

重载机车钩舌裂纹扩展及寿命预测方法研究

戴云龙, 昌超, 欧阳剑波, 高雪山, 史开志, 张梓乐

(华东交通大学交通智能运维技术与装备教育部重点实验室, 江西 南昌 330013)

摘要: 针对重载工况下车钩钩舌结构疲劳裂纹扩展与寿命评估问题, 本文提出一种基于应力强度因子 ΔK 演化的裂纹扩展寿命预测方法。对某机车车钩检修数据进行统计分析, 识别裂纹高发区域及其空间分布特征; 建立车钩钩舌三维有限元模型, 获取典型载荷工况下的应力场分布规律, 并结合裂纹萌生区域确定关键分析部位。引入三维表面裂纹模型, 计算裂纹前缘应力强度因子分布特征, 并结合 Paris 裂纹扩展定律建立裂纹扩展演化模型, 构建基于积分形式的疲劳寿命预测方法。研究结果表明: 裂纹主要集中于销孔边缘、牵引凸缘过渡区域, 其分布与有限元高应力区域具有空间一致性; 裂纹前缘 ΔK 呈显著非均匀分布特征, 并在牵引凸缘的裂纹表面约 1mm 区域出现峰值集中现象; 随着载荷偏置量增加, ΔK 空间分布发生重构, 裂纹扩展速率加快, 导致结构疲劳寿命显著降低。相比传统名义应力或经验损伤模型, 本文方法能够描述裂纹前缘 ΔK 的三维非均匀演化过程, 实现复杂载荷偏置条件下裂纹扩展驱动力与剩余寿命的联系。

关键词: 车钩钩舌; 裂纹扩展; 应力强度因子; Paris 模型; 寿命预测

中图分类号: U270.34

文献标志码: A

Study on Crack Growth and Fatigue Life Prediction of Heavy-Haul Locomotive Coupler Knuckle

Dai Yunlong, Chang Chao, Ouyang Jianbo, Gao Xueshan, Shi Kaizhi, Zhang Zile

(Key Laboratory of Transportation Intelligent Operation and Maintenance Technology and Equipment, East China Jiaotong University, 330013, China)

Abstract: To address fatigue crack propagation and life assessment of coupler knuckles under heavy-haul conditions, a crack growth life prediction method based on stress intensity factor range (ΔK) evolution is proposed. First, statistical analysis of in-service locomotive coupler data is performed to identify crack-prone regions and spatial distribution. A three-dimensional finite element model of the coupler knuckle is established to obtain stress field under loading conditions, and key analysis regions are determined with crack initiation locations. A three-dimensional surface crack model is introduced to evaluate stress intensity factor distribution along the crack front. Crack growth behavior is described using Paris law, and an incremental integration-based fatigue life prediction model is developed. Results show that cracks are mainly concentrated at the pin hole edge and traction lug transition region, consistent with high-stress regions from finite element analysis. The stress intensity factor range ΔK shows non-uniform distribution along the crack front, with peak concentration within about 1 mm beneath the surface. With increasing load eccentricity, the ΔK distribution is reconfigured, leading to higher crack growth rate and reduced fatigue life. The proposed method enables fatigue life prediction from crack initiation to failure. Compared with traditional nominal stress or empirical damage models, the proposed method describes three-dimensional non-uniform evolution of ΔK at the crack front and establishes relation between crack driving force and remaining life under load eccentricity conditions.

Key words: Coupler knuckle; Crack growth; Stress intensity factor; Paris law; Fatigue life prediction

重载铁路因其运量大、效率高, 在我国“西煤东运”能源运输体系中占据核心地位。随着重载列车运行速度的提升以及轴重和牵引吨位的持续增加, 车辆关键承载部件长期处于高强度交变载荷作用下, 其服役安全性面临前所未有的挑战。车钩作为传递纵向牵引力与冲击载荷的关键部件, 在重载运行过程

中易产生疲劳裂纹,其疲劳性能直接关系到列车运行安全^[1]。在实际工程中,车钩的几何突变部位易形成应力集中,服役过程中不可避免地存在微小缺陷,这些初始缺陷在循环载荷作用下易发展为疲劳裂纹,导致结构失效。目前工程检修主要是拆卸后的无损检测方法,发现裂纹即进行更换或修复,这缺乏对裂纹扩展行为及剩余寿命的定量评估,导致维修成本高且资源利用率低。因此,开展车钩裂纹扩展行为及寿命预测研究,深入掌握裂纹萌生与扩展规律,推动维修模式由传统的里程修向基于实际服役状态的状态修转变,在保障重载列车运行安全的同时,有效降低运维成本与资源消耗。

针对车钩疲劳性能问题,国内外学者从寿命评估、结构优化及裂纹扩展与失效机理等方面开展了系统研究。在寿命评估上,早期研究多基于名义应力法与累积损伤理论开展分析。Infante等^[2]结合线路实测应力数据与有限元分析,基于名义应力法对车钩疲劳寿命进行评估,指出关键承载区域的表面强化处理可有效延缓疲劳损伤演化。P.R. Thics等^[3]基于实测载荷时间历程,采用雨流计数方法构建载荷谱,并结合累积损伤理论实现剩余寿命预测,为工程应用提供了可行路径。耿平^[5]对车辆铸钢件疲劳寿命预测中AAR与FKM标准进行了对比分析,结果表明不同标准在工程计算中具有较好一致性。王悦东^[6]针对传统Goodman曲线的局限性提出改进方法,并结合有限元分析验证其在安全系数评估中的有效性。Ren^[8]等基于断裂力学方法,结合材料疲劳裂纹扩展参数试验、含裂纹有限元模型及实测载荷谱,对17型重载车钩开展剩余寿命预测研究,并对临界裂纹尺寸及检修周期进行了评估。秦天宇^[9]等以16/17型车钩钩尾框为对象,通过材料试验获取锻造E级钢断裂参数,结合含裂纹有限元模型与实测载荷谱,基于NASGRO方程开展剩余寿命预测,并分析裂纹形貌对寿命演化的影响,为损伤容限评估及检修优化提供参考。吴圣川^[10]从车辆服役安全角度出发,融合名义应力法与损伤容限理念,开展裂纹扩展寿命预测与结构完整性评估研究,为关键部件寿命分析提供理论支撑。现有寿命评估研究多基于名义应力或经验统计,对裂纹扩展阶段局部断裂力学行为的描述能力有限,难以反映复杂应力场条件下裂纹扩展驱动力的演化规律。

