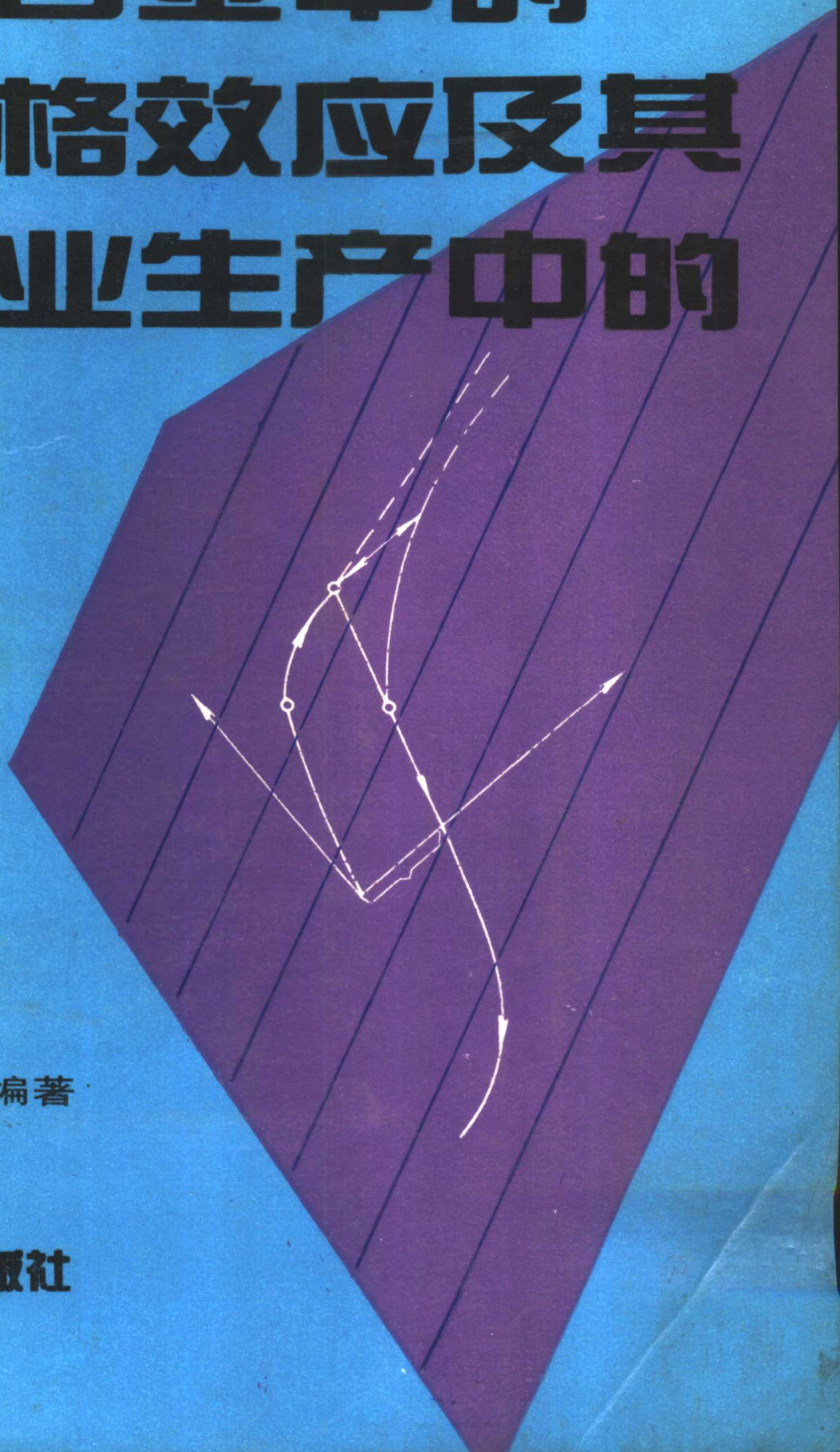


金属合金中的 包辛格效应及其 在工业生产中的 应用



马鸣图

段祝平

编著

〔日〕友田阳

机械工业出版社

(京) 新登字054号

本书对金属合金中的包辛格效应进行了全面而系统的论述。列举了大量包辛格效应的实验研究结果,阐明了描述包辛格效应的唯象和微观力学模型,介绍了用矫顽力各向异性研究包辛格效应和内应力的最新成果和理论模型;举例说明了包辛格效应在工业生产中的应用及其实际意义。本书是首部系统研究总结包辛格效应的学术和技术专著。它不仅可供高等学校师生和研究生使用,而且对于从事金属材料研究、开发、生产和应用的广大科技人员也具有重要参考价值。

图书在版编目(CIP)数据

金属合金中的包辛格效应及其在工业生产中的应用/马
鸣图等编著.-北京:机械工业出版社,1994.10

ISBN 7-111-04325-1

I.金… II.马… III.合金-包析反应 IV.TG131

中国版本图书馆CIP数据核字(94)第05949号

出版人 马九荣(北京市百万庄南街1号 邮政编码100037)

责任编辑:张绪江 版式设计:杨利华 责任校对:宁秀娥

封面设计:郭景云 责任印制:侯新民

北京昌平环球科技印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行

1994年11月第1版·1994年11月第1次印刷

787mm×1092mm1/16·16印张·332千字·

001—450册

定价:27.00元

引 言

本书概略地总结了近30年来人们对包辛格 (Bauschinger) 效应的研究进展。全书共分6章。第1章为Bauschinger效应的定义、原理、描述方法及研究发展简况。第2章介绍各种金属合金中的Bauschinger效应, 为以后各章提供实验基础和广泛参考数据。第3章从连续介质力学的基本概念出发, 介绍Bauschinger效应的唯象力学描述; 第4章则从物理和力学冶金的基本原理出发, 较详细地描述Bauschinger效应的微观力学模型; 第5章是从磁物理的一些基本概念出发, 介绍著者本人用矫顽力研究铁磁材料 Bauschinger效应所取得的新结果和新进展, 给读者展示一个研究测试复杂应变历史后的材料内应力和 Bauschinger效应的新途径; 第6章介绍研究 Bauschinger效应的实际意义, 列举了大量的应用 Bauschinger效应解决工业实际问题的有意义的实例。书中各章既有联系, 又自成体系, 可供独立阅读。

虽然, Bauschinger效应发现已百余年, 系一经典效应; 然而, 由于没有关于Bauschinger效应的专著, 因此人们对其知之甚少, 或全然不知; 这种局面与 Bauschinger效应在工程实际中的重要意义和实际应用的扩大都不相适应。对Bauschinger效应进行系统的介绍和论述, 不仅有利于澄清人们的一些模糊概念, 从而有目的认识和扩大这一效应的实际应用, 而且对于弄清一些合金的组织 and 性能的关系, 加工硬化机制以及对于物理和力学冶金的发展也具有重要理论意义。

本书第1、4、5、6章由马鸣图博士撰写, 第3、4章由茨城大学友田阳博士写出初稿, 然后由中科院力学研究所段祝平研究员和马鸣图分别修改补充, 写成二稿; 最后全书由马鸣图统一整理, 进行文字润饰, 完成书稿。

本书是从物理、力学及冶金学的新近发展来阐明这一经典效应的。虽然在成书过程中, 作者几易其稿, 但由于该书广泛涉及数学、物理、力学、冶金各个领域的新近进展, 更由于作者水平有限, 热忱企望读者对本书中的不足多加指正。

