

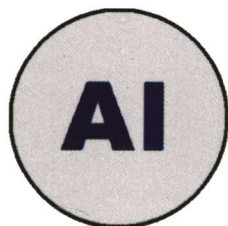
国家自然科学基金资助(50371059)

国家自然科学基金成果专著资助(50424101)

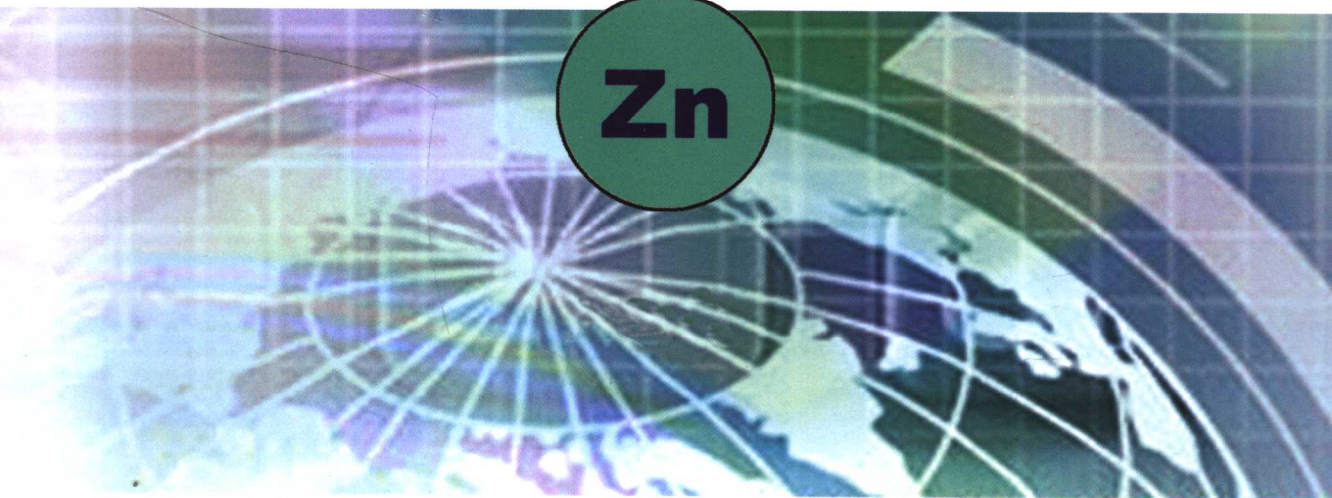
相界扩散溶解层

——Zn-Al共晶合金的超塑性

李世春 著



TFDC



中国石油大学出版社

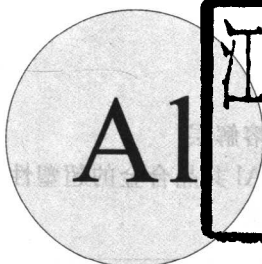
国家自然科学基金资助(50371059)

国家自然科学基金成果专著资助(50424101)

相界扩散溶解层

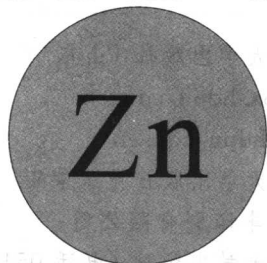
——Zn—Al 共晶合金的超塑性

李世春 著



江苏工业学院图书馆
藏书章

TFDC



中国石油大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

相界扩散溶解层:Zn—Al 共晶合金的超塑性/李世春著.

—东营:中国石油大学出版社,2006.6

ISBN 7-5636-2246-2

I. 相... II. 李... III. 超塑性合金-研究
IV. TG135

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 051767 号

书 名:相界扩散溶解层
——Zn—Al 共晶合金的超塑性
作 者:李世春 著

责任编辑:李 锋(电话 0546—8392791)

封面设计:任陆明

出 版 者:中国石油大学出版社(山东 东营 邮编 257061)

网 址:<http://cbs.hdpu.edu.cn>

电子信箱:bianwn@hdpu.edu.cn

排 版 者:中国石油大学出版社排版中心

印 刷 者:沂南县汇丰印刷有限公司

发 行 者:中国石油大学出版社(电话 0546—8392563)