在结构优化与材料改进方面,研究主要聚焦应力集中抑制与局部几何优化。Seshu等^[11]针对E型钩舌,通过静强度分析识别应力集中区域,并基于响应面法优化结构参数,显著提升疲劳寿命。在国内的寿命评估方面,尹敏轩^[12]通过对比国产与国外车钩,指出铸造工艺差异引起的表面质量劣化是导致钩舌疲劳寿命偏低的重要因素。在结构改进方面,徐京涛等^[13]以16型、17型车钩为对象,提出了一种单车钩强度分析方法,通过试验与有限元结果对比验证了模型准确性,并分析了关键参数对应力分布的影响规律,为车钩结构强度分析与局部优化设计提供新方法。丁浩谔^[14]等针对高速列车碰撞过程中车端接触与车钩失稳响应问题,建立了考虑车端接触及车钩失稳效应的列车三维碰撞动力学模型,实现了不同工况下车钩系统动力响应分析,为车钩结构设计优化及复杂载荷工况下服役性能研究提供了理论基础。

在裂纹扩展与失效机理方面,相关研究逐步引入基于断裂力学的分析框架。Morgado等^[15]通过三点弯曲试验获得材料裂纹扩展速率参数,并用于含裂纹构件寿命评估,指出初始裂纹对服役寿命具有显著影响。现有结构优化研究主要关注静强度与疲劳寿命提升,对裂纹扩展路径及裂纹扩展阶段寿命演化机制关注相对不足。白淑萍^[16]、肖利民^[17]等基于断口形貌与应力状态分析,指出下牵引台突缘由于显著应力集中成为裂纹萌生的主要区域。采用局部应力应变法结合小样本统计方法,对钩体疲劳可靠性进行评估;杨海宾^[18]基于实测载荷谱与Franc3D仿真,确定了关键部位的临界裂纹尺寸。目前针对重载车钩裂纹扩展行为的研究仍主要集中于局部裂纹分析,对复杂载荷偏置条件下裂纹前缘 ΔK 空间分布及寿命响

应规律缺少系统研究。

现有针对铁路货车车钩的疲劳研究多基于名义应力方法或经验模型，虽在工程应用中具有一定实用性，但在裂纹扩展驱动机制刻画及复杂应力场耦合方面仍存在不足。尽管应力强度因子研究已形成以数值模拟为主导、实验验证为支撑的发展体系，但针对重载工况下车钩关键部位裂纹扩展行为的系统研究仍较为缺乏。本文基于断裂力学理论，围绕车钩裂纹扩展行为及寿命预测问题，开展如下研究：通过有限元方法获取不同工况下关键部位应力场分布，引入应力强度因子表征裂纹尖端力学状态，并结合 Paris 模型分析裂纹扩展速率演化规律，再建立裂纹扩展寿命预测模型，实现对车钩剩余寿命的定量评估。

1 裂纹特征分析

为分析重载机车车钩钩舌裂纹的空间分布规律及其扩展特征，对某铁路分公司两万吨交流电力机车某型车钩历史裂纹故障进行调研，统计 2023—2025 年间检修过程中经磁粉探伤筛选得到的典型裂纹数据，并结合现场裂纹形貌特征，对裂纹高发区域及其形成机制进行分析。再进一步结合结构受力特征与裂纹扩展规律，确定本研究裂纹扩展与寿命预测的研究对象。

1.1 裂纹统计

由统计结果表 1 可知，裂纹主要分布于钩舌销孔区域、上下牵引凸缘区域及挽面接触区域。销孔和上下牵引凸缘区域附近裂纹数量较多，其次为挽面接触区。整体来看，裂纹呈现出明显的局部集中分布特征。

表 1 钩舌裂纹损伤分布表
Tab.1 Crack Damage Distribution of the Coupler Knuckle

损伤位置	2023 年	2024 年	2025 年	合计
钩舌销孔区域	19	9	15	43
钩舌挽面区域	10	6	12	28
上下牵引凸缘区域	11	8	23	42
合计	40	23	50	113

从年度变化情况来看，各区域裂纹数量虽存在一定波动，但主要分布区域未发生明显变化，始终集中于这几个关键部位，表明裂纹分布具有一定的区域稳定性。并且该裂纹集中区域均对应结构几何突变位置或载荷传递关键路径，在长期交变载荷作用下易形成局部应力集中，成为裂纹优先萌生区域。为了分析不同区域裂纹形成与扩展特征，还需要对典型裂纹区域进行现场形貌观察与对比分析。

1.2 形貌特征

现场裂纹形貌表明，钩舌表面裂纹主要分布于上下牵引凸缘区域、销孔区域以及挽面接触区域，不同区域裂纹在扩展形式及损伤特征方面存在明显差异。

1) 牵引凸缘区域裂纹形貌

在钩舌牵引凸缘内缘过渡区域，可观察到沿周向分布的线状裂纹，裂纹多呈连续或断续扩展，且与表面磨损痕迹基本一致；局部区域伴随材料剥落及挤压翻边现象，反映出明显的接触疲劳损伤特征，如图 1 所示。