由于Bauschinger效应的重要实际意义, 而赋予这一经典效应以新的生命力, 对Bauschinger效应的研究和认识仍在发展中, 期望本书对Bauschinger效应的研究、认识和应用有所帮助和促进, 在加速我国四个现代化的建设中, 愿与材料科学界的同行共同奋发努力。

北京钢铁研究总院 孙珍宝 吴宝榕先生一直关心和支持本书的撰写, 并多次提出许多宝贵建议, 蒋素芳同志为本书书稿整理和插图绘制付出许多辛勤劳动、机械工业出版社张绪江高工为本书的编辑出版付出许多心血, 使本书在交稿后短时间内与读者见面。在此并致谢意。

为使读者了解日本学者著书的特点, 书末附录给出了友田阳所撰写的3、4章的英文原稿。

作者

1994年9月于重庆

目 录

引 言

第1章 导 论	1
1.1 Bauschinger 效应的定义、研究和发展	1
1.2 BE的描述方法和有关参量的意义	2
1.3 描述 BE 的连续介质力学模型	7
1.4 描述 BE 的微观力学模型	9
1.5 综述	10
参考文献	11
第2章 金属合金中的BE及其影响因素	15
2.1 概述	15
2.2 纯金属中的BE	15
2.3 氮强化的奥氏体不锈钢的BE	18
2.3.1 单轴载荷实验时奥氏体不锈钢的BE	18
2.3.2 奥氏体不锈钢成形半球的BE	21
2.3.3 奥氏体不锈钢的BE和显微组织的关系	25
2.4 低碳钢中的BE	27
2.4.1 低碳钢中的BE特征	27
2.4.2 应变时效对低碳钢BE的影响	30
2.5 低合金高强度钢和管线钢的BE	32
2.6 由NiAl 相沉淀硬化的中碳钢的 BE 和循环载荷的影响	36
2.7 弥散硬化合金中的BE	38
2.7.1 弥散氧化物增强铜合金中的BE	38
2.7.2 沉淀强化的商品多晶铝合金中的BE	42
2.7.3 含有粗粒子沉淀的多晶铝中的BE	46
2.7.4 球化碳钢中的BE	47
2.8 $2\frac{1}{4}\text{Cr}-\text{Mo}$ 钢中的BE	50
2.9 两个延性相构成的复相合金的BE	52
2.9.1 α - γ Fe-Cr-Ni钢中的BE	52
2.9.2 双相钢中的BE	54
2.10 β -黄铜双晶体中的 BE	54
2.11 拉、扭复合载荷下合金中的 BE	59
2.12 综述	60
参考文献	61
第3章 描述BE的唯象本构理论	64
3.1 概述	64

3.2 传统(经典)塑性理论简述	64
3.2.1 塑性理论中的基本方程	64
3.2.2 等向强化与后继屈服面	66
3.2.3 塑性势理论	72
3.3 描述 BE 的唯象理论研究梗概	77
3.3.1 关于本构模型的简要说明	77
3.3.2 背应力和运动硬化模型	79
3.3.3 塑变诱导的各向异性硬化效应及其多重曲面表示	80
3.3.4 (J_2, J_3) 理论及其对 BE 的应用	80
3.3.5 计及 BE 的细观力学模型	81
3.3.6 无屈服面理论对 BE 的描述	82
3.3.7 有限弹塑性变形条件下的 BE 研究	83
3.3.8 关于动态 BE 的研究	83
3.4 运动硬化模型	84
3.4.1 后继加载面的若干实验结果	84
3.4.2 Prager-Ziegler 线性运动硬化模型	85
3.4.3 非线性运动硬化模型	88
3.4.4 各向异性运动硬化模型	90
3.5 材料硬化的多重曲面表示	94
3.5.1 塑形模量场方法	94
3.5.2 应变空间的多重曲面表示方法及其与应力空间表示的等价性	96
3.5.3 运动硬化的双重曲面表示	98
参考文献	103
第4章 描述和阐明 BE 的微观力学模型	107
4.1 概述	107
4.2 永久软化和背应力——基于等应变模型的分析	107
4.2.1 弹塑性元不均匀变形引起硬化的模型	107
4.2.2 Shack-down 模型和永久软化	109
4.3 早期的弥散硬化合金中背应力硬化的微观力学模型	111
4.4 次级滑移加工硬化理论	113
4.5 弥散硬化合金的内应力加工硬化模型	116
4.5.1 固体内应力场的计算	116
4.5.2 等效夹杂物法	123
4.5.3 不考虑塑性松弛时弥散硬化合金的加工硬化模型	125
4.5.4 加工硬化状态的 Orvwan 过程	128
4.6 考虑到塑性松弛的 Cu-Si 合金的加工硬化模型	130
4.6.1 塑性松弛的类型和位错排列的 TEM 观察	130
4.6.2 森林位错的密度和背应力	132
4.6.3 拉伸时的应力应变曲线——强化分量的组成和加和	133
4.7 BE 和塑性松弛	134
4.7.1 弥散硬化合金变形时的塑性松弛	134

4.7.2 变形的弥散硬化合金的软化和BE	136
4.7.3 松弛过程的动力学	137
4.7.4 加工硬化和强度水平	138
4.8 永久软化和背应力的可逆性以及二者之间关系的再认识	139
4.9 变形两相合金中背应力的X-ray的测定	141
4.9.1 变形两相合金中的晶格应变的X-ray测定装置	141
4.9.2 在塑性变形中晶格应变的发展和测量	142
4.9.3 晶格残留应变的定量测定	144
4.9.4 变形两相合金中的残留应力体系与所测定的残留应变之间的关系	145
4.9.5 背应力可逆性的X-ray的实验证明	147
4.10 球化碳钢的背应力硬化模型	150
4.11 自协调连续介质模型(Self-consistent continuum model)	153
4.11.1 以应力平衡为基础的连续介质模型	154
4.11.2 自协调连续介质模型的预测的实验验证	157
4.11.3 塑性松弛及其对两延性相构成的合金流变特性的影响	158
4.12 在能量平衡条件下的连续介质模型	159
4.13 描述两延性相合金变形特性的综合变形模型	162
4.14 两延性相合金中的相间应力引起的组分相的硬化和软化分析	163
4.15 用有限元方法(FEM)对两相合金变形特性的弹塑性分析	
4.15.1 空间轴对称弹、塑性大应变有限元计算程序	165
4.15.2 有限元法对两相合金变形特性及相间应力的计算	168
4.15.3 采用各向异性模型计算的两相中的平均有效应力和水静应力	172
4.16 由晶界拘束和位错的短程交互作用所引起的BE	173
4.17 综述	174
参考文献	174
第5章 双相钢中的BE和矫顽力	177
5.1 概述	177
5.2 双相钢中的BE	177
5.3 塑性变形对材料的矫顽力的影响	183
5.4 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	188
5.5 拉伸变形对双相钢矫顽力的影响	189
5.6 拉、压变形对双相钢矫顽力各向异性的影响	192
5.7 反向流变时, 双相钢矫顽力和流变应力的变化	194
5.8 拉压间时效对双相钢 BE、流变特性和矫顽力的影响	198
5.8.1 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	198
5.8.2 应变、中间时效对流变应力和矫顽力影响的综合分析	199
5.8.3 时效不能消除背应力的力学试验证明	200
5.8.4 中间时效对双相钢BE影响的位错理论说明	201
5.9 不同处理和应变历史的试样的回火——矫顽力各向	

