

北京建筑大学车辆工程本科专业建设经费资助项目



Theory and Method Research on Damage Tolerance of the Hollow Axes of High Speed Trains

高速列车空心车轴 损伤容限理论与方法研究

周素霞 著

中国铁道出版社
CHINA RAILWAY PUBLISHING HOUSE

北京建筑大学车辆工程本科专业建设经费资助项目

高速列车空心车轴 损伤容限理论与方法研究

Theory and Method Research on Damage
Tolerance of the Hollow Axles of High Speed Trains

周素霞 著

中国铁道出版社

2016年·北京

内 容 简 介

本书在国家 973 项目《高速列车安全服役关键基础问题研究》支持下完成,主要研究高速列车空心轴表面在硬物冲击损伤下裂纹的形成寿命和裂纹扩展规律及其剩余寿命问题,为科学地制定车轴检修周期与管理方法提供依据。

本书可供车辆工程、载运工具运用工程等专业学生学习使用,还可供相关领域研究人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

高速列车空心车轴损伤容限理论与方法研究/周素霞著.

—北京:中国铁道出版社,2016.1

北京建筑大学车辆工程本科专业建设经费资助项目

ISBN 978-7-113-21266-7

I. ①高… II. ①周… III. ①高速列车—空心车轴—
疲劳寿命估算 IV. ①U292.91

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 317096 号

书 名:高速列车空心车轴损伤容限理论与方法研究

作 者:周素霞 著

责任编辑:亢丽君

编辑部电话:010-63589185-3097

电子信箱:kanglijun@tqbooks.net

封面设计:时代澄宇

责任校对:马 丽

责任印制:郭向伟

出版发行:中国铁道出版社(100054,北京市西城区右安门西街8号)

印 刷:虎彩印艺股份有限公司

版 次:2016年1月第1版 2016年1月第1次印刷

开 本:787 mm×1 092 mm 1/16 印张:8 字数:204 千

书 号:ISBN 978-7-113-21266-7

定 价:28.00 元

版权所有 侵权必究

凡购买铁道版图书,如有印制质量问题,请与本社读者服务部联系调换。电话:(010)51873174(发行部)

打击盗版举报电话:市电(010)51873659,路电(021)73659,传真(010)63549480

前 言

车轴是车辆转向架的关键承载部件,其疲劳破坏直接危及运输安全,由断轴导致的脱轨后果可以说是灾难性的。铁路车轴的损伤会直接导致车辆重大事故的发生,而在车轴的损伤中,约有 2/3 是由疲劳引起的。

一般来说车轴是基于材料的耐久极限或疲劳极限的无限寿命设计。即使如此,并不能保证车轴结构在整个使用寿命期的安全,在实际应用中还是有少量的失效发生。这是因为,无论从材料、设计、工艺和维修诸方面采取何种措施,要完全避免各种损伤是不可能的。在车轴中常见的损伤或缺陷主要来自材料、加工和装配工艺。在列车运营中,又遭受疲劳载荷、各种腐蚀环境和离散源载荷造成的偶然损伤,这些损伤都可能导致车轴发生灾难性的破坏。

高速列车的运行环境比较恶劣,车轴可能受到道砟等硬物的高速冲击。极端情况下,这种尖锐硬物冲击可能造成车轴表面一定深度的锋利角缺口。虽然这是一种小概率事件,但是一旦发生,这种缺口在车轴随机载荷下可能会很快萌生裂纹,并逐渐扩展到临界尺寸,给高速列车运行安全带来很大隐患。

基于上述原因本书主要对以下内容进行了研究和分析并得出结论。

(1)制作模拟车轴表面尖锐硬物冲击缺口试样,采用四点支撑旋转弯曲试验,研究车轴钢在含不同缺口条件下的 $S-N$ 曲线,分析了缺口应力集中系数及其相应的 $S-N$ 曲线参数变化规律。

(2)线路实测高速列车在既有线路和京津城际铁路上的车轴应力—时间历程,利用雨流循环计数方法得到车轴的实测弯曲应力谱,通过统计推断发现应力谱符合三参数威布尔分布,并编制相应的程序应力谱。运用等效损伤原则比较不同线路运行时车轴的损伤,发现既有线路上运行时对车轴的损伤大于京津城际铁路。

(3)根据异物冲击造成的缺口类型和方位,提出用于缺口疲劳损伤分析的物理模型及形状参数。通过有限元分析,得到空心车轴表面不同缺口构型根部的应力集中系数。运用 Miner 法则及缺口试样 $S-N$ 曲线,估算实测载荷谱下车轴表面缺口处裂纹的萌生寿命,并分析出不同缺口构型对萌生寿命的影响。

(4)提出空心轴表面裂纹的几何模型。考虑到空心轴内孔的影响,对实心圆柱表面裂纹应力强度因子解析式进行修正,得出空心轴表面裂纹应力强度因子的解析式。全面分析了旋转弯曲载荷下,车轴表面裂纹前缘应力强度因子变化情况以及裂纹前缘最深点处的应力强度因子变化规律。

(5)采用 EI Handdad 短裂纹应力强度因子模型,根据实测应力谱研究空心

轴表面不同应力集中系数缺口下的短裂纹扩展特性和扩展寿命。发现当缺口系数比较大时,车轴表面短裂纹扩展速率高,运行几千公里就会进入长裂纹扩展阶段。

(6)采用 NASGRO 方程建立了疲劳裂纹扩展模型,根据空心轴表面裂纹的形状因子随深度和形状变化的特性,确定出裂纹扩展的门槛条件、临界尺寸和形状比的函数关系。运用实测载荷谱模拟出空心轴表面裂纹的扩展规律和剩余寿命,并探讨了车轴异物冲击缺口损伤容限及其安全性。