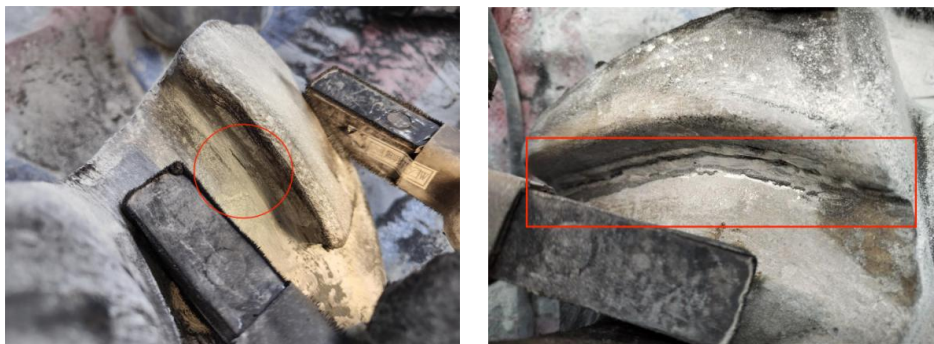


图1 钩舌牵引凸缘裂纹形貌

Fig.1 Crack Morphology at the Traction Lug of the Coupler Knuckle

该区域属于结构几何过渡位置，同时也是车钩纵向载荷传递的重要路径。在长期交变牵引载荷作用下，局部区域易形成较高应力集中，从而诱发裂纹萌生与稳定扩展。

2) 销孔区域裂纹形貌

在销孔区域，孔口边缘存在崩边缺口，缺口周围分布有细小裂纹，孔壁局部可见裂纹扩展及剥蚀迹象，表明裂纹多起源于孔口边界，并沿孔壁向内部扩展，如图2所示。



图2 钩舌销孔区域裂纹形貌

Fig.2 Crack Morphology at the Pin Hole Region of the Coupler Knuckle

销孔区域裂纹受孔壁接触应力、装配间隙及局部磨损共同影响，其裂纹扩展方向具有一定随机性，并存在多裂纹相互干扰现象，因此裂纹扩展路径相对复杂。

3) 挽面接触区域裂纹形貌

在挽面接触区，表面主要表现为点蚀与浅表裂纹，伴随明显擦伤及金属流动痕迹，反映出在长期接触载荷作用下形成的接触疲劳损伤特征，如3所示。



图3 钩舌挽面接触区损伤形貌

Fig.3 Damage Morphology at the Contact Region of the Knuckle Striking Face

该区域裂纹主要与局部接触应力及摩擦磨损相关，其裂纹深度整体较浅，但在长期循环载荷作用下仍可能进一步扩展并影响结构服役安全性。

根据裂纹统计结果与现场形貌特征可以发现，不同裂纹区域在形成机理、扩展模式及受力特征方面存在明显差异。其中，销孔区域裂纹主要受接触与装配因素影响，裂纹扩展路径复杂；而牵引凸缘区域裂纹则表现出较为稳定的扩展特征。所以还需要结合结构受力状态与裂纹扩展行为，确定研究重点对象。

1.3 主要研究对象选择

统计结果表明销孔区域和上下牵引凸缘区域为裂纹高发部位，但在裂纹扩展机理及建模适用性方面存在显著差异。销孔区域裂纹受孔壁接触应力、装配间隙及多源裂纹相互作用等因素影响，其裂纹扩展路径具有明显的三维非稳定扩展特征。并且销孔区域局部接触状态会随载荷变化不断发生演变，导致裂纹扩展方向及裂纹前缘应力场具有较强随机性，销孔区域裂纹扩展时还可能有局部接触与多裂纹作用现象，难以形成稳定的裂纹前缘应力强度因子演化规律。所以该区域裂纹不能采用统一裂纹扩展模型进行描述，也不能进行疲劳寿命预测分析。而牵引凸缘区域受力路径相对明确，裂纹扩展模式更符合典型I型张开裂纹特征，裂纹扩展路径相对稳定，更适合开展基于断裂力学的裂纹扩展与寿命预测研究。所以本文选取牵引凸缘区域作为重点研究对象。

2 有限元建模与应力分析

车钩三维几何模型来源于工作前期逆向建模与重构结果。钩舌区域由于几何突变与载荷传递集中，是典型的疲劳薄弱区，利用车钩模型进行有限元离散与应力分析，用于研究典型工况下车钩钩舌的应力分布特征与演化规律。

2.1 有限元模型构建

基于三维重构的车钩实体模型，模型如图4所示。在HyperMesh中完成有限元前处理，检查几何模型完整性，确保无自由边、重复面及几何缺陷。建模过程中采用四面体单元对模型进行离散划分，并在销孔边缘、牵引凸缘及护销孔等应力集中区域进行局部加密，提高应力梯度的捕捉精度。如图5所示。

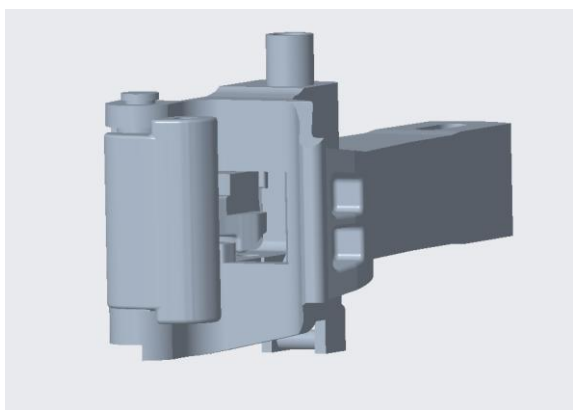


图4 车钩三维重建实体模型
Fig.4 3D reconstructed solid model of the coupler

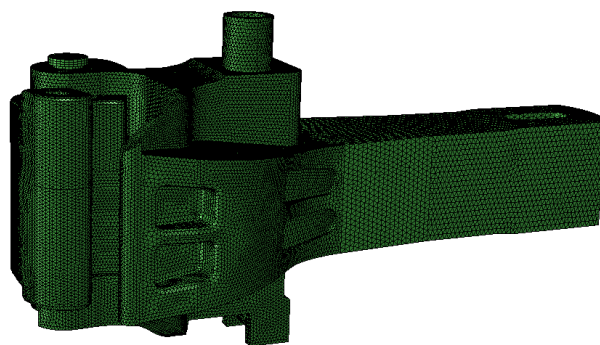


图5 某型车钩有限元网格模型
Fig.5 Finite Element Mesh Model of the Type Coupler

车钩材料选用铸造E级钢，力学性能参数如表2所示。为保证材料参数的工程可靠性与物理一致性，弹性模量、屈服强度及泊松比等关键参数均基于标准拉伸试验获得，再与典型铸造E级钢材料数据库进行对比验证，该材料输入参数也考虑满足断裂力学分析的后续计算需求。

表 2 E 级铸钢力学特性
Table.2 Mechanical Properties of Grade E Cast Steel

弹性模量 E/MPa	强度极限 σ_b / MPa	屈服极限 σ_s / MPa	泊松比 μ
204 639	806	640	0.28

2.2 边界条件与载荷工况设置

模拟车钩在实际服役过程中的受力约束状态，对边界条件的设定如图 6 所示，设定为：①约束钩舌外侧的 y、z 方向位移，以等效与其相连的车钩对其的约束作用；②约束钩舌与锁铁接触面的 y 方向位移，以等效车钩闭锁状态时锁铁对钩舌的约束作用；③钩尾框全约束，以等效与其相连的车辆对其的约束作用。

