

结构钢与铝合金 塑性变形的微观机制

刘禹门 著



西安交通大学出版社
XI'AN JIAOTONG UNIVERSITY PRESS

TG111.7
L202

结构钢与铝合金 塑性变形的微观机制

刘禹门 著

西安交通大学出版社

• 西安 •

内容提要

本书阐述了应用透射电子显微术对常用合金结构钢(铁素体钢、铁素体珠光体钢、低碳及中碳回火马氏体钢),在静载及动载拉伸应力作用下塑性变形及循环塑性变形微观过程的观察及理论分析。详细介绍了沉淀强化合金强化过程的位错缠结机制、静载加工硬化微观理论——静载竞争机制、宏观疲劳硬化/软化的微观理论——循环显微硬化/软化理论,以及粗大疲劳变形带扩展导致的显微裂纹的萌生机制。本书还介绍了自然时效、人工时效及过时效 Al-Cu-Mg 合金的静载塑性变形的微观机制。

本书可供材料科学领域研究人员参考,也可作为相关专业的研究生教材和大学生参考书。

图书在版编目(CIP)数据

结构钢与铝合金塑性变形的微观机制 / 刘禹门著.
—西安:西安交通大学出版社,2004.4
ISBN 7-5605-1835-4

I. 结… II. 刘… III. ①结构钢-塑性变形-研究
②铝合金-塑性变形-研究 IV. TG111.7

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 027696 号

书 名	结构钢与铝合金塑性变形的微观机制
著 者	刘禹门
出版发行	西安交通大学出版社
地 址	西安市兴庆南路 25 号(邮编:710049)
电 话	(029)82668357 82667874(发行部) (029)82668315 82669096(总编办)
印 刷	陕西宝石兰印务有限责任公司印装
字 数	173 千字
开 本	787mm×1092mm 1/16
印 张	8.5
版 次	2004 年 4 月第 1 版 2004 年 4 月第 1 次印刷
书 号	ISBN 7-5605-1835-4/TG·26
定 价	48.00 元

版权所有 侵权必究

导 言

金属材料加工制造的工艺性能,以及它承受机械载荷的服役性能,例如机械强度、加工硬化、塑性等力学性能,实际上都与材料的塑性变形密切相关。因此,长期以来许多研究者对金属材料塑性变形的微观机制做了大量的研究工作,取得了很大的进展。但是,对于工程结构与机械制造中大量应用的结构钢的塑性变形微观机制却很少研究。其原因是这类材料的显微组织复杂和位错密度高,例如淬火回火钢就是这样的。对它们难以辨认和确认其位错行为,故而难以建立其塑性变形的微观机制。因此,一直没有同类研究工作的文献可以引用和借鉴。

一般来说,形变位错结构的研究^①是打开探明合金力学性能根源之门的一把钥匙。

这类材料的塑性变形过程,在时间上,即材料的静载或动载的整个加载过程中,在各个变形阶段各种形变模式此消彼长,反复交替;在空间分布上,即在材料的整个承载容积中,各种形变模式互相穿插,错综复杂。鉴于此,作者曾对生产中大量应用的结构钢,尤其是淬火回火状态的合金结构钢进行了10年的研究工作,提出了一些新概念,建立了一些新机制,这些新概念和新机制具有重要理论意义。其中主要的概括如下:

沉淀强化合金强化过程的位错缠结机制。对于软的基体和硬的第二相颗粒构成的沉淀型合金,例如淬火回火钢,由于承载过程母体与第二相颗粒之间应变不能协调,便在相界面处释放位错^②。这时基体中的运动位错与界面放出的位错相遇而发生交互作用,便在第二相颗粒周围形成位错缠结。随后的运动位错很难通过含有第二相颗粒的位错缠结团,而使合金得到强化。这个强化过程可以称为位错缠结机制。

宏观加工硬化的微观理论——显微区域的加工硬化与软化的静载竞争机制。应用力学性能试验测定的静载宏观加工硬化曲线,实质上,它是材料中许多显微区域的加工硬化与许多显微区域的加工软化两种作用相反的诸因素综合相互作用的表现。材料在承载过程,一方面位错密度增加,形成各种位错组态,这些是引起加工硬化的因素;而另一方面,高位错密度区却又可能演化为低位错密度区,显微组织的多种变化以及出现各种类型的损伤,这些是引起加工软化的因素。这两种作用相反的因素随着加载的进行,在各微小容积区域中在不断变化着,这是演化的过程和竞争的过程。

宏观疲劳硬化与软化的微观理论——显微区域的循环硬化与软化的动载竞争机制。实测的恒应变幅疲劳加载的循环应力对加载周数的关系曲线所表现出来的宏观疲劳硬化与疲劳软化,实质上是许多显微区域的循环硬化诸因素与许多显微区域的循环软化诸因素相互竞争的综合表现^③。

粗大疲劳变形带扩展导致循环微裂纹萌生的机制。对于多晶体材料,从淬火回火结构钢的

① Liu Yumen and Zhou Huijiu, Mater. Sci. Eng., 81 (1986)451。此文曾被引用,例如:R. J. Amodeo and N. M. Ghoniem, Physical Review B 41(1990)6968。