异性随回火温度的变化	201
5.10 双相钢的BE和磁性软化效应	203
5.11 拉、压变形时双相钢中背应力的变化与矫顽力各向异性	204
5.11.1 双相钢中的BE和背应力	204
5.11.2 双相钢拉、压变形时矫顽力各向异性	205
5.11.3 双相钢中背应力变化与矫顽力各向异性变化的原因分析	205
5.12 双相钢中的背应力热稳定性和机械不稳定性	208
5.13 关于背应力测试方法的讨论和建议	210
5.14 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	210
5.14.1 Mn-V热处理双相钢中的BE特征	210
5.14.2 双相钢的加工硬化机制探讨和背应力计算	211
5.15 综述	212
参考文献	213
第6章 研究BE和矫顽力各向异性的实际意义	216
6.1 概述	216
6.2 BE对采用UOE工艺制造的管线承压能力的影响	216
6.2.1 用UOE方法制造管线的工艺过程	216
6.2.2 UOE管线承压能力与径向膨胀量的有限元分析	218
6.2.3 管子承压能力与材料的BE特性的关系	219
6.3 BE和材料力学性能的方向性	221
6.4 BE和钢的氢脆	229
6.5 BE和金属材料的疲劳强度	230
6.6 BE和弹性材料的松弛抗力	234
6.7 BE在其它方面的应用	239
6.8 矫顽力各向异性与背应力测试	240
参考文献	240
附录A 钢铁材料短圆柱试样矫顽力的测量	243
附录B 友田阳(Y. Tomota)所写的本书第3章和第4章英文原稿	246

第1章 导 论

1.1 Bauschinger 效应的定义、研究和发展

早在1881年,德国人Bauschinger发现,在一个方向变形后的金属,当反向变形时,和原预应变方向的变形相比,其弹性极限明显下降,这种现象被命名为Bauschinger效应[1](为叙述方便,书中以下简称为BE,即英文Bauschinger effect的两个单词的第一个字母)。此后,BE通常是指金属合金的流变行为(流变应力和加工硬化速率)对应变历史和应力状态的某些依赖关系;即在塑性变形中,反向变形的流变应力(例如压缩)常小于初始方向应变的流变应力(例如拉伸),然而在应力反向后,加工硬化速率有短暂的上升[2]。

BE最初系在多晶金属合金中观察到的一种力学现象,例如 α -黄铜[3],铜[4],铝[5],锌[6]等。以后在单晶 α -黄铜和单晶铝中也同样观察到BE的存在[3,5],尤其在单晶铝中的BE的大小可与同样纯度的多晶铝相比。60年代末期以后,对两相合金中的BE进行了大量研究,在Cu-SiO₂[7~10],Cu-Al₂O₃[11~14]等弥散硬化合金,两个延性相构成的合金[15],球化高碳钢[16~18],低合金高强度钢(HSLA)和管线钢[19~21],低碳钢[22,23],奥氏体不锈钢[24],双相钢[25~35]等多种金属合金中均已观察到BE的存在。即凡是有加工硬化的金属合金都存在有BE,同时对影响金属合金中BE的一些因素,如预应变、合金的显微组织,硬质相的体积分数,粒子的大小和间隙,粒子的形状和分布、动力学应变时效,温加工等因素进行了研究。尤其是近年来,对影响BE的应力状态,加载路径以及复合载荷下的BE进行了探讨[36,37]。

BE对金属材料构件的制造和使用性能有重要影响。它是造成金属材料力学性能方向性的重要原因之一[38,39],它可能引起管线钢使用时的强度损失或脆裂[21,22],它亦会影响变形后的共析钢氢脆的发展过程[18,40]及构件的疲劳过程和构件的尺寸稳定性[41~44]。同时BE和弹簧钢的松弛抗力的表征参量有密切关系[45],它也是热处理工件校直工艺制定时的重要考虑因素[46]。

BE虽然系一经典效应,但是由于研究BE不仅对于弄清金属材料的加工硬化机理和疲劳损伤的原因具有重要的理论价值,而且对于预测各种应变历史或应变路径对材料性能的影响及构件的疲劳损伤过程等也具有重要的实际意义;因此,近年来,人们对其研究的兴趣日渐增长[47]。

最近,马鸣图等在研究双相钢拉、压变形后的矫顽力变化时,发现了拉伸和拉伸后随之反向变形(压缩)时,矫顽力的变化有类似BE中流变应力变化的现象,即拉伸时矫顽力上升,随之反向变形时矫顽力下降,这一现象称为磁软化效应[48,49]。将这一效应和BE相结合,进行了一系列的研究[37,48~53],所获得的许多新的和有趣的结果,将有利于揭示BE的物理本质。

描述BE的模型可以分为两大类[47,54]:连续力学模型(即对BE进行唯象的力学描述)和微观力学模型。前者又可细分为背应力硬化模型,运动学加工硬化模型,弹塑性元硬化模型、组合的运动学和各向同性硬化模型、塑性变形诱导各向异性强化和多重屈服面模型,以及无屈服

面理论对 BE 的描述。后者则着重研究 BE 与显微组织特征之间的关系。最近关于拉、压流变曲线的有限元计算和本构关系的研究也取得了较大的进展。这方面的研究成果,对于复杂应力状态下的流变曲线的预测,各显微组织组成之间的内应力的分布以及流变应力和显微组织之间的关系的探讨,都具有重要的意义。因此,有限元计算是研究 BE 的一个重要方法和手段。

1.2 BE 的描述方法和有关参量的意义

BE 是金属材料的一种力学特性,为了描述这一现象,就需要有一定的参量和方法,以表征它的大小,并和其它力学参量或显微组织参量建立定性或定量的关系。

通常, BE 的大小是通过测定正向和反向流变曲线,然后引入一定的实验参量来表征的。由于这一现象的复杂性,更有不同作者研究时的重点不同:有的从应变,有的从应力,有的从变形能的角度,因此其描述参量也有多种。

(1) Bauschinger 应变差 (β_s) 通常广泛用于描述 Bauschinger 效应的参量是 β_s ; 许多书中[54~56]都以图1-1表征 BE 和 β_s 。该图示出了一个力学滞后环,初始加载沿 OAC 线进行,变形材料在 A 点屈服;如同样材料反向加载,将得到一条与 OAC 线对称的压缩变形曲线 OBC', 并在与 A 点对称的 B 点屈服,如材料先加载到 C 点(拉伸变形),然后卸载,变形将沿 CD 线进行(忽略小的微量的弹性滞后),继续压缩,材料达到 E 点屈服, E 点所对应的应力比原始压缩的屈服应力要小得多;这样,加工硬化使拉伸的屈服应力从 σ_A 增加到 σ_C , 但反而使压缩的屈服应力从 σ_B 降至 σ_E , 即材料表现出 BE。这个现象是可逆的,如果先进行压缩塑性变形,然后拉伸,则会使拉伸的屈服应力降低。如果将图1-1中的反向变形达到 F 点,卸载,然后重新拉伸加载,变形将沿 FGC 线进行,并获得塑性变形的滞后回线。