开 本:180×235 印张:13.125 字数:256 千字

版 次:2006 年 7 月第 1 版第 1 次印刷

定 价:28.00 元

谨以此书献给我的导师——陈南平

下面讲述的是我如何得到“相界扩散溶解层”的过程。过程比结果重要,因为:过程孕育了思想,过程凝聚了精神,过程体现了方法。

素昧平生,登门求教

1991年12月11日下午,为了国家自然科学基金申请书的专家推荐信(我当时是讲师,申请国家自然科学基金必须要有高级职称的专家推荐),也为了我的超塑性研究,我徘徊在清华大学材料系(当时在平房)的周围,虽然材料系有那么多教授,但是我一个也不认识。在材料系办公室,作为陌生人,我拨通了陈南平教授家的电话(当时排在电话号码本的第一位),我说我从山东赶来,是搞超塑性的,希望能当面请教几个问题。当时我就得到了陈南平教授(我习惯称呼为陈老师)的邀请,到他家进行面谈。交流之后,陈老师把白秉哲(陈老师的第一个研究超塑性的博士生,现为清华大学材料系教授)的博士论文无限期地借给我。从此,我非常珍惜地保持着和陈老师的接触,1997年,我把埋藏在心里多年的想法(用我的超塑性研究在清华大学申请博士学位)告诉了陈老师,陈老师(此时已经退休)欣然答应给予支持,从此我正式拜陈老师为导师。陈老师和我素不相识,但是为了我的超塑性研究,也为了我以后的学术生涯,陈老师愿意帮助我,并且从此承担起为我修改论文的工作。因此,本书(主要内容是我的清华博士论文)也包含了我和导师陈南平教授十年交往的记录,就在我获得学位不久,陈南平教授不幸因病突然去世,在此我对导师深表怀念。

启蒙的超塑性研究

超塑性是我在吉林大学读硕士学位时选择的研究方向,进行超塑性拉伸研究不需要什么昂贵的设备,因此对我来说,超塑性是一个非常实际的研究领域。我是1985年开始读硕士研究生的,一年之后,国际上掀起了研究超导电性的热潮,国内对超导的赶时髦劲头比国外是有过之而无不及。当时很多大学的物理系、化学系和材料系都加入了超导研究的行列,有些中学也在搞。实际上,他们中的绝大多数所从事的工作是将一些氧化物(如氧化钇、氧化钡、氧化铜,等等)按一定比例混合后,经过压力成型,然后在炉子里烧结,和人们烧陶瓷差不多。

在超导热背景下,我选择了研究超塑性,超导和超塑都姓“超”,就是因为这个

“超”字,也着实让我分享着搞超导的人的快乐(实际是赶时髦的快乐)。与此同时,我也在考虑着另外一个问题,如何真正地通过一个样品把超导和超塑联系起来。后来知道,陶瓷也可以表现出1500%的延伸率,因此,超导陶瓷的超塑性也是一个研究课题。

超塑性是材料在一定的温度下能呈现出巨大延伸率的现象,其实际意义是可以应用到材料的塑性加工。我当时对超塑性的认识只局限在工业应用的这个层面上,这也是当时大多数人的看法。

我的硕士论文是要探索稀土对超塑性的影响,即通过在合金中添加稀土元素,达到改善超塑性的目的。1987年,在导师赵友昌副教授的指导和协调下,我参加了一个联合研究小组,我们的研究小组是由三家组成的,两家属于吉林大学材料系,一家属于中国科学院长春应用化学研究所,一家一个研究生。实际上,我的导师是搭人家的车,他们两家承担着一个吉林省资助的科研项目,主要研究添加稀土(RE)的Al—Zn—Mg合金的常规性能和应用问题,他们两家并不打算研究稀土对合金超塑性的影响。当时吉林大学和长春应化所都没有冶炼合金的设备,因此,我们需要找另外一家合作单位。考虑到冶炼工艺和实践经验,我们选择了北京航空材料研究所。

1987年,我们在北京航空材料研究所呆了2个多月,我们研究生自带行李,住在研究所的研究生宿舍,每天收1元钱。在两个月时间内,我们冶炼了一系列的Al—Zn—Mg合金,从不添加稀土,到添加质量分数为0.05%,0.1%,0.2%,0.5%和1.0%的稀土,共有6种,分别被加工成2mm厚的板材和直径为12mm的棒材。稀土的添加量是由承担“Al—Zn—Mg—RE合金”项目的两家课题组决定的,板材和棒材的尺寸也是根据他们的需要选择的。

6种合金共冶炼了300kg,每一种50kg。他们两家每种各分得25kg,我的导师从材料系那位老师手里分得每样10kg合金,以后的实验是自己干自己的。导师花钱冶炼合金并不是要完全用在我的论文上,以后的研究生还等着要用这些合金呢,因此,节约用料是我必须要考虑的前提原则。

返回吉林大学后,我先把少量2mm厚的板材加工(沿轧制方向切割)成标准的“工”字形超塑性拉伸试样,然后对试样进行各种各样的热处理,希望处理后的试样在拉伸时能呈现出超塑性。所有的板材样品,拉伸的延伸率都不超过100%,因此,根本不显示超塑性。为了进行最后的“挣扎”,我希望能垂直于轧制方向和与轧制方向成45°角来切割拉伸试样,当把这种想法告诉操作线切割机的师傅时,他坚决反对我的建议,说他切了一辈子样品,还没有碰上你这样的。这位操作线切割机的师傅是属于别的课题组,是那种不轻易改变主意的人。

切割样品是最关键的一个环节,也是进行超塑性拉伸的第一步。当时我也不知道2mm的板材究竟能不能呈现超塑性,因此每次切割样品时,数量并不大。然而操

作线切割机的人,希望每次切割的数量要多。我的样品数量不但不多,而且还要与轧制方向成一个角度,因此这位师傅不愿意干这种活。为了能随心所欲地切割样品,我开始用手锯、锉刀和小台钳来切割拉伸试样,后来的实验证明,我手工切割的试样和线切割机切割的实际效果完全一样。

