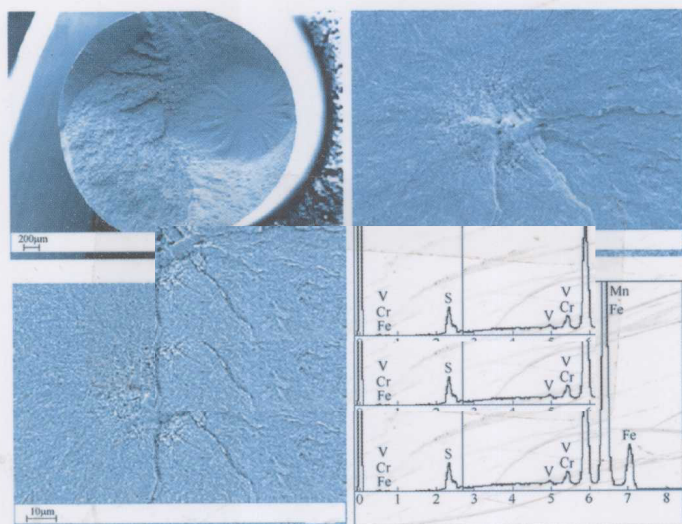


Very High Cycle Fatigue Properties of High Strength Steels
—Effects of Nonmetallic Inclusions

高强度钢超高周疲劳性能 ——非金属夹杂物的影响

李守新 翁宇庆 惠卫军 杨振国 著



冶金工业出版社
Metallurgical Industry Press

高强度钢超高周疲劳性能

——非金属夹杂物的影响

Very High Cycle Fatigue Properties of High Strength Steels

——Effects of Nonmetallic Inclusions

李守新 翁宇庆 惠卫军 杨振国 著

北 京

冶金工业出版社

2010

内 容 提 要

本书重点介绍了国家重点基础研究发展规划项目(973)——“提高钢铁质量和使用寿命的冶金学基础研究”所属课题“长疲劳寿命机械制造用高强度钢的研究”部分的研究成果和开发的技术。

本书重点从夹杂物尺寸的角度深入探讨了其对高强度钢超高周疲劳性能的影响规律。本书共分9章:第1章阐述了近年来材料疲劳研究的概况,特别阐述了对高强度钢开展超高周疲劳研究的必要性;第2章简要介绍了钢中非金属夹杂物的来源、种类、评定方法及对力学性能的影响;第3章综述了超高周疲劳的实验方法及研究进展;第4章给出了临界夹杂尺寸的估计方法与实验作了对比;第5章探讨了夹杂物尺寸大小如何影响高强度钢超高周S-N曲线的形状;第6章对高强度钢的超高周疲劳强度及寿命与夹杂物尺寸的关系,提出了新的表达式;第7章介绍了氢对高强度钢超高周疲劳性能的影响;第8章介绍了如何评定钢中的夹杂物尺寸;第9章总结了研究的经验与收获,并提出了研究的新课题和方向。

本书可供从事钢铁及其他金属材料机理、材料性能、材料制备以及机械装备制造的研究人员、设计与研发人员、生产人员阅读,也可供大专院校相关专业的师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

高强度钢超高周疲劳性能:非金属夹杂物的影响/李守新等著.

—北京:冶金工业出版社,2010.5

ISBN 978-7-5024-5255-1

I. ①高… II. ①李… III. ①高强度钢—疲劳寿命—研究
IV. ①TG142.7

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第067972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

责任编辑 王雪涛 张 卫 美术编辑 李 新 版式设计 孙跃红

责任校对 王贺兰 责任印制 牛晓波

ISBN 978-7-5024-5255-1

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

2010年5月第1版,2010年5月第1次印刷

169 mm×239 mm;10.25印张;179千字;150页

39.00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)

