合金研究简介	(16)
1.2.1 超塑性 Zn-Al 合金的种类	(16)
1.2.2 用 Zn-22Al 合金研究的主要超塑性问题	(17)
§ 1.3 超塑性研究的应用	(20)
1.3.1 结构性应用	(20)
1.3.2 功能性应用	(21)
§ 1.4 本书的主要研究内容	(21)

2

Zn-Al 共晶合金的超塑变形特性.....	(23)
§ 2.1 超塑变形力学.....	(23)
2.1.1 超塑拉伸的特点.....	(25)
2.1.2 超塑拉伸的 m 值	(27)
2.1.3 超塑变形的稳定性.....	(29)
§ 2.2 实验方法.....	(31)
2.2.1 恒速度拉伸试验.....	(31)
2.2.2 恒载荷拉伸试验.....	(31)
2.2.3 恒应力拉伸试验.....	(32)
§ 2.3 结果与讨论.....	(34)
2.3.1 m 值和粘滞流变	(34)
2.3.2 Al 含量对应变速率和应力的影响	(36)
§ 2.4 本章小结.....	(37)

3

Zn-Al 共晶合金的微观结构	(38)
§ 3.1 Al-Zn 合金相图与结晶分析	(39)
3.1.1 Al-Zn 合金相图	(39)
3.1.2 Al-Zn 合金平衡结晶分析	(40)
§ 3.2 试样制备与微观组织结构的研究方法.....	(43)
3.2.1 光学金相观察.....	(44)
3.2.2 准三维化学蚀刻和 SEM 观察	(48)
3.2.3 TEM 观察研究	(49)
3.2.4 其它研究方法.....	(49)
§ 3.3 实验结果与讨论.....	(54)

3.3.1 Al 相和 Zn 相的含量问题·····	(54)
3.3.2 Al 相和 Zn 相形态的拓扑关系·····	(56)
§ 3.4 本章小结·····	(57)

4

Zn-Al 共晶合金超塑性的表面效应 ·····	(58)
§ 4.1 超塑性的晶界滑移模型·····	(58)
4.1.1 位错调节的晶界滑移模型·····	(59)
4.1.2 扩散调节的晶界滑移模型·····	(60)
4.1.3 表面对晶界滑移的作用·····	(60)
§ 4.2 实验方法·····	(61)
4.2.1 表面着色和氧化·····	(61)
4.2.2 表面电镀·····	(63)
4.2.3 表面电荷·····	(63)
§ 4.3 结果与讨论·····	(64)
4.3.1 超塑变形和表面增加·····	(64)
4.3.2 表面对超塑变形的协调作用·····	(65)
4.3.3 镀层阻碍晶界滑移·····	(66)
4.3.4 表面电荷阻碍晶界滑移·····	(67)
§ 4.4 本章小结·····	(72)

5

Zn-Al 共晶合金超塑变形的能量分析 ·····	(73)
§ 5.1 晶界滑移的能量分析·····	(73)
5.1.1 断裂与表面能·····	(74)
5.1.2 断裂、塑性与超塑性 ·····	(75)
5.1.3 表面能和晶界能的估算·····	(76)

§ 5.2 空洞问题的能量分析	(79)
5.2.1 空洞形核	(79)
5.2.2 空洞的长大	(80)
§ 5.3 合金超塑变形的储能问题	(81)
5.3.1 储能与饱和变形	(81)
5.3.2 储能的计算	(82)
5.3.3 超塑性与储能	(85)
§ 5.4 本章小结	(89)

6

Zn-Al 共晶合金超塑性的量子效应	(90)
§ 6.1 合金电子理论	(91)
6.1.1 余氏经验电子理论	(91)
6.1.2 改进的 TFD 模型	(93)
6.1.3 EET 理论的多重解问题	(94)
6.1.4 从 EET 到 TFDC 的沟通	(95)
6.1.5 从 TFDC 到 EET 的沟通	(97)
6.1.6 EET 理论和 TFDC 理论的比较	(98)
6.1.7 本节小结	(99)
§ 6.2 X 射线衍射实验与结果	(100)
6.2.1 轧态试样的衍射结果	(100)
6.2.2 再结晶态试样的衍射结果	(103)
6.2.3 超塑变形态试样的衍射结果	(106)
§ 6.3 实验结果分析和讨论	(107)
6.3.1 各种结果的综合比较	(107)
6.3.2 晶胞原子数的测量与计算	(108)
6.3.3 对影响晶格常数各种因素的分析	(110)
6.3.4 TFDC 电子理论的解释	(112)

§ 6.4 本章小结	(113)
------------------	-------

7

Zn-Al 共晶合金反常的电塑性效应	(114)
§ 7.1 正常的电塑性效应	(114)
7.1.1 电流法电塑性效应	(115)
7.1.2 电场法电塑性效应	(118)
§ 7.2 反常的电塑性效应	(120)
7.2.1 实验设备与装置	(120)
7.2.2 实验材料与方法	(120)
7.2.3 实验的重复性问题	(121)
§ 7.3 实验结果和分析	(122)
7.3.1 低温区效应	(123)
7.3.2 高温区效应	(124)
7.3.3 临界区效应	(125)
7.3.4 其他问题	(127)
§ 7.4 本章小结	(129)