经过 10 多年的体会,我感觉到手锯、锉刀和小台钳是研究超塑性的三件法宝,在全世界都通用。1995 年,在原中国石油天然气总公司“世行贷款”项目的资助下,我在美国北卡罗莱纳州立大学材料系 Conrad 的实验室呆了 10 个月,进行了加电场的超塑性拉伸实验,所有的样品都是我自己用手锯、锉刀和小台钳加工的。把实验数据写成论文,也能发表在国外刊物(*Scripta Materialia*)上。

手锯、锉刀和小台钳是我完成硕士学位论文的基本工具,它们能够使我迈出第一步,来实现自己的想法。无论我怎么处理,2 mm 的板材始终没有呈现出超塑性,最后我把希望寄托在直径为 12 mm 的棒材上。从中国科学院长春应用化学研究所的相关课题组获悉,中国科学院长春光机所有一台很老的前苏联造的轧机,管设备的师傅很愿意干零活,而且收费特别便宜。我每次处理两根棒材(15 cm 长),然后去光机所轧制,管轧机的师傅是真正地做到了不厌其烦,每次都能满足我的要求。12 mm 的棒材轧制成板材后,只有 12 mm 宽,而且边缘有许多轧制裂纹,然后我自己用手锯、锉刀和小台钳把这些用棒材轧制的板材加工成拉伸试样。

用手锯、锉刀和小台钳制备“工”字型拉伸试样,旁观者看起来似乎有点土气,但是我自己却有一些艺术享受的感觉。先把划好线的板材夹在小台钳上,然后用手锯开槽,最后用锉刀把样品的标距锉平。锯的动作属于粗加工,锉的动作属于精加工。拉伸样品被加工好后,固定到拉伸机的拉伸夹头上,等到温度达到预定的值时,就可以开始拉伸了。如果试样的延伸率能达到 100% 以上,就表明合金呈现出了超塑性。否则,合金就没有呈现出超塑性,再往下就没有什么研究工作可以做了。由此可见,Al—Zn—Mg—RE 合金能否呈现出超塑性,是论文工作的关键,而手锯、锉刀和小台钳能够保证及时加工出拉伸样品,然后让拉伸机检验合金是否能呈现出超塑性。

1987 年 11 月,我在吉林大学材料系的实验室苦苦地摸索着我的实验,离提交学位论文的截止日不到 5 个月了。当导师知道我还没有摸索出结果时,提醒我是否换一种合金,否则就来不及了。导师所指的那种合金就是 Zn—22Al,是我亲自从北京冶炼厂带回吉林大学的。Zn—22Al 是一种典型的超塑性合金,许多人都喜欢用这种合金来做文章。如果用 Zn—22Al 做学位论文,没有任何的风险,但似乎也没有多少新问题可供研究。

我面对着桌子上一堆拉伸过的 Al—Zn—Mg—RE 合金试样,它们的延伸率都没有超过 100%,再想想预定的学位论文题目《稀土元素对 Al—Zn—Mg 合金超塑性的影响》,真正感觉到欲罢不能,再进行也不知道方向在哪里。关于 Al—Zn—Mg—RE

合金能否呈现超塑性,我的摸索实验似乎到了山穷水尽的地步。

1987年12月中旬,经过三个多月的摸索,Al—Zn—Mg—RE合金终于在我的面前呈现出了超塑性。首先将棒材进行固溶处理(480℃保温2h),然后再进行过时效处理(350℃保温24h),将处理过的棒材在室温下轧制成2mm厚的板材,最后在480℃, 10^{-2} 的应变速率下拉伸,添加稀土的合金能呈现出750%的延伸率。这个实验结果奠定了我学位论文成功的基础,也为我以后的科学研究开辟了一小块领地。

1988年4月,我完成了硕士学位论文,题目是《稀土元素对Al—Zn—Mg合金超塑性的影响》,硕士论文的摘要如下:

“本文详细论述了Al—Zn—Mg—RE超塑性合金的制备及超塑性变形特性,研究了RE对合金微观组织和超塑性变形机制的影响。指出晶粒取向因素也是增强超塑性效应的重要条件。通过对铸态、再结晶态和超塑拉伸态的试样进行光学金相、定量金相、扫描电镜和X射线衍射等研究,揭示出RE对Al—Zn—Mg合金超塑性影响的因素。RE存在于Al—Zn—Mg合金的晶界处,改善了合金的晶粒尺寸因素和晶粒取向因素,增强了合金的超塑性效应。”

1988年6月,硕士论文答辩后,我回到了石油大学(华东)机械系金相教研室,从事工程材料的教学,同时参与实验室工作。当时为了实现能独立开展科学研究的愿望,我思考了很多问题,知道需要解决的问题还很多,例如,如何解决常用的基本设备问题,如何解决科研经费问题,最重要的问题是如何把握一个研究方向。

导师陈南平教授在世时非常看重我的硕士经历,而我的博士论文就是从我的硕士论文发展而来的。

“昨夜西风凋碧树,独上高楼,望尽天涯路”