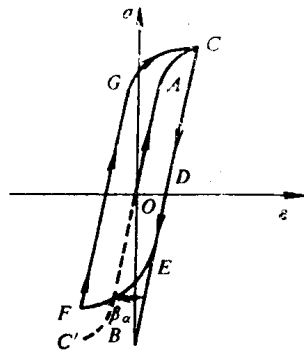


图1-1 力学滞后回线, BE 和 β_s 的测试方法图示

在这种情况下, BE 可以用压缩曲线与预应变后的反向流变曲线的交点对应的应变差值来表示[55], 并称该值为 Bauschinger 应变, 示于图 1-1。考虑到最近更多的作者用另一概念定义 Bauschinger 应变; 因此, 马鸣图采用 Bauschinger 应变差来表示这一参量, 定义为压缩流变曲线与预应变后的反向流变曲线的交点对应的两种应变历史所发展的应变差, 并以 β_s 表示。

另一些表征 BE 的参量示于图1-2, 其各参量的定义及意义分述如下。

(2) Bauschinger 应变 β 它是使应力等于预流变应力时反向流变曲线上所发展的应变, 也就是说被完全的反向加载所获得的应变。亦有用反向应力为 $3/4$ 的预流变应力 ($3/4\sigma_r$) 时所发展的应变称为 Bauschinger 应变(见图1-2b); 对于具有双拐点的外凸的反向流变曲线, β 的定义见图1-2c。通常 β 随预应变的增加而线性增加, 在达到一定的预应变后(或预流变应力后), β 值随预应变的增加其增长速度下降。参量 β 表征 BE 较为直观, 但它和显微组织之间还没有定量关系, 同时 β 还和 Luders 应变是否存在等因素有关; 因此, 当对不同的实验, 或不同预应变下的 BE 进行比较时, 采用参量 β 就遇到了困难。为此, 引入了 Bauschinger 应变参数。

(3) Bauschinger应变参数 β_s 定义为Bauschinger应变除以塑性预应变,即 $\beta_s = \beta/\varepsilon_p$,式中 ε_p 为塑性预应变;当 $\beta_s = 1.0$ 时,表示预应变完全被反向,即没有应变硬化发生。一般情况下, β_s 小于1.0;但在某些情况下, β_s 值也可能大于1.0;如果所有的由预应变引入的可动位错都参加反向变形,并且所有的位错在反向变形中都移动预应变中所覆盖的距离的2倍,那么可以预测, β_s 的最大值为2.0[23]。

(4) 平均Bauschinger应变 ABS 定义为反向流变时所节约的能量(E_s)除以正向预流变应力,即: $ABS = E_s/\sigma_f$ 。采用平均Bauschinger应变 ABS 所表征的是材料Bauschinger应变的平均效应。从反向流变开始,到内应力完全反向的那一点为止,Bauschinger应变是一个连续的变化量,如果采用在特定的反向应力下的应变作为表征BE的参量,当比较不同材料的BE时,特定的流变应力下的应变将不可能表征整个Bauschinger应变的变化情况,而采用 ABS 参量则避免了这些困难。此外,由于在参量 ABS 中,考虑了能量参量 E_s ,它可以反映应力和应变的综合效应,即比单一考虑应变或应力能更全面的反映变形材料中的BE的特性。

(5) Bauschinger应力参量 β_σ 最初,BE常以屈服点降低效应来描述,因此定义了Bauschinger应力参量 β_σ ,并表示为: $\beta_\sigma = \frac{\sigma_f + \sigma_r}{\sigma_f}$; σ_f 为预流变应力, σ_r 为反向屈服应力;当在卸载中就产生塑性流变时, σ_r 为正值, β_σ 值将大于1.0,并且理论上 β_σ 的最大值为2.0;如材料在载荷反向时才开始塑性流变,则 σ_r 将是负值, β_σ 将小于1.0。

(6) Bauschinger效应因子 BEF 它的定义为 $BEF = \frac{\sigma_r}{\sigma_f}$;这是另一个与流变应力有关的表征BE的参量。和Bauschinger应力参量类似,当材料在卸载中产生塑性流变时, σ_r 为正值, BEF 值大于0,并且在理论上, BEF 的最大值为1.0;如材料在载荷反向时才开始塑性流变,则 σ_r 将是负值, BEF 值将小于0。

(7) Bauschinger效应参数 BEP 它的定义为 $BEP = \frac{\sigma_f - \sigma_R}{\sigma_f - \sigma_0}$,式中 σ_R 为反向流变应力,它是将反向流变曲线的准线性部,外推至和拉伸预应变后的弹性卸载线相交处的应力值。如果材料有初始流变应力 σ_0 ,在给定的应变下的正向流变应力为 σ_f ,而同样应变下的反向流变应力 σ_R ,令加工硬化量由森林硬化项 $\sigma_{f,or}$ (它对正,反应变的作用是相同的),和背应力硬化项 σ_B 组成(该项阻碍正向应变,但以同样的作用和大小帮助反向流变),那么根据Brown和Stobbs的工作[7]及文献[57]中的理论模型,可以提出下述的一个近似模型[20],

$$\sigma_f = \sigma_0 + \sigma_{f,or} + \sigma_B \quad (1-1)$$

$$\sigma_R = \sigma_0 + \sigma_{f,or} - \sigma_B \quad (1-2)$$

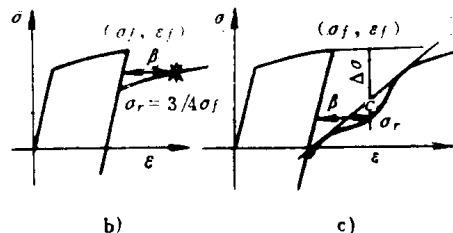
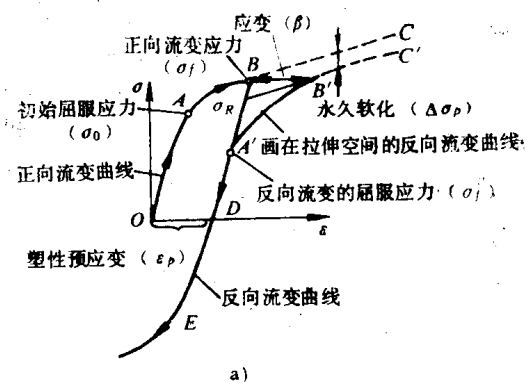


图1-2 BE参量图示

a) 单轴拉伸时的正, 反流变曲线和Bauschinger效应参量图示 b)和c) 两个特殊流变曲线中的Bauschinger应变的定义方法

根据方程 (1-1) 和 (1-2), 同样可定义 BEP 为

$$\frac{\sigma_f - \sigma_R}{\sigma_f - \sigma_o} = \frac{2\sigma_B}{\sigma_f - \sigma_o} \quad (1-3)$$

显然, 据方程 (1-3), BEP 又可理解为由弹性背应力所引起的材料的总的加工硬化部分的一种定量测量。应该注意到: BEP 中的 σ_B 值与某些塑性应变不均匀性区附近 (例如第二相粒子) 的 σ_B 的局部值并不一致。对于铁系合金, 如没有利用正向和反向应力-应变曲线或者没有参照一些补充观察或测量的结果 (如用 X-光确定晶格常数), 要估算出局部背应力的范围和范围是困难的。这正是上述处理的局限性。

