

基础装备焊接接头表面超声冲击理论及技术丛书

列车转向架构架材料及其 焊接接头的超高周疲劳性能研究

何柏林 著



西南交通大学出版社

张外信

图书在版编目 (C I P) 数据

列车转向架构架材料及其焊接接头的超高周疲劳性能
研究 / 何柏林著. —成都: 西南交通大学出版社,
2021.12

(基础装备焊接接头表面超声冲击理论及技术丛书)
ISBN 978-7-5643-8409-8

I. ①列… II. ①何… III. ①铁路车辆—转向架—架
构—材料—研究②铁路车辆—转向架—焊接接头—疲劳强
度—研究 IV. ①U270.331

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2021) 第 239251 号

基础装备焊接接头表面超声冲击理论及技术丛书

Lieche Zhuanxiangjia Goujia Cailiao ji Qi Hanjie Jietou de
Chaogaozhou Pilao Xingneng Yanjiu

列车转向架构架材料及其焊接接头的超高周疲劳性能研究

何柏林 著

责任编辑	李 伟
封面设计	何东琳设计工作室 西南交通大学出版社
出版发行	(四川省成都市金牛区二环路北一段 111 号 西南交通大学创新大厦 21 楼)
发行部电话	028-87600564 028-87600533
邮政编码	610031
网 址	http://www.xnjdcbs.com
印 刷	四川煤田地质制图印刷厂
成品尺寸	170 mm × 230 mm
印 张	17.5
字 数	261 千
版 次	2021 年 12 月第 1 版
印 次	2021 年 12 月第 1 次
书 号	ISBN 978-7-5643-8409-8
定 价	88.00 元

图书如有印装质量问题 本社负责退换

版权所有 盗版必究 举报电话: 028-87600562

前言

随着我国铁路运输全面提速、重载战略的不断推进,列车运行安全备受关注。转向架焊接构架是转向架最关键的零部件之一,属于典型的重载焊接结构,承担着车体重量和轨道振动带来的循环载荷作用,其可靠性直接影响列车的性能和行驶安全。高速列车在10年服役期内大约要经历 10^9 次应力循环,即10亿次以上的疲劳。传统疲劳研究认为,钢铁材料一般在 $10^6 \sim 10^7$ 循环周次附近存在疲劳极限,加载应力幅低于该疲劳极限,材料将不发生疲劳破坏,即材料有无限寿命,因此材料 10^7 周次的 $S-N$ 曲线即可满足构件的疲劳设计安全要求。目前的疲劳设计大多是基于 10^7 次应力循环的试验数据进行的。然而,最近的研究结果表明,金属材料在超过 10^7 次的超长寿命区出现疲劳极限消失的现象,材料在 10^7 以上超长寿命区循环周次内仍然会发生疲劳断裂,这意味着长寿命疲劳设计方法不能满足结构在超长寿命区的安全设计要求。很多材料在超高周疲劳寿命区不存在传统的疲劳极限, $S-N$ 曲线具有阶梯下降特征。与传统疲劳不同,材料的超高周疲劳行为发生在加载应力幅远低于传统的疲劳极限下。其疲劳断裂机理与传统疲劳破坏的机理也有所不同。

超声冲击处理是一种全新的焊后处理技术,它能够有效降低焊接接头焊趾处的应力集中系数,消除焊接残余拉伸应力,甚至在焊缝及其附近区域引入残余压应力,并使焊接接头表层组织得到明显细化,这对提高焊接件的疲劳寿命具有重要作用。