本书是作者读博士期间,在导师谢基龙教授的悉心指导及国家 973 项目《高速列车安全服役关键基础问题研究》支持下完成的。在试验数据的获得和理论研究过程中,得到了北京交通大学结构强度实验室老师们的大力支持和帮助。另外,还得到了北京交通大学国家轨道交通技术教育与服务中心朱晓宁、王力、陈希、王洋、刘潇、刘勇、冯力源、朱颂雅、刘伟、康柳江、赵佳昊、闫柏丞等的帮助。在此一并表示衷心感谢。

本书为学术性专著,对书中的错误和不足,恳请读者和同行批评指正。

周素霞

2015 年 10 月

目 录

1 绪论	1
1.1 研究背景与工程意义	1
1.2 车轴损伤及破坏的主要形式	3
1.3 国内外车轴失效历史	4
1.4 国内外车轴疲劳强度研究历史	5
1.5 车轴疲劳评价方法	7
1.6 高速铁路空心车轴的研究现状	8
1.7 本书主要研究内容	8
2 车轴钢的疲劳及断裂性能研究	10
2.1 金属材料的疲劳性能及分类	10
2.2 车轴钢疲劳断裂性能研究现状	14
2.3 车轴钢缺口试样的疲劳性能实验	21
2.4 缺口试样的应力集中系数	23
2.5 试验结果和分析	25
2.6 小结	31
3 车轴疲劳载荷测试及评价	32
3.1 车轴载荷谱的实验研究发展	32
3.2 空心车轴的载荷分析	33
3.3 车轴动应力数据采集及信号预处理	34
3.4 实测数据统计处理	37
3.5 空心轴应力谱的统计推断	42
3.6 车轴疲劳载荷与设计规范	46
3.7 基于实测应力谱的等效应力评价	51
3.8 车轴实测载荷综合分析评价	55
3.9 小结	57

4	异物损伤车轴的裂纹萌生寿命预测	58
4.1	异物冲击缺口的形式	58
4.2	异物冲击缺口的有限元模型	59
4.3	车轴疲劳裂纹形成寿命预测	60
4.4	小结	67
5	旋转变曲载荷下空心轴表面裂纹前缘的应力强度因子	68
5.1	裂纹尖端的应力和位移 ^[154-156]	68
5.2	应力强度因子 K 的计算方法	69
5.3	空心轴表面裂纹的几何模型	73
5.4	空心轴表面裂纹前缘的应力变化	74
5.5	空心轴表面裂纹前缘的应力强度因子解析模型	75
5.6	空心轴半椭圆表面裂纹应力强度因子计算结果及分析	80
5.7	小结	83
6	缺口处短裂纹的疲劳扩展	85
6.1	缺口根部应力应变分析	85
6.2	裂纹应力强度因子表达式	86
6.3	缺口根部短裂纹应力强度因子	88
6.4	缺口根部短裂纹的扩展特性	92
6.5	小结	95
7	疲劳裂纹扩展规律与剩余寿命分析	96
7.1	疲劳裂纹扩展规律	97
7.2	空心轴表面疲劳裂纹扩展分析	98
7.3	空心轴表面疲劳裂纹扩展寿命预测方法	103
7.4	空心轴表面疲劳裂纹扩展特性分析结果	105
7.5	空心轴裂纹扩展寿命计算	106
7.6	带表面缺口车轴安全性评价	107
7.7	小结	109
	参考文献	111

1.1 研究背景与工程意义

高速列车是高效运输工具,以其灵活、方便、快捷、安全、可靠、舒适为特点,备受世界各国的青睐。目前世界各地高速列车大多采用动车组形式,常见的动车组有日本新干线、德国 ICE、法国 TGV、欧洲之星、瑞典 X2000、美国 ACELA、中国的和谐号等^[1-2]。随着列车的提速,高速列车安全服役问题成了首要任务。在提速安全问题上,任何一个环节出现问题,都可能造成无法估量的严重后果。

车轴是机车车辆转向架的关键承载部件,其疲劳破坏直接危及运输安全,由断轴导致的脱轨后果可以说是灾难性的^[3]。切轴断裂^[4-5]是铁路车辆重大颠覆事故最主要的原因之一,有很强隐蔽性和突然性,给国家财产和人民安全带来巨大的损失和灾难。随着铁路的重载化和高速化,车轴不可避免地会受到日趋严重的冲击载荷作用,冷切轴断裂现象比较突出。当车辆高速通过钢轨接头或道岔时,以及在踏面带有扁疤的车轮影响下,会受到线路对它产生的巨大冲击作用,使作用在车轴上的簧下质量产生 $6\sim 18g$ 之间的冲击加速度^[6-7],这种冲击持续时间很短,因而在车轴中产生一种以应力波形式传播为主的动态应力,对车轴的强度提出了比常规更高的要求。为了减轻由速度提高带来的振动和冲击,必须减轻车辆的簧下质量。车轴属簧下质量,为此,高速列车普遍采用空心车轴。列车轴重、簧下质量减小,可以降低动车组运行时对线路的动力作用,降低维修费用。

铁路车轴的损伤会直接导致车辆重大事故的发生。而在车轴的损伤中,约有 $2/3$ 是由疲劳引起的^[8]。一般来说车轴是基于材料的耐久极限或疲劳极限的无限寿命设计。即使如此,并不能保证车轴结构在整个使用寿命期的安全,在实际应用中还是有少量的失效发生。这是因为,无论从材料、设计、工艺和维修诸方面采取何种措施,要完全避免各种损伤是不可能的。在车轴中常见的损伤或缺陷主要来自材料、加工和装配工艺。在列车运营中,又遭受疲劳载荷、各种腐蚀环境和离散源载荷造成的偶然损伤,这些损伤都可能导致车轴发生灾难性的破坏。除此之外,还有以下因素的限制性和不确定性:

(1) 车轴在服役期内经历的载荷循环数。日本高速列车每年大约运行 30 万 km,载荷循环数达 10^8 ,欧洲高速列车每年大约运行 40 万 km,载荷循环数达 1.5×10^8 ,我国则达到了每年 60 万 km,车轴载荷循环数为 2.2×10^8 。按照使用寿命 20 年计,日本和欧洲车轴载荷循环数分别为 2×10^9 次和 3×10^9 次,中国则为 4×10^9 次,这些载荷循环数都远高于疲劳极限循环次数(10^7)。由于设计规范中的车轴载荷是定值,而实际运用中载荷随机性很强,以至于按照恒幅疲劳极限进行车轴无限寿命设计仍会有不安全性。

(2)外来损伤造成的车轴表面缺陷。如文献[9]报告了高速轨道上尤其是在冬季、隧道中和轨道重修后可能发生的尖锐硬物冲击车轴,这种事故发生的几率很小,但是一旦发生则会产生最深达2 mm的锐利的角缺口。另外,保护层的局部破坏促进了腐蚀损伤,这就为以后裂纹的扩展提供了条件。

如果意外缺陷的形成恰好是在上次车轴无损检测刚刚结束时发生,那么在一个检修周期中裂纹扩展情况如何,其剩余寿命能否达到或超出检测间隔,直接关系到车轴的断裂安全问题,这就需要对带缺口车轴进行损伤容限分析。

实践和分析都表明,把车轴设计成能承受定量损伤,并实施计划检查的损伤容限结构,是提高列车运行安全水平的有效途径。在航空和航天工业已经用损伤容限设计来代替传统的安全寿命设计。损伤容限方法要求对结构的关键部位进行定期无损检测,定量确定缺陷的特性,然后根据裂纹扩展速率估计剩余寿命。在实际中,车轴异物损伤引起的裂纹萌生会明显降低高周疲劳寿命,因此对于车轴来说,和其他构件一样,其疲劳过程包括裂纹形成、裂纹扩展和瞬间断裂三个阶段^[10],疲劳寿命由裂纹形成寿命和裂纹扩展寿命两部分组成。对于没有异物损伤的车轴,其疲劳裂纹萌生寿命占据了车轴整个寿命的大部分。当车轴表面一旦遭遇了异物高速冲击或者其他原因的损伤,就容易在损伤部位萌生裂纹,如果出现了一定尺寸的裂纹,继续使用可能会由于裂纹不断扩展而导致车轴断裂,存在很大的安全隐患,裂纹的扩展性能将对动车组的运行和检修要求产生极大的影响。

目前,应用于空心车轴的无损检测技术大约有四种^[11],如图1.1所示。可以看出,对于深度为2 mm以上的裂纹,探出概率较高,但除了磁粉检测外,其他方法的最大探出概率都低于100%。在实际运用中,无损检测能够发现的最小裂纹非常重要,但是更重要的是在检测中漏掉的长裂纹,或者是在刚刚检测完发生的新裂纹,这些裂纹在一个检修周期内有可能发展到很危险的尺寸,从而对列车的运行安全造成很大的威胁。因此有必要研究空心轴表面裂纹扩展的规律,从而为制定更加科学的检修周期提供参考。

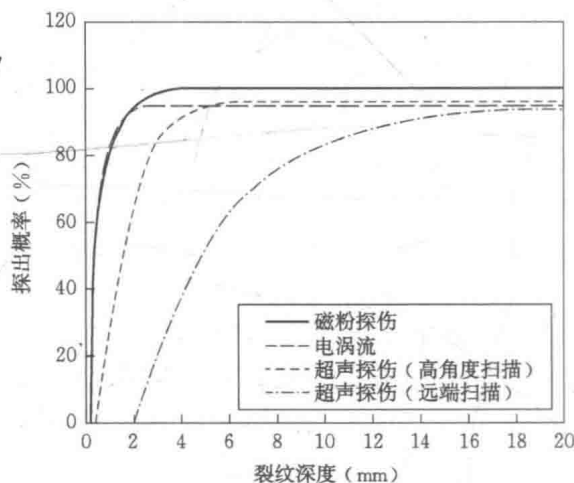


图 1.1 不同无损探测方法对车轴不同尺寸裂纹的探出概率

1.2 车轴损伤及破坏的主要形式

车轴的早期断裂失效形式主要有热切和冷切两种^[12]。热切的原因与车轴内在质量无关,而冷切发生的原因以及整个断裂过程都和车轴本身密切相关,它本质上是车轴某些质量指标未达到规定的要求或外部的条件超过了额定的允许值而引发裂纹,导致断裂。这种断裂的机理是车轴薄弱区域在交变载荷的作用下,疲劳累积损伤达到一定程度后,诱发疲劳裂纹,进而裂纹扩展,最后导致断裂。车轴的冷切可以说几乎都是疲劳断裂。如果车轴的某个区域有缺陷或损伤,那么车轴就更容易萌生裂纹,因而车轴的使用寿命极大地被缩短,这是极端危险的。这种断裂的特点是:①发生在常温下;②断裂部位没有明显的塑性变形;③往往承受的载荷不太大;④断裂时比较突然。所以防止冷切的重点应放在车轴本身质量的提高、车轴失效原因分析和失效的预防上。

车轴的失效可能发生在车轴的所有部位^[13],而断裂部位主要在轮座嵌镶部、卸荷槽和轴身中部。导致裂纹的原因有:内部材质不良,表面加工不良,腐蚀,微动摩擦损伤和轴身表面外来损伤等。常见的车轴损伤和裂纹位置如图 1.2 所示。

