

第 1 章

转向架焊接构架与超声冲击方法

1.1 转向架焊接构架简介

随着我国经济发展速度的加快，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，各国相继掀起了投资发展铁路运输的新潮。为适应新形势下的运输要求，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和社会效益。截至 2019 年 12 月 1 日，我国中原地区三条高铁集中开通，分别是京港高铁商丘至合肥段、郑州至阜阳高铁（郑阜高铁）、郑州至重庆高铁郑州至襄阳段（郑渝高铁郑襄段）。到 2019 年年底，我国铁路营业里程达到 13.9 万千米，其中高铁 3.5 万千米，居世界第一。2019 年我国高铁通车里程达到 3 800 千米，2020 年通车里程有望达 3 100 千米。2019 年与 2016—2018 年平均每年 2 000 ~ 3 000 千米的通车里程相比有较明显的上升。

在现代列车中，走行部一般采用转向架的形式。列车的转向架必须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，其主要任务包括以下内容^[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) 保证必要的粘着, 并把轮轨接触处产生的轮周牵引力传递给车架、车钩, 牵引列车车辆前进。

(3) 缓和线路不平顺对机车车辆产生的冲击作用和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。

列车转向架结构如图 1-1 所示, 主要由下列部分组成:

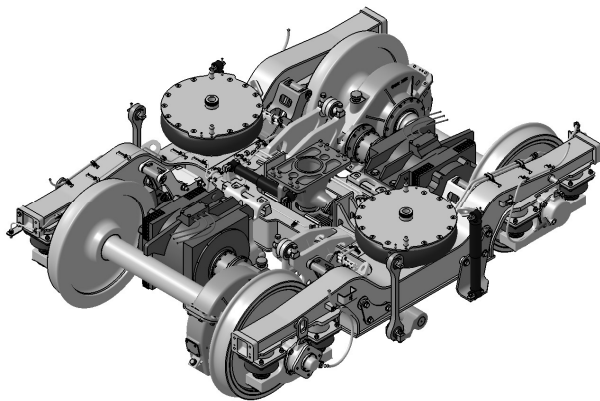


图 1-1 转向架结构示意图

(1) 转向架构架: 即转向架的骨架, 构架将转向架的各个部件组成了一个整体, 并承受、传递各种力, 包括垂向力及水平力等。它包括侧梁、横梁(或端梁)和各种相关设备安装、悬挂的支座。

(2) 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。它包括轴箱定位装置、垂直减振器等。

(3) 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不平衡离心力等), 使转向架在车辆通过曲线时能相对于车体回转, 并进一步减缓转向架和车体之间的冲击振动, 同时, 保

证转向架安全稳定。在较高速度的车辆上,车体与转向架之间还设有横动装置,使车体在水平横向成为相对于转向架的簧上重量,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,通过轮轨间的粘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,相对于转向架构架上、下、左、右和前后活动。

(5) 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,包括牵引电机、齿轮箱等^[3]。

(6) 基础制动装置:主要包括闸瓦、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(或刹车片压紧制动盘),对机车车辆进行制动。

转向架焊接构架是转向架最关键的零部件之一,是转向架其他多个零部件的安装基础,电动车组动力转向架不但要支撑车体、电机以及各种零部件,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重量轻等特点。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模式。侧梁一般采用箱形结构,其目的方面可增加强度,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模式,而日本则采用双无缝钢管的方式。采用双无缝钢管横梁的构架具有重量轻、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行驶安全。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。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,是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 转向架端梁发生疲劳断裂;“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群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,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 5 项都是属于转向架的^[11]。