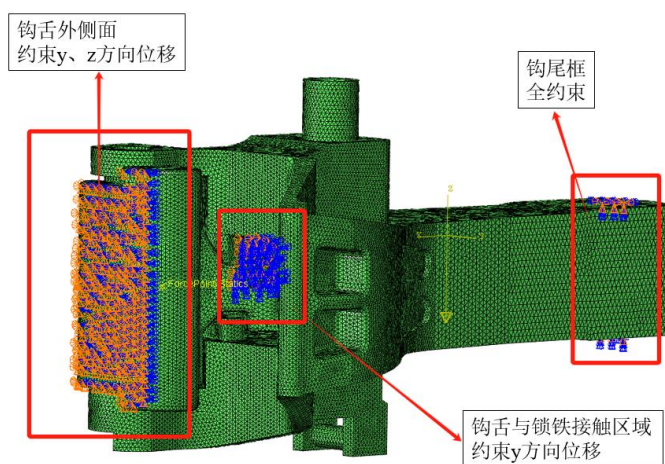


图 6 边界条件设置

Fig.6 Boundary Condition Setup

载荷方面，根据重载列车运行工况，分别施加拉伸与压缩载荷。纵向载荷范围为 200kN~1800kN，同时施加 10kN 横向力与 20kN 垂向力，并考虑重力作用 (9.81 m/s^2 , z 方向)。载荷施加示意图如图 7 所示。

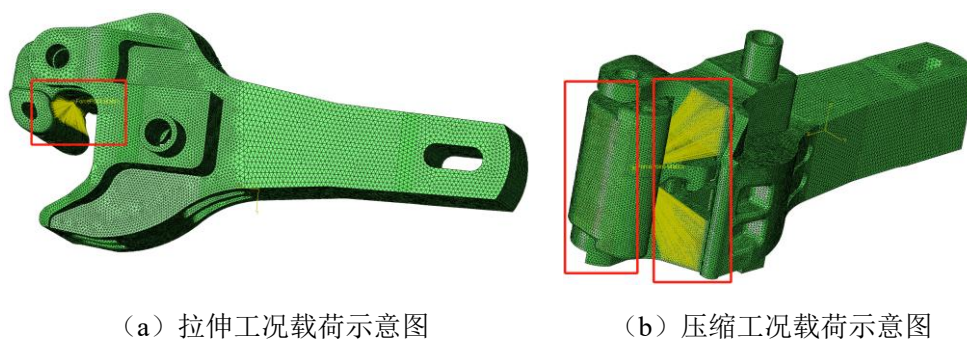


图 7 载荷施加示意图

Fig.7 Schematic Diagram of Load Application

2.3 应力场分布特征分析

在完成 200kN 到 1800kN 全载荷范围的有限元计算后，从中选取典型载荷工况进行重点分析。依据结构响应阶段及应力演化特征筛选：约 400kN 为结构由弹性阶段向弹塑性阶段转变的临界点，当载荷增至 1000kN 时，应力水平已接近材料屈服极限，能够表征典型服役状态下的受力特征；提高至 1500kN，应力集中显著增强且塑性区明显扩展，可反映结构在接近极限承载状态下的力学响应。因此选取具有代

表性的拉伸与压缩工况对比分析,结果如图8所示。其中,图8(a)和(b)为1000kN拉伸工况下钩体与钩舌的应力分布,图8(c)为1500kN拉伸工况钩舌应力分布,图8(d)为1500kN压缩工况钩舌应力分布。

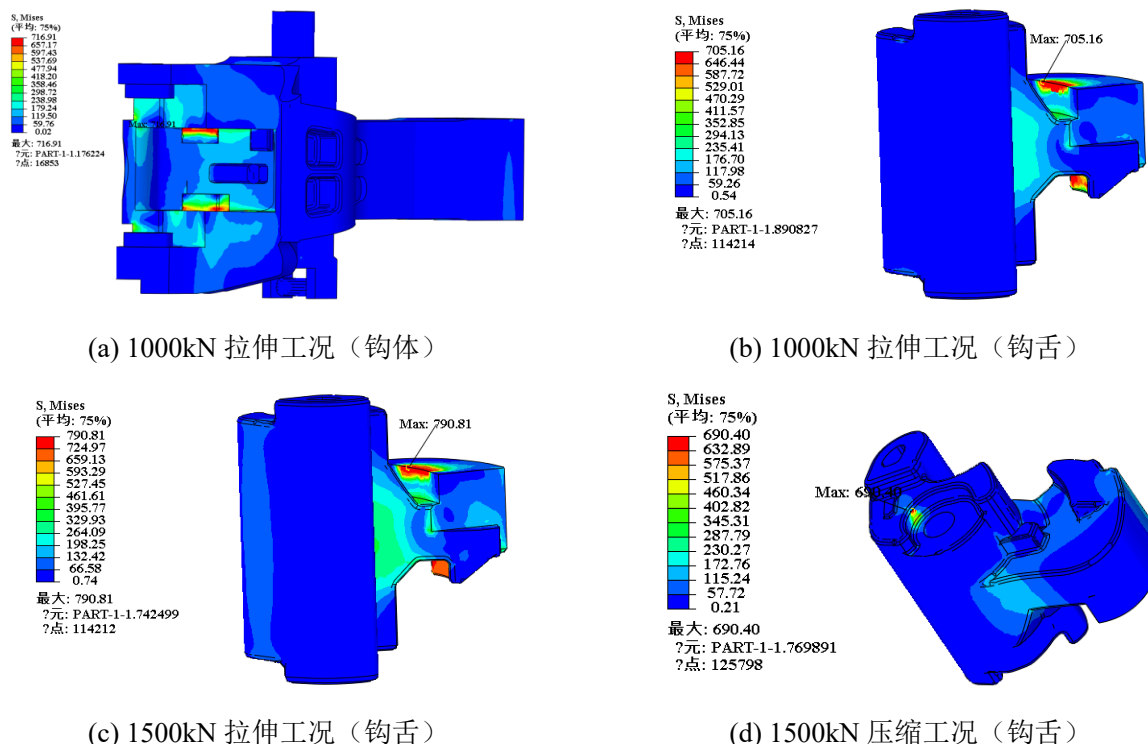


图8 车钩典型工况应力云图

Fig.8 Stress Contour Plot of the Coupler under Typical Operating Conditions

从整体应力分布来看,车钩结构在不同载荷工况下均表现出明显的局部应力集中现象,高应力主要集中于牵引凸缘过渡区域,这区域为结构几何突变及载荷传递路径变化位置。同时钩体在整体结构中主要起到载荷传递与支撑作用,其应力水平整体低于钩舌关键承载区域,所以后续分析重点针对钩舌区域展开。