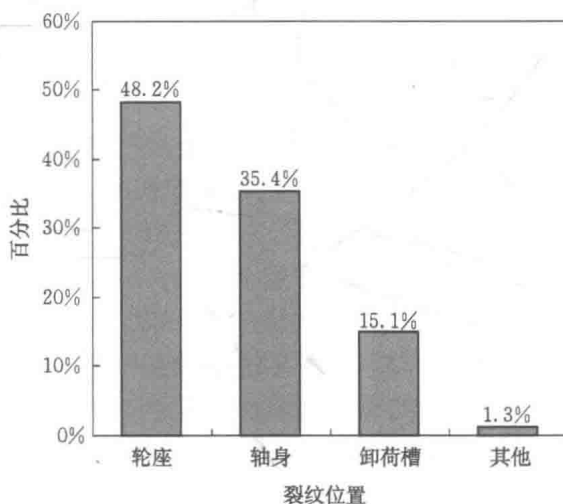
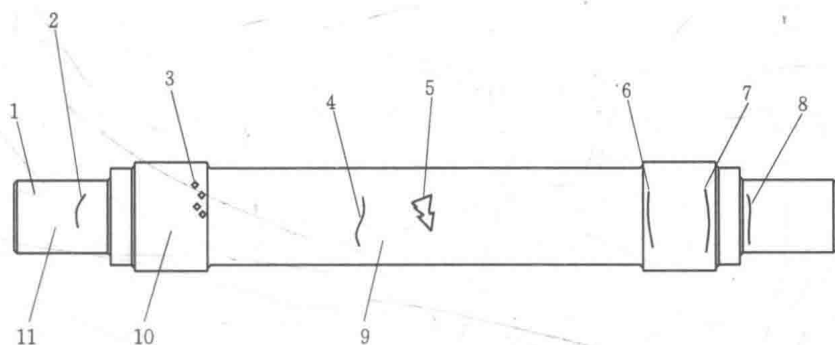


图 1.2 车轴损伤形式和部位

1—轴承位置;2—轴颈横裂纹;3—轮座内侧微动摩擦腐蚀;4—轴身横裂纹;5—轴身损伤磕碰、撞伤、铲伤等;
6—轮座内侧裂纹;7—轮座外侧裂纹;8—卸荷槽裂纹、锈蚀;9—轴身;10—轮座;11—轴颈

车轴内部缺陷主要包括材料成分偏差、组织异常、夹杂物级别超标、疏松、残余缩孔等,它是由于轴坯冶炼或车轴热处理控制不当造成的。运用中,疲劳裂纹从车轴内部缺陷处萌生,然后逐步扩展,最终导致疲劳断裂。轴颈裂纹主要发生在车轴轴颈与轴承配合部内侧边缘,是由于车轴与轴承组装不当,在其边缘产生高应力集中,导致裂纹萌生。卸荷槽加工粗糙度超标主要是在加工工艺过程中质量控制存在问题,表现在车轴卸荷槽表面有目测可见的车削刀痕,达不到标准规定的要求。车轴车削刀痕根部的应力集中导致弧形多源或线源疲劳裂纹萌生,其扩展速度较快,最终疲劳断裂。卸荷槽的局部腐蚀主要表现在车轴卸荷槽表面分布着大量的腐蚀斑点,呈不均匀分布,经清洗后可见腐蚀部位有很多麻坑,连成一片。每一个腐蚀区域腐蚀程度有所差别,麻坑大小不同。腐蚀坑处的应力集中易诱发疲劳裂纹。轮座横向裂纹是在车轴轮座表面有目测可见的周向小裂纹,是冶金缺陷形成的。轮座内侧微动腐蚀主要发生在轮座内侧镶入部 5~10 mm。轮座内侧镶入部因微动摩擦腐蚀而形成腐蚀坑,在车轴运用环境中,形成了具有一定腐蚀性的电解质,进入轮座内侧镶入部的缝隙中,与原有的轮座表面的一定损伤和车轴旋转弯曲形成的微动摩擦共同作用,在腐蚀坑处萌生横向裂纹。轮座粗糙度超标会在镶入部内侧 5~10 mm 的高应力区沿刀痕萌生疲劳裂纹。轮座压装损伤往往是压装时存在偶然失误(如漏涂油或金属异物进入等)或压装参数严重超范围。主要表现在轮座表面有目测可见鱼鳞片带和挤压包。鱼鳞片带的方向是从轮座的外侧指向轮座的内侧,挤压包在鱼鳞片带的前端(即轮座内侧)。在鱼鳞片的根部往往有裂纹。轮座退卸损伤是压装时参数选择和工艺过程存在问题,或长期运用中的氧化、锈蚀,使轮座退卸时产生退卸损伤。表现在轮座表面有目测可见的擦伤(轻度)、纵向拉痕(中度)、或纵向鱼鳞片带和挤压包(重度),鱼鳞片带的方向是从轮座的内侧指向轮座的外侧,挤压包在鱼鳞片带的前端往往被推出轮座而无法看到,甚至轮座外边缘也被推挤掉块。轴身铲痕是制造和维修过程操作不当造成的,基本沿车轴横向或斜向。运用中此处产生应力集中萌生裂纹。轴身碰伤会引起缺口效应,产生局部高度应力集中,在凹痕处萌生横向疲劳裂纹并扩展,最终导致疲劳断裂。

1.3 国内外车轴失效历史

最早的灾难性车轴事故是 1842 年 5 月 8 日发生在巴黎市郊凡尔赛宫附近的事故。这是第一次有重大生命损失的铁路意外事故。这个四轴机车的一个发动机牵引轴突然断裂,造成脱轨,当时牵引了一列 17 个车厢。出轨之后,火势从破坏引擎点燃了堆积到一起的 6 个车厢,确切的死亡人数没有统计,这次事故波及了整个欧洲。1884 年的 Penistone 事故(英国的谢菲尔德附近)中,当列车以 80 km/h 的速度行驶时,驱动车轴突然断裂,造成了列车脱轨。

从 1878 年至 1892 年的 14 年间,英国平均每年的车轴失效是 380 根;在 1881 年至 1891 年间,平均每年有 178 根铁轴和 72 根钢的驱动轴失效。