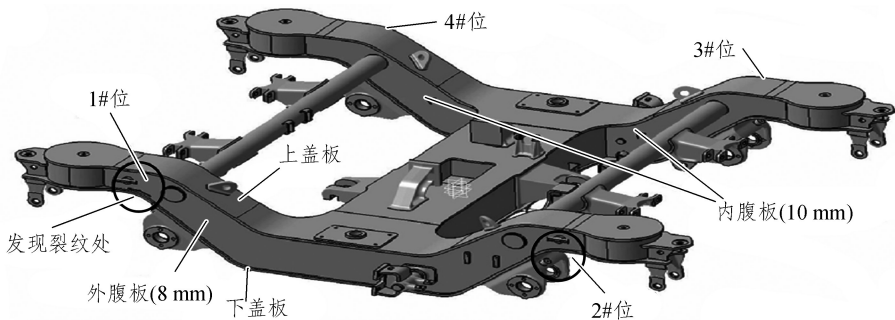


图 1-2 某型号转向架构架

1.2 超声冲击设备的工作原理

超声冲击处理 (Ultrasonic Impact Treatment, UIT) 作为一项新技术,其主要思想是将电能转变成为高频率的机械振动,通过直接(间接)作用使金属表面产生剧烈的塑性变形,由于是高频反复冲击,材料应变率极大,可使金属表面晶粒组织得到细化^[12-16]。

超声冲击设备由两部分组成:电源控制装置和冲击处理实施装置;

即电源控制箱和超声冲击枪（分别见图 1-3 和图 1-4），二者用电缆连接。



图 1-3 超声冲击电源控制箱



图 1-4 超声冲击枪及冲击针

超声冲击设备的控制部分采用新型高精度锁相和先进的恒幅技术，使设备在使用过程中始终保持输出的稳定性和可靠性，保证处理效果的高效和均匀一致性。控制箱将电网上的 50 Hz 交流电转变成超音频的交流电，超声冲击设备的系统结构如图 1-5 所示^[17]。

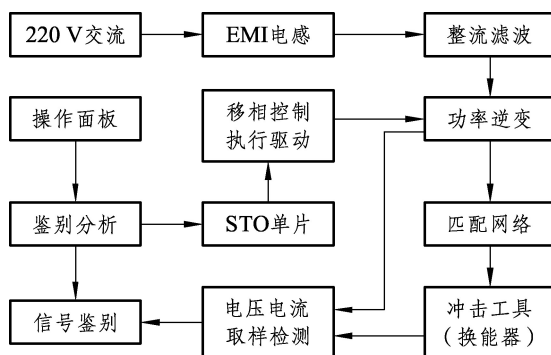


图 1-5 超声冲击设备的系统结构示意图

首先经 EMI 电感去除交流电压中的高次谐波，通过电容滤波、二极管整流将其变成直流电压，再用功率逆变转化直流电压为正负交变的矩形波电压，频率与换能器谐振同步，该电压经由高频功率变压器导入匹配网络后会激励串联谐振回路（超声换能器串联谐振电感）使得该电压振动信号转换为能够进行机械加工的机械振动信号。传感器输出端作用于冲击针使其振动，振幅范围为 20 ~ 40 μm 。较高的频率使得冲击针对工件焊趾部位产生一个强烈的冲击作用，在将机械振动导入工件的同时，这个冲击作用带来的能量足够使工件以焊趾为中心的区域产生剧烈塑性变形。当

冲击针头作用在工件表面时，冲击针头附近所产生的塑性流动将会挤压材料表面从而将表面原有的微观波峰、波谷挤压平整，即波峰会被填充至波谷的位置。正是由于经超声冲击处理之后材料表面处的波峰均被填充至波谷处，才能大幅度的降低材料表面粗糙度。如果选用适宜的工艺参数，工件的表面粗糙度甚至可降至纳米量级（小于 100 nm），从而使得金属表面的综合性能指标得到极大提高。为方便实际应用，即增大输出振动幅值，变幅杆及一些附属设备常常被安装在冲击针和传感器输出端之间。超声冲击处理方法可以分为自动冲击（见图 1-6）^[18]和手动冲击（见图 1-7）^[19]。