前 言

钢铁材料是创造现代文明的基础材料,足够数量的优质钢铁材料是世界各国实现工业化的必要条件。20世纪钢铁生产技术高速发展,形成了自动化程度很高的大规模生产流程。由于具有综合性能优异、价格低廉、资源丰富、环境友好、可循环利用等其他材料不可比拟的优势,钢铁材料仍将在21世纪占据主导地位。近年来,随着航空、航天、机械、交通和航海等行业的快速发展,对机械制造用高强度钢铁材料提出了新的要求和挑战,要求其不但具有高强度,而且还具有高的安全性和可靠性。

新一代钢铁材料是以细晶为核心并以高洁净度和高均质性三个主要特征共同构成高性能结构材料。通过前期国家重点基础研究发展规划项目(973)“新一代钢铁材料重大基础研究”(1998~2003年,首席科学家:翁宇庆)的施行,我国相关科技人员对超细晶钢的组织细化与控制技术有了深入的认识,并取得了实际的经济与社会效益。除细晶特征对钢的性能具有重要影响外,高洁净度和高均质性对钢的性能也同样十分重要。非金属夹杂物(以下简称夹杂物)的减少则是提高钢洁净度和均质性的关键之一。夹杂物对钢质量的影响是十分巨大的。钢中夹杂物的危害性就在于它破坏了钢基体的均匀连续性,造成了应力集中,能够促进疲劳裂纹的产生,并在一定条件下加速裂纹的扩展速率,从而加速了疲劳破坏的过程。尤其是在高强度钢超长寿命疲劳实验中的长寿命阶段,大部分疲劳断裂起源于钢中的夹杂物,即夹杂物等内部缺陷的影响更为显著。因此,要提高机械制造用钢的强度水平和实现长寿命化,就必须合理控制由钢中夹杂物等内部缺陷所引起的这种疲劳破坏。

我国从1996年起,已经跃居为世界第一产钢大国,但高强度钢的

质量,还需要继续提高。同时,我国工业的快速发展,对机械设备与构件的可靠性要求越来越高,因此,对改善机械制造用高强度钢的超高周疲劳性能的要求也越来越迫切。正是在这样的背景下,国家重点基础研究发展规划项目(973)“提高钢铁质量和使用寿命的冶金学基础研究”(2004~2009年,首席科学家:翁宇庆)开展了“长疲劳寿命机械制造用高强度钢的研究”(编号2004CB619104,由钢铁研究总院和中科院金属研究所承担课题的研究工作),较为系统地研究了钢中夹杂物、基体组织及环境因素对高强度钢高周特别是超高周疲劳破坏行为的影响规律,并对超高周疲劳的断裂机制进行了探索。本书即是在上述研究工作的基础上,结合国际、国内同行的研究成果,着重从夹杂物尺寸的角度探讨了其对高强度钢超高周疲劳性能的影响。

本书分为9章,前3章是基础知识与背景介绍。第1章主要讲疲劳研究概况,指出了对高强度钢开展超高周疲劳研究的必要性。第2章简要介绍钢中非金属夹杂物的来源、种类、评定方法及对疲劳性能的影响。第3章讲述超高周疲劳实验方法及最近的进展。

第4~8章则主要介绍了在国家重点基础研究发展规划项目资助下,我们经过几年研究获得的一些成果。

第4章主要研究了临界夹杂物尺寸问题。因为材料生产者和装备制造者需要了解,钢中夹杂物尺寸多大才不会引起钢的疲劳破坏而降低钢的服役寿命,这对机械制造用钢的制备与使用都是很有用的信息。本书给出了临界夹杂尺寸的估计方法并与实验作了对比。

第5章则探讨了夹杂物尺寸大小对高强度钢超高周 $S-N$ 曲线形状的影响。将连续下降型、台阶型和疲劳极限型的 $S-N$ 曲线形状与夹杂物尺寸由大到小建立了一定的联系。

第6章则是根据大量实验与理论分析,对高强度钢的超高周疲劳强度与夹杂物尺寸的关系,提出了新的表达式。随后对高强度钢超长疲劳寿命与夹杂物尺寸的关系也提出了新的表达式。这样,对经过工艺改进,降低夹杂物尺寸后预期如何提高高强度钢的疲劳强度与寿命,就获得了较为明晰的认识。