最近几十年中,英国每年的车轴失效为 1~2 起,北美每年的车轴失效为 2~3 起,但自从 1995 年以来,随着列车载重的增加,北美车轴故障数量不断增长。从 1998 年至 2002 年 5 年间,车轴故障数 52 起,平均每年超过 10 起,并且是逐年增加的趋势。德国 1998 年 6 月 3 日因为车轴断裂引起列车脱轨,死伤 188 人。2008 年 10 月,德国高铁在 8 根车轴上发现裂纹,一根车轴断裂,当时运行速度不是太高,所以没有造成人员伤亡。

在我国,自 1974 年至 1993 年,共发生车轴疲劳断裂事故七十余起,每起造成的经济损失少则十几万,多则上百万。在 2004 年 4 月初,某铁路局机车第六位轮对车轴发生断裂,断裂位置在轴身中部。该机车新造出厂服役才 6 个月,车轴断裂时的总走行里程约 81 000 km。车轴断裂是以轴身表面处疲劳源为源的低应力旋转弯曲疲劳断裂。根据文献的 35 910 根裂纹车轴进行寿命统计,得到我国车轴使用寿命分布曲线如图 1.3 所示。

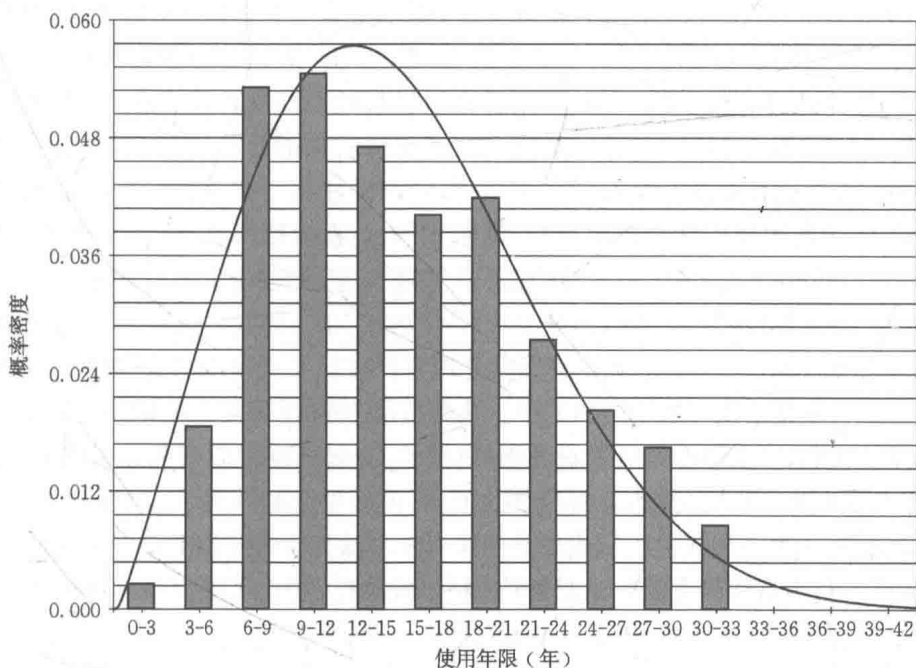


图 1.3 车轴使用寿命分布曲线

由图 1.3 可见,车轴的寿命分布符合三参数威布尔分布,主要分布在 5~20 年之间,此类裂纹往往存在于裂纹频发部位,有不同程度的表面损伤(包括腐蚀),在载荷作用下,以此为裂纹源产生累积损伤,最终形成疲劳裂纹;寿命低于 5 年的车轴比较少,一般都是存在着严重的材质或(和)加工缺陷,随着车轴加工制造工艺的提高和运用前检查验收管理的加强,此类车轴大大减少。

1.4 国内外车轴疲劳强度研究历史

早在 19 世纪 40 年代,在欧洲、美国和世界上的其他国家就已经形成了密集的铁路网,铁路在客运和货运中处于快速增长的地位。然而当时人们对车轴所承载荷的大小和材料疲劳特性知之甚少,造成了一些车轴断裂的灾难性事故。同时也是这些事故促进了人们对材料疲劳性能研究的重视。1843 年,苏格兰人 Rankine W. J. M(兰金)发表了第一篇疲劳研究论文,论文中指出,机车车辆的破坏是由于运行过程中金属性能逐渐变坏所致。他分析了车轴轴肩处尖角的有害影响,指出了加大轴肩处的圆角半径可以提高其疲劳强度。1848 年,James 和 Galton 发表了基于铁道车轴交变载荷条件下的大量铁棒实验结果。几年以后,德国工程师 August Wöhler 在 1847~1889 年间在斯特拉斯堡皇家铁路工作期间,设计出了第一台疲劳试验机,用来进行机车车轴疲劳试验,引入了著名的 S-N 曲线和疲劳极限的概

念^[20-22],这在工程领域起到了非常重要的作用。同样在这个时期,Clark DK、Andrews T^[23-25]等试验研究冲击对车轴疲劳性能的影响,并发表了相关的研究成果。

由于车轴在铁道运输安全中的重要地位,长期以来国内外学者从各种不同的方面对车轴疲劳失效问题进行理论分析和实验研究。

在车轴材料性能方面,不同国家都进行了一系列试验,研究了不同车轴钢的各种疲劳性能参数。文献[26]利用高速动车用的高频淬火中碳钢车轴,进行实物车轴疲劳强度试验,给出了恒幅载荷和变幅载荷下车轴钢的疲劳强度曲线。对于高强度合金钢车轴材料,文献[27-28]给出了材料的 $S-N$ 曲线,文献[29]研究了材料的循环应力应变曲线,在此基础上进行车轴疲劳损伤研究。文献[30]通过试验研究了此种材料的短裂纹扩展门槛值变化规律。赵永祥等^[31-34]从理论和实验上深入研究了 50 车轴钢的疲劳可靠性,建立了 50 钢的概率循环本构模型、疲劳长裂纹扩展的概率模型、随机 $S-N$ 关系的概率模型、概率疲劳极限、断裂韧性的合理统计模型等。文献[35]试验研究了 50 车轴钢材料的低周疲劳性能。