本书介绍了超高周疲劳研究的试验方法和所用设备,以及超声疲劳试样的设计和影响试样振动特性的因素;在现有高速列车转向架焊接构架常用材料的基础上,以转向架对接接头和十字接头为例,探讨了转向架焊接构架用钢及其焊接接头的超高周疲劳性能以及超声冲击对其焊接接头超高周疲劳性能和疲劳失效机理的影响;详细总结了超声冲击对焊接接头表面组织的影响、对焊接接头表层残余应力的影响、对焊接接头应力集中系数的影响以及对焊接接头超高周疲劳裂纹萌生和扩展机理的影响,以期找出超声冲击引起的晶粒细化、残余应力和应力集中变化与转向架焊接接头疲劳寿命之间的内在规律,寻求提高转向架焊接接头疲劳强度和疲劳寿命的新方法,为提高转向架焊接接头疲劳寿命、降低转向架焊接构架的维修费用和运营成本提供理论依据及技术支持。最后在论述超高周疲劳的影响因素基础上,本书对频率因素和环境因素对转向架焊接构架用钢焊接接头超高周疲劳性能的影响进行了重点讨论。

本书素材主要来自作者及其研究生(张枝森、邓海鹏、熊磊、魏康、吕宗敏、张志军、江明明、谢学涛、丁江灏、金辉、叶斌、王永祥等)近年来在这一领域的研究成果,同时书中也参考了国内外有关文献的相关内容,在此对相关作者表示感谢。

最后,感谢国家自然科学基金资助项目“超声冲击对高速列车转向架焊接接头超高周疲劳性能及失效机理的影响研究”(项目编号:51365014),中车南京浦镇车辆股份有限公司的合作课题“超声波冲击法对转向架用钢焊接接头力学性能影响研究”,江西省工业支撑重点项目“机械零部件表面超声冲击/滚压联合表面纳米加工技术及装备研究”(20161BBE50072)对本书给予的大力支持。

由于高速列车转向架构架焊接接头的超高周疲劳性能研究是近几年才开展起来的,限于作者学识水平、实践经验,研究工作与书中难免会有纰漏和考虑不周之处,还望读者不吝指正,交流探讨。

何柏林

2021年7月30日于华东交通大学

目 录

第 1 章 转向架焊接构架与常用钢材	1
1.1 转向架焊接构架	1
1.2 转向架构架常用钢材	5
第 2 章 超高周疲劳	8
2.1 疲劳概述	8
2.2 超高周疲劳研究现状	27
2.3 超高周疲劳的影响因素	36
第 3 章 超声疲劳试验方法	51
3.1 超高周疲劳研究的试验方法及所用设备	51
3.2 超声疲劳试样设计	53
3.3 超声疲劳试验系统	68
第 4 章 转向架焊接构架用钢及焊接接头的超高周疲劳性能	73
4.1 P355NL1 钢及焊接接头的超高周疲劳性能	73
4.2 SMA490BW 钢及焊接接头的超高周疲劳性能	85
4.3 16Mn 钢及焊接接头的超高周疲劳性能	104

第 5 章	超声冲击对转向架焊接构架焊接接头超高周疲劳性能的影响	113
5.1	超声冲击对 P355NL1 钢焊接接头超高周疲劳性能的影响	114
5.2	超声冲击对 SMA490BW 钢焊接接头超高周疲劳性能的影响	122
5.3	超声冲击对 Q345 钢焊接十字接头超高周疲劳性能的影响	129
第 6 章	超声冲击提高焊接接头超高周疲劳性能的机理	134
6.1	超声冲击对焊接接头表面组织与硬度的影响	134
6.2	超声冲击对焊接接头表层残余应力的影响	155
6.3	超声冲击对焊接接头应力集中的影响	178
6.4	超声冲击对焊接接头疲劳裂纹萌生及扩展的影响	208
第 7 章	影响材料超高周疲劳性能的频率和环境因素探讨	238
7.1	频率因素对 P355NL1 钢超高周疲劳性能的影响	240
7.2	试样形状对超高周疲劳性能的影响	257
7.3	环境因素对 P355NL1 钢焊接接头超高周疲劳性能的影响	260