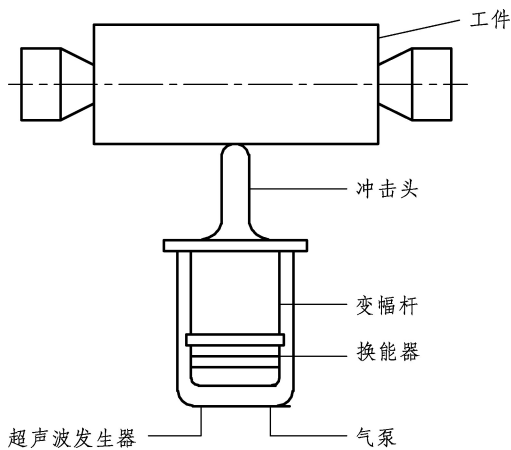
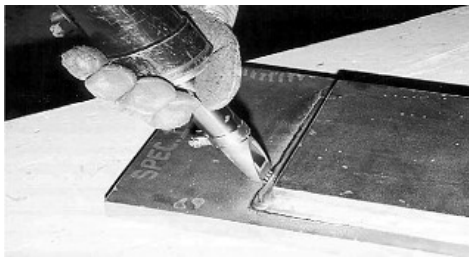


图 1-6 自动超声冲击处理方法的工作原理示意图



(a) 多针冲击



(b) 单针冲击

图 1-7 手动超声冲击处理

根据不同的焊接接头形状和焊缝位置，可以设计出不同尺寸和形状的超声冲击头，根据目前国内外相关的研究结果，超声冲击多采用头部为半圆形的圆柱型冲击头形状，圆柱直径在 1.5 ~ 4.5 mm 具有最佳的冲

击效果。冲击头太细时，虽然容易控制焊接接头的焊缝以及焊趾区域冲击形状，但由于冲击头是采用 W18Cr4V 高速钢制造的，容易引起冲击头断裂，浪费很严重；冲击头太粗时，则不容易控制焊缝的形状^[20-22]。

自动冲击是将冲击装置固定在某个执行机构上（例如机床的刀架上），按照输入的设定轨迹进行冲击处理，其特点是冲击处理均匀，效率高，主要用来冲击处理圆柱外表面或空心圆柱内表面^[23-26]。也可以将冲击装置固定在机器人上，冲击长而直的规则焊缝。手动冲击处理主要用来处理材料的表面（主要是平面），或焊缝形状不太规则或用其他方法难于达到或实现的场合，其特点是冲击位置随心所欲。为了获得较好的处理效果，可对焊缝进行多次冲击处理。在冲击处理中要掌握处理速度，一般结构件控制在 200 ~ 500 mm/min 的速度较好，对有特殊要求的和焊缝不规则的可适当放慢，这样有助于获得良好的处理效果。

HJ-III型超声冲击设备采用高效 DSP 芯片为控制核心的数字电路结构，DSP 可实现频率跟踪与恒流的调节。该超声冲击设备主要由功率冲击机构和超声发生器构成。外壳内的换能器与超声功率发生器通过电缆相连接，变幅杆与换能器的振动输出端部相连接，冲击针在变幅杆的顶部。变幅杆主要起放大换能器的输出振幅和传递具有高能量的机械振动给冲击针上，再作用于金属表面两方面的作用。此装置具有重量轻、可控性好、功率高、方便携带、成本低廉等优点。图 1-8 所示为超声发生器的原理图，图 1-9 所示为超声冲击设备振动系统示意图。其中，振动系统的子单元为针状冲击头、变幅杆、压电换能器。HJ-III型超声冲击设备主要参数如表 1-1 所示。

