DOI: 10.3901/JME.2020.14.026

点焊接头疲劳研究综述*

杨龙 杨冰 阳光武 肖守讷 朱涛
(西南交通大学牵引动力国家重点实验室 成都 610031)

摘要: 对点焊接头疲劳研究近几十年的发展进行全面的综述。从数值分析、试验分析、有限元分析和疲劳评估方法等4个方面系统梳理和综述点焊接头的疲劳研究成果,将点焊静态理论、局部应力、结构应力和断裂力学等数值分析方法进行归纳总结;从静态试验、拉剪疲劳试验、剥离试验和缺口试验等试验方法中研究点焊接头失效模式、失效机理和疲劳寿命;对8种点焊接头有限元模型的特点、建模方法、适用范围进行了对比综述,认为C_WELD和C_BAR模型适用于大型点焊结构中;对载荷-寿命法、名义应力法、热点应力法、等效结构应力法等多种点焊接头疲劳评估方法的适用条件、适用对象、评估效果等进行归纳总结,认为等效结构应力法值得在工程领域进行推广应用。最后对存在的问题和进一步研究方向进行评述和探讨,对点焊接头更深入的疲劳研究具有一定的指导和帮助。

关键词: 点焊接头; 疲劳评估; 数值分析; 试验分析; 有限元分析

中图分类号: TG405

Overview of Fatigue Research of Spot Welded Joints

YANG Long YANG Bing YANG Guangwu XIAO Shoune ZHU Tao
(State Key Laboratory of Traction Power, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031)

Abstract: The research on fatigue of spot welded joints in recent decades is summarized comprehensively. The achievements of research on fatigue of the spot welded joints are described systematically from 4 aspects, including numerical analysis, experimental analysis, finite element analysis, and fatigue assessment methods. The numerical analysis methods of spot welding such as static theory, local stress, structural stress and fracture mechanics are summarized. The failure mode, failure mechanism and fatigue life of spot welded joints are studied by test methods such as static test, tensile-shear fatigue test, peel test and notch test. The characteristics, modeling methods and applicable scopes of 8 kinds of finite element models of spot welding joints are compared and summarized, and the C_WELD model and C_BAR mode are considered to be suitable for large spot welding structures. The applicable conditions, applicable objects, and evaluation effect of various fatigue assessment methods for spot welded joints such as load-life method, nominal stress method, hot spot stress method, and equivalent structural stress method are summarized, and it is believed that the equivalent structural stress method is worthy of popularization and application in the field of engineering. Finally, the existing problems and further research directions are reviewed and discussed, which would provide some guidance and assistance for further research on fatigue of spot welded joints.

Key words: spot welded joints; fatigue assessment; numerical analysis; experimental analysis; finite element analysis

0 前言

电阻点焊作为一种重要的焊接方式广泛应用于汽车、轮船、轨道车辆、航空航天、家用电器等领域。焊接过程包括预压、通电加热、电极压力下塑性变形或者冷却结晶以及再结晶四个阶段,焊接品

质主要受到电极压力、焊接电流、焊接时间和焊件表层状态的影响^[1]。点焊有单面单点焊、双面单点焊、单面多点焊和双面多点焊等焊接类型^[2]。根据母材板厚的不同,点焊接头可以分为小尺寸接头和大尺寸接头,小尺寸接头的板厚一般小于0.5 mm,主要应用于电子元器件中,而大尺寸接头的板厚一般大于0.6 mm,主要应用于轨道车辆不锈钢车体和汽车白车身^[3-6]。点焊接头由熔核、塑性环以及焊件母材三部分构成^[7],一般要求外观表面压坑浅、平滑、呈均匀过渡,无明显凸肩式局部挤压的表面

* 国家自然科学基金(51675446)和国家自然科学基金联合基金(U1534209)资助项目。20191211收到初稿,20200424收到修改稿

鼓起, 不允许外表有环状或径向裂纹^[8]。

点焊焊接速度快、能耗低、焊接质量高、效率高, 便于实现自动化焊接, 适合大批量生产, 在轨道车辆不锈钢车体和汽车工业的焊接过程中大量采用。据统计, 一辆不锈钢车体上通常有高达 50 000 个点焊焊点^[9], 一辆轿车车身上有 4 000~6 000 个焊点^[10]。点焊在不锈钢车体中主要用于图 1 所示底架横梁与地板、侧墙梁与蒙皮、端墙梁与板、车顶横梁与车顶板等之间的焊接。在汽车车体中, 点焊主要应用在车体地板、侧围、车架、车顶、车门以及车体总成等部分的装配焊接中。

图 1 不锈钢点焊车体

如今, 越来越多地使用高强度薄板以满足不锈钢或铝合金车体轻量化的要求, 板厚减小使得点焊接头强度和刚度降低, 因此对点焊接头疲劳寿命评估和疲劳失效研究变得更为迫切。在循环载荷作用下, 焊点的疲劳断裂形式有平行于板的板间断裂和贯穿板厚的断裂。当焊核直径远大于板厚时, 常在母材区产生贯穿板厚的断裂; 反之, 当板厚远大于焊核直径时, 常在焊核处产生平行于板的板间断裂。由于不锈钢车体点焊接头的焊核直径远大于板厚, 所以常在母材区产生垂直于板且穿透板厚的裂纹, 而焊核出现裂纹的情况并不多见^[9]。点焊的疲劳断口通常呈现出三种失效形式: 高载荷水平下的熔核界面断裂(Interface fracture, IF)、中等载荷水平下的焊核拔出失效(Pullout failure, PF)、低载荷水平下的热影响区靠近母材区域“眉毛”状裂纹失效^[11-12]。由于点焊焊核处在封闭状态, 且疲劳裂纹常常在板的内侧萌生, 使得对点焊的裂纹长度和深度的监测以及无损探伤十分困难, 因此, 开展对点焊的疲劳评估显得尤为重要。

点焊接头疲劳研究主要围绕点焊的数值分析、试验分析、有限元分析和疲劳评估方法等展

开。本文将从这四个方面入手, 对点焊接头的疲劳研究进行全面梳理和分析, 旨在讨论点焊疲劳寿命评估理论和方法, 为实际工程应用提供一定的参考。

1 点焊数值分析

点焊是一个高度非线性、多变量耦合和伴随大量随机不确定因素的过程^[13-14], 而点焊数值分析是疲劳研究的基础。国内外专家学者在点焊数值分析方面做了大量研究, 主要集中在静态理论、局部应力、结构应力和断裂力学分析等方面。其中, 静态理论分析是点焊结构受力分析的基础; 局部应力和断裂力学分析则可实现对点焊结构局部应力集中、塑性变形、裂纹扩展机理及失效模式更为准确的描述; 结构应力分析是一种更倾向于工程应用的分析方法, 适用范围更为广泛。

1.1 静态理论分析

在静态理论分析方面, 点焊结构在拉剪载荷下的受力如图 2 所示^[15-16]。未加载时, A 板和 B 板中心线不在同一直线上, 加载后两板中心线趋于同一直线, 使得点焊接头同时受到拉力 F_2 、剪力 F_1 和 z 转矩 M 的作用。根据试件裂纹萌生和扩展分析, 认为 F_1 不起主要作用, 主要是因为 F_2 和 M 相互叠加导致 A 板 y_1 和 B 板 y_2 处应力最大。

图 2 点焊接头受力分析

此外, RADAJ 等^[17-22]通过理论分析得到点焊搭接接头在完全加载状态下的应力可以通过如图 3(图 3a 和图 3b 为上板的节点面力和特征力, 图 3c 和图 3d 为顶点应力)所示的接头合力或合力矩来表征, 且与顶点结构应力相关。进而, 在点焊接头力和力矩平衡的基础上建立了合力和结构应力关系式, 可以较为方便地计算出焊核周围的应力分布, 大大减少了特征力和应力的数量。

设计和应用的重要依据。

对点焊接头的试验研究主要包括准静态试验、拉剪(Tensile shear, TS)疲劳试验、剥离(Coach peel, CP)疲劳试验、缺口试验和残余应力测试等。涉及的载荷类型有恒幅加载、两级变幅加载、多级比例加载和随机加载等;加载方式有平行于板的加载、垂直于板厚的加载、多轴加载^[35]等。由于点焊接头常用于不锈钢或铝合金薄板的连接,板的刚度较低,故垂直于板厚的拉伸疲劳试验只能在小载荷下开展,而拉剪载荷试验可在大载荷下开展。

在准静态试验方面, MARASHI 等^[48]通过静载拉剪试验研究了不同板厚点焊接头的过载失效模式和失效机理,发现不同厚度点焊的峰值载荷和能量吸收的主要控制因素是点焊熔核大小、熔深和薄板强度,厚度不同的点焊失效是由较薄的母材缩颈引起的。在此基础上, POURANVARI 等^[49]发现在静载拉剪载荷下熔核区的大小、破坏方式和破坏部位的强度/延性是决定点焊峰值载荷和能量吸收的主要因素。界面破坏这种失效模式与母材的极限拉伸强度之间没有直接关系。此外,对于 DP800 点焊接头的熔核拔出失效需要的峰值载荷和能量吸收水平比界面破坏模式高得多,接头失效模式仅对能量吸收至关重要,而对峰值载荷则不那么重要,具有较大熔核尺寸的接头通常会生成较高的峰值载荷和呈现较高的能量吸收水平^[50]。由于传统的经验临界熔核直径 $4\sqrt{t}$ 难以有效评价点焊质量的问题,张小云^[51]建立了综合考虑焊点宏观压痕和微观维氏硬度变量的双相钢焊点界面撕裂力学模型,确定了发生焊点界面撕裂的临界熔核直径,实现了对不同厚度双相钢焊点界面撕裂模式的评价。