② Liu Yumen and Zhou Huijiu, Mater. Sci. Eng., 84 (1986)137。此文曾被引用,例如:J. K. Cuddy and M. N. Basim, Mater. Sci. Eng., A125(1990)43。

③ Liu Yumen, Mater. Sci. Eng., A113 (1989)237。此文曾被引用,例如:Joon Sik Park, Sung Joon Kim, Chong Soo Lee, Mater. Sci. Eng., A298(2001)127。

研究结果中作者发现、确认并界定的粗大疲劳变形带的扩展可以导致显微疲劳裂纹萌生。在承载过程,随着疲劳载荷循环周数的增多,在材料的内部即使出现了具有驻留滑移带性质的位错滑移带,由于每个马氏体晶条都会发生复杂的塑性变形,一个马氏体晶条中可以出现多滑移,因而这样的位错滑移带是要被破坏,而无法存在下去的。最终由钢中出现的粗大疲劳变形带的扩展导致萌生显微疲劳裂纹^①。

作者提出的新概念及新机制都是建立在大量的、直观的实验研究之上,同时是以塑性变形基础理论的分析为依据,并且经受了时间的检验,因而它们具有经典性质。

书中所用的全部实验结果均来自作者的研究工作,是作者长期研究工作(其中包括尚未发表的研究结果)全面系统的简要总结。虽然过去曾经公开发表过一些实验研究成果,提出过一些新概念和建立过一些新理论,但在本书中则更进一步深入地分析了这些新概念及新理论。在此基础之上,在各实验结果之间相互呼应,相互联系地进行理论分析,从而更加深刻地揭示结构钢及铝合金塑性变形的微观过程。

理论研究的目的是寻找同类型合金塑性变形的共同基本规律。本书虽然只是对几种常用的典型结构钢及铝合金的塑性变形微观过程进行分析,可是这些研究结果所揭示的基本规律却具有一定的普遍意义,能够代表同类型材料塑性变形的微观基本特征。

本书所阐述的内容,对于读者来说其重要意义不仅在于这些概念及理论的直接应用,另一层意义还在于展示这些观察和理论分析的思想方法及分析方法,或许可供借鉴。

如果本书所论述的内容能对我国材料科学基础研究有所裨益的话,那将是对作者最大的安慰和鼓舞。

劉禹門

2003.12

^① Liu Yumen, Mater. Sci. Technol. 6 (1990)731。例如:文献 Stefanie E. Stanzl-Teschegg, Z. Metallkd., 93(2002) 799 的研究表明,疲劳加载的低碳铁素体钢,即使在试样的外表面上也难以观察到驻留滑移带 PSBs。相关的详细分析参见本书正文。

目 录

第 1 章 绪论	(1)
1.1 塑性变形与力学性能	(1)
1.2 塑性变形微观机制	(1)
1.3 主要理论分析	(2)
1.3.1 合金强化机制——位错缠结模型	(2)
1.3.2 静载竞争机制	(3)
1.3.3 动载竞争机制	(3)
1.3.4 循环微裂纹萌生机制	(4)
1.3.5 铝合金的塑性变形	(4)
第 2 章 铁素体钢	(5)
2.1 铁素体的亚结构	(5)
2.2 合金铁素体钢的循环塑性变形	(5)
2.2.1 稳定状态的铁素体	(6)
2.2.2 循环形变位错结构的演变	(7)
2.3 循环塑性变形微观机制	(12)
2.4 疲劳极限的微观理论	(14)
第 3 章 铁素体珠光体钢	(16)
3.1 铁素体珠光体钢的静载塑性变形	(16)
3.1.1 退火钢的位错	(16)
3.1.2 形变位错结构的演变	(17)
3.1.3 塑性变形微观机制模型	(19)
3.2 显微加工硬化与软化理论——初论静载竞争机制	(20)
3.3 铁素体珠光体钢的循环塑性变形	(24)
3.3.1 循环形变位错结构的演变	(24)
3.3.2 循环塑性变形微观机制模型	(28)
3.4 显微循环硬化与软化理论——初论动载竞争机制	(30)
第 4 章 面心立方晶体向体心四方晶体转变的塑性变形	(32)
4.1 高碳合金钢马氏体的形核	(32)
4.1.1 奥氏体的亚结构	(32)
4.1.2 马氏体的形核位置	(33)
4.2 高碳合金钢马氏体特征	(35)