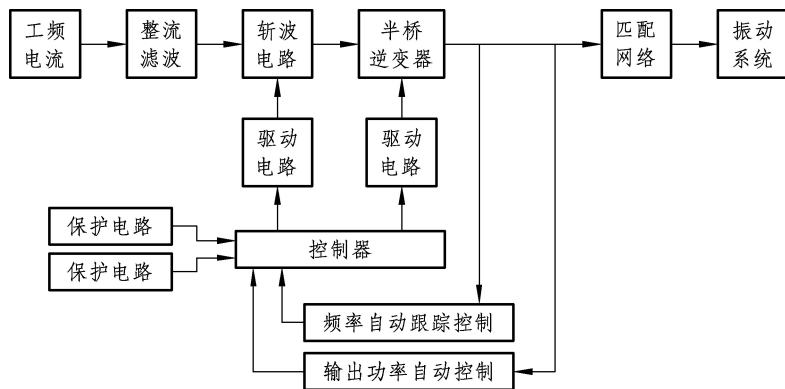


图 1-8 超声发生器的原理图

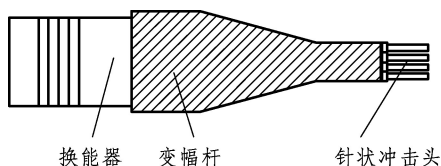


图 1-9 超声冲击设备振动系统示意图

表 1-1 HJ-III型超声冲击系统参数表

名称	参数描述	名称	参数描述
控制电源尺寸	390 mm×235 mm×282 mm	额定功率	600 W
冲击枪尺寸	f 83×325 mm	施力幅度	0~90 N
额定电流	0~4 A	处理速度	6~25 mm/s
工作频率	(17.5±2.0) kHz	冷却方式	风冷或压缩空气冷
最大振幅	50 μm	工作温度	0~35 °C

1.3 超声冲击法及其特点

超声冲击法作为一项突破性的新技术，具有操作简便、效率高、成本低廉等优点，目前已受到国际焊接学会的高度重视，美国、德国、俄罗斯、日本等国家已对该技术进行了深入研究并投入应用。近年来，国内一些科研单位和企业也陆续开始关注这项技术，研究和开发了多种型号的超声冲击处理设备，并就超声冲击处理在实际焊接结构生产和服役中的应用进行了多方位的探索。

超声冲击可对焊后的残余应力分布有一定改善，其机理类似锤击法^[27-29]。超声冲击对工件表面进行处理的过程中，变幅杆前端周期性的撞击会将撞击能量导入被加工的表面，使表面产生剧烈的压缩塑性变形，被加工区域内的残余拉应力减小消失甚至转变成残余压缩应力，相邻区域内残余拉应力也会产生变化，继而改善表面残余应力的分布情况。同时，所产生的塑性变形层又有两种变化：在宏观方面，金属表层在经过了超声

冲击处理之后引入了很高的残余压应力，从而阻止了材料表面裂纹的形核及扩展；在微观组织方面，位错密度明显增加，亚晶粒得到了大幅度的细化，晶格畸变的程度也显著增加，从而提高了材料的拉伸性能^[30]、疲劳性能^[31-34]、耐磨损性能^[35-39]和耐腐蚀性能^[40-44]。

概括起来，超声冲击法有以下几个优点：第一，有效地改善了母材与焊缝之间过渡区域几何形状，增大焊趾处的过渡半径，降低其应力集中系数；第二，调整焊接残余应力场的分布，在应力集中处产生有利于延长接头疲劳寿命的压应力，进而提高材料的疲劳性能；第三，细化了金属材料的表层晶粒，使得材料表层的硬度和强度得到提高；第四，有效地抑制了疲劳裂纹在气孔和夹渣等焊接缺陷的萌生和扩展，使得焊缝附近区域的疲劳强度接近母材。同时，超声冲击设备由于效率高（每分钟最高可以处理半米焊缝）、噪声小、节能、无污染、执行机构轻巧（只有几千克）、使用灵活、方便，应用时不受工件形状、场地、环境的限制，超声冲击法可以应用于焊接现场，处理效果显著。

1.4 超声冲击法的发展现状

1.4.1 超声冲击法国外的发展现状

超声冲击法在国外的发展与应用主要经历了以下几个阶段^[45-47]：

（1）1972年，著名的乌克兰 Paton 焊接技术研究所提出了超声冲击这一概念，随后，在俄罗斯 Quantum 研究院的参与和共同开发下，在此项技术的基础之上成功地研制出了超声冲击处理设备，首次在核潜艇体焊接结构的处理中应用了超声冲击法。

（2）超声冲击法在早期主要是被用来消除焊后残余应力，到了20世纪80年代，开始慢慢的有研究人员用超声冲击法来改善焊接接头的疲劳性能。1996年，IIW年会报道了西伯利亚的金属结构厂已经成功地将超声冲击方法应用于提高焊接接头的疲劳强度方面，效果十分不错。1999年，美国的 John W Fisher 教授（Lehigh 大学）与美国联邦高速路管理局