后来, ZHANG 等^[52]通过静载拉剪试验评估了不同厚度的 DP780 和 DP600 之间的单点焊搭接接头的组织和力学性能,并将热影响区细化为四个子区域:亚临界、临界间、细颗粒和粗颗粒热影响区。接头呈现包含图 4 所示的界面破坏(IF)和拉拔破坏(PF)两种失效模式^[52-53],且熔合区(Fusion zone, FZ)

图 4 点焊接头静载失效模式

的尺寸在接头的失效模式中起主要作用, 6.6 mm 是 FZ 的临界尺寸。传统的临界熔合尺寸以下, 界面断裂是主要的破坏模式, 载荷分散大, 能量吸收差。超过临界熔合区尺寸时, 熔核拔出成为主要的失效模式, 具有严格控制的峰值载荷和能量吸收分布^[54-55]。

拉剪和剥离疲劳试验主要研究点焊接头的疲劳极限、疲劳裂纹扩展和疲劳失效机理等。BARKEY 等^[56]提出了一种在拉力和剪切力共同作用下开展点焊强度和疲劳试验的夹具和方法。LONG 等^[57-58]对图 5 所示的三种高强度钢点焊试件进行了拉剪和剥离疲劳试验, 发现在低幅值高循环载荷下, 材料的疲劳强度基本一致, 但是拉剪载荷下不同材料的点焊试件表现出不同的疲劳裂纹路径。WU 等^[11]对 DP780GI 点焊接头进行拉剪和剥离试验之后发现 TS 接头有热影响区眉毛状裂纹失效和焊核拔出失效两种失效模式, 而 CP 接头仅存在界面破坏失效。LIN 等^[59]基于拉剪和剥离疲劳试验得到裂纹的局部应力强度因子, 建立了点焊疲劳裂纹扩展模型。WANG 等^[60]通过拉剪疲劳试验发现 B1500HS 钢点焊试件破坏形式有沿圆周和板宽方向的两种疲劳断裂方式, 疲劳裂纹起始于焊核边缘的两板的界面上, 且在高幅值低循环和低幅值高循环载荷下都穿透热影响区传播, 裂纹扩展角为 75° , 为两种裂纹混合扩展模式。RADAKOVIC 等^[61]对高强度钢(AHSS)进行拉剪疲劳试验发现焊核拔出失效和界面破坏之间存在竞争关系, 导致完全拔出失效的力与材料抗拉强度、母材厚度和焊核直径成正比, 导致界面破坏的力与点焊的断裂韧性、板厚和焊核直径有关, 于是确定了两种失效模式的板厚临界值, 板厚大于临界值时失效模式由拔出失效转变为界面破坏。

图 5 点焊拉剪疲劳试验试件

在变幅载荷和多点焊疲劳试验方面, 王瑞杰等^[62-63]对两焊点试件开展拉剪疲劳试验发现两级变幅加载下存在应力次序效应, 在低-高加载时存在“锻炼效应”, 在高-低加载时存在“过载效应”。闫坤^[37]以 ST12 低碳钢的单、双点焊试件进行恒幅及两级加载疲劳试验, 得到了各个疲劳特征参量与单、

双焊点疲劳寿命的关联性,其中等效应力强度因子关联单、双焊点疲劳寿命的性能最好。杨轶宁^[64]对 ST12 和 BGXH50 两种低碳钢板的点焊拉剪试件进行恒幅与两级加载试验,并通过 BP 神经网络法对试件进行了疲劳寿命预测。LIU 等^[65]通过对 301L 不锈钢多点焊试件开展疲劳试验得到多点焊的疲劳极限随焊点数增加而非线性增加,焊点的布置方式对多点焊的平均疲劳极限影响很大^[65-66]。

此外,PAN 等^[67]通过开展缺口试验研究了不同板厚下点焊熔核缺口处的应力应变,发现最大循环主应变出现在缺口根部,即使在小载荷下点焊接头也会发生明显的屈服,并将最大主应变与疲劳寿命相关联提出了一种基于应变的疲劳寿命预测方法。UWABA 等^[68]通过对点焊缺口试件进行夏比冲击试验测量出了点焊接头韧性至脆性的转变温度。韩长录^[69]基于 X 射线衍射法检测了 B1500H 超高强度点焊接头残余应力的分布与消减,发现导致焊核与热影响区有明显的残余应力释放现象的载荷临界值。

以上点焊试验研究可以直观地反映点焊接头的断

裂强度、疲劳极限、力学性能,能量吸收、断口形貌、失效模式、失效机理、裂纹扩展机理等,可与有限元仿真和数值分析相互佐证,是点焊接头疲劳研究的有力支撑。但是点焊试验研究仅是在简单载荷和理想条件下开展的,试验结果受试验次数、试验设备、试件加工质量、试验环境、人为因素等方面的影响。而点焊接头往往在多种载荷模式、复杂环境和复杂条件下服役,所以以后还需要开展交变载荷、多轴载荷、高/低周疲劳等点焊接头试验,更真实准确地反映点焊接头的实际受力模式和失效机理,使之更具工程意义。

2.2 点焊有限元分析

数值分析、试验研究和有限元仿真已经成为现代工程科学的三大支柱,有限元分析是点焊研究的另一个重要途径,可以缩短结构设计和分析周期,降低成本。有限元分析能够适应任意边界条件、材料性质和载荷分布复杂的结构,适用范围非常广。点焊接头有限元仿真模拟的方法有很多种,主要有图 6 所示的 8 种类型^[1,70],表 1 总结了利用 Hypermesh 进行点焊建模的主要方法及其适用性。

图 6 常用点焊有限元模型类型

不同的求解软件对点焊单元有不同的定义方式,单个焊点的模拟采用体单元能够得到较为准确的分析结果^[1,70-71]。但是对轨道车辆不锈钢车体和汽车白车身等大型分析模型,如果采用实体、实体板壳、多刚性梁、伞状或 ACM2 等精细化模型并不现实,硬件环境要求太高,计算量也过大,并不适合工程应用。

XU 等^[72]通过对 4 种点焊有限元模型仿真,结果表明当接头承受拉力、面外弯曲和扭转载荷时模拟效果较好,当承受面内弯曲和扭转载荷时模拟误差

较大。PALMONELLA 等^[73]基于动力学模型优化方法将 C_WELD 和 ACM2 模型通过固有频率表征的参数进行优化,并提出了模型的最佳优化准则。此外,相关文献的论述均表明不锈钢车体和汽车白车身中点焊接头采用 C_WELD 模型模拟结果与实际试验数据最接近^[1,70,74]。王峰^[9]通过将实体模型和 C_BAR 模型的仿真结果与点焊试件静载试验结果对比,得到实体模型和 C_BAR 模型均可以准确地模拟点焊接头,而 C_BAR 模型更方便提取焊点的结构应力。

表 1 常用点焊有限元模型建模方法及其适用性

模型类型	单元类型	建模方法	特点	适用对象
实体模型	母材：六面体单元 (CHEXA) 焊点：六面体单元 (CHEXA)	焊点用与母材材料参数一致的体单元模拟，节点重合	模型与实际结构的形状最为接近，对结构网格离散质量要求较高	仿真精度较高，前处理时间长，适用于对结构局部应力细致分析
实体板壳模型	母材：壳单元(SHEEL) 焊点：六面体单元 (CHEXA)	焊点与母材材料参数一致，相交节点重合，为避免具备不同自由度单元连接界面不协调，在实体单元外包一层壳单元	模型需保证上下被焊接件焊点直径范围内单元离散一致性	仿真精度高，前处理时间长，适用于对结构局部应力细致分析
C_BAR 模型	母材：壳单元(SHEEL) 焊点：弹性梁(CBAR)	焊点 CBAR 连接母材上下两个节点，并赋焊核直径 d	模型对离散网格质量有较高的要求，被焊接件上焊点所对应位置需布置节点，网格依赖性强	结构应力仿真精度高，前处理时间长，适用于提取点焊结构应力
C_WELD 模型	母材：壳单元(SHEEL) 焊点：铁摩辛柯梁 (CWELD)	焊点 CWELD 连接母材上下两个节点，并赋焊核直径 d	模型属区域连接，没有网格一致性的要求	仿真精度高，前处理时间短，适用于大结构
单刚性梁模型	母材：壳单元(SHEEL) 焊点：单刚性梁 (S_Rigid)	焊点用单个 RBE2 连接母材上下两个节点	模型对离散网格质量有较高的要求，被焊接件上焊点所对应位置需布置节点，网格依赖性强	仿真精度低，前处理时间长，适用于不关注点焊局部应力的粗略分析
多刚性梁模型	母材：壳单元(SHEEL) 焊点：多刚性梁 (M_Rigid)	母材分别开直径为 d 的孔，上下孔边缘的节点一致，焊点用一组 RBE2 连接母材孔边缘对应的上下两个节点	模型需保证上下被焊接件焊点直径范围内节点一致，网格依赖性较强	仿真精度高，前处理时间长，适用于关注点焊局部应力的小结构
伞状模型	母材：壳单元(SHEEL) 焊点：弹性梁(CBAR)和刚性梁单元 RBE2 组合	母材分别开直径为 d 的孔，上下孔边缘的节点可以不一致，上下孔边缘的节点分别耦合到各自中心主节点上，再由 CBAR 连接两个中心主节点	模型不需要上下被焊接件焊点直径范围内的节点相一致，对结构网格离散质量要求相对宽松	仿真精度高，前处理时间长，适用于结构静强度和疲劳强度校核
面接触模型(ACM2)	母材：壳单元(SHEEL) 焊点：六面体单元 CHEXA 和柔性连接单元 RBE3 组合	模拟焊核的六面体单元 CHEXA 上的 8 个节点作为主节点，分别通过 RBE3 单元与母材上焊点直径范围内的从节点连接	模型不需要被焊接件上焊点直径范围内单元保持一致，网格划分相对自由	仿真精度高，前处理时间长，适用于小结构或紧固件的模拟