在车轴加工和热处理研究方面,文献[36-38]分别对 50 车轴钢的热处理工艺、化学成分控制,非金属夹杂物控制、气体含量、晶粒度以及处理流程进行了研究,以从材料质量上来提高车轴的疲劳性能,并应用于实际的生产加工中。施柯里尼克等^[39]研究了车轴制造新工艺如径向锻造、横向螺旋轧制、冷成形冷碾压等对其强度、塑性、金属纤维扭曲度和疲劳极限等的影响。为了增加车轴表面疲劳强度,预防表面裂纹的形成,可采用亚温淬火^[40]、滚压技术^[41]、高频淬火^[42]等表面处理工艺,这些工艺方法主要是用来引入车轴表面的残余压应力,从而提高车轴表面的疲劳强度。利用高频淬火车轴表面形成适当的硬度、硬化层深度和压缩残余应力,以提高压装部位的疲劳强度。车轴疲劳裂纹主要发生在表面不同位置。车轴表层的残余应力状态对车轴的疲劳强度有重要影响,如果车轴表层存在拉应力,则当车轴承受外加循环载荷时,表层的合成应力水平增加,表面受到的最大应力有可能超过车轴的疲劳强度,产生疲劳破坏;相反,如果车轴表层存在压应力,则当车轴承受外加循环载荷时,应力幅值不变,但平均应力降低了,因此提高了车轴的疲劳强度。文献[43]对 50 钢车轴进行了低温淬火和表面滚压试验,通过研究处理前后的化学成分、金相、机械性能和残余应力的变化,来说明车轴表层形成的压应力可以提高车轴的疲劳强度。另外,对于车轴压装部位,也可以通过以下几种方法提高疲劳强度^[44]:淬火热处理、喷丸、冷轧及渗氮和优化车轴压配合结构形式等。

在车轴的载荷研究中,此前也有很多的成果。C. B. 魏尔辛斯基等^[45]详细论述了车轴运用中的载荷情况,他指出,车辆在运行过程中,车轴承受着各种各样的载荷作用,在这些载荷中多数是静载荷(车辆在理想光滑直线上所产生的载荷),而动载荷具有复杂的作用特性。动载荷并不总是能够用理论的方法来决定,它们基本上用试验研究的方法来确定。车轴动载荷中除了轮对通过钢轨接头和车辆通过曲线时所产生的载荷,还包括由制动和车辆摇头振动引起的载荷。他从理论上确定了车轴的运用载荷,并用于车轴的强度计算。1995 年日本铁道技术协会和铁道总研进行了四根新干线实物车轴的动载荷试验,试验中采取尽可能保持与实际工作应力相关的原则选取应力等级和循环次数,发现运行中发生弯曲应力的主要外力是轮重和横压力,其中横压力发生在通过曲线的时候,其影响占动应力的大部分。本松启美等^[46-47]在以前车轴疲劳载荷分析的基础上,在新干线高频淬火车轴的基础上制造了试验轴,对车轴压入端部的应力状态进行了分析,并进行了初步的动载荷试验研究。在我

国,早期的车轴强度设计采用垂直动荷系数来确定计算载荷,在疲劳试验时,也只以通常的等幅载荷作为加载依据,故不能确切地预估车轴的疲劳寿命。为了编制我国客货车轴的载荷谱,原四方车辆研究所针对我国铁路的特点,先后在万余公里的线路上实测了 RC3、RD2、RD3 等客货车轴的随机载荷数据。在此基础上对所测数据进行了双参数雨流法统计,且运用统计推断理论对统计数据作理论拟合。最后在考虑各种工况加权数的基础上,根据理论拟合结果,合成并推断出概率为 10^{-6} 的最大载荷,并且编制出载荷谱^[46]。继此之后,铁路相关部门又进一步测试了双层客车车轴和提速客车车轴的载荷谱^[49-50]。

1.5 车轴疲劳评价方法

名义应力法^[51]是估算裂纹形成寿命和裂纹扩展寿命之和的方法。作为一种常规的寿命估算方法,它以零构件危险点的名义应力为基本参数,从材料的 $S-N$ 曲线出发,再考虑各种因素(或系数)的影响,得出构件的 $S-N$ 曲线,然后按构件的 $S-N$ 曲线进行疲劳设计。局部应力应变法^[51-52]是一种估算疲劳裂纹形成寿命的方法。它将局部应力应变分布作为寿命预测的依据。局部应力应变法不同于名义应力法,它包括材料的疲劳特性、应力-应变分析、损伤和累积损伤计算三方面的内容。文献^[27]试验研究了非线性损伤模型和变幅载荷下,车轴表面裂纹的萌生寿命和材料的 $S-N$ 曲线。魏长竹^[53]、商跃进^[54]应用疲劳损伤累积理论,具体计算了车轴的疲劳寿命及其相应的可靠度。田中真一等^[55]根据实物轮轴疲劳试验结果和实际车轴裂纹检查统计资料建立了车轴轮座部的 $P-S-N$ 曲线,研究表明车轴发生裂纹和断裂时的 $S-N$ 曲线斜率为 $4\sim 6$,轮座处裂纹萌生寿命分布近似于对数正态分布,并认为变幅载荷下的压装轴裂纹萌生寿命的疲劳破坏准则大致上可用修正的 Miner 法则,这种方法对车轴其他部位也基本适用。