在1200kN拉伸工况下,车钩整体处于弹塑性响应阶段。图8(a)和(b)显示,应力在钩体与钩舌之间连续传递,载荷路径清晰,最大应力主要出现在钩体上凸缘及钩舌下凸缘附近,此时最大应力已接近材料屈服极限,局部区域开始出现塑性发展趋势,但整体仍保持较为稳定的应力分布状态。当载荷增至1500kN拉伸工况时,如图8(c)显示,应力集中现象增强,最大应力稳定分布于钩舌牵引凸缘根部及销孔边缘区域,局部区域塑性区扩展,应力增长趋势趋于平缓,未出现明显的失稳扩展。在1500kN压缩工况下,如图8(d)显示,应力传递路径发生明显改变,应力主要集中于钩舌销孔区域,但整体峰值应力水平显著低于同载荷拉伸工况。

对比两种工况可以发现,拉伸工况下结构整体应力水平高于压缩工况,且危险区域更加集中于钩舌牵引凸缘及销孔区域;压缩工况则主要集中于钩舌销孔位置。该结果表明车钩在不同载荷下具有显著的载荷路径依赖性,其高应力区域与结构几何突变位置高度一致。

再结合第一节裂纹统计结果可知,有限元分析得到的高应力区域与实际裂纹高发区域具有良好一致性,尤其是牵引凸缘及钩舌销孔区域,既是应力集中区,也是裂纹萌生与扩展的主要区域,验证了应力场分布对裂纹形成与扩展的影响。

3 裂纹扩展与寿命预测

在前文对裂纹易发区域及结构受力特性的分析, 确定裂纹扩展的典型萌生位置与输入条件。构建裂纹尖端应力强度因子计算模型, 并引入裂纹扩展判据与数值积分方法, 实现裂纹从萌生到失稳全过程的模拟与分析, 最后通过裂纹扩展路径与载荷循环关系完成车钩钩舌结构的疲劳寿命评估。

3.1 裂纹扩展建模方法

3.1.1 三维应力强度因子计算

疲劳裂纹扩展过程由裂纹尖端应力强度因子控制, 在循环载荷作用下, 裂纹扩展驱动力通常采用应力强度因子幅值 ΔK , 如式 (1) 所示, 其变化规律直接决定裂纹未来扩展行为。

$$\Delta K = K_{\max} - K_{\min} \quad (1)$$

针对车钩钩舌结构几何复杂、受力状态多轴耦合的特点, 采用三维裂纹模型对裂纹前沿应力强度因子进行计算。结合第二节有限元分析结果图 8 可知, 应力集中主要分布于钩舌销孔边缘及牵引凸缘过渡区域, 可以选取上述区域作为裂纹萌生与扩展分析的典型位置。

进一步从载荷作用机理分析, 钩舌销孔区域主要以装配接触应力集中为主, 而牵引凸缘区域在牵引、冲击循环载荷作用下更易形成稳定扩展型疲劳裂纹, 所以后续重点针对牵引凸缘区域开展裂纹扩展与寿命预测, 并在该区域引入表面裂纹模型进行深入研究。

对于三维表面裂纹, 其应力强度因子沿裂纹前沿呈空间分布, 可表示为

$$\Delta K = Y(a, \theta) \Delta \sigma \sqrt{\pi a} \quad (2)$$

式中: Y 为裂纹几何修正系数, θ 为裂纹前沿位置参数, $\Delta \sigma$ 为由有限元分析得到的等效应力幅值, a 为裂纹特征尺寸。

3.1.2 裂纹扩展速率模型

裂纹在循环载荷作用下的扩展速率采用 Paris 定律描述

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^m \quad (3)$$

其中, a 为裂纹长度, N 为循环次数, C 与 m 为材料参数, 由 E 级铸钢的裂纹扩展试验确定。

为提高钩舌裂纹扩展寿命预测精度, 结合 E 级铸钢断裂力学试验结果确定 Paris 参数。参考 GB/T 6398—2017《金属材料疲劳试验疲劳裂纹扩展方法》, 基于标准 CT 试样开展 E 级铸钢疲劳裂纹扩展试验。根据试验记录获得裂纹长度与循环次数关系, 并计算裂纹扩展速率与应力强度因子幅值范围之间的关系, 如图 9 所示。

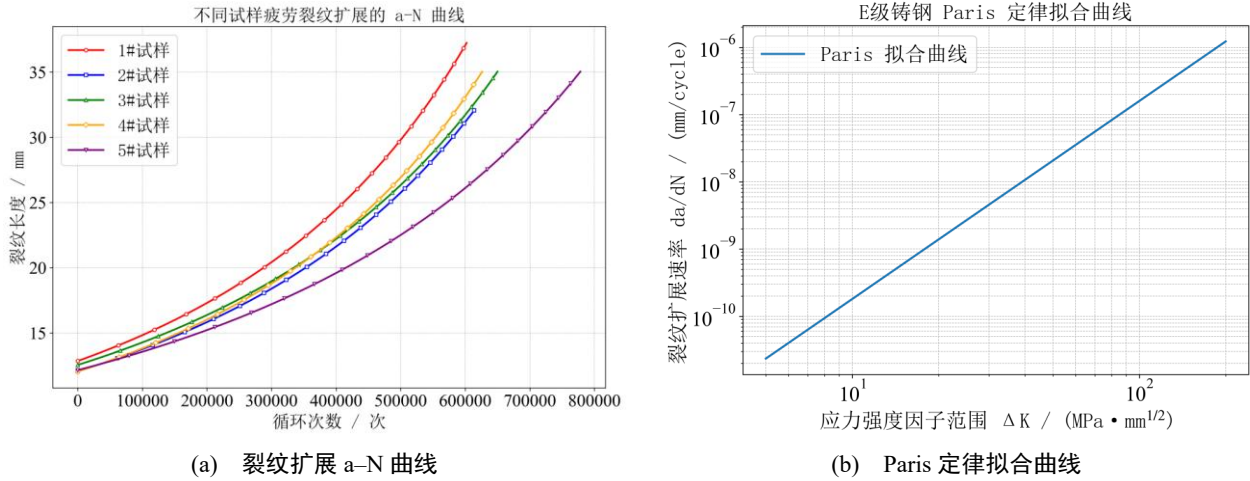


图 9 E 级铸钢疲劳裂纹扩展试验结果及 Paris 参数拟合
Fig.9 Experimental results of fatigue crack growth and Paris law fitting for Grade E cast steel

图 9(a)给出了不同试样裂纹长度随循环次数变化的 a-N 曲线，可见裂纹长度随载荷循环增加持续扩展，扩展过程整体较稳定。

图 9(b)为裂纹扩展速率 da/dN 与应力强度因子幅值范围 ΔK 在双对数坐标下的拟合结果。可以看出，两者在稳定扩展阶段呈较好的线性关系，满足 Paris 定律特征。