通过以上分析可以看到六种常用的点焊有限元模型各有优缺点，实际应用中可以根据需求选择适合的模型。在大型点焊结构中，为了既能够简化模型又能够准确地模拟点焊接头，综合考虑显示采用 C_WELD 和 C_BAR 模型具有精度高、批量处理方便、工作量小、模型规模小、计算效率高等优势，可作为不锈钢点焊车体、汽车白车身等大型结构仿真的优选方案。

3 点焊疲劳评估方法

据统计，焊接结构有 80%~90%的失效是由疲劳引起的^[75]，而点焊结构也是如此。由于点焊接头具有封闭性和难监测性，所以对其进行疲劳评估尤为重要。点焊疲劳评估方法主要包括载荷-寿命法、名义应力法、热点应力法、局部法、缺口应力法、断裂力学法和等效结构应力法等。

3.1 载荷-寿命法

载荷-寿命法是用于确定点焊接头疲劳寿命最直接和最先进的方法，但这种方法的缺点是要通过

试验获得不同点焊接头几何参数和材料参数下的疲劳试验数据^[76]。起初，POLLARD 等^[77]对点焊试件开展了拉剪和横向拉伸疲劳试验，建立了疲劳寿命 N 与板厚、焊核直径、载荷幅 ΔF 和载荷比关系的经验公式，且寿命预测结果与试验结果一致。LIN 等^[78]通过试验得到了双相钢、低碳钢和高强度钢点焊接头的 $F-N$ 曲线，并验证了点焊疲劳裂纹扩展模型。后来，王瑞杰等^[16]通过对比几种不同的点焊疲劳试验方法得出载荷-寿命法的估计公式必须基于大量试验统计得出，不能将不同形状焊点的疲劳寿命相联系，是一种粗略的估计方法。

目前，工程上多采用载荷-寿命($F-N$)曲线来预测点焊结构寿命^[9]。作为基础性工作，针对点焊接头疲劳强度的研究都是在疲劳试验的基础上进行的，而试验得到的一般都是一条包含不同载荷比、板厚和焊核直径组合的主 $F-N$ (载荷-寿命)曲线，但线性相关程度往往较低；然而，如果对载荷比、板厚和焊核直径进行进一步区分，又会得到多条 $F-N$ 曲线，工程应用时易导致选取过程繁琐复杂。

3.2 名义应力法

名义应力评估方法是目前焊接构件疲劳评定应用十分广泛的基本方法^[79-80], 名义应力是在接头相关的横截面上计算出的弹性应力, 不考虑焊接接头本身引起的应力集中, 但接头附近构件的宏观几何形状不连续导致的应力集中需要考虑, 如大的开孔、截面变化等^[81]。LEE 等^[82]定义名义应力为载荷与净截面之比, 并提出了名义应力-寿命计算公式。李娟^[83]提出受力不同名义应力计算公式不同: ① 轴向力作用下, 名义应力等于轴向力除以受载横截面积; ② 当母材受弯矩或转矩作用时, 名义应力为弯矩或转矩除以相关的截面模量。

名义应力评估法直接按照结构的名义应力和对应不同“缺口等级”的 $S-N$ 曲线估算该结构的疲劳强度, 焊接接头缺口等级的划分取决于接头形式、焊缝类型、加载情况及制造加工质量与缺陷情况^[84]。疲劳强度由小型试件或足尺试件的试验结果决定, 试件包括多种结构不连续效应产生的连接结构以及多种焊接结构, 但通常不产生宏观效应^[85]。失效依据是判断名义应力是否小于疲劳断裂时的许用名义应力, 许用名义应力可根据焊接接头的几何形状、类型、载荷以及工艺影响(例如表面修正加工情况及缺陷)等因素从焊接疲劳设计标准的有关图表中查找^[79]。

通过以上分析可以看到, 基于名义应力的焊接接头及构件疲劳强度评定依赖于典型结构细节的疲劳强度数据, 标准中给出的接头细节类型是有限的, 而实际结构中接头类型较为复杂, 因此该方法具有一定局限性^[86]。传统的名义应力法用于焊接结构的疲劳评定存在以下问题^[87]: ① 疲劳寿命与名义应力幅之间的分散性较大; ② 无法明确几何形状复杂焊接结构的名义应力; ③ 无法评定规范中规定之外构造细节的疲劳强度。点焊疲劳试验寿命与名义应力大致呈线性关系, 但点焊试验寿命数据分布较分散, 基于名义应力法的疲劳寿命预测方法很难取得精确的预测结果^[88]。

3.3 热点应力法

为了克服名义应力法的局限性, 欧洲钢结构规范(Eurocode3)、国际焊接学会(IIW)和挪威船级社(DNV)等引入了以“热点应力”为基础的疲劳评定方法, 以期减少 $S-N$ 曲线的分散性和对接头的依赖性^[83]。热点应力就是热点处的结构应力(几何应力), 选用两个特定点处的结构表面应力进行线性外推, 忽略了焊缝部位的几何样式、载荷类型以及板厚方向应力强度因子的影响^[89]。热点应力有 2 种计算方法^[87]: ① 名义应力乘以热点应力集中系数; ② 采

用有限元分析方法获得。基于有限元法的热点应力计算除了采用如图 7 所示的表面外推法^[90]外, 还可借鉴应力线性化法^[91]、DONG 法^[36]和 1 mm 法^[92-93]。

图7 热点应力表面线性外推法示意图

热点应力法对焊接接头进行疲劳评定最大的优点就是可以用 $S-N$ 条曲线表示不同类别焊接接头的疲劳强度, 因而大大减少焊接接头按疲劳强度划分的级别^[83]。但热点应力法对有限元网格敏感性较大, 对网格划分的尺寸有严格的要求, 因此传统热点应力法受人为主观因素影响较大, 无法准确地预测焊缝处的疲劳寿命^[86]。针对此问题, IIW 最新标准对热点应力法进行了更新, 在 Woehler 的 $S-N$ 曲线中考虑了高周疲劳, 允许对之前标准的热点应力网格进行粗略划分^[94], 该方法的主要缺点是对表面裂纹破坏的限制以及外推法的不确定性, 设计人员必须事先验证焊接接头不会因根部或内部缺陷而失效。

通过以上分析可得到, 热点应力克服了名义应力法的局限性, 而且不考虑焊缝处的几何样式、载荷类型以及板厚方向应力强度因子的影响, 可以用 $S-N$ 条曲线表示不同类别焊接接头的疲劳强度, 但是对有限元网格敏感性较大, 今后可以尝试通过提取点焊接头的节点力, 基于节点力建立对网格敏感性小的热点应力法。

3.4 局部法

局部法也是为了克服名义应力法的局限性而发展起来的一种焊接接头疲劳评估新方法。局部法的基本原理是焊接接头的疲劳破坏总是从应力集中处的最大应力处开始的, 局部循环载荷是疲劳裂纹萌生和扩展的先决条件, 只要局部循环参量相同, 就具有相同的疲劳性能^[95]。局部法正是以应力集中区域应力场的“局部参量”作为疲劳失效的控制参量, 将不同应力集中焊接构件的疲劳性能与光滑试件的疲劳性能联系起来, 建立具有普适性的“局部参量”与循环次数曲线, 即局部法的 $S-N$ 曲线, 从而消除名义应力法的局限性, 达到对焊接接头进行疲劳评估的目的^[83]。目前局部法已经发展了多种疲劳评定

理论,包括缺口应力强度因子法^[96-97]、等效应力强度因子法^[98-99]、临界距离法^[100-101]、应力梯度体积法和临界面法^[102-103]等。

闫坤等^[88]将 C_WELD 点焊模型通过 Nastran 软件仿真得到接头的最大主应力,基于局部法拟合得到点焊的 $S-N$ 曲线,结果显示在不同载荷水平下,基于最大主应力法的点焊疲劳寿命预测结果与试验寿命之间存在良好的相关性。BERTINI 等^[104]通过有限元仿真对用于评估焊接接头疲劳寿命的两种局部法(缺口应力法和峰值应力法)进行了对比研究,发现缺口应力法评估结果更保守。LIU 等^[105]提出了一种 U 形缺口疲劳损伤的局部应力法,基于此方法得到了 U 形缺口 PMMA 板的 $S-N$ 曲线,并与试验数据进行了比较,验证了局部应力法对疲劳寿命的准确估计的有效性。

通过以上分析可以看出,局部法可以较准确地评定各种样式的焊接接头,但是因为考虑了包括焊趾半径、倾角在内的焊缝局部细节,使得将其应用于实际大型复杂的焊接结构分析时,建模工作异常繁重,而且局部参量对有限元网格的密度的依赖性较大,因此在实际疲劳评定中难以普及^[83, 86]。

3.5 缺口应力法

缺口应力法是基于材料的弹性理论提出的一种疲劳评估方法,采用缺口应力法分析时,除名义应力和结构应力之外还应确定焊趾、焊缝带来的应力集中以及结构几何形状变化带来的应力集中^[83]。缺口应力法用有限元计算得到的潜在危险位置的真实应力来建立疲劳寿命的 $S-N$ 曲线。但是实际应用中,焊趾和焊跟的局部几何形状是高度不规则的,针对这一问题,在应用缺口应力法时,通常理想地假设焊趾和焊跟存在规则的过渡圆弧,于是局部应力可以通过数值方法计算出来^[85]。采用缺口应力评定方法一般需要具备下列条件^[84]。