4.2.1	高碳马氏体的分布	(35)
4.2.2	高碳马氏体的基本特征	(36)
4.2.3	形变马氏体	(40)
4.3	高碳合金钢相变过程的塑性变形	(41)
4.3.1	过冷奥氏体	(42)
4.3.2	马氏体	(43)
4.3.3	马氏体周围的奥氏体	(43)
4.4	低碳马氏体转变过程的塑性变形	(44)
4.4.1	显微组织	(45)
4.4.2	马氏体的塑性变形	(46)
第5章	低碳回火马氏体钢	(48)
5.1	淬火自回火低碳铬镍钢的塑性变形	(48)
5.1.1	淬火钢的显微组织和亚结构	(48)
5.1.2	钢的力学性能	(48)
5.1.3	形变位错结构的演变	(48)
5.1.4	塑性变形的分析	(52)
5.2	低温回火低碳铬镍钢的塑性变形	(53)
5.2.1	钢的显微组织	(53)
5.2.2	钢的力学性能	(53)
5.2.3	形变位错结构的演变	(53)
5.2.4	塑性变形的分析	(56)
5.3	中温回火低碳铬镍钢的塑性变形	(59)
5.3.1	钢的显微组织	(59)
5.3.2	钢的力学性能	(59)
5.3.3	形变位错结构的演变	(59)
5.3.4	塑性变形与流变应力	(60)
5.4	高温回火低碳铬镍钢的塑性变形	(63)
5.4.1	钢的显微组织	(63)
5.4.2	钢的力学性能	(64)
5.4.3	形变位错结构的演变	(65)
5.4.4	屈服与加工硬化的分析	(67)
5.5	*再论静载竞争机制——宏观加工硬化的微观理论	(68)
5.5.1	合金塑性变形的模式	(69)
5.5.2	低位错密度区的形成及特征	(69)
5.5.3	静载加工硬化的竞争机制模型	(71)

第 6 章 * 沉淀强化的新理论	(74)
6.1 回火马氏体的位错增殖与交互作用	(74)
6.1.1 回火马氏体晶条界	(74)
6.1.2 碳化物相界面	(74)
6.1.3 碳化物外围的位错交互作用	(75)
6.2 沉淀强化的位错缠结模型	(75)
第 7 章 中碳回火马氏体钢的塑性变形	(77)
7.1 中碳合金钢马氏体的一般特征	(77)
7.1.1 马氏体转变的塑性变形	(77)
7.1.2 回火马氏体的回复	(77)
7.2 550℃回火中碳马氏体的塑性变形	(78)
7.2.1 形变位错结构的演变	(78)
7.2.2 塑性变形与力学性能	(82)
7.3 650℃回火中碳马氏体的塑性变形	(83)
7.3.1 回火马氏体的位错网	(83)
7.3.2 形变位错结构的演变	(83)
7.4 位错缠结模型的重要证据	(84)
第 8 章 回火马氏体钢的循环塑性变形	(87)
8.1 中温回火低碳铬钼马氏体	(87)
8.1.1 回火马氏体的亚结构	(87)
8.1.2 循环形变位错结构的演变	(87)
8.2 * 粗大疲劳变形带	(93)
8.2.1 特征	(93)
8.2.2 萌生	(93)
8.2.3 扩展	(93)
8.3 * 再论动载竞争机制——显微循环硬化与显微循环软化理论	(95)
第 9 章 循环显微裂纹萌生的新机制	(97)
9.1 高温回火低碳铬钼马氏体	(97)
9.1.1 回火马氏体的显微组织	(97)
9.1.2 循环形变位错结构的演变	(97)
9.2 * 循环显微裂纹萌生机制	(101)
9.2.1 循环位错滑移带	(101)
9.2.2 循环显微裂纹的萌生	(101)
9.2.3 循环显微裂纹萌生模型	(103)
第 10 章 Al-Cu-Mg 合金	(105)
10.1 自然时效 Al-Cu-Mg 合金	(105)

10.1.1	形变位错结构的演变	(105)
10.1.2	力学性能的分析	(107)
10.2	人工时效 Al-Cu-Mg 合金	(108)
10.2.1	形变位错结构的演变	(108)
10.2.2	力学性能的分析	(110)
10.3	过时效 Al-Cu-Mg 合金	(111)
10.3.1	形变位错结构的演变	(112)
10.3.2	力学性能的分析	(114)
10.4	塑性变形微观机制模型	(115)
当前研究现状		(118)
参考文献		(120)

第 1 章 绪 论

1.1 塑性变形与力学性能

金属材料的加工性能,或者说它的可加工性与塑性变形有密切关系。例如,大部分金属材料都是通过各种类型的压力加工生产制造的,因此成形工艺就是重要的工艺过程。这时材料的屈服强度、加工硬化特性、塑性的大小均影响材料的可加工性,也影响材料成形的加工成本。这些可加工性又都是材料塑性变形特性的表现。对于结构材料来说,希望能够有高的屈服强度,合适的加工硬化特性,足够的塑性和韧性。而这些力学性能均与材料的塑性变形特性有直接的关联。一般希望材料不要在低的外加载荷作用下便出现裂纹,已经出现的裂纹不要很快地扩展而导致整体断裂。裂纹的萌生和扩展又都受材料塑性变形特性的控制。机械零件或构件在服役中为了安全起见,希望材料有足够的塑性,当过载而出现颈缩时,还应经过较大一些的塑性变形后再断裂,这样人们可以得到预警而避免重大事故的发生。所有这一切都与金属材料的塑性变形特性有紧密的关系。一些构件或零件是在疲劳载荷作用下服役的,例如飞机、汽车的主要零部件便承受疲劳载荷。因此,研究疲劳载荷作用下金属材料的循环塑性变形就显得特别重要。例如,多年来全世界的航空事故许多都与材料抗疲劳载荷性能的恶化有关。提高金属材料的抗疲劳载荷的能力是避免事故发生的重要方面,而研究材料循环塑性变形的特性对改善材料抗疲劳性能有重要意义。