第7章则是对氢是如何影响高强度钢的超高周疲劳性能,根据实

验做了归纳。在冶炼、热处理与使用中,高强度钢构件往往受到环境中氢的影响;而在超长寿命疲劳中,夹杂物附近的氢往往起到重要作用。这样,无论从高强度钢的安全应用还是疲劳机制的研究来看,了解氢含量对高强度钢超高周疲劳行为的影响都是很有必要的。本章的主要工作是研究了氢含量与夹杂尺寸对疲劳性能的影响,并给出了定量的关系。

第8章试图解决的问题是,既然大尺寸的夹杂物对疲劳性能有重要影响,那么就需要评定一定体积的钢中最大夹杂物尺寸。本章介绍了常规的标准检验方法,并指出,这种方法测定的夹杂尺寸与由疲劳断口上裂纹源处测定的夹杂物尺寸相比往往过小,也就无法给出疲劳强度的合理预测。需要借助统计方法来推断,因而介绍了两种统计方法,并从实验上验证其对疲劳强度预测的适用性。

第9章首先介绍了本课题组对高强度钢长疲劳寿命化进行探索的经验与收获;其次对以后需要继续研究与注意的问题作了简要介绍,期望能引起更多研究者的关注,并深入研究和解决这些问题。

本书可供钢铁及其他金属材料机理、材料性能、材料制备以及机械装备制造行业的研究人员、设计与开发人员、生产人员阅读,也可供大专院校相关专业的师生参考。

由于高强度钢的超高周疲劳研究是近几年才广泛开展起来的,我们的研究经验不足,学识有限,研究工作中会有疏漏或考虑不周之处,欢迎读者交流探讨。真理只有在不断的实践中探索、检验和修正,才可能逐步得到真谛。

作 者
2010年1月

目 录

1 高强度钢超高周疲劳研究背景	1
1.1 疲劳分类	1
1.2 传统疲劳研究的发展概况	3
1.3 高强度钢超高周疲劳研究必要性	4
2 钢中非金属夹杂物	7
2.1 钢中非金属夹杂物的来源与种类	7
2.1.1 非金属夹杂物的来源	7
2.1.2 非金属夹杂物的种类	8
2.2 钢中非金属夹杂物的测量与评定	11
2.2.1 金相法	11
2.2.2 无损检测法	12
2.2.3 夹杂物浓缩检测方法	12
2.2.4 疲劳实验检测方法	13
2.2.5 统计方法	13
2.3 非金属夹杂物对钢力学性能的影响	14
2.3.1 非金属夹杂物对常规力学性能的影响	14
2.3.2 非金属夹杂物对疲劳性能的影响	14
3 超高周疲劳的实验方法及研究进展	20
3.1 超高周疲劳实验方法	20
3.1.1 超声波疲劳研究的发展	20
3.1.2 超声波疲劳实验设备	22
3.1.3 超声波疲劳实验原理	23
3.2 超高周疲劳的研究进展	27

3.2.1	<i>S-N</i> 曲线特性	27
3.2.2	断口特征与机制	28
3.2.3	疲劳强度与夹杂物尺寸的关系	31
4	临界夹杂物尺寸问题	33
4.1	夹杂物与其他缺陷尺寸的等效性	34
4.1.1	Murakami 夹杂物等效投影面积模型	34
4.1.2	表面粗糙度等效缺陷尺寸	35
4.2	临界夹杂物尺寸的估计	36
4.2.1	临界夹杂物尺寸的定义	36
4.2.2	临界夹杂物尺寸的估算	37
4.3	实验及其结果	42
4.3.1	实验材料和实验方法	42
4.3.2	疲劳裂纹源及疲劳强度	43
4.3.3	分析与讨论	43
4.4	小结	46
5	<i>S-N</i> 曲线特性与夹杂物尺寸问题	47
5.1	实验材料与方法	49
5.2	实验结果	51
5.2.1	微观组织	51
5.2.2	<i>S-N</i> 曲线	52
5.2.3	断口形貌观察	54
5.2.4	疲劳源区的元素面分布	57
5.3	讨论	60
5.3.1	洁净高强度弹簧钢的超高周疲劳性能	60
5.3.2	夹杂物尺寸对超高周疲劳 <i>S-N</i> 曲线的影响	61
5.4	小结	63
6	疲劳强度与疲劳寿命的估计	65
6.1	疲劳强度的估计	65
6.1.1	由表面与内部夹杂物决定的疲劳强度 σ_w	65
6.1.2	由 GBF 决定的疲劳强度 σ_{w9}	66