(1) 掌握有关缺口应力理论。

(2) 具备确定某种情况下缺口应力的数值计算方法和试验手段,如有限元法、边界元方法、应变测量技术和光弹技术。

(3) 确定结构和焊接接头的形状、几何尺寸。

(4) 测定局部循环应力-应变曲线和与疲劳有关的材料常数。

(5) 计算材料在受到变幅工作载荷作用时的累积损伤。

(6) 测定或计算缺口顶端的焊接残余应力。

采用缺口应力法对点焊接头进行疲劳评估时认为焊点接触面边缘是缺口^[16], SATOH 等^[106]使用应

变计测量点焊接头电极压痕两侧的应变,得到应变幅变化率与疲劳循环数曲线来预测点焊接头疲劳寿命。RADAJ^[23]提出了具有微支撑效应的缺口应力,并将此局部应力用于点焊拉剪试件的疲劳评估。RADAJ 假设点焊接头边缘有一个小孔缺口,基于 Airy 应力函数推导出了点焊的缺口应力公式,用于点焊接头的疲劳评估^[17, 107]。后来, RADAJ 在点焊熔核边缘设置了一个半径 $r=0.05$ mm 的小缺口,然后基于熔核边缘的弹塑性缺口应变,来估算点焊拉伸剪切试件在有限寿命范围内的疲劳强度^[108]。此外, PAN 等^[67]开展了熔核处带缺口的混合板厚点焊疲劳试验,测量出了熔核处的应力应变,发现最大循环主应变幅值出现在缺口根部,且最大循环主应变和主应变幅值均与疲劳寿命相关,主应变幅值相关性更高。

综上所述,缺口应力评定方法在确定缺口应力时不仅需要较复杂的计算或测试,而且高度依赖实际应用经验和前期数据积累,应用便捷性尚有待提高。

3.6 断裂力学法

断裂力学法作为前几种疲劳评估方法的发展与补充,在疲劳寿命的评估中得到了广泛的应用。它以材料或构件存在缺陷或裂纹为前提,一般用疲劳裂纹的扩展速率来评估结构的剩余寿命^[85]。PARIS 等^[109]指出循环荷载下,裂纹尖端的应力强度因子幅值是控制构件裂纹扩展速率的基本参数,建立了表征裂纹扩展速率与裂纹尖端的应力强度因子幅值之间的关系。裂纹扩展速率(da/dN)与应力强度因子范围(ΔK)的关系在双对数坐标上呈一条“S”形曲线分布,可分为三个阶段:裂纹低速扩展区、中速率扩展区和高速扩展区^[110]。焊接结构中焊趾和焊缝根部的裂纹和缺陷可基于裂纹尖端处的应力强度因子计算,裂纹稳定扩展以及最终发生断裂时裂纹的临界尺寸可由裂纹尖端处应力强度因子的幅值计算^[79]。

基于断裂力学法对点焊疲劳评估时认为焊点接触面是裂纹,将基于 J 积分与应力强度因子 K 等参数估算的裂纹扩展寿命作为接头总的疲劳寿命,其中等效应力强度因子应用最多^[111]。RADAJ 等^[47]对基于结构应力计算的点焊边缘应力强度因子公式进行了简化,进而推导出了不等厚板点焊的应力强度因子^[45]。后来又得到不同材料不等厚板的点焊接头的应力强度因子,为点焊接头的疲劳强度评估提供了依据^[46]。SWELLAM 等^[42-43]基于断裂力学研究了点焊接头的各疲劳损伤参数以及试件板厚、宽度和焊核直径对裂纹扩展的影响,提出了一种混合型应力强度因子 K_i 。左银龙^[112]通过修正等效应力强度因

子对 301L 不锈钢点焊结构进行疲劳寿命评估。ZHANG^[113]通过公式将点焊接头的应力强度因子和缺口应力与载荷、接头类型和几何尺寸相关联,推导出了循环载荷下点焊关键点的应力强度因子计算公式。LIN 等^[78]在局部应力强度因子解的基础上,建立了点焊疲劳裂纹扩展模型,并通过疲劳试验验证了其准确性。此外,NEWMAN 等^[114]将点焊搭接接头的疲劳问题简化为单自由度裂纹扩展问题,建立了仅考虑母材疲劳裂纹扩展的点焊疲劳寿命预测模型。LEE 等^[115]发现仅基于 J 积分不足以准确预测点焊试件的疲劳寿命,于是基于 J 积分推导出了等效 J 积分幅值-疲劳寿命方程,此方法相对 J 积分预测精度更高。程亚军等^[116]采用壳单元和梁单元来模拟点焊接头,通过提取梁单元的力和力矩来计算不锈钢车体点焊接头的应力强度因子,基于应力强度因子对点焊接头疲劳强度进行了准确评估,并认为此方法非常适用于不锈钢点焊车体的设计阶段。

通过以上分析可以看到,虽然线弹性断裂力学方法对复杂结构的评定有较高的精确度,但因为其计算量相当大,通常也仅用于一些存在不可避免缺陷或裂纹的结构、质量要求较高的焊接构件、安全性要求较高的主要元件的评定,一般不能用作尺寸设计的依据。

3.7 等效结构应力法

国际焊接学会根据焊接接头的试验结果给出一组代表不同载荷模式下相互平行的 $S-N$ 曲线来评估疲劳寿命,但当应力范围 $\Delta\sigma$ 确定后,需要根据焊接接头的类型、几何形状、载荷模式选择准确的 $S-N$ 曲线来评估寿命。但是在实际情况中很多焊接结构的几何形状十分复杂,受载情况也复杂多样,而且标准中接头类型十分有限,所以很难准确选择^[117-118]。为此,人们提出了等效结构应力法来解决应力对网格的敏感性和焊接接头与 $S-N$ 曲线难以一一对应的问题。等效结构应力法是基于断裂力学理论,通过对焊接接头疲劳试验数据进行统计而提出的一种焊缝疲劳评估的新方法。此方法通过对等效结构应力范围 ΔS 和疲劳寿命 N 拟合得到 $\Delta S-N$ 曲线,将所有疲劳试验数据将落在一个窄带中,近似于一条主 $S-N$ 曲线^[119],从而实现以一条主 $S-N$ 曲线来评估焊接结构的疲劳寿命^[120]。这种方法具有以下几个特点。

(1) 对网格不敏感。

(2) 满足平衡等效条件和严格数学定义的力学模型。

(3) 能够同时考虑应力集中、板厚、载荷模式

等对疲劳寿命的影响。

(4) 采用单一的主 $S-N$ 曲线,降低焊缝分类和接头形式等对疲劳设计中 $S-N$ 曲线确定的难度。

(5) 计算精度高,值得在工程领域进行推广应用。

等效结构应力一般通过有限元仿真来确定。对于普通焊接接头,首先提取焊趾截面或焊喉截面的节点力,等效转化为沿着中面焊线方向的线力和线弯矩,然后基于材料力学公式求出截面的结构应力^[117]。对于点焊接头,首先提取点焊有限元模型中梁单元的力和力矩,然后根据板厚 d 和焊核直径 r 的关系来判断点焊接头的失效模式,再将梁单元的力和力矩代入失效模式对应的等效结构应力公式求出结构应力。最后,根据等效结构应力和疲劳寿命拟合出一条主 $S-N$ 曲线来评估点焊接头的疲劳寿命。

现行的点焊等效结构应力法主要有 RADAJ 法^[29]、RUPP 法^[33]、SHEPPARD 法^[31,44]、DONG 法^[36]和 KANG 法^[121]等。RADAJ 法^[29]给出了焊核边缘的最大等效结构应力公式。RUPP 法^[33]给出了图 8 所示的点焊母材和焊核两种失效模式下接头的等效结构应力计算公式。后来,朱涛^[122]基于 RUPP 法对汽车点焊结构进行疲劳寿命分析,且预测结果与试验一致。吴晓^[38]对 RUPP 法中的结构应力公式系数优化后提出了一种新的结构应力公式。王峰^[9]基于 RUPP 法得到了点焊的主 $S-N$ 曲线,并分析了载荷比的影响。杨轶宁等^[123]通过对 C_WELD 点焊模型仿真,提取了 CWELD 单元的节点平衡力,并基于 RUPP 法得到不同载荷下的点焊疲劳寿命。SHEPPARD 法^[31,44]与 RUPP 法定义了点焊疲劳损伤模型一致,认为疲劳裂纹沿着薄板厚度传播,通过板、梁有限元模型来计算焊核边缘处的结构应力,以最大结构应力范围作为点焊疲劳损伤的参量。DONG 法^[36,124-125]基于点焊有限元模型中的膜应力和弯曲应力提出了一种对网格不敏感的结构应力计算方法,并基于大量试验数据得到了主 $S-N$ 曲线,该曲线涵盖了接头类型和加载方式等影响因素。KANG 法^[121]将 von Mises 方程中的应力分量代入点焊附近的局部结构应力,然后根据有限元分析得到焊点的力和力矩,并计算出焊核边缘的等效结构应力。闫坤^[37]将 DONG 法和 RUPP 法相结合,提出了一种新的点焊疲劳特征参量来简化结构应力,并对比了 RUPP、KANG、DONG、SHEPPARD 结构应力、简化结构应力和等效应力强度因子这 6 种点焊疲劳特征参量对单、双点焊疲劳性能的关联性。KANG 等^[35]通过点焊试件在组合拉伸和剪切载荷

下的疲劳试验研究了拉伸和剪切载荷对点焊疲劳特性的影响, 并基于 SWELLAM 法、SHEPPARD 法、RUPP 法、内插/外推法对点焊接头疲劳寿命进行评估, 得到各种方法的适用条件及评估效果。

图 8 Rupp 法中点焊结构应力计算模型

等效结构应力法相对于名义应力法、热点应力法等网格敏感性最低, 计算精度最高^[117]。其中 RUPP 法由于不需要对网格细化、计算量小、精度较高, 而广泛应用于不锈钢车体和汽车白车身等大型点焊结构。以后可以分析等效结构应力公式对板厚、材料、焊核直径、应力均值和应力比等参数的敏感性, 对等效结构应力修正和优化, 提出精度更高, 适用范围更广的点焊等效结构应力评估方法。