1988年硕士研究生毕业后,我连做梦都在思考着这样的问题:如何将“超塑性”、“国家基金委”和“清华大学”联系起来,再后来又思考着如何从“超塑性”过渡到“TFDC电子理论模型”。回想过去的日子,招回了昨天的感觉:“昨夜西风凋碧树,独上高楼,望尽天涯路”。

我第一次请陈南平老师写推荐信是1991年,在此之前,我已经两次申请国家自然科学基金(未被批准),第一次申请是1989年,题目是“稀土元素对Al—Zn—Mg合金超塑性的影响”,这个题目和我的硕士论文的题目是一样的,申请书里的推荐信是请吉林大学材料系的哈宽富教授和吉林工业大学金属材料工程系的刘玉文教授写的,实际上推荐信是我在1988年6月研究生毕业离开长春时就请他们写好了。1990年的申请书没有写完。1991年申请书里的推荐信是找北京航空航天大学材料系的陈昌麒老师和北京航空材料研究所的刘伯操研究员写的,申请书的题目是“新型稀土铝锌镁超塑性合金的超塑机理及性能研究”(未被批准)。

1991年,当陈南平教授把他的博士研究生白秉哲的博士学位论文借给我时,我根据这本学位论文思考了两个问题:第一是清华大学博士论文的模式(内容和形式);第二是我的研究方向的侧重面(基础或应用)。我知道自己不可能得到关于超塑性应用方面(实际应用)的课题,因为应用性的课题涉及行业和部门以及基本实验条件的限制,因此,我搞超塑性似乎只能往基础研究靠拢,而国家自然科学基金就是专门资助基础研究的。此时,我朦胧地感觉到,“超塑性”、“国家基金委”和“清华大学”这些关键词可以联系在一起。第一步,我要用“超塑性”在国家基金委申请一个项目;第二步,我要用“超塑性”在清华大学申请一个博士学位。

1992年,我经过多次修改,向国家自然科学基金委员会提交了题目为“稀土提高合金超塑性变形速率的机理研究”的申请书,申请书里的推荐信是请清华大学的陈南平教授和北京航空航天大学的陈昌麒教授写的,这一次的申请书仍然没有被批准。这年的12月,我又开始准备第二年的申请书,由于申请书的题目变了,因此,申请书里的推荐信要重新写。考虑到我和陈南平教授已经见过两次面了,因此我没有打电话相约,径直来到陈老师家里,非常不巧的是陈老师正好要去医院看望病人,当我把来意说明后,陈老师又返回屋里,给我写了一个便条,让我去找北京机电研究所的白秉哲,从此,我认识了当时在北京机电研究所工作的白秉哲研究员。为了增加申请书被批准的几率,白秉哲同意作为合作者写进申请书里,他请所里的海啸涛研究员给我写了推荐信。这年10月,乘邓小平同志南巡的春风,在一家企业的资助下,我通过中国广播电视出版社出版了《魔方及其应用》,在国家基金的申请书里还特别提到了此书以及书里的相关内容。

1993年,我作为石油大学的讲师(硕士学位),终于申请到了第一个国家自然科学基金,项目的名称为“超塑性的耗散结构模型和金属物理研究”,研究期限是1994年1月—1996年12月。在我得到国家基金项目的时候,我被基金委材料科学一处推荐到我国“两弹一星”功勋科学家程开甲院士门下,学习TFDC电子理论模型。

1993年12月8日,在北京钢铁研究总院的一个会议室里,我见到了我国著名物理学家程开甲院士,并且在一起开了三天会(基金委工程与材料学部组织的“材料设计研究”集团管理项目研讨会),大家讨论的范围很广。程先生针对各种材料问题,反复强调量子力学的基本原理(有时强调第一原理)。从这次会议开始,我和程先生的学术合作和学术讨论一直延续到今天。程先生早年留学英国,曾经在玻恩(量子力学创始人之一,提出了波函数的统计诠释并且因此获得了1954年诺贝尔物理学奖)的研究小组学习和工作,程先生曾经是我国核试验基地的技术负责人,并且成功地用TFD模型估算出原子弹爆炸时冲击波对物质的压缩状态。

从1988年6月硕士研究生毕业开始,我独立从事科学研究就像是在黑暗中摸着石头过河,没有灯塔,没有向导,也听不到彼岸的声音。我希望生长在向阳处的肥田

沃土,承受阳光沐浴,细雨滋润。但是这样的条件似乎永远也得不到,因此,我只能让我的枝叶向光亮延伸,让我的根须努力在石缝中吸收水分。我相信春风春雨定会向我降临,我将是一枝骤然开放的迎春。

我得到的第一个国家自然科学基金就像是一场久旱的春雨,她透彻地滋润了我的学术根须,也修饰了我的枝叶。

1993 年底我被提升为副教授,从此写国家基金申请书再也不用求别人写推荐信了。可能是由于惯性的作用,也可能是一时的心血来潮,结果我于 1994 年又写了一个申请书,题目是“三维金相学研究”,非常感谢基金委材料科学一处的项目管理者 and 评审专家没有批准这个项目,否则就不会开辟出后来的研究方向。