6.2 疲劳寿命的估计	75
6.2.1 疲劳寿命与夹杂物尺寸的关系	75
6.2.2 实验求 m 值	76
6.3 小结	81
7 氢对高强度钢超高周疲劳行为的影响	82
7.1 GBF 区的形成与疲劳断裂机制	82
7.1.1 GBF 区边界的应力强度因子阈值	83
7.1.2 由氢引起的应力强度因子	87
7.2 氢对高强度钢疲劳强度的影响	91
7.2.1 实验材料与方法	92
7.2.2 氢对高强度钢硬度的影响	94
7.2.3 氢对疲劳性能的影响	94
7.3 小结	102
8 夹杂物评定标准与统计方法	103
8.1 夹杂含量评定国家标准	104
8.2 估计最大夹杂物尺寸的两个统计方法	106
8.2.1 统计极值(SEV)方法	106
8.2.2 广义帕雷托分布(GPD)方法	109
8.3 实验验证	111
8.3.1 实验材料与过程	111
8.3.2 参数的确定	111
8.3.3 疲劳强度下限的预测	113
8.3.4 实验结果与讨论	113
8.3.5 钢中最大夹杂物尺寸估计的重要意义	116
8.4 小结	116
9 成功探索与今后需要研究的一些问题	118
9.1 高强度钢的长疲劳寿命化的成功探索	118
9.1.1 客运专线弹条用弹簧钢的长疲劳寿命化	118
9.1.2 汽车变截面少片簧用长疲劳寿命弹簧钢	121
9.2 今后需要研究的一些问题	123

9.2.1	高强钢疲劳性能的优化	123
9.2.2	夹杂物类型与改性	124
9.2.3	钢基体中软相和其他组织缺陷的作用	125
9.2.4	如何更有效地评估夹杂物尺寸	126
9.2.5	实验频率影响与试样发热问题	127
9.2.6	超高周疲劳实验合作研究	128
参考文献		129
后记		145
术语索引		147

1 高强度钢超高周疲劳研究背景

合金结构钢是钢铁产品中一类主要产品,在机械零件和工程构件中使用量大、应用面广。近年来,国民经济各部门对合金结构钢提出了更高强度、更高安全性、长寿命和低成本的要求^[1]。而磨损、腐蚀和断裂是机械零件和工程构件的三种主要破坏形式,也是这些零件和构件失效的三种主要原因。在机械零部件中,每年因磨损和腐蚀而造成的经济损失都是十分可观的。然而材料断裂破坏因其常突然发生,导致灾难性的设备事故和人身事故,所以断裂破坏更为工程界所重视。在机械的断裂事故中,绝大部分是由于钢的疲劳引起的^[2]。因此,疲劳破坏是阻碍机械制造用钢进一步高强度化和长寿命化的主要原因之一,具有优异的抗疲劳破坏性能的高强度钢铁材料是当今机械制造领域追求的材料之一。

对于高强度钢的定义,目前还没有统一与严格的界定。业界有这样的认识,高强度钢其强度、韧性综合性能应该较好,抗拉强度一般在 1200 MPa 以上;而超高强度钢其抗拉强度在 1500 MPa 以上。本书为了叙述简便,不再将二者区别。