3.8 其他评估方法

除上述相对成熟的疲劳评估方法外, 国内外学者还提出了一些针对不同点焊具体问题的其他方法。

MIRSALEHI 等^[126]通过对 St14 钢点焊试件进行疲劳试验发现残余应力对结构应力幅值的影响很大, 考虑残余应力后疲劳强度降低了 26.99%, 因此提出了一种基于裂纹扩展的点焊疲劳寿命估算方法, 并通过试验验证了该方法的有效性。杨轶宁^[64]对 ST12 和 BGX50 两种低碳钢板的点焊试件进行恒幅与两级加载的拉剪疲劳试验, 并引入 BP 神经网络方法对试件疲劳样本数据库进行疲劳寿命模拟, 得到 BP 神经网络预测法相对结构应力法预测精度更高。PARK 等^[127]开发了反向传播神经网络法来预测点焊在各种几何因素和载荷条件下的疲劳寿命, 反向传播神经网络法不需要点焊熔核周围的局部应力和材料常数, 而是将点焊试件多个输入变量(如载荷比、加载角度、焊核直径和载荷范围等)与点焊疲劳寿命关联起来, 准确性较高。KANG 等^[128]对 Rule 插值法进行修正后提出了一种新的外推方法, 基于此外推法估算出了点焊接头的疲劳寿命,

并通过 SWELLAM 和 SHEPPARD 法验证了该方法的合理性。此外, 王瑞杰等^[63, 129]通过有限元仿真研究了固有频率随疲劳裂纹扩展的变化规律, 基于此规律建立了基于载荷幅和平均应力的疲劳寿命预测模型, 预测寿命与试验结果较一致。湛兰等^[130]基于频率下降幅度变化率和疲劳损伤度推导出数学方程进行点焊疲劳寿命预测, 且预测结果与试验数据基本相同。侯晓丹等^[131]利用线性和非线性疲劳累计损伤理论对低-高两级加载下的点焊试件疲劳寿命预测取得了较好的效果, 针对高-低加载时效果不理想的情况, 提出了一种基于 CHABOCHE 修正的非线性疲劳累计损伤模型, 预测结果得到改善。ZHANG 等^[132]通过对双杯点焊试件在横向拉伸载荷下的试验数据进行数值评估, 得出了一个基于点焊尖端的径向名义应力和板厚的疲劳新参数, 该参数相对简单, 对点焊周围名义应力的预测精度较高。

3.9 疲劳评估方法对比

通过对上述几种疲劳评估方法对比可以看出, 早期的点焊疲劳评估多用载荷-寿命法, 但该方法只能进行粗略估算, 不能同时考虑载荷模式、板厚和焊核直径等影响因素。

名义应力法对焊接接头进行了分级归类, 严格限定了加载模式, 当遇到焊缝形状复杂或受力复杂的焊接构件时, 很难选择恰当的 $S-N$ 曲线。

热点应力评估法可视为一种介于名义应力评估法与缺口应力评估法之间的一种方法^[84-85], 利用外推的方法计算热点应力, 但是该方法对网格敏感性较大, 计算出的焊缝疲劳寿命准确度不高。

局部法包括了焊接接头局部焊缝细节等因素的影响, 可以不考虑接头类别, 能够准确反映焊接结构疲劳断裂的实际情况, 解决了名义应力法的局限性, 但焊缝的几何参数如焊趾半径、焊趾倾角具有随机性, 对于实际中含有很多焊缝的结构, 建模工作量繁重, 无法有效使用。

缺口应力法用有限元计算得到的潜在危险位置的真实应力来建立疲劳寿命的 $S-N$ 曲线, 包含了所有的应力集中来源, 但方法只适用于焊趾或焊根处潜在断裂的评定, 且在确定缺口应力时需要较复杂的计算或测试, 迄今仍只用于某些特殊的场合。

断裂力学法以材料或构件存在缺陷或裂纹为前提, 通过建立裂纹尖端的应力强度因子幅值与裂纹扩展速率之间的关系来评估焊接接头的疲劳强度, 对复杂结构的评估就有较高的精度, 但是由于计算量大仅用于一些质量要求高的小构件, 对不锈钢车体等大型结构并不适用。

等效结构应力法基于严格数学定义的力学模型,通过焊缝附件节点的力和力矩来计算焊接接头的等效结构应力,同时考虑了应力集中效应、载荷模式及板厚等影响因素,且对网格不敏感。通过等效结构应力和疲劳寿命得到一条单一的主 $S-N$ 曲线,降低焊缝分类和接头形式等对疲劳设计中 $S-N$ 曲线确定的难度。等效结构应力法因具有网格敏感性低、计算量小、计算精度高等优点而被广泛用于对大型点焊结构进行疲劳寿命评估。

此外,还有诸如考虑残余应力的评估法、基于神经网络评估法、模态评估法等,其适用性还需在实践和工程应用中得到进一步验证。

4 结论

由以上研究进展可以看出,点焊接头疲劳强度受到多种因素的影响,而焊核位于两板之间导致应力集中严重,且无法直接观测裂纹萌生和扩展。所以如何选择准确的点焊接头疲劳参量与疲劳特性关联以及准确地评估点焊接头的疲劳寿命显得尤为重要。目前对点焊接头的疲劳研究主要从数值分析、试验分析、有限元仿真和疲劳评估方法研究等几个方面进行。

(1) 点焊数值分析是对点焊接头疲劳评估的理论基础,数值分析主要包括静态理论分析、局部应力分析、结构应力分析和断裂力学分析等方面。数值分析一方面需要在进一步考虑高度非线性、多变量耦合等因素影响下的精确解,例如边界元法、离散元法、界面元法等新型精确的数值分析方法正在兴起,有望成为未来数值分析的主流。另一方法要抓住主要影响因素,修正或忽略次要影响因素,尽可能地简化计算公式和流程,面向工程应用。

(2) 试验分析是对点焊接头实际受力形式和疲劳失效模式的再现。点焊试验主要包括静态试验、拉剪疲劳试验、剥离疲劳试验、缺口试验和残余应力测试等。除了常规的试验外还应开展点焊试件纯扭、纯弯、拉扭、拉弯、弯扭、拉弯扭、十字拉伸、脉动载荷等试验,以研究不同载荷模式下点焊接头的失效模式、失效机理和疲劳寿命。此外,为了更贴近工程应用,还应进一步开展高/低周疲劳试验、交变载荷下的疲劳试验、多级或多轴载荷下疲劳试验等;还需要研究对焊核区应力、热影响区应力、缺口应力和残余应力观测的新方法;深入研究熔核区化学成分和组织性能;考虑平均载荷、焊接工艺、接头形状、材料等对点焊接头疲劳的影响,为有限

元仿真提供参考。

(3) 有限元分析可以较为准确地模拟复杂的点焊接头,大大缩短结构设计和分析周期,降低成本。常见用点焊有限元模型主要包括实体模型、实体板壳模型、C_BAR 模型、C_WELD 模型等八种类型。虽然上述点焊模型考虑了母材和焊核的差异,但是对焊核和热影响区内部的应力不能准确模拟。有限元分析方面还需要研究在进一步考虑焊接质量、材料特性、表面压痕、板材间隙、表面粗糙度、腐蚀环境等多种因素下点焊接头如何准确模拟,还需要研究如何在不增加工作量的情况下进一步提高现有模型的仿真精度,提出具有精度高、批量处理方便、计算效率高等优势的点焊有限元模型,为不锈钢车体等大型点焊结构提供校核依据。

(4) 点焊接头疲劳寿命预测方法的研究日趋成熟,可以更加接近实际工程条件,更加精确地评估疲劳寿命,但各种评估方法都有各自的适用条件和局限性,要根据具体的工程需要选择合适的评估方法。鉴于点焊接头应力的复杂性,对其疲劳研究还需进一步深入研究。目前点焊疲劳评估方法均没有考虑材料和载荷比的影响,可通过对应力计算公式进行修正使其更好地预测疲劳寿命。还可以研究高/低周载荷条件下点焊的 $S-N$ 曲线,交变或多轴载荷下点焊疲劳评估方法,多点焊疲劳寿命预测等。还需要分析失效模式对点焊疲劳寿命的影响、多点焊结构焊点之间的相互作用、单点焊及多点焊 $S-N$ 曲线的定量关系、点焊结构的耐久性等。此外,还需要进一步研究复杂载荷模式、接头类型、裂纹尺寸、服役环境等因素对累积损伤的影响。还需要对考虑残余应力的评估法、基于神经网络的评估法和模态评估法等疲劳评估方法进行实践验证。

今后,进一步优化点焊接头 C_WELD、C_BAR 等高精度有限元模型和等效结构应力公式,提取点焊接头有限元模型焊核处的节点力,基于等效结构应力法将节点力等效转化为焊核处的等效结构应力,然后基于点焊疲劳试验和等效结构应力得到点焊接头在不同载荷模式下归一化的 $S-N$ 曲线值得重点关注和研究。目前,氩弧焊、钎焊、激光焊、胶粘等一些代替点焊的连接方法正在蓬勃发展,因此,如何面向未来市场高质量、高效率、高效益和轻量化的需求,围绕点焊新工艺、新技术开展研究,也是值得进一步探索的方向。

参 考 文 献

- [1] 姚亚涛. 不锈钢点焊车体结构仿真关键技术研究[D].