“相界扩散溶解层”是我 12 年超塑性研究的总结,也是我以后关于相界面研究的开端,特别是异类原子之间的平衡问题,既可以应用 TFDC 模型,也可以切入到纳米材料领域,是一个既有容量又有深度的研究课题。从此,我再也不用为研究方向而徘徊和彷徨了。

12 年超塑性研究的体会是:科学思想是灵魂,设备和经费充其量只能算是皮肉,而科学精神却是骨头。

“衣带渐宽终不悔,为伊消得人憔悴”

我硕士研究生毕业,以石油大学讲师的身份,身处位于黄河尾部的东营市,从起步时我就知道,设备和经费的匮乏要使我受一些皮肉之苦,其副产品是能给我带来一些智慧,这是自然界的互补原理。我的第一个科研项目是为武汉钢铁公司钢铁研究所编写一个 ODF 的程序,经费是 1 000 元人民币。

在研究生阶段,导师给提供的设备条件不多,经费也不多,但是这些条件还是为我准备了一个温暖的研究“窝”,我在导师现成的“窝”里很容易下几个论文“蛋”。研究生毕业就相当于要出“窝”,我也没有条件赖在导师的窝里再多呆几年,当个硕士后,要多下几个论文蛋。

1988 年底,中国科协学会工作部组织全国 27 个学会在武汉召开材料研讨会,我把硕士论文的主要内容写成《稀土元素提高铝锌镁合金的超塑性及其机制》,由于时间问题,论文没有让导师过目,因此,这篇论文只署了我自己的名字。后来我和导师署名发表两篇,一篇是《稀土元素对铝锌镁合金超塑性拉伸的影响》,刊登在《稀土》1989 年第 1 期上;另一篇是《稀土元素对铝锌镁合金超塑性的影响》,刊登在《中国稀土学报》1990 年第 4 期上。经过两年的消耗,我攻读硕士学位时期积累的数据已经全部发表了,以后的文章怎么做啊?

前不见数据,后不见项目,念学术之悠悠,独怅然而志下。

1991 年冬天,我把超塑性研究干脆搁在一边,开始了另外一种探索,就是写一些

介于科学和人文之间的东西,后来选择曾经时髦过的智力玩具魔方作为载体,最后确定书名为《魔方及其应用》(以下简称为《魔方》)。

《魔方》完稿之际,正好是邓小平同志南巡之时,显然这是一种巧合,但是这种巧合为我在1992年出版《魔方》解决了经费问题。后来我把《魔方》作为名片来散发,大搞《魔方》“外交”,为我的超塑性研究鸣锣开道。

1991年12月,我到山东省科委工交处申请项目(递交申请之后去面谈),也可能是一种缘分,我和当时当家的工交处白一民处长海阔天空地谈了几乎一个下午,谈话虽然没有主题,但是字里行间却向这位领导渗透着我的观念。月底在北京出差,我又特意给这位处长寄了一个贺年片,贺年片的结尾写道:“只要资助5000元,我的超塑性研究就可以向前迈进一大步”。后来得到的结果是,这位处长和办公室的其他人商量之后,决定批准资助我2万元,从此我有了第一个所谓“省部级”的科研项目。

1992年,我带领两个本科生和一名教师到北京冶炼厂冶炼了一批添加稀土的Zn—5Al合金,参照1987年冶炼Al—Zn—Mg合金的稀土添加工艺,共冶炼了6个品种,每个品种100 kg。

同年,全国第一次掀起兴建高新技术开发区的热潮,从政策和文件看,超塑性也被列入到高新技术之列,这对我似乎又预示着一次机会的来临。我把我发表的关于超塑性方面的论文、山东省科委的科技合同以及国家关于高新技术的一些资料装订成册,分别交给学校主管校长和科技处处长,希望得到支持,结果得到了6万元的资助。当时的立项报告是想要开发一种产品,但是在风险一栏里写道:“即使有心栽花花不开,也必然会插柳柳成荫”。这句话的意思是,即使开发技术不成功,但是在基础研究方面也会有大的收获。

实际上我最想要的是一台超塑性拉伸机,因此,当务之急是制造一台拉伸机。因为我已经有了使用手锯、锉刀和小台钳制备试样的手艺,如果再有一台拉伸机,就可以大规模地开展超塑性研究了。为了实现这个愿望,我从1988年回到石油大学就开始做准备工作了。我们学校有一个废旧设备库房,我经常去光顾,偶尔能够拣到一些仍然可以使用的废旧设备,通过拆卸这些废旧设备,我学了不少机械和电器方面的知识,这为我设计和制造设备打下了成功的基础。

为了自己制造超塑性拉伸机,我先盖了一间平房实验室,因为我需要一定的场地,即一个临时车间。在临时车间,我和两个本科生干了三个月,制造了一台简易拉伸机(有些图纸是聘请一个教师画的)。我们使用的重要工具是一台钻床,共打了1500多个孔,使用变速自行车的轮盘和飞轮,组装成拉伸机的变速系统。2 m长的三段保温炉的炉膛是用4个箱式炉拼起来的,中间的两个固定在一起,两边各一个作为温度补偿,这样中间的恒温区就有1 m多长。