钢铁材料一般随着抗拉强度的提高,其疲劳强度也提高。但是当钢的强度级别提高到一定程度,比如抗拉强度达到约 1250 MPa 时,其疲劳强度就往往不会随着抗拉强度的提高而不断提高,即使提高,也是比较有限的。人们已经认识到,钢中的夹杂物在这里是非常大的影响因素,尤其是在超长寿命疲劳(也称超高周疲劳)实验中的长寿命阶段,大部分疲劳断裂起源于钢中的夹杂物,即夹杂物等内部缺陷的影响更为显著^[3~13]。

为了较全面地了解人们对高强度钢超长疲劳寿命研究的概况,首先要了解一下有关疲劳的基础知识。

1.1 疲劳分类

工程中很多机件和构件都是在变动载荷下工作的,如曲轴、连杆、弹簧、轧辊、航空发动机及汽轮机叶片、水轮机转轮及桥梁等,疲劳破坏是其主要的失效

形式。据统计,疲劳破坏在整个失效件中约占 50% ~ 90%,极易造成人身伤害和经济损失,危害性极大。特别是 20 世纪 80 年代以来,随着机器向高温、高速和大型化方向发展,机械构件的工作应力日趋提高,工作环境日趋恶劣,疲劳破坏事故层出不穷。因此,材料抗疲劳性能的研究仍然是当前科学研究和工程应用研究领域的一个重要课题。疲劳破坏由于受外加应力、应变的波动变化和周围环境的影响,表现为不同的形式。按照不同的标准对疲劳的分类如下所述:

(1) 疲劳按研究对象可以分为**材料疲劳**和**结构疲劳**。材料疲劳主要研究材料的疲劳失效机理、化学成分和微观组织对材料疲劳强度的影响等。结构疲劳则以零部件、连接件以至整机为研究对象,研究它们的疲劳性能、抗疲劳设计方法、寿命估算方法和疲劳实验方法等。

(2) 按加载应力状态可以分为**单轴疲劳**和**多轴疲劳**。**单轴疲劳**是指单向循环应力作用下的疲劳,包括只承受单向拉-压循环应力的拉-压疲劳、弯曲循环应力的弯曲疲劳和扭转循环应力的扭转疲劳等;**多轴疲劳**则指在多向应力作用下的疲劳,也称为**复合疲劳**。

(3) 按载荷变化情况可以分为**恒幅疲劳**、**变幅疲劳**和**随机疲劳**。

(4) 按载荷工况和工作环境又可以分为**机械(常规)疲劳**、**蠕变疲劳**、**热机械疲劳**、**腐蚀疲劳**、**滑动/滚动接触疲劳**、**微动疲劳**、**冲击疲劳**等。

(5) 目前,大多数研究工作是按照疲劳失效前所经历的循环周次来划分的,分为**低周疲劳**(low cycle fatigue)、**高周疲劳**(high cycle fatigue)和**超高周疲劳**(very high cycle fatigue 或者 ultra-high cycle fatigue)。

1) **低周疲劳**:通常指失效循环数低于 $10^4 \sim 10^5$ 周次的疲劳。其特点是作用于构件的应力水平高于材料的弹性极限,试样处于塑性状态,应力和应变曲线呈非线性关系。低周疲劳实验一般都采用轴向拉-压疲劳实验,实验过程采用应变幅控制,描述方式主要为应变-寿命曲线和循环应力-应变曲线。

2) **高周疲劳**:通常指失效循环数范围在 $10^5 \sim 10^7$ 周次之间的疲劳,又称为高循环疲劳。高周疲劳实验时,加载应力相对较低,试样处于弹性范围,应力和应变呈正比关系。高周疲劳大都采用应力幅控制,因此高周疲劳又被称为应力疲劳,描述方式主要为应力-寿命曲线,即 $S-N$ 曲线。