研究静载塑性变形及动载循环塑性变形的基本规律可以为改善材料的力学性能和开发研制新金属材料提供重要理论依据。因此,合金塑性变形微观机制的研究是极其有意义的工作。

1.2 塑性变形微观机制

本书主要讨论钢铁材料及铝合金在静载或动载作用下发生的塑性变形或循环塑性变形的微观机制。

研究用材料为低碳铬铝钢、低碳铬镍钢、中碳锰钢等常用合金结构钢,以及 Al-Cu-Mg 合金。所用的加载方式为静拉伸载荷及循环拉伸载荷,即脉动拉伸载荷,都是在常温下进行试验的。

上述各类钢铁材料不论其热处理方式的差异,所得显微组织都是以体心立方晶体结构的铁素体为基体,加上形状、尺寸、分布不同的碳化物。淬火回火钢形成过饱和碳的铁素体晶条和碳化物,碳化物主要为渗碳体。因此,塑性变形过程的形变位错结构在随外加载荷的增加所发生的演变过程中,起主要作用的是铁素体中位错增殖、运动、交互作用及各种位错组态的形成。铁素体中形成的特征位错组态及亚结构是非常重要的,因为它们直接影响着材料的主要力学性能。

加载前,合金显微组织,位错密度及分布,加载初期的位错增殖、运动和相互作用,位错与碳化物的相互作用都对合金的屈服过程有重要影响。在随后的加载过程,形变位错结构的演变直接影响着流变应力和加工硬化以及微裂纹的萌生。在循环拉伸应力作用下,合金中发生的位错增殖、运动和相互作用与静载有相似之处,也有相异之处。此外,在疲劳载荷作用下容易形成位错圈。在淬火回火钢中,回火马氏体晶条界是重要增殖位错的源,而碳化物相界也同样增殖着位错。由于碳化物是弥散分布的,晶条中的运动位错必然与碳化物相遇而发生相互作用,这种作用对流变应力有重要贡献。在静拉伸应力作用下,一方面位错密度增加,形成高位错密度区,同时在此区中却又出现低位错密度区。这两种作用相反的过程反复交替地进行着,它们影响着合金的流变应力及加工硬化。

在循环拉伸应力作用下,随着加载周数的增加,循环形变位错结构的演变,铁素体晶条中出现了作者称为粗大疲劳变形带的特征亚结构。作者对这种特征亚结构的特征和特性做了界定。这个粗大疲劳变形带的扩展可以使回火马氏体中萌生疲劳微裂纹。

本书首先讨论铁素体钢,即退火的 12CrMo 钢动载塑性变形的微观机制(第 2 章)。

其后讨论:

铁素体珠光体钢,即退火的 40Mn 钢静载及动载塑性变形的微观机制(第 3 章);

高碳合金钢及低碳铬镍钢 12Cr2Ni4A 马氏体转变过程,奥氏体及马氏体发生的热应力及相变应力引发的塑性变形(第 4 章);

淬火自回火,200 °C 回火,400 °C 回火及 600 °C 回火的低碳铬镍钢 12Cr2Ni4A 静拉伸载荷塑性变形的微观机制(第 5 章);

位错缠结机制模型(第 6 章);

淬火高温回火中碳锰钢 40Mn 在静拉伸应力作用下的塑性变形的微观机制(第 7 章);

淬火回火低碳铬钼钢 12CrMo 在循环拉伸载荷作用下循环塑性变形的微观机制(第 8 章);

淬火回火 12CrMo 钢粗大疲劳变形带扩展导致的循环微裂纹的萌生机制(第 9 章);

最后,自然时效,190 °C 人工时效及过时效三种热处理状态的 Al - Cu - Mg 合金静载塑性变形的微观机制(第 10 章)。

1.3 主要理论分析

过去几十年中,对常用合金结构钢塑性变形微观机制研究工作的文献是非常少见的,因此作者在这方面的研究工作具有开创性,无先例可资借鉴。本书中所论述的各种成份,各种显微组织的合金,其静载及动载塑性变形微观机制的研究均具有领先的意义。本章先介绍其中几个主要的理论观点。