- 成都: 西南交通大学, 2016.
- YAO Yatao. Research on key technologies for structural simulation of stainless steel spot welded car body[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2016.
- [2] CHU Q, LI W Y, HOU H L, et al. On the double-side probeless friction stir spot welding of AA2198 Al-Li alloy[J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2019, 35(5): 784-789.
- [3] CHANG B H, LI M V, ZHOU Y. Comparative study of small scale and 'large scale' resistance spot welding[J]. *Science & Technology of Welding & Joining*, 2001, 6(5): 273-280.
- [4] ZHOU Y, REICHERT C, ELY K J. On 'joining applications in electronics and medical devices'[C]// Edison Welding Institute, September 1998, Columbus, OH, 1998: 79-90.
- [5] 王敏. 电阻焊在汽车工业中的应用[J]. *电焊机*, 2003, 1(1): 1-6.
- WANG Min. Application of resistance welding in automobile industry[J]. *Electric Welding Machine*, 2003, 1(1): 1-6.
- [6] Resistance Welder Manufacturers' Association. Resistance welding manual[M]. 4th ed. Philadelphia: Resistance Welder Manufacturers' Association, 1989.
- [7] 宇慧平, 王伟伟, 李晓阳, 等. 超高强钢点焊结构拉剪试验及数值仿真[J]. *焊接学报*, 2013, 34(10): 9-12.
- YU Huiping, WANG Weiwei, LI Xiaoyang, et al. Tensile shear test and numerical simulation of spot welded structure of ultra high strength steel[J]. *Journal of Welding*, 2013, 34(10): 9-12.
- [8] 张家菊, 张玉萍. 汽车车身电阻点焊焊点强度影响因素的分析[J]. *焊接技术*, 1995, 1(5): 8-11.
- ZHANG Jiaju, ZHANG Yuping. Analysis of the factors affecting the strength of welding spots of automotive body resistance spot welding[J]. *Welding Technology*, 1995, 1(5): 8-11.
- [9] 王峰. 点、环焊接头等效应力方法研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2018.
- WANG Feng. Research on equivalent stress method of spot and girth welded joints[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2018.
- [10] 袁少波, 童彦刚. 点焊技术在汽车工业中的应用[J]. *电焊机*, 2005, 1(2): 26-30.
- YUAN Shaobo, TONG Yangang. Application of spot welding technology in automobile industry[J]. *Electric Welder*, 2005, 1(2): 26-30.
- [11] WU G H, LI D Y, SU X M, et al. Experiment and modeling on fatigue of the DP780GI spot welded joint[J]. *International Journal of Fatigue*, 2017, 103: 73-85.
- [12] 王艳俊. 轻量化汽车车身铝合金的电阻点焊研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2017.
- WANG Yanjun. Research on resistance spot welding of lightweight automotive body aluminum alloy[D]. Nanchang: Nanchang University, 2017.
- [13] YAO Y X, SHI C Y. Fussy assessment of fatigue strength of spot-welded structures[J]. *Advanced Materials Research*, 2012, 562-564: 2030-2033.
- [14] 王长征. 基于 DRC 法的电阻点焊协同控制[D]. 长春: 吉林大学, 2004.
- WANG Changzheng. Cooperative control of resistance spot welding based on DRC method[D]. Changchun: Jilin University, 2004.
- [15] RADAJ D. 焊接结构疲劳强度[M]. 北京: 机械工业出版社, 1994.
- RADAJ D. Fatigue strength of welded structures[M]. Beijing: China Machine Press, 1994.
- [16] 王瑞杰, 尚德广, 沈通, 等. 点焊接头疲劳寿命预测研究进展[J]. *力学与实践*, 2006, 1(3): 9-14.
- WANG Ruijie, SHANG Deguang, SHEN Tong, et al. Research progress on fatigue life prediction of spot welded joints[J]. *Mechanics and Practice*, 2006, 1(3): 9-14.
- [17] RADAJ D, SONNION C M, FRICKE W. Fatigue assessment of welded joints by local approaches[M]. Cambridge: Woodhead Publishing Limited, 2006.
- [18] RADAJ D. Vollständige Bestimmung der Kräfte am Schweißpunkt[J]. *Ing-Archiv*, 1990, 60: 389-398.
- RADAJ D. Complete determination of the forces at the welding point[J]. *Ing-Archiv*, 1990, 60: 389-398.
- [19] RADAJ D. Theory of forces and stresses in spot-welded overlap joints[J]. *Archive Appl. Mech.*, 1996, 67: 2-34.
- [20] RADAJ D, ZHANG S. Anschauliche Grundlagen für Kräfte und Spannungen in punktgeschweißten Überlappverbindungen[J]. *Konstruktion*, 1996, 48: 65-71.
- RADAJ D, ZHANG S. Clear basics for forces and tensions in spot welded overlap connections[J]. *Construction*, 1996, 48: 65-71.
- [21] RADAJ D, ZHANG S. Strukturspannungen am starren Kern in endlich berandeter Platte[J]. *Konstruktion*, 1996, 48: 195-199.

- RADAJ D, ZHANG S. Structural stresses on the rigid core in a finally bordered plate[J]. *Construction*, 1996, 48: 195-199.
- [22] RADAJ D, ZHANG S. Weld spot force evaluation with dented sheet material[J]. *Engng. Fract. Mech.*, 1998, 61: 673-678.
- [23] RADAJ D. Stress singularity, notch stress and structural stress at spot-welded joints[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 1989, 34(2): 495-506.
- [24] RADAJ D, ZHANG S. Geometrically nonlinear behaviour of spot welded joints in tensile and compressive shear loading[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 1995, 51(2): 281-294.
- [25] WAGARE V. Fatigue life prediction of spot welded joints: A review[J]. *Proceedings of Fatigue, Durability and Fracture Mechanics*, 2018, 36: 445-455.
- [26] HOU Z, WANG Y, LI C, et al. An analysis of resistance spot welding[J]. *Welding Journal*, 2006, 85(3): 36-40.
- [27] ADIB H. Fatigue life duration prediction for welded spots by volumetric method[J]. *International Journal of Fatigue*, 2004, 26(1): 81-94.
- [28] SOCIE D F. Fatigue life prediction using local stress-strain concepts[J]. *Experimental Mechanics*, 1977, 17(2): 50-56.
- [29] RADAJ D. Nominal structural stress for common spot welded specimens[J]. *Construction*, 1989, 41(81): 255-259.
- [30] MADDUX S J. Fatigue design of welded structures[J]. *International Journal of Fatigue*, 1994, 16(2): 155.
- [31] SHEPPARD S D. Estimation of fatigue propagation life in resistance spot welds[J]. *Advances in Fatigue Predictive Techniques*, 1993, 2: 169-185.
- [32] RUPP A, GRUBISIC V, BUXBAUM O. Ermittlung ertragbarer Beanspruchungen am Schweiß punkt auf Basis der übertragenen Schnittgrößen[J]. *FEA Schriftenreihe*, 1994, 111: 235-244.
- RUPP A, GRUBISIC V, BUXBAUM O. Determination of tolerable stresses at the welding point based on the transferred internal forces[J]. *FEA series*, 1994, 111: 235-244.
- [33] RUPP A, KLAUS S, GRUBISIC V. Computer aided dimensioning of spot-welded automotive structures[C]// *International Congress & Exposition*, 1995.
- [34] COOK R D. Roark's formulas for stress & strain[M]. 6th ed. New York: McGraw-Hill, 1989.
- [35] KANG H, BARKEY M E, LEE Y. Evaluation of multiaxial spot weld fatigue parameters for proportional loading[J]. *International Journal of Fatigue*, 2000, 22(8): 691-702.
- [36] DONG P. A structural stress definition and numerical implementation for fatigue analysis of welded joints[J]. *International Journal of Fatigue*, 2001, 23(10): 865-876.
- [37] 闫坤. 基于结构应力的拉剪点焊接头疲劳强度分析[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2015.
- YAN Kun. Fatigue strength analysis of tensile-shear spot welded joints based on structural stress[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2015.
- [38] 吴晓. 钢材点焊接头疲劳测试与寿命预测方法研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2016.
- WU Xiao. Research on fatigue test and life prediction method of steel spot welding joints[D]. Chongqing: Chongqing University, 2016.
- [39] TADA H, PARIS P, IRWIN G. The stress analysis of cracks handbook[M]. 3th ed. New York: Del Research Corporation, 1985.
- [40] BROEK D. Elementary engineering fracture mechanics[M]. London: Martinus Nijhoff Publishers, 1982.
- [41] SWELLAM M H, KURATH P, LAWRENCE F V. Electric-potential-drop studies of fatigue crack development in tensile-shear spot welds[J]. *International Journal of Fatigue*, 1993, 15(1): 383-401.
- [42] SWELLAM M H, BANAS G, LAWRENCE F V. A fatigue design parameter for spot welds[J]. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 2010, 17(10): 1197-1204.
- [43] SWELLAM M H, LAWRENCE F V. A fatigue design parameter for spot welds[J]. *International Journal of Fatigue*, 1993, 15(3): 251-251.
- [44] SHEPPARD S D. Further refinement of a methodology for fatigue life estimation in resistance spot weld connections[J]. *Investigational New Drugs*, 1996, 14(3): 257-263.
- [45] RADAJ D, ZHANG S. Stress intensity factors for spot welds between plates of unequal thickness[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 1991, 39(2): 391-413.
- [46] RADAJ D, ZHANG S. Stress intensity factors for spot welds between plates of dissimilar materials[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 1992, 42(3): 407-426.
- [47] RADAJ D, ZHANG S. Simplified formulae for stress intensity factors of spot welds[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 1991, 40(1): 233-236.