原来用于箱式炉的炉膛呈箱子状,炉膛的前面敞口,侧面是密封的墙壁,内设电

阻丝的孔道,炉膛的后面是墙壁,有一个供热电偶插入的圆孔。为了把4个箱式炉膛串接起来,必须要把每个炉膛的后墙壁打通。炉膛是陶瓷制作的,俗话说没有金刚钻,别揽瓷器活。现在是要把整个墙壁打通,而不是只钻一个孔。因此,搞到金刚锯似乎比造出拉伸机更难,最后我用了100多根普通的钢锯条把四个墙壁锯掉了。

首先把钢锯条穿到炉膛墙壁的热电偶孔里,然后把锯条固定在手锯架子上,固定好锯条后就可以开始锯了。钢锯条锯陶瓷,真有点赶鸭子上架。一根锯条来回锯不上十几下,锯齿就被完全磨损掉了,然后再换上一根新的,就这样锯四个炉膛消耗了100多根钢锯条。

恒温区有1 m,拉伸速度有15个档次的超塑性拉伸机终于制造成功了,第一次拉伸Zn—5Al合金试样,就得到了5000%的延伸率。

下面是12年发表的与超塑性有关的文章,但是没有一篇涉及“扩散溶解层”的概念。

1. 李世春. 稀土元素提高铝锌镁合金的超塑性及其机制. 新材料研究(下册). 中国科协学会工作部,1988:160
2. 李世春,赵友昌. 稀土元素对铝锌镁合金超塑性拉伸的影响. 稀土,1989,(1):22
3. 李世春,赵友昌. 稀土元素对铝锌镁合金超塑性的影响. 中国稀土学报,1990,8(4):332~337
4. 李世春,王彪. The Roles Played by Ce in the Superplastic Behavior of Al—Zn—Mg—RE. Second International Conference on Aluminum Alloys,1990:426
5. 李世春. 超塑性与耗散结构. 石油大学学报,1994,(3):125
6. 李世春,胡秀莲,刘润昌,等. 稀土对Zn—5Al合金超塑性的影响. 金属热处理,1995,(1):20~22
7. 李世春,胡秀莲,许英达. Rare Earth and Superplastic Materials. International Conference on Rare Earth Development and Applications,1995:107
8. 李世春,杨春松,白秉哲. Zn—5Al合金超塑性的表面效应. 材料研究学报,1996,(6):617~619
9. 李世春. Zn—5Al合金的反常电塑性效应. 材料研究学报,1998,12(3):314~316
10. 李世春,Conrad H. Electric field strengthening during superplastic creep of Zn—5Al: A negative electroplastic effect. Scripta Materialia,1998,39(7):847~851
11. 韩彬,李世春,胡秀莲. Zn—10Al合金超塑性变形的研究. 金属热处理,1999,(4):14~15
12. 李世春. Zn—5Al合金超塑性的量子效应. 自然科学进展,1999,9(6):552~

13. 韩彬,李世春,胡秀莲. Zn—2.5Al 合金超塑性变形的研究. 热加工工艺, 2000, (5): 13~14

“众里寻他千百度,蓦然回首,那人却在灯火阑珊处”

我是拿着自己先完成的博士论文初稿到清华大学申请学位的,而请导师完全是我自己的事情,因此,我拜请陈南平老师当我的导师,实际上是一种民间行为,完全不受什么行政的约束。

如果从第一次见面算起,我和导师陈南平老师的见面次数平均不到一年一次,但是我们合作的效果很好。众所周知,马克思是我们的伟大(革命)导师,但是我们一辈子也见不到导师一次面,因此,评价导师的作用不能简单用见面的次数来衡量。

还有一个更重要的问题,就是如何衡量导师的水平。我国古代衡量学术水平的基本工具是秤和尺子,汗牛充栋表达了秤的评价效果,而“读万卷书,行万里路”则表达了尺子的评价效果。我国古代用尺子和秤来衡量学术水平,这似乎反映了社会对学者的一种宽容。现在用字数来衡量学者的水平,如果真能做到精确地数文章的字数,这似乎也算是一种方法。可能是由于统计字数的人嫌麻烦,特别是碰到图表,还要计算,又显得很复杂。因此,现在比较流行的做法是数篇数,所以大家会常常看到某人某单位发表了多少篇论文,至于文章的“质量”和“尺度”就不提了,因为现在可能没有人会使用磅秤和尺子了。

我是凭着自己的感觉找到导师陈南平老师的,我希望导师能通读我的论文至少一遍,能够提出客观的综合评价意见,在此基础上,能给我提出实质性的宏观修改意见,在答辩时能帮我张罗,关键的时刻能为我撑腰。而我回报给导师的,第一是这本书,第二是清华大学学位办公室转发给导师的酬金(我总共向清华学位办交纳了 7 500 元)。

1998 年,我把论文初稿《Zn—Al 和 Al—Zn—Mg 合金超塑性的研究》,交到陈老师手里,恳请阅读并且提出修改意见,论文共 10 章:

第一章 绪论

第二章 Zn—Al 共晶合金的超塑性变形特性

第三章 Zn—Al 共晶合金的微观结构

第四章 Zn—Al 共晶合金超塑性的表面效应

第五章 Zn—Al 共晶合金超塑性变形的能量分析

第六章 Zn—Al 共晶合金超塑性变形后晶格常数的变化

第七章 Zn—Al 共晶合金反常的电塑性效应

第八章 Zn—Al 共晶合金超塑性变形的耗散理论

第九章 稀土对 Zn—Al 和 Al—Zn—Mg 超塑性的影响

第十章 结论

第一次陈老师并没有仔细阅读我的论文,因为从整体布局以及章节间的相互联系就能看出很多问题,因此,陈老师说论文整体就不能令人满意,必须要动大手术,作全面的修改。

根据导师的修改意见,我对论文进行了翻天覆地的修改,同时我也检索了导师的主要论著。意外的收获是,我在《中国科学》看到了一篇文章,题目是“质疑耗散结构理论”,作者虽然不是导师陈南平教授,但是文章的致谢表明陈老师帮助作者修改了文章(可以看出导师同意作者的观点)。导师质疑耗散结构,而我希望在学位论文里用耗散结构理论来解释我的实验结果,这显然有点矛盾。问题是我想坚持我的观点,而又不想和导师的观点发生碰撞,最少在字面上不能把这个碰撞反映出来。在定稿前,我主动和导师协商,我用“能量分析”来代替“耗散结构”,导师对此表示同意。

1999年,第二稿的博士论文完成了,导师看过后,同意我正式到学位办公室办理手续,但是对论文内容的连贯性仍然不满意。在导师出具书面同意的条件下,清华大学材料系的资格审查小组(5个教授)要求我就博士论文内容作一个报告,然后决定是否同意我申请学位。教授们提了好多意见,有的意见字面上看还有点苛刻。根据审查小组所提的意见,我对论文进行了为期一年的修改。

除修改博士论文外,我还要干另外一个国家基金项目,题目是“多层材料界面电子分布对材料性能的影响”,这个基金的申请书写了近一年,有30多页,主要内容是关于铺垫和发展“TFDC模型”的。项目是1998年申请的,这年基金委的《项目申请指南》里明确为“程氏理论”设立了一个重点项目,题目就叫“多层材料界面电子分布对材料性能的影响”,我申请的是“面上”项目,但是名称就照搬这个重点项目的题目,时间也是四年。

面对“多层材料界面电子分布对材料性能的影响”这个题目,我思考了两年,为什么要叫这个题目?参加这个重点项目的单位有四家,他们的共同兴趣究竟体现在哪个字或者哪个词上?这个重点项目暗中挂帅领衔的是程开甲院士,因为程先生是“程氏理论”的创立者,而其他三家单位的研究领域都侧重薄膜,薄膜都是一层一层地制备出来的。

真是两年寻思它千百度,蓦然回首,“层”字就在题目处。我思考了两年,想要找的答案原来就是一个“层”字。不但那三家单位都喜欢这个“层”字,程先生也特别喜欢这个“层”字,因为“层”字包含了“程氏理论”的一些内涵和外延。由于我从1993年就开始思考着如何从超塑性过渡到TFDC模型,过渡的关键是需要一个桥梁,而此时我豁然开朗,建立桥梁需要在这个“层”字上做文章。

2000年,我绞尽脑汁地把“层”字灌入到了我的博士论文,最终形成了“相界扩散

溶解层”的主题思想,贯穿整篇论文。第三稿的论文经陈老师修改后,成为最后的定稿论文(通过答辩后再没有修改),题目和目录如下:

《Zn—Al 共晶合金超塑性的研究》

第一章 引言

第二章 Zn—Al 共晶合金的超塑性变形特性

第三章 Zn—5Al 合金超塑性变形的能量分析

第四章 Zn—Al 合金超塑性变形前后的组织变化

第五章 Zn—Al 共晶合金超塑性变形的晶界滑移

第六章 Zn—Al 共晶合金超塑性变形的结构演化

第七章 Zn—Al 共晶合金负的电塑性效应

第八章 稀土对 Zn—5Al 合金超塑性的影响

第九章 结论

论文的详细摘要(原文)如下:

“超塑性是材料能呈现出巨大延伸率的一种能力,已成为被广泛关注的研究主题。超塑性已在工业上得到应用,但是,超塑性的物理机制在材料科学中仍然是一个具有挑战性的问题。本文选择 Zn—5wt%Al 共晶合金为主要研究对象,其延伸率可达5 000%,试样的绝对伸长量为 500 mm。对超塑性变形前后的试样进行了 DSC, SEM, TEM, X 射线衍射等分析研究,提出了 Zn—Al 共晶合金超塑性变形相界滑移的扩散-溶解层控制机制。

超塑拉伸前的储能释放,对应着超塑性变形抗力的增加和延伸率的下降。成分偏离共晶点时,合金中 α/β 界面减少,超塑拉伸的延伸率下降,变形抗力增加。在 350 °C, α/β 界面间容易形成扩散-溶解层 α' 非均匀固溶体,若 β 端的含 Zn 量小于 65at%,有利于 α/β 界面的滑移。