1.3.1 合金强化机制——位错缠结模型

回火马氏体是由取向各异的铁素体晶条与分布其中的硬相碳化物组成。在外加应力作用

下,由于基体铁素体与硬颗粒碳化物之间的刚度相差很大,应变不能协调,因而要在相界面处形成位错以调整这样的变形不协调。因此可知,碳化物相界面处增殖位错是必然的。图 33(d) (1987 年)示意地说明碳化物界面增殖位错的特征,此图具有广泛的适用意义。另一方面,铁素体晶条界也是增殖位错的源。对于低温回火马氏体来说,因为其中尚有很高的位错密度,而且其中也会有许多可动位错,因而这些可动位错的运动也同样能增殖位错。总之,在外加应力作用下,铁素体晶条中有很多的可动位错运动着,同时由于碳化物是弥散分布的,因而运动位错一定会向碳化物滑移,结果这些运动位错必然与碳化物相界增殖的位错相遇而发生交互作用,最终在碳化物周围形成位错缠结。这就是碳化物强化回火钢的基本过程,可称为沉淀强化过程的位错缠结机制。在第 5~7 章中将详细讨论这个强化机制。

1.3.2 静载竞争机制

静载竞争机制是合金宏观加工硬化的微观理论。

对于退火钢或高温回火钢,由于初始位错密度较低,在拉伸加载的初期,随着塑性变形的进行,必然是位错的大量增殖而导致位错密度快速增加。但是,随着应变量的增加,那些高位错密度的区域必然处于不稳定状态,难以继续增加其位错密度。因此,在高位错密度区中就会逐渐形成小块低位错密度区域,即萌生阶段。在外加应力作用下,随着应变量的增加,已经形成的小块低位错密度区会逐渐地向着周围的高位错密度区扩展,即侵入包围它的高位错密度区,从而扩大低位错密度区范围,即扩展阶段。

初始的低位错密度区在加载后,逐渐成为高位错密度区,这个过程是流变应力增加和加工硬化速率增加的过程。此后,随着加载的继续进行,在这个高位错密度区中出现低位错密度区小块的过程是降低流变应力和加工硬化速率的过程。随着加载的进行,塑性变形的发展使这个新形成的低位错密度区又会出现再次增加位错密度的过程。总之,对于同一块显微区域来说,这两种作用相反的不同位错密度区可以反复交替出现,见第 5 章图 50 和图 51。因此称这个过程为显微区域的加工硬化与显微区域的加工软化的竞争机制(1988 年)。用这个微观机制可以阐明宏观加工硬化速率的数值及其变化规律。

对于初始位错密度高的低温回火钢来说,在加载的初始阶段,随着塑性变形的发展,就会出现这种竞争过程。

事实上,除上述高位错密度区与低位错密度区构成的显微区域加工硬化与软化的竞争过程之外,还可有其他类型的竞争过程,详见第 5 章。

1.3.3 动载竞争机制

合金中初始的高位错密度区,在外加循环应力作用下,随着塑性变形的发展,在这个高位错密度区中会出现小块的低错密度区,可称为萌生阶段。继续循环加载,已萌生的低位错密度区可以向着一个主方向扩展,穿过一些铁素体晶条,形成长条形状的低错密度区,称为扩展阶

段。这个低位错密度区称为粗大疲劳变形带(1989年),见图 62 和图 65。循环载荷作用下位错密度增加的过程具有引起显微区域循环硬化的作用,而低位错密度区的粗大疲劳变形带的萌生和扩展具有引起显微区域的循环软化的作用。这两种作用相反的因素在循环加载过程中竞争着。宏观的疲劳硬化与软化是这两种作用的综合表现。这个过程称为动载竞争机制,见第 8 章。

1.3.4 循环微裂纹萌生机制

在循环载荷作用下,随着循环塑性变形的发展,粗大疲劳变形带穿过铁素体晶条的扩展过程,由于它们之间的应变不能协调,便在晶条界附近形成循环微裂纹(1989~1990年),见第 9 章图 71。

1.3.5 铝合金的塑性变形

前述沉淀强化合金的强化机制——位错缠结模型具有普遍适用的意义。虽然过时效 Al-Cu-Mg 合金中 $\text{Al}_2\text{CuMg-S}$ 相并没有多大的强化作用,不能显著提高合金的屈服强度。可是此合金的显微组织特征与淬火回火钢,尤其是高温回火钢相似。它们都是软基体中存在硬的第二相化合物。在静载拉伸应力作用下,化合物相界增殖位错,然后基体中的运动位错与相界面增殖的位错相遇而发生交互作用。最后,在第二相的周围形成高位错密度的位错缠结,见图 81 和图 82。这个过程提高了合金的流变应力和增加了加工硬化速率。因此,从这个作用过程的微观机制角度考虑时,上述回火马氏体的位错缠结模型也适用于过时效 Al-Cu-Mg 合金。这也表明,不同化学成份,不同晶体结构的合金,由于它们的显微组织特征相似,便出现相似的塑性变形微观机制。