第 1 章

转向架焊接构架与常用钢材

1.1 转向架焊接构架

随着我国经济节奏的加快，铁路运输全面提速、重载战略的不断推进，列车运行安全备受关注，对运载工具可靠性的要求越来越高。与公路、航空等其他运输方式相比，铁路在提高运能和节能环保两方面均具有显著优势。因此，铁路在全世界得到了重新关注，各国相继掀起了大量投资发展铁路运输的新潮。为适应新形势下的运输要求，以继续保持铁路在运能、环保、节能、经济等诸多方面的优势，高速客运和重载货运成为重点发展方向，并已给各国带来了巨大的经济效益和社会效益。截至 2020 年 12 月 31 日，随着商合杭高铁合肥至湖州段、潍莱高铁、京雄城际铁路等一大批铁路开通，我国铁路发展又迈向一个新的高峰。2020 年，全国铁路新增运营里程超过 4 800 千米，其中新增高铁通车里程 2 520 千米，高速铁路运营里程达到 3.79 万千米，较 2015 年年底的 1.98 万千米翻了近一番，稳居世界第一。2021 年春节前，还有京哈高铁北京到承德段（192 千米）投入运营。此外，国铁集团计划 2021 年投产新线 3 700 千米左右，其中高铁 1 600 千米左右，预计到 2021 年年底，全国铁路营业里程达到 15 万千米左右，其中高铁 4 万千米左右。

1. 转向架的作用

在现代列车中,走行部一般采用转向架的形式。列车转向架必须要保证列车在运行时具有稳定性、平稳性以及良好的曲线通过性,从而使列车行驶安全、乘坐舒适、减小维修^[1]。转向架作为机车车辆的主要组成部分之一,其主要作用包括以下内容^[2]:

(1) 承受车架及其以上各部分的重量,包括车体、车架、动力装置以及辅助装置等。

(2) 保证必要的黏着,并把轮轨接触处产生的轮周牵引力传递给车架、车钩,牵引机车车辆前进。

(3) 缓和线路不平顺对机车车辆产生的冲击作用,保证机车车辆具有较好的运行平稳性和稳定性。

(4) 保证机车车辆顺利通过曲线。

(5) 产生必要的制动力,以便机车车辆在规定的制动距离内停车。

2. 转向架的组成

列车转向架如图 1-1 所示,主要由下列部件组成。

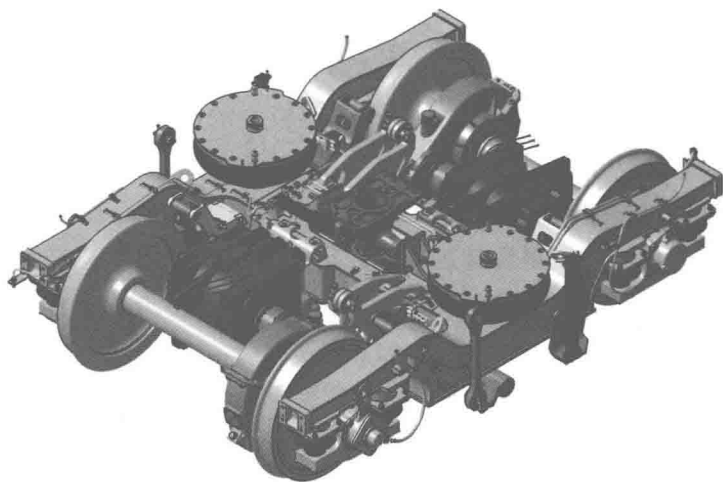


图 1-1 转向架结构示意图

(1) 转向架构架。它是转向架的骨架, 构架将转向架的各个部件组成一个整体, 并承受、传递各种力, 包括垂向力及水平力等。转向架构架包括侧梁、横梁 (或端梁) 以及与各种相关设备安装、悬挂的支座。

