

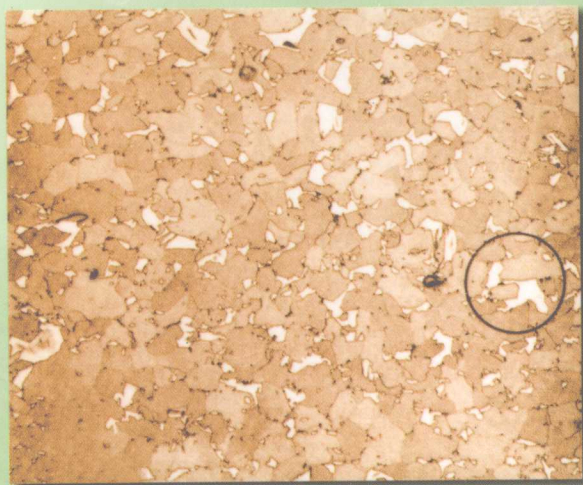
先进钢铁材料技术丛书

双相钢——

物理和力学冶金

(第2版)

马鸣图 吴宝榕 著



冶金工业出版社

<http://www.cnmp.com.cn>

先进钢铁材料技术丛书

双 相 钢

——物理和力学冶金
(第2版)

马鸣图 吴宝榕 著

北 京
冶 金 工 业 出 版 社
2009

内 容 简 介

本书介绍了双相钢的产生、发展、工业生产和新近应用概况;论述了双相钢的微观结构特征、单轴拉伸下的变形特性、Bauschinger 效应成形性、断裂特性、疲劳和其他工艺性能,以及描述了双相钢变形特性的连续力学和微观力学模型。

本书可供冶金企业、机械制造企业、特别是汽车制造企业从事金属材料、热处理和力学性能的科研或工艺开发的技术人员及高等院校材料专业的师生、研究生阅读或参考。

图书在版编目(CIP)数据

双相钢:物理和力学冶金/马鸣图,吴宝榕著.—2版.—北京:
冶金工业出版社,2009.1

(先进钢铁材料技术丛书)

ISBN 978-7-5024-4655-0

I. 双… II. ①马… ②吴… III. 钢—性能—研究
IV. TG142.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 158937 号

出 版 人 曹胜利

地 址 北京北河沿大街嵩祝院北巷 39 号,邮编 100009

电 话 (010)64027926 电子信箱 postmaster@cnmip.com.cn

策划编辑 张 卫 责任编辑 王雪涛 美术编辑 李 心

版式设计 张 青 责任校对 王贺兰 责任印制 李玉山

ISBN 978-7-5024-4655-0

北京百善印刷厂印刷;冶金工业出版社发行;各地新华书店经销

1988 年 6 月第 1 版,2009 年 1 月第 2 版,2009 年 1 月第 2 次印刷

169mm×239mm;31 印张;602 千字;473 页;2101~4100 册

79.00 元

冶金工业出版社发行部 电话:(010)64044283 传真:(010)64027893

冶金书店 地址:北京东四西大街 46 号(100711) 电话:(010)65289081

(本书如有印装质量问题,本社发行部负责退换)

《先进钢铁材料技术丛书》

编辑委员会

主 编：翁宇庆

编 审：刘嘉禾 杨树森

编 委：（按姓氏笔画为序）

干 勇	才鸿年	马绍弥	王立新	王全礼
王国栋	王洪发	王新华	兰德年	田志凌
刘 俭	刘 浏	刘万山	刘 苏	刘春明
刘嘉禾	朱 静	江来珠	许璐萍	李 成
李文秀	李世俊	苏 杰	杨树森	陈思联
陈蕴博	林慧国	柯 俊	赵 沛	赵克文
郭爱民	高惠菊	翁宇庆	董 瀚	

序 言

钢铁材料具有资源丰富、生产规模大、品种规格多、性能稳定且多样化等特点,并易于加工、价格低廉。钢铁材料既方便使用,又便于回收,是人类从铁器时代就开始使用、目前亦为工业生产和人民生活中最广泛使用的材料。在可以预见的未来,还没有哪一种材料能够全面取代钢铁材料的作用。钢铁材料是人类社会进步的重要物质基础。

我国经济和社会持续不断地发展,钢产量持续快速增长,自1996年以来,粗钢产量连续十余年保持世界首位。但是,金属矿产资源、能源、交通运输和环境等方面却难以满足不断增长且数量庞大的钢材生产和使用的需求。在技术进步和各种材料的竞争条件下,人们提出了钢铁材料合理生产和创新发展的问題。那么,中国需要什么样的钢铁材料呢?