第 2 章 铁素体钢

本章讨论 αFe , 即铁素体中的晶体缺陷特征, 以及在循环拉伸应力作用下铁素体中循环形变位错结构的演变。分析金属材料的疲劳曲线出现疲劳极限的原因。

2.1 铁素体的亚结构

工业纯铁中不可避免地存在着各种杂质元素, 例如碳。如果在杂质含量不多的情况下, 基本上都溶解于 αFe 中, 而构成含有这些杂质的 αFe , 亦即 αFe 固溶体或称铁素体。从高于 $\gamma \rightarrow \alpha$ 转变温度范围冷却下来后, 合金便只有铁素体单相, 碳原子是以原子状态溶解于铁素体中, 构成间隙式固溶体。当铁素体冷却到较低温度时, 由于碳原子有向位错析集的倾向, 因而碳原子在位错中心附近就聚集起来。当用随炉缓慢冷却的退火方法进行热处理时, 铁素体中的位错密度很低, 只能观察到稀疏的位错。碳原子在位错中心附近的析集使这里的化学稳定性较差。因此, 当选用适当的化学试剂浸蚀合金时, 在材料外表面上露头的位错线就更容易被浸蚀。利用这样的特性便可以显示露头的位错线分布特征。这样显示位错线的方法称为蚀斑法。曾经应用这个方法显示铁素体中的三叉亚晶界^[1]。图 1 显示 αFe 中的三叉亚晶界。工业纯铁在退火处理的冷却过程, 虽然冷却速度比较慢, 可是由于热应力及 $\gamma \rightarrow \alpha$ 转变时的相变应力, 使铁素体发生了轻微的变形。当冷却到常温后, 铁素体中除了亚晶界外, 还会存在一些零散分布的位错。

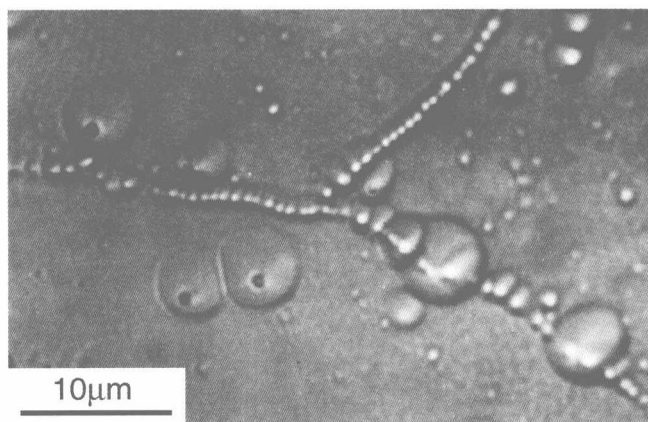


图 1 蚀斑法显示 αFe 位错亚结构的光学显微像

2.2 合金铁素体钢的循环塑性变形^[2~5]

为了提高铁素体的屈服强度, 最基本的方法便是加入合金元素, 使其成为合金铁素体。常

用的合金元素便是 Cr 和 Mo,常用的钢种便是低碳铬钼钢——12CrMo,此钢 C、Cr、Mo 的质量分数分别为 0.10%、0.53%和 0.48%。退火处理后此钢的显微组织主要为铁素体和少量珠光体,因此可以认为此钢是铁素体钢。本节讨论经 930 °C 加热保温后,进行退火处理获得等轴状铁素体晶粒及少量珠光体组织的 12CrMo 钢,经循环拉伸,即脉动拉伸疲劳试验,其循环形变位错结构及亚结构随加载周数的增多而发生的演变。此材料的疲劳极限为 167 MPa。

2.2.1 稳定状态的铁素体

经退火处理后低碳 Cr-Mo 钢中合金铁素体内部低密度的位错及位错亚结构示于图 2。低密度位错特征主要表现在长直位错的存在。但是,因为从高温冷却过程中,面心立方结构的奥氏体与体心立方结构的铁素体比容的差异,同时还因为冷却过程的热应力的影响,所以材料中