(2) 一系悬挂。一系悬挂即弹簧悬挂装置, 用来保证轴重分配, 同时可缓和线路不平顺导致的车辆冲击, 保证列车运行平稳。一系悬挂包括轴箱定位装置、垂直减震器等。

(3) 二系悬挂。二系悬挂即车体和转向架之间的连接装置。它用来传递车体与转向架间的垂向力及水平力 (包括纵向力, 如牵引力或制动力; 横向力, 如通过曲线时的车体未平衡离心力等), 使转向架在车辆通过曲线时能相对车体回转, 并进一步减缓转向架和车体之间的冲击振动, 同时保证转向架安定。在较高速度的车辆上, 车体与转向架之间还设置横动装置, 使车体在水平横向成为相对转向架的簧上质量, 以提高机车车辆在水平方向的运行平稳性。

(4) 轮对和轴箱。转向架的轮对直接向钢轨传递机车车辆的重量, 通过轮轨间的黏着产生牵引力和制动力, 并通过轮对本身的回转实现机车车辆在钢轨上的运行。轴箱联系转向架构架和轮对, 是一个活动的关节。轴箱除了保证轮对进行回转运动外, 同时还能使轮对适应不平顺的条件, 并相对转向架构架上下、左右和前后活动。

(5) 驱动机构。驱动装置为动力转向架所包含的部分, 它将动力装置的扭矩传递给轮对。驱动装置包括牵引电机、齿轮箱等^[3]。

(6) 基础制动装置。基础制动装置主要包括闸瓦 (或闸片)、制动盘等。由制动缸传来的力, 经杠杆系统增大若干倍后传递给闸瓦, 使其压紧车轮 (或闸片压紧制动盘), 对机车车辆进行制动。

3. 转向架焊接构架

转向架焊接构架是转向架最关键的零部件之一, 是转向架其他零部件的安装基础。电动车组动力转向架不但要支撑车体、电机及各种零部件, 而且需要传递车体与轮对之间的牵引力、制动力等各种横向、垂向和纵向力, 其可靠性直接影响动车的性能和安全性。随着运行速度的提高, 构架除了要有良好的疲劳强度外, 还需具有结构简单和质量轻等特

点。目前,除北美国家外,客车转向架构架基本上采用焊接构架的形式。侧梁一般采用箱形结构,其目的一方面可增加强度,另一方面可增加空气弹簧附加空气室的容积。欧洲国家横梁一般采用箱形结构形式,而日本则采用双无缝钢管的形式。采用双无缝钢管横梁的构架具有质量轻、易实现盘形制动等特点,近年来得到广泛应用^[4]。

转向架的焊接构架属典型的重载焊接结构,承担着车体重量和轨道振动带来的循环载荷作用,其抗疲劳性能直接影响到列车的运行安全。转向架焊接构架刚度大、焊缝数量多且分布复杂,其中主要承力焊缝大都为角焊缝,如构架侧梁立板与盖板之间的焊缝、横梁套管与侧梁立板之间的焊缝、定位座与侧梁盖板之间的焊缝等。焊接构架的主要制造过程为:由钢板、钢管来料经过机加工、焊接组装成横梁、侧梁等大部件,再通过焊接把横梁和侧梁组焊成焊接构架,焊接构架经过打磨、调修、整体热处理、表面处理形成构架总成,然后进入其他流程。通常,焊接会在接头附近区域产生较高的残余应力,而由于焊趾处的应力集中,其疲劳强度较低,这些地方成为转向架构架承载能力的薄弱环节^[5-6]。转向架焊接接头的疲劳性能直接影响转向架的寿命和车辆的行车安全^[7-9]。目前,因转向架结构疲劳引发的铁路运输重大事故时有发生。例如:提速客车 209HS 转向架的联系梁、吊杆、牵引座出现疲劳裂纹;提速客车 CW160 转向架的吊杆、构架和横向控制杆发现疲劳断裂;提速机车 558 转向架端梁发生断裂;“蓝箭”动车组牵引座、电机吊座发生疲劳破坏;提速货车转向架 Z8A(G)交叉杆系统发生疲劳破坏;国内研制的高速动车组“先锋号”(250 km/h)和“中华之星”(270 km/h),在试运行中也出现了抗蛇行减振器座开裂和裙板折断等焊接结构强度问题^[10]。某型号的转向架焊接构架侧梁外腹板上的节点座下方与下盖板相交的焊缝上,发现了一条长度大于 100 mm 的纵向裂纹,裂纹外观及位置如图 1-2 所示。因零部件突然失效而导致的重大行车事故或恶性事故中,以转向架零部件失效所占比例最大。在列检及修理重点抓的六项预防工作中,其中五项都是属于转向架的^[11]。