进入21世纪,一方面,国民经济各个部门都需要高性能、高精度和低成本的高级钢铁材料,如高层建筑、海洋设施、大跨度重载桥梁、高速铁路、轻型节能汽车、石油开采和长距离油气输送管线、大型储存容器、工程机械、精密仪器、大型民用船舶、军用舰艇、航空航天和国防装备等都需要专业用途的高级钢铁材料;另一方面,社会的发展对钢铁的生产、加工、使用和回收等环节又提出了节约能源、节省金属矿产资源、保护环境等要求。因此,从科学发展观来看,我们现在和未来的经济建设和社会发展迫切需要的先进钢铁材料应该是采用先进技术生产的高技术含量的钢铁材料,是具有高性能、高精度、低成本、绿色化为特征的钢铁材料,如高强度、高韧性、长寿命的高

性能化;高形状尺寸精度和高表面质量的高精度化;低合金含量和优化工艺流程的低成本化;易于回收和再利用的绿色化。

近年来,在国家发改委、国防科工委和国家科技部的大力支持下,国内的科研院所、高校和企业的研发人员承担了国家工程研究中心、重点工程配套材料、国家支撑计划、国家“973”规划、国家“863”计划等国家重要科技项目工作,开展了先进钢铁材料的研发,在基础理论、工艺技术、产品应用等方面都取得了很好的成绩。为了促进钢铁材料发展,满足市场需要,由先进钢铁材料技术国家工程研究中心、中国金属学会特殊钢分会和冶金工业出版社共同发起,并由先进钢铁材料技术国家工程研究中心和中国金属学会特殊钢分会负责组织编写了《先进钢铁材料技术丛书》。先进钢铁材料技术国家工程研究中心专家委员会专家和中国金属学会特殊钢分会的专业人员组成本套丛书的编辑委员会。本套丛书的编写与出版具有时代意义。丛书编委会将组织国内钢铁冶金和材料领域的知名学者分别撰写,努力反映先进钢铁材料的科研、生产和应用的最新进展。期望本套丛书能够在推动先进钢铁材料的研究、生产和应用等方面发挥积极作用。本套丛书的出版可以为钢铁材料生产和使用部门的技术人员提供先进钢铁材料生产和使用的技术基础,也可为相关大专院校师生提供教学参考。我们组织编写《先进钢铁材料技术丛书》尚属首次。本套丛书将分册撰写,陆续出版。书中存在的疏漏和不足之处,欢迎读者批评指正。

《先进钢铁材料技术丛书》编委会

第 2 版 前 言

自 2000 年以来,中国汽车工业的发展跨入了快车道,每年均以两位数的速度快速增长。2006 年中国汽车产量已达 728 万辆,2007 年超过 880 万辆,中国汽车产量已进入世界产销大国的行列,其汽车保有量近 5000 万辆。与此同时,世界汽车产量也在较快增长,2006 年产量已超过 7000 万辆,汽车保有量已超过 5 亿辆。汽车产量的持续攀升,汽车保有量的增加,由此而造就的汽车文明和该文明所蕴藏的深刻的内涵,在对人类社会产生深刻影响的同时,也产生了三大社会问题:燃油消耗、排放和安全。而减少燃油消耗和降低排放的有效途径是汽车轻量化,大量的实验结果表明:乘用车自重每减轻 10%,则油耗下降 6%~8%。对全顺车的系统实验表明:在符合欧 IV 标准排放下,汽车自重和油耗亦呈线性关系。但轻量化和汽车安全性是相悖的,既减轻自重实现轻量化而又保证汽车安全的方法就是应用各种高强度轻量化材料。20 世纪末,面对汽车轻量化的需求和各种轻量化材料的竞争态势,国际钢铁协会组织了 34 家钢铁企业和知名汽车公司联合开展了超轻钢车身项目(UL-SABAVC),项目提出一些典型轿车的白车身的减重目标为 20%,价格与原白车身保持不变,并满足 2004 年的碰撞安全法规;达到项目目标使原白车身用材发生了重大变化,高强度从原来白车身用量的 5% 提高到 ULSAB 的 98%;而在高强度钢和先进高强度钢的应用中,兼有强度和延性良好匹配的双相钢用量竟达 70%~80%。