3) **超高周疲劳**:通常指疲劳破坏循环数大于 10^7 周次的疲劳,又称为超长寿命疲劳(ultra-long life fatigue 或者 super-long life fatigue)或十亿周(10^9 周次)疲劳(giga-cycle fatigue),其加载应力通常较高周疲劳时更低。

传统疲劳研究由于受实验条件和实验设备加载频率等的限制,循环周次常限于 10^7 以内。近年来,随着航空、航天、汽车、高速列车、轮船和核电等工业部

门的快速发展,其中一些重要工程构件,经受的疲劳循环已经达到 $10^8 \sim 10^{10}$ 周次甚至更高。因此,材料在 10^7 周次以上超长寿命下的疲劳行为开始引起研究人员和工程技术人员的重视。传统疲劳研究认为,钢铁材料在 10^7 循环周次附近往往存在一个疲劳极限,加载应力幅低于该疲劳极限,材料将不会发生疲劳破坏,即材料有无限寿命。然而,目前的研究结果表明,材料在 10^7 周次以上超高周范畴内仍然发生疲劳断裂,并且加载应力幅可能远低于传统的疲劳极限^[3~15]。其疲劳断裂机理与传统疲劳破坏的机理有所不同,在超长寿命区,材料的疲劳断裂主要起源于材料内部。因此,基于机械构件设计可靠性和安全性的需要,材料的超高周疲劳行为研究成为目前一个重要的热点。

1.2 传统疲劳研究的发展概况

材料的疲劳是指材料在循环载荷作用下的损伤和破坏。1964 年国际标准化组织把疲劳定义为:“金属材料在应力或者应变的反复作用下所发生的性能变化叫做疲劳”^[16]。

关于金属疲劳的最初研究是由德国矿业工程师 Albert 在 1829 年前后完成的^[16]。对疲劳现象最先进行系统实验研究的是德国学者 Wöhler,他在 1860 年前后比较系统地论述了疲劳寿命与循环应力的关系,提出了 *S-N* 曲线(即应力-寿命曲线)和疲劳极限的概念,确定了应力幅是疲劳破坏的主要因素,为金属材料的疲劳研究奠定了基础^[16]。随后,金属的疲劳引起了广大研究工作者和工程技术人员的兴趣。Ewing 等人^[17,18]在 1900 年前后通过铁的疲劳研究使人们摒弃了晶化理论对疲劳机制的解释,说明疲劳破坏起源于材料晶粒内部的滑移带。Basquin^[19]在 1910 年提出了描述金属疲劳 *S-N* 曲线的经验规律,指出应力与疲劳循环数的双对数图在很大的应力范围内表现为线性关系。Bauschinger 早在 1886 年验证 Wöhler 的疲劳实验时,发现了在循环载荷下弹性极限降低的“循环软化”现象,引入了应力-应变滞后回线的概念^[16]。Bairstow^[20]在 1910 年对金属循环硬化和软化的早期研究中也作出了重要的贡献,他通过多级循环实验和测量滞后回线,给出了有关形变滞后的研究结果,并指出形变滞后与疲劳破坏的关系。这一时期还有很多人做出较大贡献。在 20 世纪二三十年代,疲劳已发展成为一个重要的科学研究领域。这一时期的研究工作主要集中于金属的腐蚀疲劳、疲劳破坏的累积损伤模型、单向形变和循环形变的缺口效应、变幅疲劳及材料强度的统计理论^[16]。

20 世纪以来,光学显微镜和电子显微术的发展,促进了人们对传统疲劳破

坏微观机制的研究。20 世纪中期, Thompson 等人^[21]的研究表明,已经产生滑移带的金属疲劳试样表面在去除一层后,若继续疲劳,有些滑移带还会在原位出现,它们据此提出了驻留滑移带(persistent slip band, PSB)的概念,并确认局部应变集中区的驻留滑移带是产生疲劳微裂纹的先兆。同期, Zappfe 和 Worden^[22]在疲劳断口上第一次观察到一种特殊的条痕,它是疲劳裂纹扩展时在断裂面上留下的痕迹,即目前所称的疲劳辉纹。