经拟合得到 E 级铸钢裂纹扩展关系为

$$\frac{d\alpha}{dN} = 2.0719 \times 10^{-13} (\Delta K)^{2.9424} \quad (4)$$

对应 Paris 参数为

$$C = 2.0719 \times 10^{-13} \quad (5)$$

$$m = 2.9424 \quad (6)$$

拟合结果与试验数据吻合较好，表明该参数能够较准确表征 E 级铸钢在稳定裂纹扩展阶段的疲劳断裂行为。因此，本文将作为 Franc3D 裂纹扩展计算的材料输入参数，用于后续钩舌裂纹扩展路径及疲劳寿命预测计算。

Paris 模型能够有效描述疲劳裂纹稳定扩展阶段裂纹扩展速率与应力强度因子幅值之间的关系，模型形式简洁、参数明确，在金属结构疲劳寿命分析中应用较为广泛。结合 E 级铸钢疲劳裂纹扩展试验结果可知，材料在稳定扩展阶段呈良好的幂函数关系，满足 Paris 定律特征。本文重点为钩舌表面裂纹在服役载荷作用下的扩展行为及剩余寿命预测，所分析裂纹扩展过程主要处于稳定扩展阶段，因此采用 Paris 模型能够较好表征裂纹扩展规律，并满足后续裂纹扩展路径模拟及疲劳寿命预测分析需求。

3.2 子模型建立与裂纹扩展数值模拟

由于裂纹尖端区域存在强应力梯度，直接作用整体有限元模型难以满足计算精度要求。因此在整体模型基础上建立局部子模型，对钩舌关键区域进行精细化分析。子模型选取第二节应力分析中识别的高应力区，如销孔及牵引凸缘附近，需要通过边界位移传递方法将整体模型计算结果映射至子模型边界，来实现局部模型受力状态与整体结构一致。子模型建立及裂纹引入过程如图 10 所示。

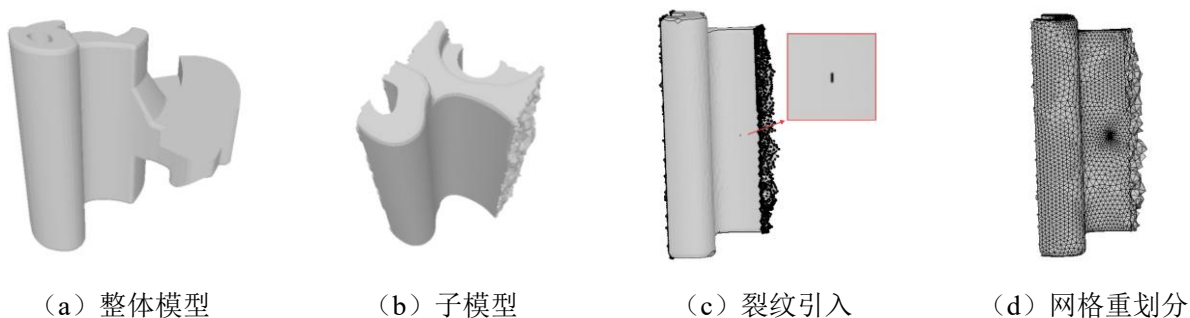


图 10 子模型建立与裂纹引入示意图

Fig.10 Submodel Construction and Crack Introduction Schematic Diagram

采用整体和子模型耦合的裂纹扩展预测方法，构建多尺度数值模拟体系，实现裂纹扩展行为的分层建模与分析。整体模型用于获取结构宏观应力响应，子模型用于刻画裂纹尖端局部应力梯度场，两者通过边界位移传递实现多尺度信息地传递，保证裂纹驱动力 ΔK 计算的连续性与一致性。

在裂纹扩展分析过程中，通过对裂纹尖端区域进行局部网格加密，提高裂纹尖端应力场解析精度，并结合 E 级铸钢断裂力学参数以及 Paris 裂纹扩展模型，实现裂纹扩展行为数值求解。裂纹扩展过程中，裂纹前缘应力强度因子 ΔK 的变化直接决定裂纹扩展速率与扩展路径，因此需要引入实际运行工况下的循环载荷条件，以建立裂纹扩展行为与服役寿命之间的对应关系。

由于重载机车车钩在实际运行过程中长期承受随机交变纵向载荷作用，裂纹扩展行为对载荷幅值及循环次数具有较高敏感性，因此本文采用基于实测运行数据建立的 18 级载荷谱作为裂纹扩展寿命分析的输入条件。本文采用西南交通大学尹敏轩^[19]建立的神黄线万吨、两万吨混跑编组列车车钩 18 级载荷谱，其载荷等级及循环次数如表 2 所示。

表 2 朔黄线两万吨列车车钩载荷谱
Tab. 2 Coupler Load Spectrum of 20,000-Ton Trains on the Shuohuang Railway

载荷级	最小载荷	最大载荷	循环次数	载荷级	最小载荷	最大载荷	循环次数
1	50	510	140	10	50	1500	40
2	50	600	60	11	50	1440	60
3	50	675	120	12	50	1275	40
4	50	720	40	13	50	1050	40
5	50	885	60	14	50	885	40
6	50	1050	60	15	50	720	20
7	50	1275	40	16	50	675	100
8	50	1440	80	17	50	600	40
9	50	1725	120	18	50	510	140

该载荷谱是根据重载铁路实际运行工况下的长期实测数据，能够较好反映重载列车纵向牵引载荷的幅值分布及循环特征。本文研究对象同样面向重载机车车钩结构，其运行路线、轴重等级以及纵向冲击载荷特征与所采用载荷谱对应工况具有较高一致性，由此采用该 18 级载荷谱作为裂纹扩展寿命分析输入条件具有较好的工程适用性。载荷谱完整循环一次代表线路运行约 32 428 km，可用于建立裂纹扩展长度与服役里程之间的对应关系，实现基于 ΔK 演化的裂纹扩展寿命预测。

3.3 不同载荷状态下钩舌裂纹拓展行为

钩舌裂纹扩展行为由裂纹前缘应力强度因子 ΔK 的空间分布主导，在非对称载荷作用下表现出明显的非均匀扩展特征。因此研究无偏置与偏置载荷条件下裂纹扩展行为，其中，无偏置载荷为载荷作用线