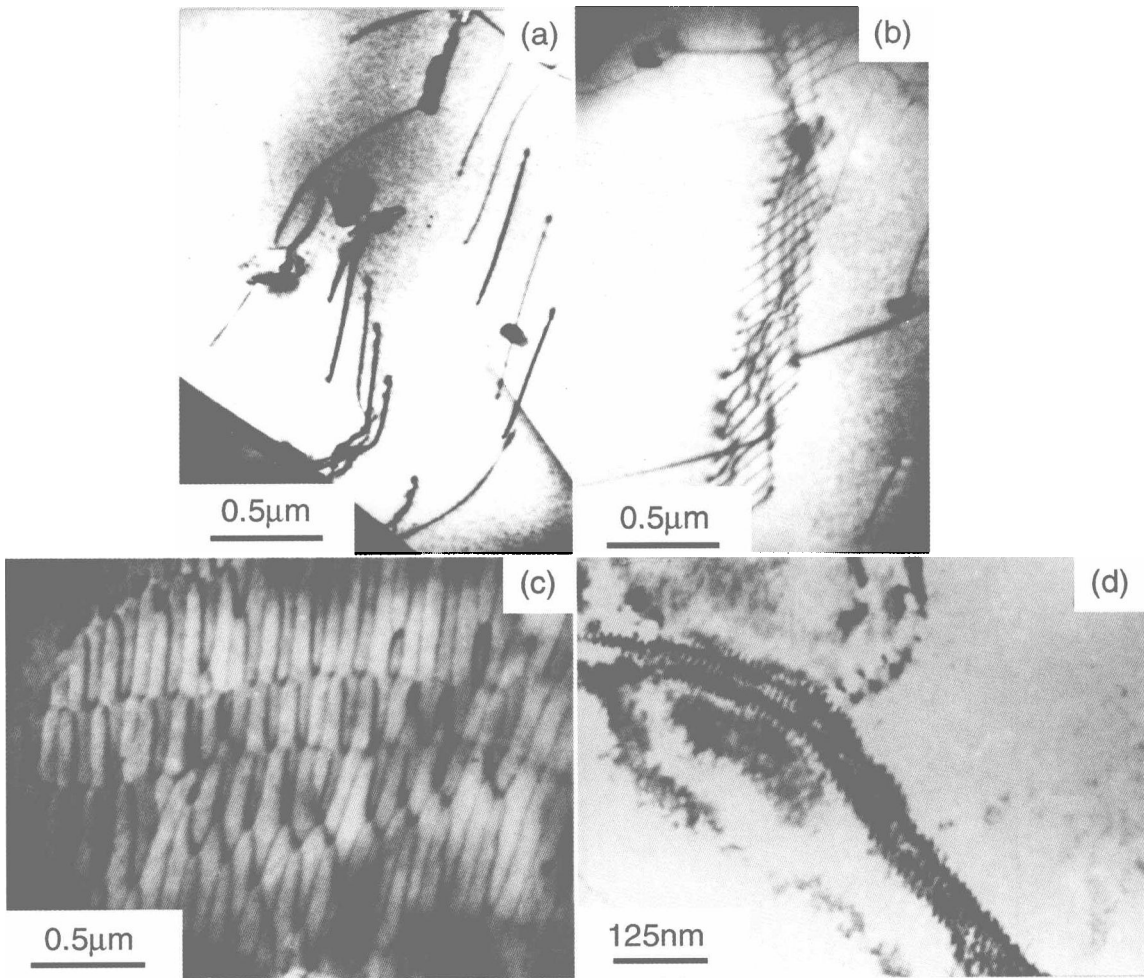


图 2 退火低碳 Cr-Mo 铁素体中位错的透射电子显微像

(a) 长直位错,束方向 $[257]$; (b) 位错亚结构, $g(\bar{2}\bar{2}\bar{2})$; (c) 位错网, $g(21\bar{1})$; (d) 三叉亚晶界

必然引起内应力而使铁素体轻微变形。铁素体的变形必然引起位错分布特征偏离稳定状态的分布。观察图 2(a)可知,虽然长直的位错线是稳定状态的表现,可是由于铁素体的轻微变形而使位错运动和弯曲。或者位错相交而发生位错反应,见图 2(a)的上方,从此图的左下方还可以见到晶粒界对位错运动的阻碍作用。

因为奥氏体向铁素体的转变过程,及铁素体的早期冷却过程,都是在铁素体的回复与再结晶温度以上的温度范围进行的。因此,位错可以形成小角度亚晶界。但是,也正是由于这些过程是在较高温度进行的,因而不仅亚晶粒内部的位错会运动到亚晶界中去而与亚晶界位错发生相互作用,甚至由于铁素体的轻微变形,内应力集中的存在,而使已经形成位错墙的位错能够发生轻微的运动。所有这些因素都会导致亚晶界中位错分布的不规则性,这种情形示于图 2(b)和图 2(c)。图 2(d)示出铁素体中的三叉亚晶界。

体心立方结构的晶体中,柏格斯矢量为 $\frac{1}{2}\langle 111 \rangle$ 和 $\langle 100 \rangle$ 的位错是稳定的,它们由下列反应联系起来:

$$\frac{1}{2}[1\ 1\ 1] + \frac{1}{2}[1\ \bar{1}\ \bar{1}] = [1\ 0\ 0]$$

这个反应对于位错网的形成是很重要的。根据位错的 Frank 理论^[6,7]可知,如果具有柏格斯矢量为 $\frac{1}{2}\langle 1\ 1\ 1 \rangle$ 的两列平行位错相交时,可形成一段 $\langle 1\ 0\ 0 \rangle$ 的位错。这样便构成六角位错网^[2],其形态可见图 5,其旋转轴沿着 $\langle 0\ 1\ 1 \rangle$ 方向。在垂直于这个方向的平面内,位错网所构成的亚晶界是扭转的。同样具有柏格斯矢量为 $\langle 1\ 0\ 0 \rangle$ 的两列平行位错相交时,可形成一段 $\langle 0\ 1\ 1 \rangle$ 的位错。这样也构成六角位错网而成为扭转亚晶界。

在合金铁素体的形成过程和高温缓慢冷却过程,位错可以形成稳定分布的六角位错网而构成扭转亚晶界。但是,在实际热处理条件下,因为没有能够达到充分缓慢冷却和位错网的实际形成温度高低不同,以及由于铁素体的轻微变形等因素的影响,所以网孔的形状不能完全充分达到平衡的状态。图 2(c)是在一定取向时观察到的不规则的位错网网孔的形状。这个位错网形状的主要特征是两组平行位错相交时形成一段短位错。虽然网孔的形状不甚规则,可是这样的位错网仍可构成小角度亚晶界。总之,退火低碳铬钼铁素体中形成许多亚晶粒。