塑性应变造成损伤的理论是由 Coffin^[23]和 Manson^[24]建立的,他们通过研究由于热受载和高应力幅载荷引起的疲劳问题,各自独立提出了发生疲劳破坏时的载荷反向次数同塑性应变幅的经验关系,即 Coffin-Manson 关系式,它是一种应用最为广泛的根据应变描述疲劳的方法,从而奠定了低周疲劳的基础。1963 年, Paris 等人^[25]在断裂力学方法的基础上,提出了表达裂纹扩展规律的著名关系式——Paris 公式,给疲劳研究提供了一个估算裂纹扩展寿命的新方法,在此基础上发展出了损伤容限设计,从而使断裂力学和疲劳这两门学科结合起来。

从材料疲劳微观机制讲,塑性变形引起的形变局部化及形变不可逆性是疲劳破坏的主要特点。因此对低周疲劳破坏,因为整个试样标距区都可能经历塑性形变,因而塑性形变局部化自然会起主要作用。而对于高周与超高周疲劳,虽然试样宏观上往往处于弹性形变,但微观的局部缺陷区,仍有可能经历塑性形变,因而引起微裂纹的萌生,最终引起疲劳破坏。

在过去一百多年的时间里,广大科研人员对材料传统疲劳性能研究的发展做出了重大贡献,并且材料的抗疲劳性能已经成为机械构件和工程结构设计的一个重要指标。但是,随着新材料和新的工程问题的出现,人们对疲劳问题的研究还远没有结束。

1.3 高强度钢超高周疲劳研究必要性

如前所述,一些重要工程部件如发动机部件、汽车承力运动部件、铁路轮轴和轨道、飞机、海岸结构、桥梁、特殊医疗设备等,往往承受高频低应力幅循环载荷作用,实际的疲劳使用寿命要求已经超过了 10^7 循环周次,甚至已经达到了 10^{10} 循环周次,见表 1-1。 10^9 周次相当于日本高速列车新干线轮轴系统运行 10 年,一台以 3000 r/min 速度运行的涡轮发动机在 20 年服役期内要经历约 10^{10} 次应力循环。目前我国大力发展的高速轨道交通的轮轴系统 1 年就有可能经历 10^8 周次的循环载荷。

表 1-1 不同结构件及其需承载的疲劳寿命

Table 1-1 Different structures and components and their fatigue lives

部件名称	涡轮 发动机	新干线 轮轴	轿车轮轴	蒸汽涡轮 叶片	生物医学用 不锈钢管	直升机涡轮
服役期限	20 年	10 年	3×10^5 km			5000 h
寿命要求/周次	10^{10}	10^9	3×10^8	10^{11}	5×10^{10}	10^9

在这种情况下,传统的疲劳性能研究已经不能满足发展的需要,所以迫切需要研究这类材料在超长寿命阶段的疲劳行为。事实上,对于高强度钢,仍有部件和结构在超过 10^7 周次和低于传统疲劳极限的应力水平下发生疲劳破坏^[14,15]。

我们对商业弹簧钢 60Si2CrVA、60Si2MnA 100 个高周和 100 个超高周疲劳断口的统计结果表明,在高周疲劳断裂的断口上(疲劳寿命 N_f 在 $10^5 \sim 10^7$ 循环周次),约有 40% 是从夹杂物处开裂;而在超高周疲劳断裂的断口上(疲劳寿命 N_f 在 $10^7 \sim 10^9$ 循环周次),增加到约 70% 是从夹杂物处开裂的(见图 1-1)。这说明,对于超高周疲劳($N_f > 10^7$ 周次),内部缺陷特别是夹杂物引起的疲劳断裂显著增加。