作用钩舌挽面几何中心并沿结构对称方向的理想工况；偏置载荷则以该基准载荷作用线为参考，沿挽面地铅垂方向偏移，通过改变载荷作用位置，模拟实际工况下的非对称受力状态。

3.3.1 无偏置的等效载荷下的应力强度因子分布

钩舌上下凸缘区域的裂纹前缘应力强度因子分布如图 11 和图 12 所示，在三维裂纹问题中，应力强度因子可分为三种基本断裂模式，即 I 型（张开型）、II 型（滑移型）及 III 型（撕裂型），分别对应裂纹面法向张开、面内剪切及面外剪切变形特征。裂纹尖端 I 型应力强度因子 K_I 为正且占比最大，裂纹尖端 II 和 III 型应力强度因子 K_{II} 、 K_{III} 均分布在零值附近。故钩舌裂纹主要是 I 型裂纹，后续重点分析 I 型应力强度因子的变化。应力强度因子的正负代表裂纹尖端的扩展方向，应力强度因子的幅值则直接表示裂纹扩展的力学驱动力水平，决定裂纹扩展速率的变化特征。

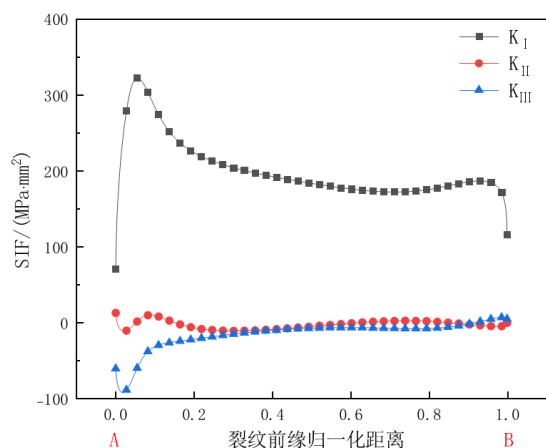


图 11 钩舌上牵引凸缘应力强度因子 SIF 分布图
Fig.11 Distribution Map of Stress Intensity Factor (SIF) on the Traction Flange of the Coupler Tongue

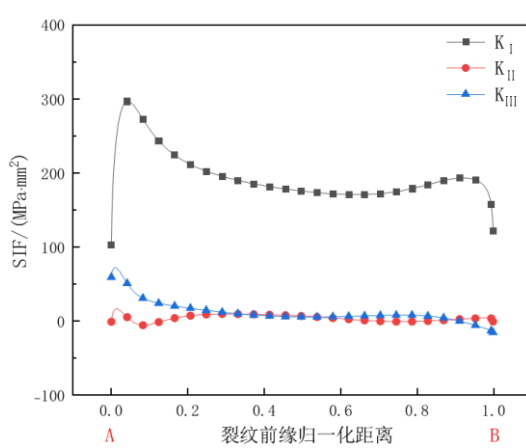
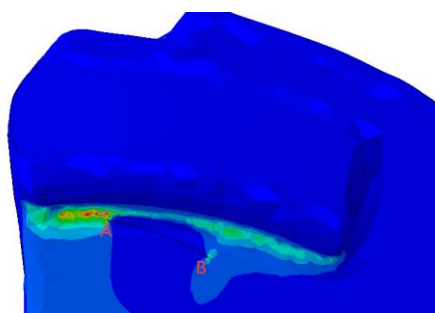


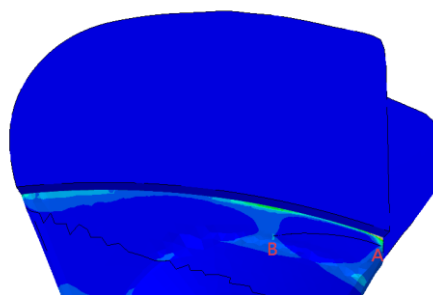
图 12 钩舌下牵引凸缘应力强度因子 SIF 分布图
Fig.12 Distribution Map of Stress Intensity Factor (SIF) on the Lower Traction Flange of the Coupler Tongue

从上图分析 K_I 沿裂纹前缘的分布特征，整体呈现“边缘高、中心低”的非均匀分布形式，梯度变化较为平缓，说明裂纹驱动力在前缘分布相对均匀。

裂纹扩展路径如图 13 所示。在无偏置载荷作用下，裂纹扩展路径整体呈现稳定演化特征，未出现明显偏转现象，该结果表明，裂纹扩展过程主要受近似对称的应力场控制，其扩展方向具有可预测稳定性。同时为准确捕捉该稳定扩展过程中裂纹长度随循环载荷的演化规律，裂纹扩展过程采用逐步迭代方式进行数值预测，通过裂纹长度增量更新同步计算对应 ΔK 演化，实现裂纹扩展路径的离散预测。在计算过程中，初始裂纹步长设定为 0.1mm，并基于 ΔK 梯度变化及数值收敛性进行自适应调整，保证裂纹扩展预测的精度与稳定性。



(a) 钩舌下牵引台面裂纹扩展路径



(b) 钩舌上牵引台面裂纹扩展路径

图 13 钩舌上下牵引台面裂纹扩展路径

Fig.13 Crack Propagation Paths on the Upper and Lower Traction Surfaces of the Coupler Knuckle

在每一次裂纹扩展过程中，对裂纹前缘应力强度因子进行计算。当应力强度因子达到材料断裂韧度时，裂纹失稳扩展并终止。提取钩舌上下牵引凸缘在各扩展步中所有裂纹前缘的 I 型应力强度因子分布特征，如图 14 和图 15 所示。

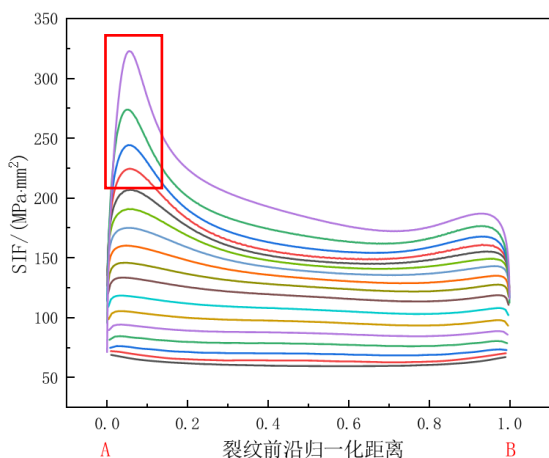


图 14 钩舌上牵引凸缘所有前缘的应力强度因子 SIF 分布
Fig.14 Distribution Map of SIF on All Leading Edges of the Upper Traction Flange of the Coupler Tongue