结构件失效的主要原因是疲劳裂纹扩展。过去, $S-N$ 曲线是唯一的工程工具,没有考虑用裂纹扩展预测寿命。然而现在,可用线弹性断裂力学研究裂纹扩展行为和预测构件剩余寿命。这对衡量一个构件是否能继续使用有很大必要性。断裂力学方法^[56]是一种估算疲劳裂纹扩展寿命的方法,它假定零构件内存在初始裂纹来估算其剩余寿命,并通过试验来校验,确保在使用期(或检修期)内裂纹不致扩展到引起破坏的程度,从而保证带裂纹构件在其使用期内能安全使用。等幅加载情况下,常用的裂纹扩展速率方程有 Paris 公式和 Forman 公式,对裂纹扩展速率积分就可以得到其扩展寿命;估算随机载荷下疲劳裂纹扩展寿命时应将每一载荷循环所产生裂纹长度的增量累加起来。即当裂纹由初始裂纹长度 a_0 扩展到临界裂纹长度 a_c 时,可利用数值积分法得到裂纹扩展寿命。一般,车轴表面没有明显缺陷的情况下,车轴裂纹的萌生寿命占据了车轴疲劳寿命的大部分,这个阶段对车轴的定期检修体制影响不是很大,而由于各种原因萌生裂纹后的扩展相对来说对车轴检测间隔的制定显得更加重要,因此很多文献研究了车轴裂纹扩展情况^[57-60]。文献^[57-58]应用断裂力学和车轴载荷谱等方面的研究成果,考虑不同影响因素,对车轴的疲劳裂纹扩展寿命进行了初步的研究。S. Beretta 和 Uwe Zerbst^[18,59]研究了断裂力学在车轴上的应用,通过试验和数值计算的方法得到了车轴疲劳裂纹扩展的随机模型。文献^[60]试验研究了尺寸效应对车轴疲劳性能的影响,建立了载荷谱下的车轴裂纹扩展模型。而赤间诚^[61]等以新干线车辆的车轴为例,对于车轴的车轮压入部所产生的裂纹扩展,用基于断裂力学的方法,在计算机上进行了

模拟数值试验,这些数据对今后无损探伤的周期和允许裂纹尺寸的重新评价,对车轴设计标准的研究有很大参考价值。Makoto Akama^[62]通过对小试件仿真试验中得到的数据,运用贝叶斯数值分析的方法对新干线车轴轮座部位的裂纹不确定性扩展进行了分析,预测了疲劳寿命的适当值。文献[63]研究了车轴的腐蚀疲劳裂纹,通过分析得出了引起车轴卸荷槽部位的腐蚀疲劳裂纹主要原因为大气腐蚀。文献[64]系统研究了腐蚀坑对车轴钢的疲劳寿命和疲劳极限的影响。通过试验断口分析和断面金相研究,得出蚀坑试样裂纹萌生的最主要原因是,蚀坑半球壳形的几何形状和蚀坑底部的显微缺口二者交互作用形成了应力集中。根据实物车轴所做的应力测试发现,当有侧向力时,在轮座镶嵌部内边缘的应力不仅成倍地增加,而且比车轴的其他位置增加的都多。所以在车轴的轮座镶嵌部内边缘一旦形成腐蚀坑,它必将转化为裂纹源,降低车轴的使用寿命,构成导致车轴早期失效断裂的潜在威胁。文献[65]认为,车轴断裂源于车辆压装区的微动疲劳。近年来,微动疲劳研究有了很快的发展^[66-69],研究者们用有限元的方法建立了微动疲劳的模型,预测微动疲劳裂纹的产生。通过压装试件和切槽试件的弹塑性分析,认为临界接触面的应力和应力梯度及压装力不足是引起微动疲劳裂纹产生的重要参数。刘伟等^[70]采用模拟轮对,对试验轴进行模拟工况的微动损伤试验,发现疲劳裂纹过早地在试验轴微动应力集中的滑动过渡区萌生,并加速了裂纹初期的扩展,降低了试验轴的疲劳强度。

1.6 高速铁路空心车轴的研究现状

在国外,高速铁路已经有了几十年的运营历史,常见的动车组有日本新干线,德国 ICE,法国 TGV 等等。这些国家对空心车轴的研究比较早,日本铁道技术协会和铁道总研在 1995 年进行了新干线实物车轴的动载荷试验^[71]。G·Miyaiishi 进行了高速车辆车轴的运用载荷分析及疲劳寿命估计^[72]。德国对空心车轴的材料特性进行了试验,测出了高速动车组的载荷谱并进行了疲劳强度分析^[59]。这些国家都建立了完善的空心车轴的检测系统。而在我国,也进行过高速客车空心轴的研究。

我国为了实现铁路装备现代化和中国铁路快速发展的奋斗目标,原铁道部先后在 2004 年和 2005 年组织采购了时速 200 km 及以上的动车组。我们的最终目标是立足国产化,促进我国铁路动车组的健康和持续发展^[73]。在消化吸收国外先进高速动车组技术阶段,借鉴国外高速动车组设计制造经验和标准是必要的。此外,还需要通过测试来验证国外规范是否符合我国线路条件,研究符合我国实际运营状况的疲劳设计载荷,为今后动车组车轴等的设计提供可靠的载荷依据。为此,在相关部门和高校的配合下,对动车组的一些相关性能检测也在进行,其中包括车轴在不同速度下的动载荷测试等等,这都为更好地研究车轴的各方面性能提供了很好的基础数据。

1.7 本书主要研究内容

本书以高速列车的运用为背景,基于异物损伤造成的车轴表面缺口问题,对带缺口车轴损伤容限的相关内容展开研究,主要内容如下:

第 1 章介绍了研究背景和国内外相关领域的研究状况,综述了车轴损伤及失效形式和

历史、车轴疲劳强度研究方法以及空心轴的研究现状等。

第2章研究车轴钢的疲劳断裂性能。通过制作中碳钢车轴材料试样表面缺口,采用有限元方法计算出不同缺口的理论应力集中系数和在旋转弯曲载荷下缺口的应力状况。实测光滑试样和缺口试样的 $S-N$ 曲线,得到给定可靠度下车轴钢的概率疲劳极限,以及缺口应力集中系数对 $S-N$ 曲线参数的影响规律。

第3章以高速列车既有改造线路(上海—昆山段和京津城际铁路)为对象,进行连续线路动车组车轴应力—时间历程实测,利用雨流循环计数方法对试验数据处理得到车轴的实测弯曲应力谱,运用概率统计方法对每一个工况下的应力谱进行分析,发现车轴应力幅值符合三参数威布尔分布,在此基础上推断出车轴动应力最大值,并编制出相应的程序应力谱。提出载荷谱等效方法,运用等效损伤原则对既有改造线路和京津城际铁路实测应力谱进行分析评价,比较不同线路运行时车轴的损伤;计算出车轴不同表面缺口情况下的等效应力,并与 JIS-E-4501 和 EN 13103 车轴设计标准进行比较,以评价这两个标准的适用范围问题。

第4章分析异物冲击造成的车轴表面损伤类型,提出损伤缺口的物理模型及形状参数,依据车轴实测载荷谱并结合 Miner 法则,建立车轴裂纹萌生寿命的预测模型,估算车轴表面缺口处裂纹的萌生寿命,分析不同缺口构型对萌生寿命的影响。

第5章在分析实心圆柱表面半椭圆裂纹应力强度因子解析式的基础上,考虑到空心轴内孔的影响,创新性地提出修正方法,得到空心轴表面半椭圆裂纹应力强度因子的解析式,分析旋转弯曲载荷下车轴表面裂纹前缘应力强度因子变化情况。根据旋转弯曲载荷下裂纹前缘最深点处在水平及垂直位置时的应力强度因子,运用叠加原理,得到了空心轴任意旋转角度下裂纹前缘最深点的无量纲应力强度因子随裂纹深度和形状的变化规律。

第6章对缺口根部短裂纹处的不同应力强度因子解析模型进行对比分析。根据 El Haddad 模型对长裂纹应力强度因子模型进行修正,得到不同缺口根部短裂纹的应力强度因子范围。根据 Paris 准则,采用有效应力强度因子分析短裂纹的扩展特性。对 Paris 公式在短裂纹的上下限尺寸区间进行积分得到短裂纹的扩展寿命,及缺口应力集中系数对短裂纹扩展寿命的影响规律。

第7章采用 NASGRO 方程建立空心轴表面半椭圆疲劳裂纹扩展模型,根据空心轴表面裂纹的形状因子随深度和形状变化的特性,预测实测载荷谱下空心轴表面裂纹的扩展规律及剩余寿命,对其进行损伤容限评价。

车轴钢的疲劳及断裂性能研究

车轴材料主要包括中碳钢和合金钢。本章总结了相关文献中车轴中碳钢与合金钢的疲劳及断裂性能,给出车轴钢的循环应力应变曲线、应力—寿命($S-N$)曲线、应变—寿命($\Delta\epsilon-N$)曲线、裂纹扩展速率 da/dN 、裂纹扩展门槛值 ΔK_{th} 和车轴钢的断裂韧性 K_{IC} 等。通过比较分析,提出影响车轴钢不同性能参数的一些因素,并通过试验进一步研究异物损伤缺口下车轴钢疲劳性能参数的变化规律,为后面车轴钢裂纹萌生和扩展特性分析提供基本数据。

2.1 金属材料的疲劳性能及分类

2.1.1 金属材料的疲劳分类

金属材料的疲劳有很多种分类方法。在目前的研究工作中,比较多的是按照破坏前材料所经历的载荷循环周次来划分疲劳的形式,即低周疲劳(破坏循环次数低于 $10^4 \sim 10^5$)、高周疲劳(破坏循环次数在 $10^5 \sim 10^7$ 之间)和超高周疲劳(破坏循环次数高于 10^7)。

(1)低周疲劳:破坏循环次数低于 $10^4 \sim 10^5$ 的疲劳。其特点是作用于构件的应力水平较高,材料处于塑性状态,应力和应变呈非线性关系。表征材料低周疲劳性能的有应变—寿命($\epsilon-N$)曲线和循环应力应变曲线,试验过程都是采用应变幅控制,故低周疲劳又称应变疲劳。

(2)高周疲劳:破坏循环次数在 $10^5 \sim 10^7$ 之间的疲劳。其特点是作用于构件的应力水平低于材料的屈服强度,材料处于宏观弹性变形状态,应力和应变呈线性关系,表征材料高周疲劳性能的是 $S-N$ 曲线。

(3)超高周疲劳:传统疲劳研究,受试验条件和试验设备载荷频率的限制,高周疲劳研究范围常限于 10^7 循环以内。随着现代工程技术的发展,多种构件在服役期实际承受的疲劳循环次数已远高于 10^7 周。传统疲劳研究认为钢铁材料在 10^7 周次附近存在疲劳极限,构件载荷应力幅低于该疲劳极限时,则具有无限寿命。近 20 年来,随着对金属材料超高周疲劳性能研究的发展,已有许多研究结果显示,某些材料在 10^7 周次以上超高周疲劳阶段仍然发生疲劳断裂。

2.1.2 金属材料的疲劳寿命

19 世纪 80 年代的铁路断轴事故促使人们开始材料疲劳问题的研究。早期车轴经历了大量循环而导致疲劳失效,这些失效启发了 Wöhler,他设计出了第一台疲劳试验机,用来进行机车车轴疲劳试验,并发现材料在某个应力水平下可以反复循环下去,称这个应力为疲劳极限,因而引入了著名的 $S-N$ 曲线和疲劳极限的概念。从此, $S-N$ 曲线就成了人们研究材