对于局部背应力的计算和处理, 可以按照 Brown 和 Stobbs [7] 的模型进行。例如: 对于一个包含有刚性夹杂物的两相材料, 其刚性夹杂物的半径为 r , 体积分数为 f , 当其承受塑性应变 ϵ_p 时, $\sigma_{f,or}$ 和 σ_B 可以表示为:

$$\sigma_{f,or} = \sqrt{3a\mu} f^{\frac{1}{2}} \left(\frac{8b\epsilon}{\pi r} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (1-4)$$

$$\sigma_B = \left(\frac{8\pi b}{\epsilon r a^2} \right)^{1/8} a \mu f \left(\frac{8b\epsilon}{\pi r} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (1-5)$$

由方程 (1-3), (1-4) 和 (1-5) 可以得出:

$$(BEP)^{-1} = C_2 f^{-\frac{1}{2}} + C_1 f^{-1} \quad (1-6)$$

$$\frac{\sigma_B}{\sigma_{f,or}} = C_3 f^{\frac{1}{2}} \quad (1-7)$$

式中, a 为常数, μ 为剪切弹性模量, b 为布氏矢量的模, C_1, C_2, C_3 为常数。

方程 (1-6) 表明: 在给定的预应变下, BEP 主要与硬质相的体积分分数有关。而方程 (1-7) 则表明: 弹性背应力与森林硬化项之比, 正比于硬质相体积分分数的均方根。借助于方程 (1-6)、(1-7), 据合金中的 f 值, 就可以对不同流变下的 BEP 的大小进行估算。

(8) 永久软化 ($\Delta\sigma_p$) 通常这一参量定义为画在拉伸区内的正向和反向流变曲线的接近平行部分的应力差 (见图 1-2)。由于这一参量常和基体中的平均长程内应力——即背应力 (Back Stress), 或相间应力 (Interphase Stress) σ_B 相联系, 因此, 它是描述材料 (尤其是由刚性粒子和软基体所构成的两相材料) BE 的一个重要参量, 基于连续体模型已导出了背应力和显微组织参量之间的关系, 以及背应力和非松弛塑性应变, 预应变之间的关系; 通过永久软化及显微组织参量的测量, 就可以预测基体中或硬质相中弹性背应力的大小。

背应力的概念最早起源于 Fisher 关于弥散硬化合金的研究 [58]。在弥散硬化合金变形时, 从激活滑移面上发射的位错, 绕着交割滑移面的不可切变的粒子弯曲并通过粒子而留下 Orowan 环; 这些位错环通过在滑移面上施加的背应力增加了在滑移面上的 Frank-Read 源发射位错的有效临界应力。背应力的大小取决于稳态的位错环数, 每个粒子上位错环的径向分布, 粒子的大小和间隙。背应力本身就定义了由于沉淀粒子所引起的硬化增量。以后, 在 Brown 和 Stobbs [7~9] 和 Asaro [18] 等所提出的两相材料的加工硬化模型中将背应力的概念进一步进行了发展。从连续介质的塑性理论或位错理论导出了背应力与非松弛应变之间的关系。已经表明: 背应力硬化具有方向性, 它阻碍材料的正向流变, 引起硬化, 但却以相反的意义帮助反向流变, 引起软化和反向流变曲线圆化, 从这个意义上说, 可以认为永久软化是背应力的大小的度量。

根据方程 (1-1) 和 (1-2) 可以得出:

$$\sigma_t - \sigma_R = 2\sigma_B \quad (\text{或 } \sigma_t - \sigma_R = \Delta\sigma_p = 2\sigma_B) \quad (1-8)$$

如基体中的长程背应力以 σ_m 表示, 则 $\sigma_B = \sigma_m$, 那么:

$$\Delta\sigma_p = 2\sigma_B = 2\sigma_m \quad (1-9)$$

方程 (1-9) 的力学理论基础是Cottrell的“稳定模型”(Shakedown model)。这一模型类似于早期的理想的并联的二元弹塑性元硬化模型(又称Masing model)[59]。该模型是将一个弹性元和一个理想的塑性元平行地焊在一起(见图1-3), 在塑性变形时, 这样一个体系的BE可以用永久软化来表示。图中所示的理想塑性材料的屈服流变应力为 σ_y , 当图中两组元进行等应变变形时, 理想塑性材料与只承受弹性变形的材料平行的变形, 体系所表现出的永久软化的大小等于塑性组元中残留应力的二倍, 如公式 (1-9) 所示。而非均匀的局部内应力使反向流变曲线产生圆化(如图中虚线所示)。

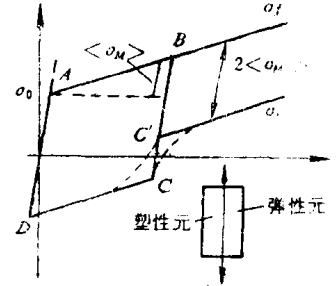


图1-3 Shakedown模型的变形图示

Wilson在1965年进行了一项有意义的X-ray实验, 实验中他设置了一个特殊的加载装置, 测量了变形的球化高碳钢的基体和碳化物的晶格应变, 并由此计算了两相中的弹性内应力; Wilson基于有关实验结果指出[60], 预应变所产生的背应力, 在反向应变中将会逐渐降低或消失, 在所谓的 ϵ_m 的反向应变下, 其背应力下降到零。在这一特定的应变下, 正向和反向的流变应力差为 $(1.9 \pm 0.1) \sigma_m$, σ_m 为用X-射线测定的母相中的平均内应力(即背应力)。Wilson所确定的 ϵ_m 值为正向预应变的3/8。但是, Wilson的实验结果表明: 画在拉伸区的反向流变曲线与正向流变曲线之间, 且未表现出严格一定的永久软化值。因此方程 (1-9) 中的因子“2”实际是一个上限值; 用方程(1-9)所确定的基体中的平均内应力比真实值会小一些。用X-ray所测定的球化碳钢中的背应力和永久软化之间的关系表明: $\sigma_B = 0.53 (\Delta\sigma_p)$, 而用正、反向流变曲线近似平行部分测出的永久软化量 $\Delta\sigma_p$, 然后按照方程(1-9)计算出的背应力值亦小于实测值[60、61]。此外, 方程 (1-1) 和 (1-2) 中假定了在正反变形时, 森林硬化项 $\sigma_{f,0}$ 保持不变, 显然这与实际材料中变形时的情况也不相符; 也就是说, 在讨论背应力与永久软化之间的关系时, 应该考虑到 $\sigma_{f,0}$ 和 $\Delta\sigma_p$ 在反向应变中的变化[62]。然而, 由于这一问题的复杂性, 迄今尚未见到关于这一问题的理论探讨。

马鸣图等研究了预应变后, 反向流变时矫顽力各向异性的变化[51, 53], 清楚地展现了在反向流变过程中, 背应力的降低, 消失以及与预应变引入的符号相反的反应力的重新产生的过程。虽然矫顽力变化曲线上各拐点的物理意义有待进一步研究, 但矫顽力各向异性的消失点, 则可认为是预应变引入的背应力的消失点(关于这部分的详细讨论将在第5章进行)。