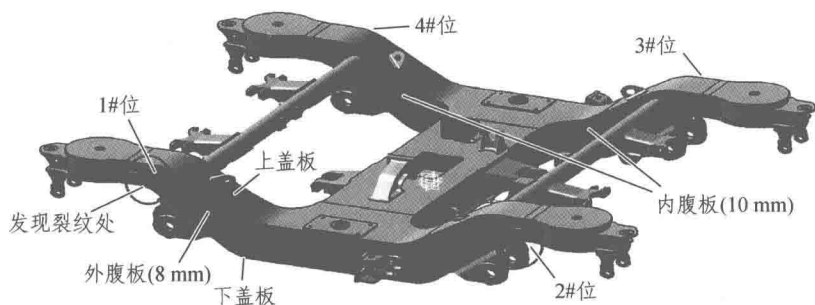


图 1-2 某型号转向架构架

1.2 转向架构架常用钢材

1.2.1 转向架构架常用钢材性能要求

制造高速列车转向架用的结构材料的选择是一个重要的课题，因为正确选择结构材料可以在制造转向架的金属用量最少的前提下保证转向架可靠和长时间运用。决定结构材料在车辆转向架构架结构中的应用效果的主要性能是强度、塑性、冲击韧性、切割和焊接工艺性、基本金属和焊接接头的耐腐蚀性等。

1. 耐腐蚀性能

转向架在我国铁路运行环境中要经受住大气侵蚀，因此构架材质还需要有抗腐蚀性能。在大气中的腐蚀锈蚀，是钢铁材料的主要破坏形式之一。世界上每年约有 1/10 年产量的钢材因腐蚀而损耗。为防止锈蚀所采取的诸如打磨、涂装等措施所需要的费用更是占到工程投资总费用的相当比例。因此，防止或减缓钢铁材料在大气中腐蚀是提高钢铁材料使用寿命的重要方法。

2. 低温韧性

我国南北地域的温度差异很大，在西北和东北的很多地区冬季的最低温度可达 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，因此构架材质还需要有耐低温的性能。由于转向架

焊接构架是复杂动负荷的主要承载构件,该动负荷又随速度的提高而明显增强。所以要求该焊接构架有足够的强度和抗疲劳性能,以便减轻自重,实现低动力作用和确保运行安全可靠。

3. 可焊性

可焊性指钢材焊接时形成裂纹和在焊缝区产生脆性的程度。它主要取决于钢材的化学成分,另外还与焊件结构的形状、刚度及焊接材料和工艺规范有关。一般来说,当碳钢含碳量小于 0.25%、合金钢含碳量小于 0.18%或碳当量(CE)小于 0.45%时,其可焊性属于良好。

1.2.2 转向架构架常用钢材现状

目前,我国的一般转向架用钢主要有 Q345、16Mn 等。首先, Q345 系列钢板作为力学性能和焊接性能较为稳定的钢种,在桥梁和机车车辆上已经使用了十几年,并且在其他行业中得到了广泛应用。但随着对钢结构力学性能要求的不断提高,对钢的焊接性能的要求也不断提高。在铁路机车车辆制造方面,随着重载、提速、高速列车的迅猛发展,要求焊接转向架不仅质量轻,而且整体结构的抗疲劳性进一步提高,这就要求钢不仅具有一定的强度,而且应具有较高的韧性,焊接后焊缝和钢的热影响区还要有一定的耐冲击强度。

Q345 与 SMA490BW、P355NL1 的抗拉强度、屈服强度及延伸率相差不大,但冲击韧性却存在一定的差距,特别是低温下的冲击韧性。因此,目前我国高速动车组转向架构架大都采用 SMA490BW 和 P355NL1 制造。

参考文献

- [1] 王伯铭. 高速动车组总体及转向架[M]. 2 版. 成都: 西南交通大学出版社, 2014.
- [2] 王学明, 金晶, 宋年武, 等. 机车转向架技术[M]. 成都: 西南交通

大学出版社, 2009.