双相钢诞生于 20 世纪 70 年代初,30 多年来,人们对双相钢进行了

大量研究,并曾预言,双相钢的出现将会使汽车结构轻量化、安全行驶,从而对提高汽车工业的竞争能力产生深远影响。在双相钢诞生之初,人们研究探讨的重点集中在对这一新钢种的物理和力学冶金的原则、组织性能的关系上,本书的第1版总结了双相钢的物理和力学冶金所取得的进展。近年来,汽车工业发展和国际上燃油价格的不断攀升以及对人类赖以生存的地球的环境保护,对温室效应的控制,导致汽车轻量化的进步在加快。双相钢——具有高强度高成形性的钢种再次引起人们高度的兴趣,而且近年来对双相钢的一些研究,更多地集中在与使用性能相关的应用上,在这一时期热镀锌连续退火生产线的建立和批量生产运行,为双相钢的生产提供了手段和装备,亦为双相钢的扩大应用提供了条件,而高强度和良好成形性的双相钢,在汽车轻量化和保证安全碰撞性能中所显示的良好效果和作用,已远远超出双相钢诞生之初时人们的预料。基于以上情况,承蒙冶金工业出版社的大力支持,作者决定将《双相钢——物理和力学冶金》一书修订再版,以满足有关读者和我国汽车用钢和汽车工业发展的需求。此次的第2版基本保留第1版的结构,但补充了近年来有关双相钢使用性能方面的研究成果,尤其补充了双相钢和其他高强度钢的应用对整车性能影响的研究成果;在双相钢的成形性中,补充了有实用价值的性能检测数据和回弹预测、回弹补偿等相关内容;考虑到双相钢用于碰撞安全件,还补充了双相钢在高速拉伸条件下的响应特性。汽车轻量化还对其他类型的高强度高成形性钢的发展提供了需求和动力,如相变诱发塑性钢(TRIP钢)和孪晶诱发塑性钢(TWIP钢),以及复相钢及热成形马氏体钢。这些钢的合金设计思想仍然是利用复合材料概念,即利用一个复合物,依靠这个复合物,使得各相的优点尽可能发挥,而其缺点由于其他相的存在而减少或消除;这仍与双相钢有很多类同之处,只是在TRIP钢中又增加了应变诱发马氏体

转变,使受力集中处的缩颈因马氏体转变而强化,推迟了缩颈的发生,从而提高了均匀延伸,取得更高的强度和延性匹配。由于对这些钢的论述超出了本书范畴,本书中专列一章论述双相钢和其他高强度钢的性能对比,以拓展对双相钢和其他高强度钢异同的认识和应用。在双相钢的工业生产应用一章,列举了更多的应用实例和减重效果,可以进一步拓宽人们的思路和扩大双相钢的应用。在双相钢的生产和应用一章,还补充了一些典型连续退火生产线和镀层板生产线的内容和实例,以使读者对双相钢的现代生产模式有所了解。在20年前,有关这方面的具体报道还较少见。

在汽车高强度钢零件的成形和性能预测中,计算机模拟是一个有力的工具和手段,第1版时由于缺少材料成形的数据和油漆烘烤的数据,使应用这一工具受到限制,本书的有关章节亦注意补充了相关数据和内容。

本书中还补充一章专门论述了双相钢中 Baushinger 效应的一些内容,以使读者对这一经典效应有更深入的了解,同时也阐述了作者关于用矫顽力研究 Baushinger 效应的一些成果。近年来, Baushinger 效应有了更多的实际应用,但愿从对 Baushinger 效应应用的论述中能对读者有所帮助。

作者还对附录中的成形极限图理论分析中的缩颈理论和 M-K 理论计算方程编制了计算程序,以便读者利用相关数据进行 FLD 理论计算;有兴趣的读者,可与作者联系。

本书保留了第1版从物理和力学冶金方面对双相钢进行阐述的特点,同时更突出了一些对双相钢应用研究成果和使用性能的介绍,试图实现对双相钢的成分/结构组织与材料性能、材料的合成与加工、有用构件的制造工艺,以及使用性能(即材料科学与工程)四大要素系统介绍