为了简化讨论, 现仍认为方程 (1-1) 和 (1-2) 中的假定(即 $\sigma_{f,0}$ 在正、反向流变中不变)是正确的。即方程(1-8)和(1-9)是正确的。那么由方程(1-8)可以看出: 当反向流变应力 σ_R 与正向流变应力 σ_t 相等时, 则有 $\sigma_B = 0$ 。而 $\sigma_R = \sigma_t$ 时所发展的应变即定义为 Bauschinger 应变 β , 当反向流变 $\epsilon_r = \beta$ 时, $\sigma_B = 0$, 即由预应变引入的背应力消失。

从能量角度分析问题的方法可以同时反映应变和应力的影响, 并且这种解决和处理问题的方法可以只考虑过程的始态和终态, 避开复杂路径的困难。拉伸或压缩的耗能, 可以用应力应变曲线下的面积来表示。现利用这一方法分析图1-4所示的理想状态下的拉伸和拉伸后随

之压缩时的能量变化。图中 $OABF$ 为拉伸应力应变曲线,材料在 A 点屈服,拉伸变形至 B 点卸载并压缩,材料在 B' 点屈服, $CB'E$ 为画在拉伸空间的压缩流变曲线;拉伸至 B 点后继续拉伸时的耗能可用 $BB'CDEFB$ 所包围的面积表示;如果初始屈服应力 σ_0 和森林硬化应力 $\sigma_{f,0}$ 所做的功对正向和反向应变都是相同的,那么拉压变形时所做的功的差主要是方向性的背应力所造成,并且可用 $BB'EFB$ 所包围的面积表示;它的大小恰为 E_s 的二倍。这一块面积可用 $\beta \cdot BB'$ 来近似表示(准确的表示应是 $\beta \cdot BB' \cdot K$, K 为一系数), $BB' = \sigma_f - \sigma_R = \Delta\sigma_p$,因此可以得出: $BB' \cdot \beta = \Delta\sigma_p \cdot \beta = 2E_s$,即:

$$\Delta\sigma_p = \frac{2E_s}{\beta} \quad (1-10)$$

当流变曲线为曲线时,方程(1-10)并不失一般性,此时只是计算曲线下所包围的面积应采用积分方法:即 $E_s = \int_0^{\beta} \sigma_B(\epsilon_r) d\epsilon_r$,方程(1-10)可以表示为更一般的形式:

$$\Delta\sigma_p = \frac{2 \int_0^{\beta} \sigma_B(\epsilon_r) d\epsilon_r}{\beta} \quad (1-11)$$

方程(1-11)表明:随着 $\sigma_B(\epsilon_r)$ 的变化, E_s 在变化, $\Delta\sigma_p$ 亦在变化;不同的钢种已表明了有不同的永久软化量。但是方程(1-10)表明:只要 β 存在(凡有BE的合金, β 总会存在),则就会有 $\Delta\sigma_p$ 存在;但在许多工程材料中,并未发现永久软化存在,而有明显的 β 值。这一矛盾主要来自于 $\sigma_{f,0}$ 这一应力分量对正反流变的不同影响,导出方程(1-10)时,假定了 $\sigma_{f,0}$ 在正反流变时是不变的,但实际上森林硬化明显影响反向变形时的硬质相中的弹性背应力的释放,在文献[51]中表明:矫顽力各向异性消失(背应力消失)时所对应的反向流变应力值并不等于预流变应力,而是小于预流变应力,就可能是 $\sigma_{f,0}$ 对反向流变时弹性背应力的影响结果。方程(1-8)和(1-9)只是在某些条件下才能成立。在文献[26]中也已得出:对于双相钢,背应力和永久软化也不存在唯一形式的确定关系;本书作者亦在文献[39]中强调指出:仅根据Bauschinger效应实验,来准确地预测背应力,其理论背景还不充分。

(9) Bauschinger强度差因子 $BSDF$ 这一参量的定义为: $BSDF = \frac{\sigma_f' - \sigma_r}{\sigma_f'}$

式中, σ_f' 为在一定的预拉伸变形后,再正向拉伸变形时的屈服流变应力, σ_r 为反向变形时的屈服流变应力;其测量方法的图解示于图1-5。在文献[24]中引入这一参量主要是为了表征在成形制品中或构件中的BE(如不锈钢制成的半球容器)。同时,这一参量对于研究中时效对BE的影响也较方便。但在其它场合应用不多。

(10) Bauschinger效应能量参数 $BEEP$ 这一参量定义为:在反向加载中达到某一变形量所节约的能量(E_s ——又称Bauschinger效应能)与预应变时的耗能 E_p 之比;

$BEEP = E_p/E_s$ 。其 E_s 和 E_p 的意义示于图1-2。正如前述,不论应力或应变,都不能对BE提供一个准确而充分的测量。一个较好的测量参量是采用应力应变曲线下的面积,这一面积参量具有“功”或“能”的意义和尺度。 $BEEP$ 作为对BE的测度不仅同时反映了应力和应变效应,而且也反映了在反向加载中的快速的加工硬化效应和森林硬化的变化效应。实验已经证明: $BEEP$ 值总是小于1.0,并且在一般情况下,其

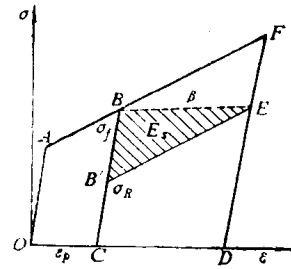


图1-4 理想化的拉压流变曲线

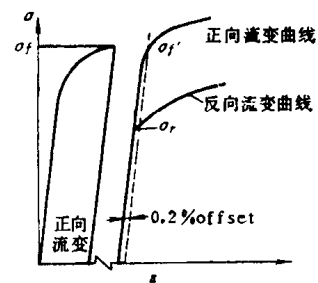


图1-5 $BSDF$ 的测量方法图示

值远小于1.0。反向流变时出现这一能量节约的原因是拉伸预应变中所累积的弹性能，以可逆的方式储存在预变形的材料中，在反向变形时，由系统中放出，从而导致外力对系统做功相应地下降。因此，从这个意义上说，*BEEP* 可以作为预应变循环中所建立的平均弹性应力的直接测量，并可根据*BEEP*值的高低，对预应变的性质进行评价。例如*BEEP*值较低的与*BEEP*值较高的材料相比，其变形中所消耗的不可逆功要多，因而其变形状态更加稳定。

考虑到BE的“可逆性” (recoverability) 或者是与变形相关的能量储存机制的“可逆性”以及变形过程中储能的大小具有重要的实际意义，那么从拉伸与压缩变形的宏观，微观过程对这一参量进行分析，将可加深对这一参量的物理本质的理解。

如果拉伸方向在应力 σ_T 下产生塑性变形 ϵ_p ，其中部分应力 σ_{f1} 用于克服由杂质或 peierls 力所引起的摩擦力^[63]，另一部分应力 σ_{f2} 是与位错克服更大距离上的运动阻力相关的应力^[64]，平均摩擦力(它包含了不变应力参量 σ_{f1} 和可变应力参量 σ_{f2})将取决于峰值应力。应力的其它分量来源于位错与位错的线张力所产生的反作用力之间的交互作用。这样拉伸流变曲线就可以用一个矩形面积(见图1-6)代替^[23]，并可表示为：

$$\int \sigma d\epsilon = \bar{\sigma}_T \epsilon_p = \bar{\sigma}_F \epsilon_T + \bar{\sigma}_E \epsilon_T \quad (1-12)$$