- [3] ZHANG M, NIE H, ZHU R P. Design and Dynamics Analysis of Anti-skid Braking System for Aircraft with Four-wheel Bogie Landing Gear[J]. Chinese Journal of Construction Machinery, 2011, 24 (2): 277-284.
- [4] 王盛楠. CRH5 动车组转向架构架及摇枕的强度分析与设计规范的比较[D]. 北京: 北京交通大学, 2007.
- [5] 何柏林, 魏康. 转向架用 SMA490BW 钢对接接头应力集中系数有限元分析[J]. 表面技术, 2015, 44 (10): 74-78.
- [6] HE B L, WEI K, YU Y X, et al. Fatigue Life Analysis of Ultrasonic fatigue Welded Butt Joint for Train Bogie Based on ABAQUS/FE-SAFE[J]. China Welding, 2016, 25 (4): 1-7.
- [7] KIM J S. Fatigue assessment of tilting bogie frame for Korean tilting train: Analysis and tests[J]. Engineering Failure Analysis, 2006, 13 (8): 1326-1337.
- [8] BAEK S H, CHO S S, JOO W S. Fatigue life prediction based on the rainflow cycle counting method for the end beam of a freight car bogie[J]. International Journal of Automotive Technology, 2008, 9 (1): 95-101.
- [9] WU H C, WU P B. Bogie Frame Fatigue Simulation Based on Flexible Multibody Dynamics[J]. International Conference on Transportation Engineering, Chengdu, 2009:1831-1837.
- [10] ZHANG W H, Wu P B, Wu X J, et al. An investigation into structural failures of Chinese high-speed trains[J]. Engineering Failure Analysis, 2006, 13 (1): 427-441.
- [11] 严隽毫. 车辆工程[M]. 2 版. 北京: 中国铁道出版社, 2003.



第 2 章

超高周疲劳

2.1 疲劳概述

2.1.1 疲劳断裂及其特点

疲劳是固体力学的一个分支，它主要研究材料或结构在交变载荷作用下的强度问题，研究材料或结构的应力状态与寿命的关系。疲劳是由应力不断变化引起的材料逐渐破坏的现象。当材料或结构受到多次重复变化的载荷作用后，应力值虽然始终没有超过材料的强度极限，甚至比弹性极限还低的情况下就可能发生破坏，这种在交变载荷重复作用下材料或结构的破坏现象就叫疲劳破坏。美国材料试验协会将疲劳定义为“材料某一点或某一些点在承受交变应力和应变条件下，使材料产生局部永久性逐步发展的结构性变化过程。在足够多的交变次数后，它可能造成裂纹的积累或材料完全断裂”。文献[1]给出定义为“材料在变动载荷作用下，会产生微观的和宏观的塑性变形，这种塑性变形会降低材料的继续承载能力并引起裂纹，随着裂纹逐步扩展，最后将导致断裂，这一过程称为疲劳”。简单说，疲劳是裂纹的萌生、扩展与最终断裂的过程。

疲劳破坏与传统的静载破坏有着许多不同点：① 静力破坏是在最大载荷作用下的一次破坏；疲劳破坏是在多次反复载荷作用下产生的破坏，它不是短期内发生的，而是要经历一定的时间，甚至很长时间才能发生