(FHWA)合作,用超声冲击法对 Atlanta 市和 Virginia 地区的公路、桥梁等进行了多次处理,结果发现表面超声冲击法在提高焊接接头疲劳强度方面具有较高的优越性。

(3) 2000 年,超声冲击法被美国国家焊接学会列入《焊接行业发展战略技术指南》,并对该项技术的研发注入了大量资金,确保未来 20 年内美国在焊接行业的国家竞争力优势。

(4) 2001 年,美国国家标准技术学会通过中子源扫描技术得到了经过超声冲击处理前后试样的三维应力分布扫描图谱,为从微观角度解释超声冲击法如何提高材料疲劳强度的机理提供了有力证据。

1.4.2 国内超声冲击法的发展历程

我国引入超声冲击法相对较晚,但引入后其发展速度却非常迅猛,应用范围也在日益扩大着。超声冲击法在国内的发展与应用主要经历如下:

(1) 1998 年,在我国著名的焊接结构专家霍立兴教授的指导下,天津大学的王东坡博士率先攻克了冲击头、换能器以及主电路的研究设计工作,成功研制了国内首台基于压电技术的超声冲击装置。

(2) 2000 年,我国第一代基于频率锁相跟踪技术的超声冲击装置 HJ-I 型诞生,同时,也是世界上首台基于压电式换能器的超声冲击装置,从而开创了世界超声冲击领域的磁致伸缩式和压电晶体式竞相发展的新局面。

(3) 2003 年,功率输出稳定性等问题在研究人员的不懈努力之下得以解决,第二代超声冲击装置 HJ-II 型也随即问世。从电路部分分析,第二代进一步完善了频率跟踪系统,即超声冲击设备的控制核心部件之一。同时,在连续工作 5 h 以上的条件下,HJ-II 型超声冲击装置的整个系统仍处于非常良好的状态。

(4) 2007 年,第三代超声冲击装置 HJ-III 型完成。在保证机器抗强干扰性和频率稳定性的前提下,第三代机型具有更加宽广的频率跟踪范围,同时,全数字化控制系统也使得机器的各种参数设定和控制更加的

科学方便, 输出功率以及电源的工作效率显著提高。

(5) 2007年, 宣邦金属新材料科技有限公司在上海成立, 天津大学的王东坡教授担任超声冲击设备方面的顾问, 从此, 超声冲击设备在我国市场化条件下的推广与运营中迈出了关键性一步, 这对超声冲击方法在国内的发展与应用具有重要的现实意义。

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, 金学松. 机车转向架技术[M]. 成都: 西南交通大学出版社, 2009.
- [3] Zhang Ming, Nie Hong, Zhu Rupeng. Design and Dynamics Analysis of Anti-skid Bracking 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] Bolin He, Kang Wei, Yingxia Yu, Zhisen Zhang. 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] Jung-Seok Kim. Fatigue assessment of tilting bogie frame for Korean tilting train: Analysis and tests[J]. Engineering Failure Analysis, 2006, 13(8): 1326-1337.
- [8] S.H. BAEK, S.S. CHO and W.S. JOO. 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, Vol. 9, No.1, 95-101.