方程(1-12)表明：拉伸变形能可以分为两部分：即大的面积 $\bar{\sigma}_F \epsilon_T$ ，它表示在变形中所消耗的大部分能量和小的面积 $\bar{\sigma}_E \epsilon_T$ ，该项能量表示储藏

在试样中的与平均弹性应力 $\bar{\sigma}_E$ 有关的能量。

在拉伸预应变之后，进一步的拉伸变形时的平均流变应力为 $(\bar{\sigma}_T + \Delta\sigma)$ ，如果材料没有BE，在预应变之后压缩变形时的平均流变应力应为 $-(\bar{\sigma}_T + \Delta\sigma)$ ，然而，由于材料中BE的存在，而在压缩时的实际平均流变应力为 $-(\bar{\sigma}_T - \Delta\sigma)$ ，这意味着在压缩时获得单位塑性变形所需的功少于拉伸，变形从零应力下相同的内能状态开始，由于应变路径的差异而出现上述

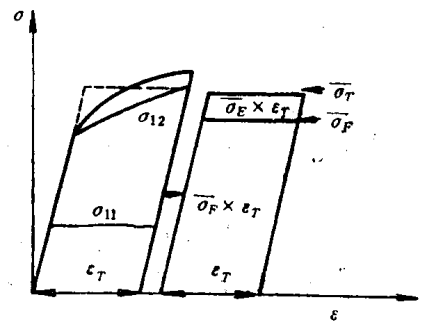


图1-6 修正的拉伸流变曲线

两种能量状态是很有趣的也是令人惊奇的。因此可以推测，反向流变时出现的这一能量节约的原因是在拉伸变形中累积的弹性能，以可逆的方式储藏在变形材料中，在压缩时从系统中放出，导致外力对系统做功的降低。

如果上述分析和推测成立，那么 $\bar{\sigma}_E \epsilon_T = E$ ，就可以以实验确定。因此*BEEP*可以写为：

$$BEEP = \frac{E}{E_p} = \frac{\bar{\sigma}_E \epsilon_T}{\sigma_T \epsilon_T} = \frac{\bar{\sigma}_E}{\sigma_T} \quad (1-13)$$

根据对*BEEP*参量物理意义的分析，可以认为BE又是在预应变循环中所建立的平均弹性能的直接测度。同时*BEEP*也是对经预应变的变形材料的性质和稳定性的评价。例如*BEEP* = 0.05和*BEEP* = 0.15或更高的值相比，前者由于预应变所作的功其不可逆部分要比后者高的多，或者说，*BEEP*值较低的材料在变形后的状态要比*BEEP*值较高的材料要稳定的多。

1.3 描述BE的连续介质力学模型

BE是材料的宏观力学表现，因此，对于这一现象的描述的早期理论大都属于连续介质力学的探讨。连续介质力学属于唯象理论，它不涉及物质材料的性能与微观结构的关系，而采

用连续介质的假设,使得与连续场论有关的数学处理和分析可以方便地用于阐明有关力学现象;由于这种分析问题的方法不涉及变形材料的物理本质,因而简单实用,同时由于它所依据的是宏观实验结果,而所得的结论仍用于阐明宏观力学现象,因此又具有一定的合理性。

采用连续介质力学处理时,广泛采用两个加工硬化规则:各向同性加工硬化(isotropy work hardening)和运动学加工硬化(kinematic work hardening)[65]。当初始屈服表面在塑性流变中均匀膨胀时,就出现了各向同性加工硬化,而初始屈服表面可以定义一个各向同性材料,亦可定义一个各向异性材料[66]。按照运动学的加工硬化规则,屈服表面并不改变它的初始形式和取向,只是在应力空间象刚体那样平移,将这些颇为基本的概念延拓,就导致产生了一些理论模型:如各向同性硬化和线性运动学硬化模型,弹塑性元硬化模型(又称Masing model)[59],组合的运动学和各向同性硬化模型,以及基于初始屈服表面的平移、膨胀和扭曲的各种方式的组合而导出的加工硬化模型。这些模型都是为了描述材料的加工硬化行为和反向流变产生的BE。在弹塑性断裂力学中,这些模型也可用于描述材料裂纹尖端的屈服行为。

在各向同性的加工硬化模型中,是把“塑性变形历史曲线”的弧长作为描述“变形历史”的唯一参数,因此无法描述BE。在建立描述BE的唯象理论时,最重要的是在加载准则和本构关系中引进和塑性变形历史有关的新的参量,背应力和运动硬化模型就是在这种情况下提出来的。

50年代初,Ishlinski[67]和Prager[68]等首先提出了线性运动硬化模型作为描述BE的一种简单理论。这一理论认为:当加载面或后继屈服面在应力空间作运动时,其运动的中心由背应力表示。随后Ziegler等为克服Prager提出的模型数学上的不完备之处,对Prager理论又进行了修改。60年代至80年代,运动硬化模型已引起人们广泛的重视,并发表了一系列文章,讨论了各种线性和非线性运动硬化模型及其适用范围。背应力是建立模型的核心,它和后继屈服面在应力应变空间一起运动,因此,它对应力和塑性应变历史具有唯一的确定性。

值得提出的是,背应力概念的引进,可以和目前的塑性内变量理论框架协调一致起来,即把背应力看成是一种表征由塑性变形引起的微元内部结构发生变化的一种特殊的内变量。作为内变量理论的最重要的问题是建立内变量的演化方程;目前,在Prager和Ziegler等人运动强化模型的基础上,对背应力的演化方程已进行了大量研究,已使这一理论日臻完善。

把等向强化与运动硬化模型结合起来的各向异性强化理论表明:运动的后继屈服面不仅是初始屈服面在应力空间或应变空间的刚性平移与转动,而且在运动中还会发生扭曲和胀缩。如初始屈服表面为各向异性时,对这类材料的BE,可采用广义的运动强化模型来描述。

上述的运动硬化模型是以单一的后继屈服面为基础的,这一理论虽然可以说明简单载荷下的BE。但对具有复杂加载路径的塑性变形过程的描述并不充分,亦很难用于循环载荷下的shack down状态和极限分析的研究。为了克服这些不足,使唯象模型可以更正确地描述物体在复杂加载路径下的响应特性,如弹性松弛,应力滞后回线和shack down特性,而提出了各向异性强化的多重曲面模型。1963年,Besseling[71]曾提出用应变空间中的一个附加曲面来描述屈服与加载曲面的硬化区域,并以此讨论了初始各向同性材料在塑性变形中产生各向异性硬化时的塑性流动理论。随后Mroz[72]详细论述了应力空间的多重曲面的各向异性硬化理论,并提出了关于“加工硬化模量场(Field of workhardening moduli)的概念以代替运动硬化模型中的应力或应变的单一参数。Mroz的模型对于复杂加载,尤其是反复循环

加载条件下的材料特性的描述更接近实验结果；继 Mroz 之后，关于非弹性变形的多重曲面表示和论述已发表了一系列工作[73~80]，尤其值得提出的是文献[75, 76]中提出的双曲面塑性理论模型（又可称为简化的多重曲面理论），即引进了屈服曲面和边界曲面；在理论推导和数值计算时，和 Mroz 的多重曲面表示已有很大的方便之处。