的破坏,即具有寿命的断裂破坏。②当静应力小于屈服极限或强度极限时,不会发生静力破坏;而交变应力在远小于静强度极限,甚至小于屈服极限的情况下,疲劳破坏也可能发生。③静力破坏通常有明显的塑性变形产生;而疲劳破坏通常没有宏观的显著塑性变形迹象,哪怕是塑性良好的金属也如此,就像脆性材料破坏一样,事先不易被觉察出来,这就表明疲劳破坏具有更大的危险性。尽管疲劳是脆性断裂,但疲劳断裂形式与脆性断裂形式有明显差别。疲劳与脆性断裂相比较,虽然二者断裂时的形变都很小,但疲劳需要多次加载,而脆性断裂一般不需多次加载,结构脆断是瞬时完成的,而疲劳裂纹的扩展则是缓慢的,有时需要长达数十年时间,它是在长期累积损伤过程中,经裂纹萌生和缓慢亚稳扩展到临界尺寸 a_c 时才突然发生的。因此,疲劳是一种潜在的突发性断裂^[2]。④在静力破坏的断口上,通常只呈现粗粒状或纤维状特征;而在疲劳破坏的断口上,总是呈现两个区域特征,一部分是平滑的,另一部分是粗粒状或纤维状。⑤静力破坏的抗力主要取决于材料本身;而疲劳破坏的抗力与材料的组成、构件的形状或尺寸、表面状况、使用条件以及外界环境都有关系^[3]。⑥疲劳对缺陷(缺口、裂纹及组织缺陷)十分敏感。由于疲劳破坏是从局部开始的,所以它对缺陷具有高度的选择性。缺口和裂纹因应力集中增大对材料的损伤作用;组织缺陷(夹杂、疏松、白点、脱碳等)降低了材料的局部强度,三者都加快疲劳破坏的开始和发展。

众所周知,疲劳断裂是金属结构失效的一种主要形式。工程结构中约80%以上的失效破坏是由疲劳断裂引起的。大量统计资料表明,在某些工业部门,由于疲劳而失效的金属结构,约占失效结构的90%。引起疲劳失效的循环载荷的峰值往往远小于根据静态断裂分析估算出来的“安全”载荷,因此开展结构疲劳研究有着重要的意义。

2.1.2 变动载荷和循环应力

变动载荷是指载荷大小和/或方向随时间按一定规律呈周期性变化或无规则随机变化的载荷,前者称为周期变动载荷或循环载荷,后者称为随机变动载荷。变动载荷在单位面积上的平均值为变动应力。变动应