2.2.2 循环形变位错结构的演变

本节讨论 12CrMo 钢在循环拉伸应力作用下,循环形变位错结构的演变。图 3 示出此钢的疲劳曲线。

2.2.2.1 低循环应力

在疲劳极限 167 MPa 的循环应力作用下,经过 10^7 周后材料未断,这时合金铁素体中出现的各种循环形变位错结构特征示于图 4。铁素体中明显可见位错滑移带,这种滑移带与静载拉

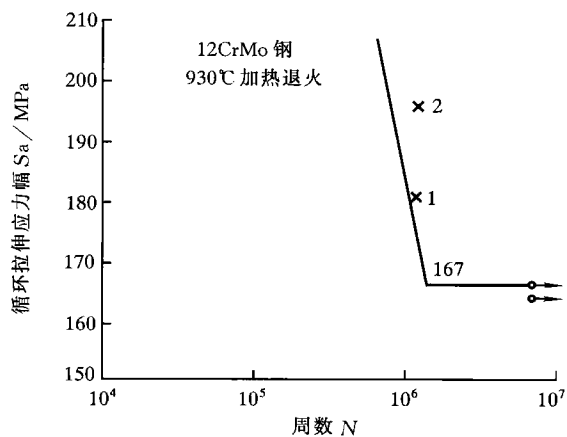


图 3 退火 12CrMo 钢循环拉伸应力幅对加载周数的关系

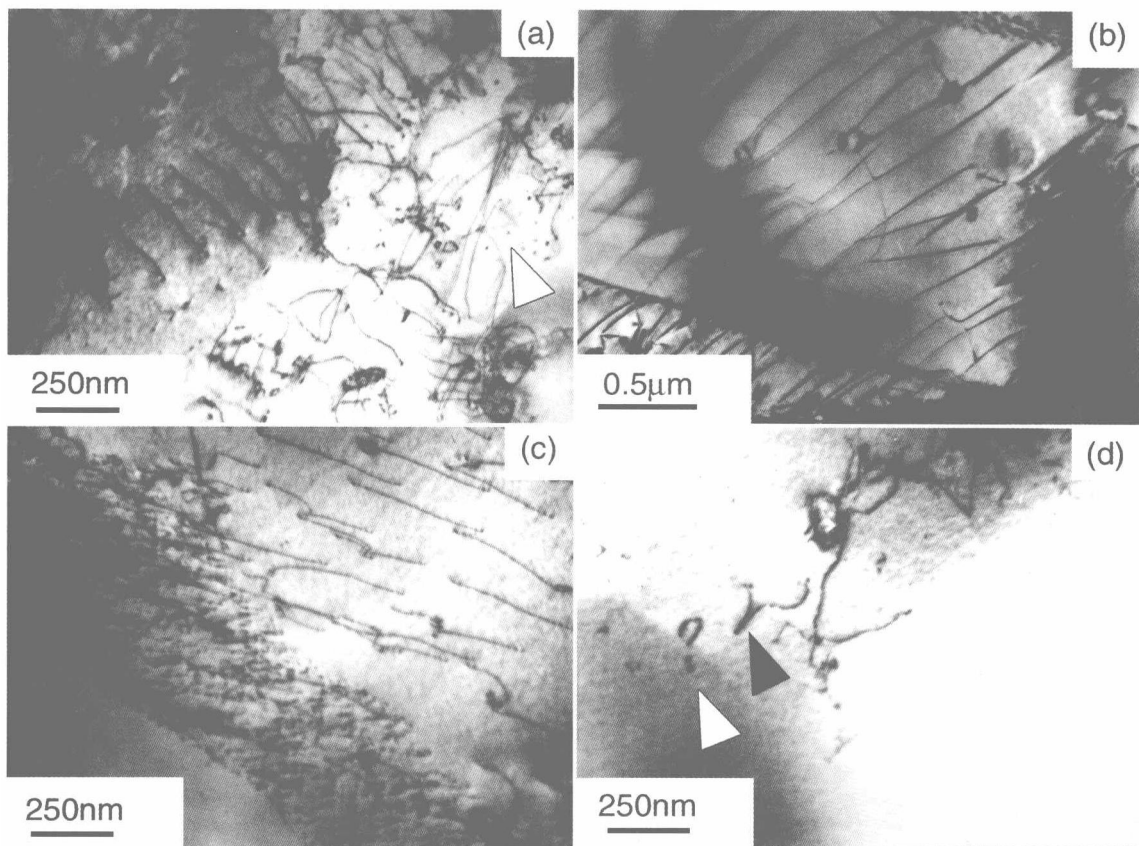


图 4 低碳 Cr-Mo 铁素体中(167 MPa, $N=10^7$ 周)循环变形位错结构的透射电子显微像

(a) 位错滑移带,束方向[113];(b) 位错的运动,束方向[011];

(c) 位错的运动和增殖,束方向[112];(d) 位错的运动和增殖