- [9] Huichao Wu, Pingbo Wu. Bogie Frame Fatigue Simulation Based on Flexible Multibody Dynamics[J]. International Conference on Transportation Engineering, Chengdu, 2009, 1831-1837.
- [10] Weihua Zhang, Pingbo Wu, Xuejie Wu, et al. An investigation into structural failures of Chinese high-speed trains[J]. Engineering Failure Analysis, 2006, 13(1): 427-441.
- [11] 严隽堯. 车辆工程[M]. 2 版. 北京: 中国铁道出版社, 2003.
- [12] Lu K, Lu J. Surface nanocrystallization of metallic materials-presentation of the concept behind a new approach[J]. Mater Sci Technical, 1999; (15): 193-97.
- [13] Mordyuk B N, Prokopenko G I. Fatigue life improvement of α -titanium by novel ultrasonically assisted technique[J]. Materials Science and Engineering, 2006, 437(2): 396-4053.
- [14] Mordyuk B N, Prokopenko G I. Ultrasonic impact peening for the surface properties materials[J]. Journal of Sound and Vibration, 2007, 308(3): 855-8664.
- [15] Yatsenko V K, Stebel'kov I A. Surface strain-hardening of the blades of gas-turbine engines in an ultrasonic field[J]. Problemy Prochnosti, 1985, (8): 68-715.
- [16] Sekkal A C, Langlade C, Vannes A B. Tribologically transformed structure of titanium alloy (TiAl6V4) in surface fatigue induced by repeated impacts[J]. Materials Science and Engineering, 2005; 393(1): 140-146.
- [17] 杜伟卓, 杜随更, 汪志斌, 等. 超声冲击设备及晶粒细化试验研究[J]. 科学技术与工程, 2010, 10 (11): 2736-2740.
- [18] 何柏林, 余皇皇. 超声冲击表面纳米化研究的发展[J]. 热加工工艺, 2010, 39 (18): 112-115.
- [19] Xiaohua Cheng, John W. Fisher, Henry J. Prask, Thomas Gnaupel-Herold, Ben T. Yen, Sougata Roy. Residual stress modification by post-weld treatment and its beneficial effect on fatigue strength of welded

- structures[J]. *International Journal of Fatigue* 25 (2003) 1259-1269.
- [20] 周尚瑜. 超声冲击改善 16MnR 焊接接头疲劳寿命的原因细分研究[D]. 南昌: 华东交通大学, 2010.
- [21] Bolin He, Yingxia Yu, Jing Liu, Xiaodong Zhang, Jianping Shi. Research about the Effect of Ultrasonic Impact on the Fatigue Property of Cruciform Joint of 16MnR Steel [J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2012, Vol.41(S1): 283-286.
- [22] Bolin He, Bin Wang. Development and Application of 16MnR Materials Database of Pressure Vessel in Software DEFORM-3D [J]. *Applied Mechanics and Materials* Vol. 189 (2012): 465-469.
- [23] Ting Wang, Dongpo Wang, Gang Liu, Baoming Gong, Ningxia Song. Investigations on the nanocrystallization of 40Cr using ultrasonic surface rolling processing[J]. *Applied Surface Science*, 255 (2008) 1824-1829.
- [24] 丁江灏. 超声表面滚压加工对 45#钢表层晶粒细化机理及疲劳性能影响的研究[D]. 南昌: 华东交通大学, 2019.
- [25] 何柏林, 丁江灏. 超声表面滚压加工技术对 45#钢表面及疲劳性能的影响[J]. *组合机床与自动化加工技术*, 2019, (8): 133-135.
- [26] Bolin He, Jianghao Ding. Effect of Ultrasonic Surface Rolling Processing on the Surface Properties of 45 Steel[C]. ISMR 2018, September 25-28, 2018, Irkutsk, Russia, Proceedings of the 6th International Symposium on Innovation and Sustainability of Modern Railway, p.546-550.
- [27] Bertini L V, Straffelini G. Influence of post weld treatments on the fatigue behaviour of Al alloy welded joints[J]. *International Journal of Fatigue*, 1998, 20 (10): 749-755.
- [28] 王东坡, 霍立兴, 荆洪阳, 等. 提高焊接接头疲劳强度的超声冲击法与 TIG 熔修法之比较[J]. *机械强度*, 2001, 23 (2): 202-205.
- [29] Bolin He, Yingxia Yu, Jing Liu. Research and Prospects of Improving the Fatigue Life of Welded Train Bogie Structure[J]. *Advanced Materials Research* Vols. 189-193 (2011) pp 3292-3295.