力可分为规则周期变动应力（也称循环应力）和无规则随机变动应力两种^[4]。这些应力可以用应力-时间曲线表示，如图 2-1 所示。

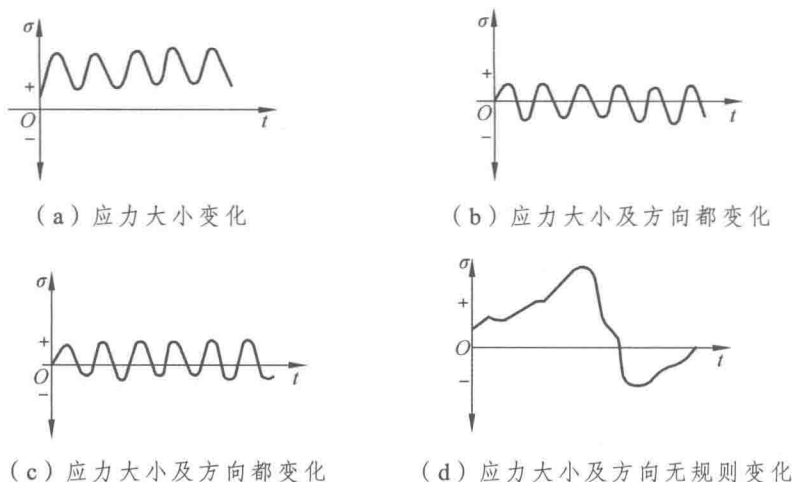


图 2-1 变动应力示意图

实际机器部件承受的载荷一般多属后者，但就工程材料的疲劳特性分析和评定而言，为简化讨论，主要还是针对循环载荷（应力）而言的。

通常循环应力的波形有正弦波、矩形波和三角波等，其中正弦波较为常见。正弦波的特征参数如图 2-2 所示。

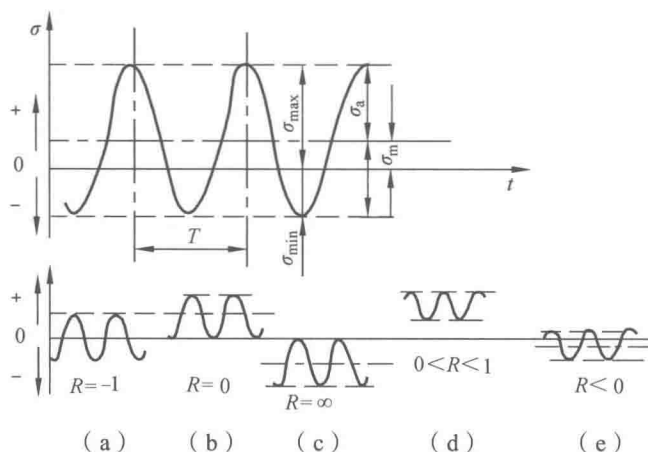


图 2-2 循环应力特征

循环应力的特征主要由以下参数表示：

- (1) 最大应力 $\sigma_{\max}$ 和最小应力 $\sigma_{\min}$ ，即循环应力中的最大值和最小值；
- (2) 应力振幅 $\Delta\sigma = \sigma_{\max} - \sigma_{\min}$ 或应力半幅 $\sigma_a = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2}$ ，即应力最大值与最小值之差或差值的一半；
- (3) 平均应力 $\sigma_m = \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2}$ ，即最大应力与最小应力之和的一半；
- (4) 应力比 $R = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}}$ ，或 $r = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}}$ ，也称为交变应力的循环特性，其变化范围为 $-\infty \sim +1$ ；
- (5) 加载频率 f ，单位符号为 Hz。

此外，还有加载波形，如正弦波、三角波以及其他波形等。

很容易看出， $\sigma_{\max} = \sigma_m + \sigma_a$ 和 $\sigma_{\min} = \sigma_m - \sigma_a$ 。因此，可以把任何变动载荷看作是某个不变的平均应力（静载恒定应力部分）和应力振幅（变动应力部分）的组合。

循环应力按照图 2-2 可分为下列几种典型情况：

(1) 对称循环， $\sigma_m = 0$ ， $R = -1$ ，如图 2-2 (a) 所示。大多数轴类零件，通常受到交变对称循环应力的作用；这种应力可能是弯曲应力、扭转应力或者是两者的复合。其疲劳极限用 σ_{-1} 表示。

(2) 不对称循环， $R \neq -1$ ，如图 2-2 (b)、(c)、(d)、(e) 所示。有时还把循环中既出现正（拉）又出现负（压）应力的循环称之为交变应力循环，如图 2-2 (a)、(e) 所示。其疲劳极限用 σ_r 表示，下标 r 用相应的特性系数表示，如 $\sigma_{0.1}$ 。

(3) 脉动循环， $\sigma_m = \sigma_a$ ， $R = 0$ ，如图 2-2 (b) 所示。齿轮的齿根和某些压力容器受到这种脉动循环应力的作用，其疲劳极限用 σ_0 表示。

(4) 波动循环， $\sigma_m > \sigma_a$ ， $0 < R < 1$ ，如图 2-2 (d) 所示。飞机机翼下翼面、钢梁的下翼缘、气缸盖螺钉以及预紧螺栓等，均承受这种循环应力的作用。

(5) 脉动压缩循环 ($R = \infty$)、大压小拉循环 ($R < 0$) 等，如图 2-2 (c)、(e) 所示。滚珠轴承受受到脉动压缩循环应力，内燃机连杆受到大压小拉循环（不对称交变）应力的作用。