的完整的统一。

作者虽然尽了很大努力,力图使本书内容尽可能丰富,但由于内容涉及材料科学和工程的四大要素及较宽知识领域,书中不妥和疏漏之处,希望广大读者不吝指正。

第1版的作者之一吴宝榕先生和部分章节的审阅者孙珍宝先生已经不幸过世,本书的出版也是对二位老先生的纪念。

在本书的修订出版过程中,冶金工业出版社的同志付出了辛勤劳动,上海宝钢、韩国浦项钢铁、德国蒂森公司以及JFE和瑞典SSAB公司等提供了一些宝贵资料和图片,丰富了本书修订内容,蒋素芳同志和中国汽车工程研究院材料工艺部的有关同志也对本书的修订给予了大力支持,在此并致谢意。

马鸣图

2008年3月于重庆

第 1 版前言

20 世纪 70 年代初,低合金高强度钢的研究取得了一个重要突破,这就是双相钢的产生与发展。双相钢是指主要由马氏体和铁素体所构成的一类高强度高延性低合金钢。它的出现不只把低合金高强度钢的发展推向一个新的强度与延性的综合平衡阶段,而且由于它的特殊性能以及国内外物理冶金学者对描述这类钢的组织 and 性能关系的新概念、新机制和新模型所进行的大量工作,从而大大丰富了物理和力学冶金的内容。

双相钢最初是采用临界区热处理生产的(后来控轧工艺的发展又产生了轧制双相钢),然而人们对临界区处理和两相组织力学性能的认识则经历了一段发展过程。40 年代前后,热处理工作者发现,当钢在完全奥氏体化后如果冷却不当,或部分奥氏体化后的淬火组织中存在有铁素体等非马氏体组织时,会使钢的强度、冲击韧性,尤其是弹性极限降低。50 年代的试验表明,在临界点温度附近进行摆动热处理,可以细化晶粒,大幅度提高钢的低温韧性,同时经临界区加热淬火后可以抑制钢的回火脆性。到了 60 年代,人们对马氏体相变理论和复合材料力学性能的研究有了新的认识和进展,使临界区热处理的应用发生了质的变化。1968 年双相钢专利的发表是这种质变的表现。

工业生产尤其汽车工业需要高强度冲压用钢,并为双相钢的开发提供了动力,而双相钢的出现又对汽车结构轻量化、安全行驶以及提高汽车工业的竞争能力产生了深远的影响。美国麻省理工学院 W. S. Owen 教授在 1980 年发表的重要报告“一个简单的热处理能挽救底特律(汽车工业)吗?”说明了双相钢对美国四大工业支柱之一的汽车工业的重要性。

双相钢的产生与发展改变或丰富了过去人们熟悉的有关完全奥氏体化钢的物理和力学冶金中的某些概念。临界区加热时合金元素在热循环中的再分配,奥氏体和铁素体共存时马氏体相变的拘束,两相塑性应变不相容情况下材料的变形特性,断裂源的位置和传播途径的多样性,岛状硬质相的强化机制以及描述双相钢抗拉强度的连续或不连续纤维复合材料强度的混合物定律等就是其中的一些例子。本书将归纳、评述近二十年来关于双相钢

的物理和力学冶金研究中的进展。全书共分九章：

第1章概述双相钢的产生、发展和应用，以给读者一个关于双相钢的概貌。

第2章介绍临界区加热时奥氏体形成的特点、影响因素以及描述临界区热处理时奥氏体形成的体视特征的理论模型，为获得合适组织的双相钢提供理论基础和途径。

第3章介绍双相钢的显微组织特征及其影响因素，为认识双相钢的性能特点提供显微组织基础。

第4、5章详细论述双相钢在单轴拉伸下的变形特性及描述这些变形特性的理论模型。应该说像双相钢这样性能的理论预测值和实验值之间具有如此紧密的联系是较少见的。

第6章介绍双相钢的成形性、试验方法、表征参量及其与其他钢种的对比。作为主要用于冲压构件的双相钢，了解其成形性或平面应力下的变形特性对于实际应用具有重要意义。

第7章介绍解理断裂应力的意义、测试方法和双相钢的解理断裂特性。这对理解组织特征对材料解理断裂应力的影响，扩大双相钢的应用和进行安全设计都十分重要。

作为交变负荷使用的构件（如汽车轮盘），材料的疲劳性能对构件使用寿命的预测十分重要，本书第8章介绍双相钢的疲劳裂纹萌生、扩展和门坎值的实验结果，同时介绍双相钢在腐蚀环境下使用时的性能—氢脆和工艺性能—点焊性。