- [48] MARASHI S P H, POURANVARI M, SALEHI M, et al. Overload failure behaviour of dissimilar thickness resistance spot welds during tensile shear test[J]. *Materials Science and Technology*, 2010, 26(10): 1220-1225.
- [49] POURANVARI M, MARASHI S P H. Key factors influencing mechanical performance of dual phase steel resistance spot welds[J]. *Science and Technology of Welding and Joining*, 2010, 15(2): 149-155.
- [50] SUN X, STEPHENS E V, KHALEEL M A. Effects of fusion zone size and failure mode on peak load and energy absorption of advanced high strength steel spot welds under lap shear loading conditions[J]. *Engineering Failure Analysis*, 2008, 15(4): 356-367.
- [51] 张小云. 双相钢点焊熔核界面撕裂失效机理与控制方法研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2008.
- ZHANG Xiaoyun. Study on the tear failure mechanism and control method of spot nugget interface in dual phase steel[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2008.
- [52] ZHANG H, WEI A, QIU X, et al. Microstructure and mechanical properties of resistance spot welded dissimilar thickness DP780/DP600 dual-phase steel joints[J]. *Materials & Design*, 2014, 54: 443-449.
- [53] 石燕栋. 铝合金点焊接头疲劳性能与寿命预测方法研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2013.
- SHI Yandong. Study on fatigue performance and life prediction method of aluminum alloy spot welded joints[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2013.
- [54] SUN X, STEPHENS E, DAVIES R, et al. Effects of failure modes on strength of aluminum resistance spot welds[C]// SAE 2005 World Congress & Exhibition. Detroit, Michigan, 2005.
- [55] SUN X, STEPHENS E, KHALEEL M. Effects of fusion zone size on failure modes and performance of advanced high strength steel spot welds[C]// SAE 2006 World Congress & Exhibition. Detroit, Michigan, 2006.
- [56] BARKEY M E, KANG H. Testing of spot welded coupons in combined tension and shear[J]. *Experimental Techniques*, 1999, 23(5): 20-22.
- [57] LONG X, KHANNA S K. Fatigue properties and failure characterization of spot welded high strength steel sheet[J]. *International Journal of Fatigue*, 2007, 29(5): 879-886.
- [58] LONG X, KHANNA S K. Fatigue performance of spot welded and weld bonded advanced high strength steel sheets[J]. *Science and Technology of Welding and Joining*, 2008, 13(3): 241-247.
- [59] LIN S H, PAN J, WUNG P, et al. A fatigue crack growth model for spot welds under cyclic loading conditions[J]. *International Journal of Fatigue*, 2006, 28(7): 792-803.
- [60] WANG B, DUAN Q Q, YAO G, et al. Fatigue fracture behaviour of spot welded B1500HS steel under tensile-shear load[J]. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 2015, 38(8): 914-922.
- [61] RADAKOVIC D J, TUMULURU M. Predicting resistance spot weld failure modes in shear tension tests of advanced high-strength automotive steels[J]. *Welding Journal*, 2008, 87(4): 96-105.
- [62] 王瑞杰, 尚德广, 刘泓滨. 两级加载下两焊点拉剪点焊接头的损伤[J]. *焊接学报*, 2010, 31(12): 77-80.
- WANG Ruijie, SHANG Deguang, LIU Hongbin. Damage of tension-shear spot welded joints of two solder joints under two-stage loading[J]. *Journal of Welding*, 2010, 31(12): 77-80.
- [63] 王瑞杰, 徐晓东, 刘泓滨. 基于固有频率的两级加载下拉剪点焊结构疲劳损伤分析[J]. *机械科学与技术*, 2010, 29(9): 1193-1197.
- WANG Ruijie, XU Xiaodong, LIU Hongbin. Fatigue damage analysis of spot welded structure with two-stage loading down-shearing based on natural frequency[J]. *Mechanical Science and Technology*, 2010, 29(9): 1193-1197.
- [64] 杨轶宁. 基于BP神经网络的点焊接头疲劳寿命预测研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2016.
- YANG Yining. Study on fatigue life prediction of spot welded joints based on BP neural network[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2016.
- [65] LIU W, FAN H, GUO X Z, et al. Mechanical properties of resistance spot welded components of high strength austenitic stainless steel[J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2015, 32(6): 561-565.
- [66] ESMAEILI F, RAHMANI A, BARZEGAR S, et al. Prediction of fatigue life for multi-spot welded joints with different arrangements using different multiaxial fatigue criteria[J]. *Materials & Design*, 2015, 72: 21-30.
- [67] PAN N, SHEPPARD S. Spot welds fatigue life prediction with cyclic strain range[J]. *International Journal of Fatigue*, 2002, 24(5): 519-528.
- [68] UWABA T, YANO Y, ITO M. Resistance spot weldability of 11Cr-ferritic/martensitic steel sheets[J].

- Journal of Nuclear Materials, 2012, 421(1-3): 132-139.
- [69] 韩长录. 超高强度点焊残余应力的测试与数值分析[D]. 北京: 北京工业大学, 2014.
- HAN Changlu. Test and numerical analysis of residual stress in spot welding of ultra high strength steel[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2014.
- [70] 黄志宏, 许彦强. 不锈钢车体结构设计及仿真分析要点[J]. 铁道车辆, 2012, 50(6): 14-17.
- HUANG Zhihong, XU Yanqiang. Key points of structural design and simulation analysis of stainless steel car body[J]. Railway Vehicles, 2012, 50(6): 14-17.
- [71] ADIB H. Fatigue life duration prediction for welded spots by volumetric method[J]. International Journal of Fatigue, 2004, 26(1): 81-94.
- [72] XU S, DENG X. An evaluation of simplified finite element models for spot-welded joints[J]. Finite Elements in Analysis and Design, 2004, 40(9-11): 1175-1194.
- [73] PALMONELLA M, FRISWELL M I, MOTTERSHEAD J E, et al. Guidelines for the implementation of the CWELD and ACM2 spot weld models in structural dynamics[J]. Finite Elements in Analysis and Design, 2004, 41(2): 193-210.
- [74] NAZRI N A, SANI M S M. Finite element normal mode analysis of resistance welding jointed of dissimilar plate hat structure[J]. Iop Conference Series: Materials Science and Engineering, 2017, 257: 012059.
- [75] 杨明海. 改善焊接结构疲劳性能新技术[J]. 企业科技与发展, 2009, 1(9): 15.
- YANG Minghai. New technology for improving fatigue performance of welded structures[J]. Enterprise Technology and Development, 2009, 1(9): 15.
- [76] LEE Y L, PAN J, HATHAWAY R B, 等. 疲劳试验测试分析理论与实践[M]. 北京: 机械工业出版社, 2011.
- LEE Y L, PAN J, HATHAWAY R B, et al. Fatigue testing and analysis theory and practice[M]. Beijing: China Machine Press, 2011.
- [77] POLLARD B. Fatigue strength of spot welds in Titanium-bearing Hsla steels[C]// SAE International SAE International Congress and Exposition, SAE Technical Paper Series, 1982, 1.
- [78] LIN S H, PAN J, WUNG P, et al. A fatigue crack growth model for spot welds under cyclic loading conditions[J]. International Journal of Fatigue, 2006, 28(7): 792-803.
- [79] 吴冰. 不锈钢焊接接头疲劳失效评定方法研究[D]. 天津: 天津大学, 2004.
- WU Bing. Research on fatigue failure assessment methods for stainless steel welded joints[D]. Tianjin: Tianjin University, 2004.
- [80] ZAMZAMI I A, SUSMEL L. On the accuracy of nominal, structural, and local stress based approaches in designing aluminium welded joints against fatigue[J]. International Journal of Fatigue, 2017, 101(2): 137-158.
- [81] 周张义, 李芾, 卜继玲. 基于名义应力的焊接结构疲劳强度评定方法研究[J]. 内燃机车, 2007, 1(7): 1-4.
- ZHOU Zhangyi, LI Fu, BU Jiling. Research on fatigue strength assessment method of welded structure based on nominal stress[J]. Diesel Locomotive, 2007, 1(7): 1-4.
- [82] LEE Y L, LU M W. Fatigue-reliability analysis of resistance spot-welds[C]// Reliability and Maintainability Symposium, 1994.
- [83] 李娟. 镁/铝合金焊接接头疲劳评定的热点应力法研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2011.
- LI Juan. Research on hot spot stress method for fatigue evaluation of magnesium/aluminum alloy welded joints[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2011.
- [84] 王斌杰. 高速列车结构热点应力疲劳评定方法及应用研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2008.
- WANG Binjie. Research on hot spot stress fatigue evaluation method and application of high-speed train structures[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2008.
- [85] 马青娜, 邵飞, 高磊. 铝合金焊接接头疲劳研究进展综述[J]. 建筑结构, 2018, 48(S2): 1022-1026.
- MA Qingna, SHAO Fei, GAO Lei. Review of fatigue research progress of aluminum alloy welded joints[J]. Building Structure, 2018, 48(S2): 1022-1026.
- [86] 龚琼琼. 基于结构应力的焊接接头疲劳评估[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2013.
- GONG Qiongqiong. Fatigue evaluation of welded joints based on structural stress[D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2013.
- [87] 揭志羽, 李亚东, 卫星, 等. 复杂应力场下焊接接头疲劳寿命评估的热点应力法[J]. 中国公路学报, 2017, 30(5): 97-103.
- JIE Zhiyu, LI Yadong, WEI Xing, et al. Hot stress method for fatigue life evaluation of welded joints in complex stress fields[J]. Journal of China Highway, 2017, 30(5): 97-103.
- [88] 闫坤, 王瑞杰. 最大主应力预测点焊疲劳寿命研究[J]. 机械科学与技术, 2016, 35(9): 1387-1390.