增加超塑性变形前的保温时间, α/β 界面间的扩散-溶解层厚度增加,扩散-溶解层 α 端的含 Zn 量为 1at%, β 端的含 Zn 量为 65at%。这种饱和的扩散-溶解层不易滑移。保温时间对延伸率和变形抗力的影响存在一个临界点,超过临界点后,继续保温对超塑性没有明显的影响,对应于扩散-溶解层两端达到饱和,继续保温只使得扩散层厚度增加,两端的界面结合方式不变。

在 α/β 界面上,由于 Al 原子和 Zn 原子价键电子密度的差别, α 相承受压力, β 相承受拉力。当 α/β 界面平直时, α 相所受的合力为零。在外力作用下, α/β 界面将发生弯曲,由于曲率半径变小, α 相在弯曲部位承受的压力增大。为减少所承受的压力, α 相将增大曲率半径,途径是 Al 原子扩散迁移至曲率半径小的地方,结果在弯曲部位附近直的地方 α 条越来越薄,并最终断开,使取向不利滑移的长 α 条断开成若干段有利于滑移的短 α 条。

电场(包括微弱漏电流)有促进原子扩散的作用,使 α/β 界面的扩散-溶解层增厚,不利于 α/β 的滑移,表现为延伸率下降、变形抗力增大、应变速率降低和表面空洞增多,是一种负的电塑性效应。

在 Zn—5Al 合金中添加 0.05~0.2wt% 的稀土,可提高合金超塑性变形的延伸率,当变形温度在 350 °C 以上时,稀土增强 Zn—5Al 合金超塑性效应非常明显。在 350 °C 以上,稀土抑制 Zn 往 Al 中的扩散和溶解,使 α/β 界面间的扩散-溶解层不饱和,有利于 α/β 的滑移,从而增强了 Zn—5Al 合金的超塑性效应。”

以上是《相界扩散溶解层》的产生背景,谨以此书献给导师陈南平,并以导师的名义呈献给读者。

李世春

2005 年 12 月

目 录

Contents

第一章 相界扩散溶解层	1
1.1 扩散溶解层的定义	2
1.1.1 h 状态和 t 状态	2
1.1.2 相图和扩散溶解层	3
1.1.3 扩散溶解层的结构	5
1.1.4 扩散溶解层的普遍性	6
1.2 原子界面和原子相图	8
1.2.1 原子的状态	8
1.2.2 电子密度数据	9
1.2.3 异类原子的接触问题	12
1.2.4 原子相图	13
1.2.5 原子相图的杠杆定律	14
1.3 原子相图的应用	15
1.3.1 Vegard 定律	16
1.3.2 前人对 Vegard 定律的修正	16
1.3.3 Vegard 定律的“三点式”修正	18
1.4 本章小结	21
第二章 Zn—Al 合金的超塑性	22
2.1 超塑性的实验方法	23
2.1.1 Zn—5Al 合金的超塑性变形特性	24
2.1.2 Zn—5Al 合金的粘滞流变	26
2.2 影响 Zn—Al 合金超塑性的因素	27
2.2.1 Al 含量对 Zn—Al 合金超塑性的影响	27
2.2.2 拉伸前保温时间对超塑性的影响	30

2.2.3 自然时效对 Zn—5Al 合金超塑性的影响	31
2.3 超塑性的能量分析	31
2.3.1 轧态合金的储能	33
2.3.2 超塑性变形合金的储能	34
2.4 储能在超塑性变形过程中的释放	35
2.4.1 储能的释放速度	36
2.4.2 滞弹性与内耗	36
2.4.3 超塑性变形的能量控制参数	37
2.4.4 涨落与弛豫	37
2.5 本章小结	37
第三章 Zn—Al 合金的微观结构	39
3.1 Zn—Al 合金相图与结晶分析	39
3.1.1 Al—Zn 合金相图	39
3.1.2 Zn—Al 合金平衡结晶分析	39
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	43
3.2.2 SEM 和 TEM 观察	44
3.2.3 其他研究方法	44
3.3 实验结果与讨论	44
3.3.1 Zn—Al 合金铸态组织的特征	44
3.3.2 Zn—Al 合金轧态和再结晶态组织的特征	46
3.3.3 Zn—5Al 合金的相分析	47
3.3.4 Zn—5Al 合金超塑性变形态组织的特征	48
3.4 本章小结	49
第四章 Zn—Al 合金的扩散溶解层	50
4.1 超塑性的晶界滑移模型	50
4.1.1 位错调节的晶界滑移模型	50
4.1.2 扩散调节的晶界滑移模型	50
4.2 观察晶界滑移的实验方法	51
4.2.1 表面抛光试样的观察	52
4.2.2 表面电镀试样的观察	54
4.3 相界滑移的扩散溶解层控制机制	54
4.3.1 Al/Zn 界面上的扩散与溶解	55
4.3.2 Al/Zn 界面间的扩散溶解层	57