最后一章介绍双相钢的生产和应用情况，我们希望本书尤其本章的内容可促进双相钢在我国早日开花结果。

各章之间互有联系，但基本自成体系，可供单独阅读。

本书的若干章节由《材料科学和测试技术丛书》编委孙珍宝先生审阅，第6章由北京航空学院钟群鹏教授校阅，他们提出的宝贵意见已经著者采用于书中，在此敬表谢意。

本书涉及物理和力学冶金的广大领域，限于作者水平，编著中可能有不当之处，热情希望读者多加指正。

作者
1984年元月

目 录

1 双相钢的产生与发展	1
1.1 概述	1
1.2 汽车工业的发展和低合金高强度钢板的应用	1
1.3 低合金高强度钢的发展和双相钢的产生	6
1.4 双相钢的发展概况	8
参考文献	11
2 临界区加热 ^① 时奥氏体的形成	13
2.1 概述	13
2.2 临界区加热时奥氏体的形成	14
2.2.1 奥氏体形成的观察	14
2.2.2 奥氏体形成动力学	18
2.3 临界区加热时奥氏体的形成模型	21
2.3.1 奥氏体长大的几何特征	21
2.3.2 奥氏体形成动力学的计算	27
2.3.3 奥氏体的长大和合金元素分配	35
2.3.4 碳和合金元素在 α 和 γ 相中的分配及其意义	43
2.4 影响临界区加热时奥氏体形成的因素	46
2.4.1 钢的成分	46
2.4.2 初始显微组织	50
2.4.3 热处理工艺	51
2.5 临界区加热时奥氏体形成图	51
参考文献	52
3 双相钢的显微组织	54
3.1 概述	54
3.2 双相组织的形貌学	54
3.2.1 复相组织	55

3.2.2	弥散组织	56
3.2.3	网状组织	56
3.2.4	双相组织	56
3.3	双相钢的显微组织特征	57
3.3.1	双相钢显微组织的显示方法	58
3.3.2	光学显微镜观察时双相钢的显微组织特征	59
3.3.3	扫描电镜观察时双相钢的显微组织特征	61
3.3.4	透射电镜观察时双相钢的显微组织特征	62
3.4	双相钢显微组织参数的定量测试方法	70
3.4.1	马氏体体积分数的测定	70
3.4.2	马氏体岛大小的测定	71
3.5	影响双相钢显微组织特征的因素	72
3.5.1	合金元素	72
3.5.2	临界区加热温度	74
3.5.3	加热后冷却速率	76
3.5.4	热轧工艺	79
3.5.5	轧制变形的影响	81
3.5.6	临界区加热前组织状态	83
3.5.7	回火	83
3.6	双相钢显微组织的变形	87
3.7	综述	90
	参考文献	90
4	双相钢在单轴拉伸下的变形特性	93
4.1	概述	93
4.2	单轴拉伸下的变形特性参量	93
4.2.1	应力应变曲线	93
4.2.2	真应力真应变曲线	95
4.2.3	加工硬化和塑性失稳	97
4.2.4	塑性应变各向异性比	99
4.2.5	影响单轴拉伸试验时流变特性的因素	100
4.3	双相钢单轴拉伸时的变形特性	103
4.3.1	双相钢的工程应力应变曲线	103
4.3.2	双相钢的真应力真应变曲线	104
4.3.3	双相钢的屈服特性	105

4.3.4	双相钢的加工硬化和应变速率敏感性	107
4.3.5	双相钢的抗拉强度和总伸长率	112
4.3.6	双相钢的 \bar{r} 值	113
4.4	双相钢单轴拉伸下各变形特性参量的关系	113
4.4.1	抗拉强度和伸长率的关系	113
4.4.2	加工硬化指数 n 和屈服强度的关系	116
4.5	影响双相钢变形特性的因素	117
4.5.1	马氏体体积分数	117
4.5.2	马氏体中碳含量	122
4.5.3	马氏体相的分布和形态	126
4.5.4	铁素体性能	132
4.5.5	残留奥氏体	137
4.5.6	合金元素	139
4.5.7	临界区加热温度	148
4.5.8	临界区加热温度下的保温时间	152
4.5.9	临界区加热后的冷却速率	153
4.5.10	晶粒大小	158
4.5.11	预变形	159
4.5.12	时效或回火	161
4.5.13	预应变加时效	169
4.5.14	其他因素的影响	172
	参考文献	173
5	描述双相钢变形特性的模型	179
5.1	概述	179
5.2	混合物定律	181
5.2.1	纤维复合材料的混合物定律	181
5.2.2	双相钢的混合物定律	185
5.3	连续力学模型	195
5.3.1	等应变模型	195
5.3.2	应变分配模型	200
5.3.3	应力分配模型	209
5.3.4	其他模型	211
5.3.5	几种变形模型的图示	213
5.4	微观力学模型	214