- [30] 孙佳, 倪宝成, 何柏林. 超声波冲击法对转向架用 P355NL1 钢对接接头性能的影响[J]. 焊接技术, 2017, 46 (8): 29-31.
- [31] Yingxia Yu, Bolin He, Huanghuang Yu, and Jianping Shi. Research about the Effect of Ultrasonic Impact on the Fatigue Life of Butt Weld Joint of 16MnR Steel[J]. Advanced Materials Research Vols. 189-193 (2011) pp 3296-3299.
- [32] Bolin He, Liu Jing, Wang Bin. Study on the Methods of the Surface Self-nanocrystalline Technology and its Effect on the Materials Properties[J]. Applied Mechanics and Materials Vols. 80-81 (2011) pp 673-677.
- [33] Bolin He, Shangyu Zhou. Study on The Status and Development Trend of Fatigue Properties for Welded Joints of Mg-alloy[C]. The Third International Symposium on Innovation and Sustainability of Modern Railway, Nabchang, China, September 20-21,2012, p.614-617.
- [34] Yingxia Yu, Bolin He, Jianping Shi, Jing Liu. The Effect of Residual Stress on Fatigue Life of Welded Cruciform Joints of 16MnR for Train Bogie[J]. Advanced Materials Research Vol. 815 (2013) pp 695-699.
- [35] A. Amanov, I.S. Cho, Y.S. Pyouna, C.S. Leeb, I.G. Park. Micro-dimpled surface by ultrasonic nanocrystal surface modification and its tribological effects[J]. Wear, 286-287 (2012) 136-144.
- [36] 李晓刚, 王胜, 龚宝明, 邓彩艳, 王东坡. 超声冲击复合电火花熔凝处理改善 DH36 表面性能[J]. 焊接学报, 2018, 39 (3): 99-102.
- [37] Tripathi K, Guawali G, Amaniv A, et al. Synergy effect of ultrasonic nanocrystalline surface modification and laser surface texturing on friction and wear behavior of graphite cast iron[J]. Tribology transactions, 2017, 60(2): 226-237.
- [38] Liang Li, Miru Kim, Seungjun Lee, Munki Bae, Deugwoo Lee. Influence of multiple ultrasonic impact treatments on surface roughness and wear performance of SUS301 steel[J]. Surface & Coatings Technology, 2016, 307: 517-524.

- [39] 何柏林, 史建平, 颜亮, 陈朝霞. 超声冲击对钢轨钢组织与性能的影响[J]. 中国铁道科学, 2009, 30(4): 58-62.
- [40] B. N. Mordyuk, O. P. Karasevskaya, G. I. Prokopenko. Structurally induced enhancement in corrosion resistance of Zr-2.5%Nb alloy in saline solution by applying ultrasonic impact peening[J]. Materials Science & Engineering A, 2013, 559: 453-461.
- [41] M. Daavari, S.A. Sadough Vanini. Corrosion fatigue enhancement of welded steel pipes by ultrasonic impact treatment[J]. Materials Letters, 2014, 139: 462-466.
- [42] Yu.N, PetrovaG.I, ProkopenkoaB.N, MordyukaM.A, VasylyevaS.M, VoloshkobV.S, SkorodzievskiaV, S.Filatovaa. Influence of microstructural modifications induced by ultrasonic impact treatment on hardening and corrosion behavior of wrought Co-Cr-Mo biomedical alloy[J]. Materials science & engineering. C, Materials for biological applications, 2016, 58: 1024-35.
- [43] N. I. Khripta, O. P. Karasevska, B. N. Mordyuk. Surface Layers of Zr-18% Nb Alloy Modified by Ultrasonic Impact Treatment: Microstructure, Hardness and Corrosion[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2017, Vol.26 (11), pp.5446-5455.
- [44] Fereidooni B, Morovvati MR, Sadough-Vanini SA. Influence of severe plastic deformation on fatigue life applied by ultrasonic peening in welded pipe 316 Stainless Steel joints in corrosive environment[J]. Ultrasonics. 2018, 88: 137-147.
- [45] 中国科学院金属研究所. 金属材料表面纳米化[J]. 现代焊接, 2004, 30(6): 30-32.
- [46] 温爱玲, 陈春焕, 郑德有, 等. 高能喷丸表面纳米化对工业纯钛组织性能的影响[J]. 表面技术, 2003, 20(3): 16-18.
- [47] 张淑兰, 陈怀宁, 林泉洪, 等. 工业纯钛的表面纳米化及其机制[J]. 有色金属, 2003, 30(4): 5-8.

016 | 列车转向架构架焊接接头表面超声冲击强化及
疲劳性能改善技术

017 | 列车转向架构架焊接接头表面超声冲击强化及
疲劳性能改善技术