- YAN Kun, WANG Ruijie. Research on fatigue life of spot welding with maximum principal stress[J]. Mechanical Science and Technology, 2016, 35(9): 1387-1390.
- [89] 廖平, 肖林, 卫星, 等. 主梁新细节的疲劳寿命预测及参数分析[J]. 西南交通大学学报, 2016, 51(4): 639-644.
- LIAO Ping, XIAO Lin, WEI Xing, et al. Fatigue life prediction and parameter analysis of new details of the main beam[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2016, 51(4): 639-644.
- [90] 王文静, 白锦仪, 刘伟. 基于热点应力法的焊接结构疲劳评估[J]. 北京交通大学学报, 2017, 41(6): 82-87.
- WANG Wenjing, BAI Jinyi, LIU Wei. Fatigue evaluation of welded structures based on hot spot stress method[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2017, 41(6): 82-87.
- [91] RADAJ D. Design and analysis of fatigue resistant welded structures[M]. Cambridge: Abington Publishing, 1990.
- [92] XIAO Z G, YAMADA K. A method of determining geometric stress for fatigue strength evaluation of steel welded joints[J]. International Journal of Fatigue, 2004, 26(12): 1277-1293.
- [93] LIU R, LIU Y Q, JI B H, et al. Hot spot stress analysis on rib-deck welded joint in orthotropic steel decks[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2014, 97: 1-9.
- [94] HOBACHER A F. New developments at the recent update of the IIW recommendations for fatigue of welded joints and components[J]. Steel Construction, 2010, 3(4): 231-242.
- [95] 杨新岐, 张艳新, 霍立兴, 等. 焊接接头疲劳评定的局部法研究现状[J]. 焊接学报, 2003, 24(3): 82-86.
- YANG Xinqi, ZHANG Yanxin, HUO Lixing, et al. Research status of local method for fatigue evaluation of welded joints[J]. Journal of Welding, 2003, 24(3): 82-86.
- [96] LAZZARIN P, LIVIERI P. Notch stress intensity factors and fatigue strength of aluminium and steel welded joints[J]. International Journal of Fatigue, 2001, 23(3): 225-232.
- [97] LAZZARIN P, TOVO R. A notch intensity factor approach to the stress analysis of welds[J]. Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, 1998, 21(9): 1089-1103.
- [98] TAYLOR D. Crack modeling: A technique for the fatigue design of components[J]. Engineering Failure Analysis, 1996, 3(2): 129-136.
- [99] TAYLOR D, CIEPALOWICZ A J, ROGERS P, et al. Prediction of fatigue failure in a crank shaft using the technique of crack modelling[J]. Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, 1997, 20(1): 13-21.
- [100] OSTASH O P, PANASYUK V V. Fatigue process zone at notches[J]. International Journal of Fatigue, 2001, 23(7): 627-636.
- [101] TAYLOR D, BARRETT N, LUCANO G. Some new methods for predicting fatigue in welded joints[J]. International Journal of Fatigue, 2002, 24(5): 509-518.
- [102] MCDIARMID D L. Fatigue under out-of-phase bending and torsion[J]. Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures, 1987, 9(6): 457-475.
- [103] QYLAFKU G, AZARI Z, KADI N, et al. Application of a new model proposal for fatigue life prediction on notches and key-seats[J]. International Journal of Fatigue, 1999, 21(8): 753-760.
- [104] BERTINI L, FRENDI F, MARULO G. Fatigue life assessment of welded joints by two local stress approaches: The notch stress approach and the peak stress method[J]. International Journal of Fatigue, 2018, 110(5): 246-253.
- [105] LIU W, YAO X, CHEN X. A local stress approach to predict the fatigue life of the U-notched PMMA plate at different temperatures[J]. International Journal of Fatigue, 2017, 103(10): 436-443.
- [106] SATOH T, ABE H. Non-destructive detection of fatigue crack in spot-welded joint specimens[J]. Quarterly Journal of the Japan Welding Society, 1986, 4(4): 666-673.
- [107] RADAJ D, LEHRKE H P, GREULING S. Theoretical fatigue-effective notch stresses at spot welds[J]. Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, 2001, 24(5): 293-308.
- [108] RADAJ D, SONSINO C M, FRICKE W. Recent developments in local concepts of fatigue assessment of welded joints[J]. International Journal of Fatigue, 2009, 31(1): 2-11.
- [109] PARIS P, ERDOGAN F. A critical analysis of crack propagation laws[J]. Journal of Basic Engineering, 1963, 85(4): 528-533.
- [110] 刘会杰, 闫久春, 魏艳红. 焊接冶金与焊接性[M]. 北京: 机械工业出版社, 2007.
- LIU Huijie, YAN Jiuchun, WEI Yanhong. Welding

- metallurgy and weldability[M]. Beijing: China Machine Press, 2007.
- [111] ZHANG J, DONG P, GAO Y. Evaluation of stress intensity factor-based predictive technique for fatigue life of resistance spot welds[C]// SAE 2001 World Congress, 2001.
- [112] 左银龙. 301L 冷轧不锈钢点焊接头疲劳断裂分析[D]. 北京: 北京交通大学, 2012.
- ZUO Yinlong. Fatigue fracture analysis of 301L cold rolled stainless steel spot welded joints[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2012.
- [113] ZHANG S. Approximate stress intensity factors and notch stresses for common spot-welded specimens[J]. Welding Journal, 1999, 78(5): 173-179.
- [114] NEWMAM J A, DOWLING N E. A crack growth approach to life prediction of spot-welded lap joints[J]. Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, 1998, 21(9): 1123-1132.
- [115] LEE H, CHOI J. Overload analysis and fatigue life prediction of spot-welded specimens using an effective J-integral[J]. Mechanics of Materials, 2005, 37(1): 19-32.
- [116] 程亚军, 张春玉, 谢素明. 轨道车辆不锈钢车体焊点强度评估方法研究[J]. 大连交通大学学报, 2018, 39(2): 43-47.
- CHENG Yajun, ZHANG Chunyu, XIE Suming. Study on the evaluation method of welding joint strength of stainless steel body of rail vehicle[J]. Journal of Dalian Jiaotong University, 2018, 39(2): 43-47.
- [117] 俞壮壮, 孙振轩. 基于主 S-N 曲线法的 T 形接头疲劳评估和试验验证[J]. 计算机辅助工程, 2018, 27(2): 18-22.
- YU Zhuangzhuang, SUN Zhenxuan. Fatigue evaluation and experimental verification of T-joints based on the main S-N curve method[J]. Computer Aided Engineering, 2018, 27(2): 18-22.
- [118] 孙云, 朱黎明, 王龙轩, 等. 基于等效结构应力法的铸钢分叉节点环形对接焊缝的疲劳分析[J]. 应用力学学报, 2019, 36(1): 183-189.
- SUN Yun, ZHU Liming, WANG Longxuan, et al. Fatigue analysis of circular butt welds of forked nodes of cast steel based on equivalent structural stress method[J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2019, 36(1): 183-189.
- [119] DONG P, HONG J K, OSAGE D A. Master S-N curve method for fatigue evaluation of welded components[J]. Welding Research Council Bulletin, 2002, 474: 1-44.
- [120] 王亦军, 董奇志, 肖守讷, 等. 等效结构应力法的焊接疲劳评估[J]. 河南科技大学学报, 2017, 38(4): 16-19.
- WANG Yijun, DONG Qizhi, XIAO Shoune, et al. Assessment of welding fatigue by equivalent structural stress method[J]. Journal of Henan University of Science & Technology, 2017, 38(4): 16-19.
- [121] KANG H T. Fatigue prediction of spot welded joints using equivalent structural stress[J]. Materials & Design, 2007, 28(3): 837-843.
- [122] 朱涛. 汽车结构中的点焊疲劳寿命计算[C]// 中国 CAE 工程分析技术年会暨全国计算机辅助工程, 2005.
- ZHU Tao. Calculation of spot welding fatigue life in automotive structures[C]// China CAE Engineering Analysis Technology Annual Meeting and National Computer Aided Engineering, 2005.
- [123] 杨铁宁, 王瑞杰, 闫坤. 结构应力法预测点焊试件疲劳寿命[J]. 电焊机, 2016, 46(6): 50-53.
- YANG Yining, WANG Ruijie, YAN Kun. Structure stress method for predicting fatigue life of spot welding test pieces[J]. Electric Welder, 2016, 46(6): 50-53.
- [124] DONG P. Mesh-insensitive structural stress method for fatigue evaluation of welded structures[R]. Battelle Memorial Institute, Battelle SS JIP Training Course Materials, 2005.
- [125] KANG H T, DONG P, HONG J K. Fatigue analysis of spot welds using a mesh-insensitive structural stress approach[J]. International Journal of Fatigue, 2007, 29(8): 1546-1553.
- [126] MIRSALEHI S E, KOKABI A H. Fatigue life estimation of spot welds using a crack propagation-based method with consideration of residual stresses effect[J]. Materials Science & Engineering, 2010, 527(23): 6359-6363.
- [127] PARK J M, KANG H T. Prediction of fatigue life for spot welds using back-propagation neural networks[J]. Materials and Design, 2007, 28(10): 2577-2584.
- [128] KANG H, BARKEY M E. Fatigue life estimation of spot welded joints using an interpolation/extrapolation technique[J]. International Journal of Fatigue, 1999, 21(8): 769-777.
- [129] 王瑞杰, 尚德广, 李力森, 等. 基于固有频率变化的点焊接头疲劳寿命预测[J]. 北京工业大学学报, 2007, 33(12): 1252-1256.
- WANG Ruijie, SHANG Deguang, LI Lisen, et al. Fatigue life prediction of spot welded joints based on natural

- frequency changes[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2007, 33(12): 1252-1256.
- [130] 湛兰, 秦湘阁. 不锈钢车体侧墙电阻点焊接头疲劳寿命预测[J]. 佳木斯大学学报, 2017, 35(5): 799-802.
- ZHAN Lan, QIN Xiangge. Fatigue life prediction of resistance spot welding joints of stainless steel car body side walls[J]. Journal of Jiamusi University, 2017, 35(5): 799-802.
- [131] 侯晓丹, 王瑞杰, 雷星海. 基于累积损伤理论的 ST12 钢 T 型点焊件寿命研究[J]. 热加工工艺, 2018, 47(19): 196-201.
- HOU Xiaodan, WANG Ruijie, LEI Xinghai. Research on life of T-spot weldments of ST12 steel based on cumulative damage theory[J]. Hot Working Technology, 2018, 47(19): 196-201.
- [132] ZHANG G, RICHTER B. A new approach to the numerical fatigue life prediction of spot-welded structure[J]. Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, 2008, 23(6): 499-508.
-
- 作者简介:** 杨龙, 男, 1993 年出生, 博士研究生。主要研究方向为车辆结构强度及可靠性。
E-mail: yanglong6788@163.com
- 阳光武(通信作者), 男, 1977 年出生, 研究员。主要研究方向为机车车辆设计理论、疲劳可靠性及动力学。
E-mail: gwyang@home.swjtu.edu.cn