5.5	综合变形模型	217
5.6	双相钢应力应变曲线分析	220
5.7	双相钢的屈服模型	224
5.7.1	可动位错模型	224
5.7.2	残留应力模型	225
5.8	双相钢中的包辛格(Bauschinger)效应	226
5.8.1	包辛格效应的定义及描述参量	226
5.8.2	描述包辛格效应的模型	227
5.8.3	双相钢中的包辛格效应	228
	参考文献	231
6	双相钢中的包辛格效应和矫顽力	235
6.1	概述	235
6.2	双相钢中的 BE	236
6.3	塑性变形对材料的矫顽力的影响	245
6.4	小变形量下的拉压变形对双相钢矫顽力的影响——磁软化效应的初步研究	251
6.5	拉伸变形对双相钢矫顽力的影响	252
6.6	拉压变形对双相钢矫顽力各向异性的影响	256
6.7	反向流变时双相钢矫顽力和流变应力的变化	259
6.8	拉压间时效对双相钢 BE、流变特性和矫顽力的影响	264
6.8.1	拉压间时效对双相钢 BE、流变特性和矫顽力影响的实验结果	264
6.8.2	应变、拉压间时效对流变应力和矫顽力影响的综合分析	265
6.8.3	时效不能消除背应力的力学实验证明	267
6.8.4	拉压间时效对双相钢 BE 影响的位错理论说明	268
6.9	不同处理和应变过程试样的回火——矫顽力各向异性随回火温度的变化	269
6.10	双相钢的 BE 和磁性软化效应	272
6.11	拉压变形时双相钢中背应力的变化与矫顽力各向异性	273
6.11.1	双相钢中的 BE 和背应力	273
6.11.2	双相钢拉压变形时矫顽力各向异性	275
6.11.3	双相钢中背应力变化与矫顽力各向异性变化的原因分析	275
6.12	双相钢中的背应力热稳定性和机械不稳定性	279
6.12.1	时效和反向流变对双相钢 BE 和背应力的影响	279
6.12.2	回火过程中组织变化和矫顽力的关系	280

6.12.3	背应力的热稳定性和机械不稳定性	281
6.12.4	关于背应力测试方法的讨论和建议	281
6.13	双相钢的 BE 与显微组织的关系——双相钢初始加工硬化 机制的探讨	282
6.13.1	Mn-V 热处理双相钢中的 BE 特征	282
6.13.2	双相钢的加工硬化机制探讨和背应力计算	283
6.14	综述	285
	参考文献	286
7	双相钢的成形性	290
7.1	概述	290
7.2	有几何约束的成形试验	290
7.2.1	圆顶冲头延展试验和成形极限图 (FLD)	290
7.2.2	FLD 的理论计算	300
7.2.3	影响 FLD 极限应变的因素	307
7.2.4	液压鼓胀试验	310
7.3	无几何约束的成形试验	311
7.3.1	单轴拉伸试验	311
7.3.2	延展弯曲试验	311
7.3.3	胀孔试验	312
7.4	双相钢的成形性	313
7.4.1	双相钢有几何约束的成形性	313
7.4.2	双相钢无几何约束的成形性	320
7.5	双相钢成形构件的其他特性	326
7.5.1	回弹	326
7.5.2	压痕抗力	334
7.5.3	帽形结构静压溃抗力和撞击吸能	339
7.6	结语	341
	参考文献	341
8	双相钢的断裂特性	345
8.1	概述	345
8.2	解理断裂应力的测试方法	345
8.2.1	V 形钝缺口试样慢弯曲试验法	345
8.2.2	影响解理断裂应力测定结果的因素	350