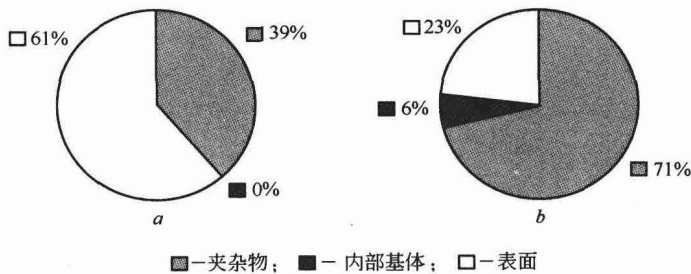


图 1-1 商用弹簧钢 60Si2CrVA 和 60Si2MnA 疲劳断口裂纹起源特性统计

a—100 个高周疲劳断口, $10^5 < N_f < 10^7$; b—100 个超高周疲劳断口, $10^7 < N_f < 10^9$

Fig. 1-1 Statistics of crack initiation site features at fatigue fracture surfaces under high cycle fatigue and very high cycle fatigue for commercial spring steels 60Si2CrVA and 60Si2MnA

a—100 crack initiation sites for high cycle fatigue, $10^5 < N_f < 10^7$;

b—100 crack initiation sites for very high cycle fatigue, $10^7 < N_f < 10^9$

材料的超高周疲劳(VHCF)是国际疲劳界的一个研究热点,已先后于1998年在法国巴黎、2001年在奥地利维也纳、2004年在日本东京、2007年在美国密歇根召开了四届国际会议,而第五届将于2011年在德国柏林召开。目前,超高

频率加速疲劳实验系统已先后在欧洲、日本和美国等地的大学和研究机构建成并开展了大量的研究工作,每年均有相当数量的研究成果发表。大量的研究成果已经开始在高速列车、航空、航天和汽车等工业领域获得应用,并给现有的疲劳设计规范和疲劳破坏机制的理解带来全新的概念^[26]。这其中,研究最为广泛与深入的就是高强度钢的超高周疲劳。我国近年来由于国民经济的高速发展,以及世界经济危机引起的产品质量的竞争,对高强度钢的超高周疲劳性能的提高具有更迫切的要求。

2 钢中非金属夹杂物

钢中夹杂物可分为**金属夹杂物**和**非金属夹杂物**两大类。金属夹杂物也称为**异形金属**,它是外来未熔金属所造成的夹杂物。钢中金属夹杂物的形成原因是多方面的,如在炼钢过程中加入的铁合金数量较多或者那些熔点较高的难熔铁合金加入后未能全部熔化而残留在钢中,就形成钢中的金属夹杂物。钢中的金属夹杂物多系偶然的外来因素造成的,因此只要采取有效措施是可以避免的。

通常所说的夹杂物主要是指钢中的非金属夹杂物。在冶炼和浇注凝固过程中产生或混入钢中,经加工或热处理后仍不能消除的,与钢基体无任何联系而独立存在的氧化物、硫化物、氮化物等非金属相,统称为**非金属夹杂物**,简称**夹杂物**。钢中非金属夹杂物主要是铁、锰、铬、铝、钛等金属元素与氧、硫、氮等形成的化合物,其中氧化物主要是脱氧产物。

钢中的非金属夹杂物会破坏钢基体的连续性,使钢的组织 and 性能的不均匀性增加,品质降低。对钢中非金属夹杂物的研究和控制是当前各国冶金界的最主要课题之一。非金属夹杂物对质量的影响是个极其复杂的问题。夹杂物的类型、形态、含量、尺寸和分布都会影响钢的性能。在目前钢的冶炼工艺技术条件下,它是钢中不可避免的一种必然组分。多年来,许多冶金工作者对钢中非金属夹杂物的形成、大小、数量、在钢中的分布及其对钢性能的影响进行了大量的研究。

2.1 钢中非金属夹杂物的来源与种类

2.1.1 非金属夹杂物的来源

非金属夹杂物的来源主要有两个方面,即**内生夹杂物**和**外来夹杂物**。前者包括在熔化和凝固时钢液中各种元素由于温度以及化学、物理条件的变化而发生化学反应所形成的夹杂物;而后者包括炉渣、耐火材料或其他材料与钢液机械