除了应力空间的多重曲面表示外，Casey 等[81]引进了应变空间多重曲面表示的一般方法，并给出了应力空间和应变空间表示的等价性条件。采用应变空间表示的优点是可以统一处理应变硬化和应变软化，塑性加载和弹性卸载等问题，并给计算带来很大方便。

此外，在对 Mroz 模型修正中，Rees[77, 78]考虑了运动后继加载面的新的表示，并考虑了运动硬化曲面的胀缩和转动，从而使理论计算和实验结果吻合较好。

Rees 等[82]曾详细计算了在拉、扭复合应力下的 J_3 效应以及不同于 Levy-Mises 流动法则而产生的各向异性硬化效应，以此说明和描述拉-扭或扭转试验时的初始屈服面的形状、部分材料的循环应变硬化以及与 BE 有关的一些现象，也有人进一步把 J_2 和 J_3 屈服理论和运动强化模型结合起来，建立了更一般的运动强化模型，并以此作为讨论 BE 的基础。

近20年来，随着塑性本构关系的发展，人们提出了各种事先不需要构造屈服面或加载函数的塑性本构理论，泛称为无屈服面的塑性本构理论。这种理论采用了广义的内变量方法；该理论的提出和发展是塑性唯象本构理论的一个重要发展。理论从塑性变形的物理机制分析着手，选择一组反映材料在塑性变形过程中内部结构和缺陷变化的“内部状态变量”(Internal state Variable)，简称内变量，它们可以是标量，向量或张量，它们的大小和变化完全可以等价于对塑性变形历史的描述。通过理论分析或实验研究，建立一组内变量的演化或发展方程，将内变量的时间率，内变量本身，宏观应力，应变等表示出来。只要把内变量对 Gibbs 自由能或 Helmholtz 自由能的贡献以及耗散函数对这些内变量的依从关系确定下来，则原则上都可确定这些演化方程；再通过实验和计算，验证内变量的选择及演化方程是否合理和正确。

内变量理论最早曾用来描述热弹性和线性粘弹性物体的不可逆行为[83]。Schapery[84, 85]把这一理论扩展到了非线性粘弹性中去，内时理论即引进内禀时间作为描述弹塑性物体非线性变形历史的一种内变量，在热力学框架内构造无屈服面的粘弹性塑性本构关系，也是一种内变量理论[86, 87]。不少学者用这一理论研究了大量比例和非比例加载的塑性变形问题：包括 BE。循环载荷下的滞后回线，循环变形等。得到不少计算值和实验相符的结果。在内时理论中的内禀时是塑性历史弧长的某个可微函数，和牛顿的真实时间并无直接联系，这一理论描述的只是准静态的或率无关的现象。显然这里所叙述的内时理论仅是一种特殊的无屈服面理论。在文献[88]中还论述了用位错动力学构造的塑性本构关系以及利用这一关系唯象地研究 BE 和各向异性流动法则等现象[89]，实际上也是一种无屈服面理论。

在本书的第3章中将较详细论述这些模型或理论。各理论预测和实验结果吻合的程度不仅与模型自身的完善性有关，而且也与模型中材料常数的选择的合理性有关：材料在复合载荷下不同路径的响应特性的实验结果，对于合理选择各模型中的材料常数是相当重要的。

1.4 描述 BE 的微观力学模型

微观力学在力学界又称细观力学，它是研究材料的宏观性能和微观组织组成及各种点、线、面缺陷之间关系的一门新兴学科。它考虑到连续介质力学中的物质组成的微观不均匀性

及应力、应变分布的不均匀性,通过一定的研究方法把材料的宏观力学性质与微观结构,缺陷分布、运动及演化规律密切结合起来,从而在更微观的层次上揭示材料宏观变形、断裂的客观规律,是固体力学、材料科学、物理冶金等学科相互沟通、联系的纽带。

许多工作研究了纯金属的单晶或多晶的循环变形特性,BE和相应的位错模型。但是对描述BE的微观力学探讨,人们更多地兴趣是对包含有非变形夹杂物的二相合金的加工硬化的研究[7~9, 11, 12, 100~107]。这些研究的主要目的是确定加工硬化机理和变形中所发展的内应力。

描述BE的微观力学认为:在变形材料中, BE发展的主要原因是塑性应变的不均匀性。不论是从位错运动的微观尺度(nm)上,或者从晶粒大小的尺度(μ)上,以及第二相粒子、夹杂物的尺度(亚 μ)上,塑性应变都是不均匀的,这种结构:性能和塑性应变的不均匀性将导致在变形材料内部的各相之间的塑性应变不相容,从而产生内应力,这些内应力按其性质又可分为短程内应力和长程内应力;前者多与位错的排列、粒子间隙等因素有关,后者则与硬质相和母相之间的整体塑性应变不相容有关,长程内应力是有方向性的,它提供了一种正向流变时的硬化机制,但在反向流变时产生软化和BE。而这一长程内应力常常根据正向和反向流变试验来估算,并称这一内应力为背应力(亦称母相中的平均应力mean stress in the matrix或相间应力)。已经注意到,在塑性应变中,两相材料中的硬质粒子周围将会出现一定量的塑性松弛而形成一层塑性壳;这种部分地塑性松弛只是使基体和夹杂物之间的塑性应变不相容性略有下降。两相之间的塑性应变不相容性的度量是非松弛应变(ϵ_p^*),显然 ϵ_p^* 与背应力有关。这种对两相合金的强化机理(背应力硬化和森林硬化)的分析可以应用于包含有各种大小、形状和强度的第二相粒子或夹杂物的两相合金;例如球化碳钢[17, 18],包含有粗的金属间化合物粒子的Al-6%Ni和Al-7.6%Ca合金(其金属间化合物分别为:Al₃Ni和CaAl₄) [108],以及沉淀强化的Al-Cu-Mg, Al-Zn-Mg和Al-Cu系合金[109, 110]。

合金的组织越复杂,则对其加工硬化行为描述时进行数学处理越困难。造成这种困难的原因有二:首先是第二相的定量困难,其二是当正反加载试验时,描述第二相对材料加工硬化行为的影响困难。例如:高强度低合金钢(HSLA钢),这类钢通常是在低碳钢中加入微合金元素而发展起来的,具有较复杂的显微组织;这类钢中已有一些用于管线钢,而制作管线的U、O、E工艺过程包含有应变循环,BE对其压力-膨胀特性表现有明显的影响[111, 112]。近年来发展起来的具有低的屈服强度、高的加工硬化速率和良好的强度和延性匹配的双相钢,由于其组织的复杂性,对其BE机理探讨也是人们感兴趣的研究课题。

1.5 综 述

BE是金属合金中相当重要而又普遍存在的一种力学现象,对BE的研究不仅对于弄清合金的变形和加工硬化机制具有理论意义,而且对于成形构件强度的合理使用,BE有害影响的降低和防止等均具有重要意义。

BE发现百多年来,已进行了一系列的大量研究,在BE的测试方法的发展,表征参量的物理意义探讨,BE和加工硬化机制的关系研究,BE的实际应用等方面都取得了明显的进展。

目前,随着测量BE的力学方法的完善和实验设备尤其是计算机控制的电液伺服设备的应用,以及复合加载系统的出现和应用,为BE的研究和深入认识提供了新的手段和丰富的实验结果。有限元计算方法的发展,为模拟拉压流变曲线和显微组织之间的关系提供了新的有效