8

Zn-Al 共晶合金超塑变形的耗散理论	(130)
§ 8.1 超塑变形系统的特点及其描述	(130)
8.1.1 系统的特点	(130)
8.1.2 几个概念	(132)
§ 8.2 超塑性的耗散理论	(136)
8.2.1 能量密度	(137)
8.2.2 超塑性的耗散模型	(138)
§ 8.3 本章小结	(141)

参考文献.....	(142)
索引.....	(157)
致谢.....	(160)

Contents

Chapter 1 Introduction

- § 1.1 Review about research of superplasticity
 - 1.1.1 Concept of superplasticity and its meaning
 - 1.1.2 Elongation of superplastic tensile test
 - 1.1.3 Strain rates of superplastic deformation
 - 1.1.4 State equation of superplasticity
 - 1.1.5 Micro-characters of superplastic deformation
 - 1.1.6 Physical characters of superplastic deformation
 - 1.1.7 Summary
- § 1.2 Summary of superplastic Zn-Al alloys
 - 1.2.1 Superplastic Zn-Al alloys
 - 1.2.2 Research of superplasticity in Zn-22Al alloy
- § 1.3 Application of superplasticity
 - 1.3.1 Application in structure
 - 1.3.2 Application in function
- § 1.4 Research works in this book

Chapter 2 Superplastic deformation in Zn-Al eutectic alloy

- 2.1.1 Superplastic mechanics

- 2. 1. 2 Strain rate sensitive exponent
- 2. 1. 3 Stability of superplastic deformation
- § 2. 2 Experimental methods
 - 2. 2. 1 Tensile test at constant speed
 - 2. 2. 2 Tensile test under constant load
 - 2. 2. 3 Tensile test under constant stress
- § 2. 3 Results and discussions
 - 2. 3. 1 Value of m and viscosity
 - 2. 3. 2 Effect of Al on strain rate
- § 2. 4 Summary

Chapter 3 Microstructure of Zn-Al eutectic alloy

- § 3. 1 Phase diagram of Al-Zn alloy and crystallization
 - 3. 1. 1 Phase diagram of Al-Zn alloy
 - 3. 1. 2 Equilibrium crystallization in Al-Zn alloy
- § 3. 2 Specimen and method for microstructure
 - 3. 2. 1 View of optics metallograph
 - 3. 2. 2 Chemical etching and SEM analysis
 - 3. 2. 3 TEM analysis
 - 3. 2. 4 Other research methods
- § 3. 3 Experimental results and discussions
 - 3. 3. 1 The contents of Al phase and Zn phase
 - 3. 3. 2 Configuration of Al phase and Zn phase
- § 3. 4 Summary

Chapter 4 Surface effect of superplasticity in Zn-Al eutectic alloy

-
- § 4.1 GBS model of superplasticity
 - 4.1.1 GBS model with dislocation adjustment
 - 4.1.2 GBS model with diffusion adjustment
 - 4.1.3 Effect of surface on GBS
 - § 4.2 Experimental methods
 - 4.2.1 Coloured surface and oxidized surface
 - 4.2.2 Electroplated surface
 - 4.2.3 Charged surface
 - § 4.3 Results and discussions
 - 4.3.1 Increase of surface and superplastic deformation
 - 4.3.2 Adjustment of surface on superplastic deformation
 - 4.3.3 Effect of electroplated layers on GBS
 - 4.3.4 Effect of surface charges on GBS
 - § 4.4 Summary

Chapter 5 Energy analyses of the SP deformation in Zn-Al eutectic alloy

- § 5.1 Energy analysis of GBS
 - 5.1.1 Fracture and surface energy
 - 5.1.2 Fracture, plasticity and superplasticity
 - 5.1.3 Calculation of surface energy and grain boundary energy
- § 5.2 Energy analysis of cavitation
 - 5.2.1 Cavity nucleation
 - 5.2.2 Cavity growth
- § 5.3 Stored energy and superplastic deformation
 - 5.3.1 Stored energy and saturated deformation
 - 5.3.2 Calculation of stored energy

5.3.3 Superplasticity and stored energy

§ 5.4 Summary

Chapter 6 Quantum effect of superplasticity in Zn-Al eutectic alloy

§ 6.1 Electronic theory of alloy

6.1.1 Yu's empirical electron theory

6.1.2 Improved TFD model

6.1.3 Multi-solution of EET

6.1.4 From EET to TFDC

6.1.5 From TFDC to EET

6.1.6 Comparison of EET to TFDC

6.1.7 Summary

§ 6.2 Experiments of X-ray diffraction

6.2.1 Diffraction of rolled specimen

6.2.2 Diffraction of recrystallized specimen

6.2.3 Diffraction of SP deformed specimen

§ 6.3 Experimental results and discussions

6.3.1 Comprehensive analyses of the results

6.3.2 Measurement and calculation of the number of the
atoms in a cell

6.3.3 Factors of affecting lattice constant

6.3.4 Application of TFDC

§ 6.4 Summary

Chapter 7 Negative electroplasticity in Zn-Al eutectic alloy

§ 7.1 Electroplastic effect