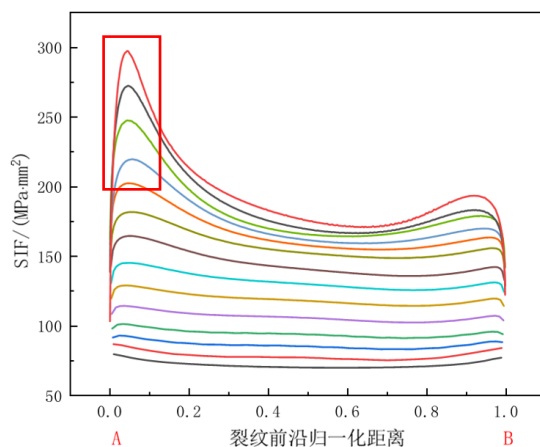


图 15 钩舌下牵引凸缘所有前缘的应力强度因子 SIF 分布
Fig.15 Distribution Map of SIF on All Leading Edges of the Lower Traction Flange of the Coupler Tongue

由图 14 和图 15 可知，在裂纹扩展过程中，上、下牵引凸缘裂纹前缘均存在明显的非均匀应力强度因子分布特征，其中靠近裂纹 A 端且距裂纹表面约 1mm 区域出现显著 SIF 峰值。该区域对应裂纹前缘局部驱动力集中位置，由于裂纹扩展速率与应力强度因子幅值呈幂函数关系，所以该区域裂纹扩展速率显著高于其他位置，并先达到材料断裂临界条件。

3.3.2 有偏置的等效载荷下的应力强度因子分布

由于重载机车通常运行在山区等复杂地形中，需要经常面对长上坡或者长下坡路段，其车钩所受等效载荷往往会发生偏置。为了等效上坡及下坡工况下的钩舌受力情况，研究不同偏置载荷对钩舌裂纹扩展寿命及扩展速率的影响，引入偏置载荷模型，对不同载荷偏移条件下裂纹扩展驱动力的变化规律分析。

在建模过程中，以钩舌挽面几何中心为坐标原点，分别在其铅垂方向偏置 ±5mm，±10mm，±20mm 处施加等效载荷。对各偏置工况下钩舌裂纹前缘的应力强度因子分布进行计算与对比分析，重点分析 I 型应力强度因子沿裂纹前缘的空间变化特征，其结果如图 16 和图 17 所示。

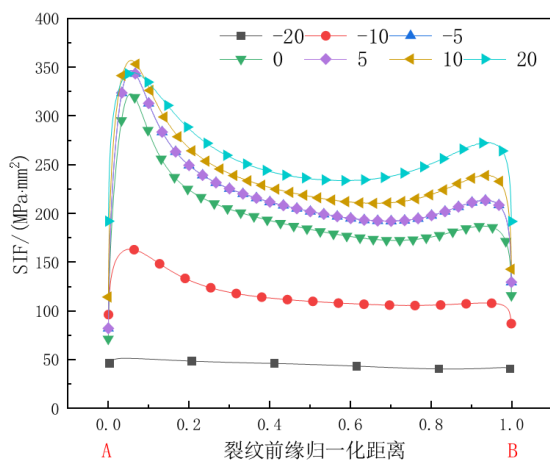


图 16 偏置载荷钩舌上牵引凸缘 I 型应力强度因子分布图
Fig.16 Distribution Map of Mode I SIF on the Upper Traction Flange of Coupler Tongue under Offset Loading

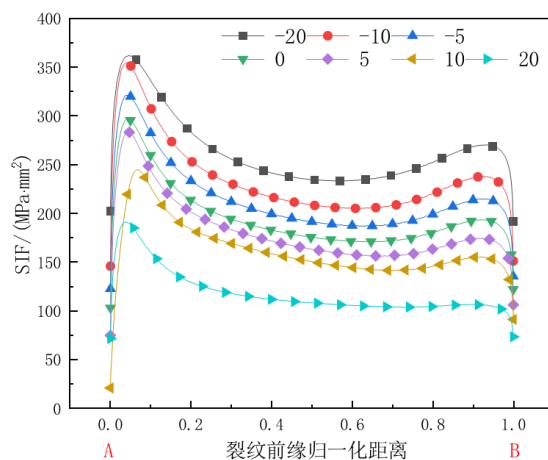


图 17 偏置载荷钩舌下牵引凸缘 I 型应力强度因子分布图
Fig.17 Distribution Map of Mode I SIF on the Lower Traction Flange of Coupler Tongue under Offset Loading

由图 16 和图 17 可知,在不同偏置载荷作用下,裂纹前缘应力强度因子分布呈现明显的不对称特征,其空间分布随载荷偏移方向发生整体迁移。相较于无偏置工况,应力强度因子峰值位置发生偏转,表明裂纹扩展驱动力在裂纹前缘的分布发生重构。再随着载荷偏移量的增加,应力强度因子峰值逐渐向载荷偏移方向集中,导致裂纹扩展速率在局部区域显著提高,使裂纹扩展路径发生偏转,并改变裂纹失稳扩展的主导位置。

3.4 基于 ΔK 驱动的疲劳寿命预测

基于前述裂纹扩展模型与应力强度因子计算结果,建立以应力强度因子幅值 ΔK 为核心驱动参数的裂纹扩展疲劳寿命预测模型。该模型通过描述裂纹扩展速率与循环载荷之间的定量关系,实现从局部断裂力学响应到结构整体失效寿命的映射。

在循环载荷作用下,裂纹前缘 ΔK 随裂纹尺寸演化呈现非线性变化特征。依据 Paris 定律,裂纹扩展速率与 ΔK 之间满足幂函数关系,表明裂纹扩展过程具有显著的路径依赖性与阶段性特征。

为实现疲劳寿命的定量预测,需要基于裂纹扩展速率对裂纹演化过程进行数值积分分析,从而获得裂纹从初始长度 a_0 扩展至临界长度 a_c 的疲劳寿命。疲劳寿命可利用积分形式表示为

$$N_f = \int_{a_0}^{a_c} \frac{1}{C(\Delta K)^m} da \quad (7)$$

由此可将载荷偏置对结构疲劳寿命的影响统一归结为应力强度因子幅值 ΔK 的演化问题,通过建立 ΔK 与裂纹扩展速率之间的关系,结合裂纹扩展模型进行积分,可实现裂纹从初始尺寸扩展至临界尺寸的寿命预测。

对不同载荷偏置工况下钩舌裂纹疲劳寿命进行计算与预测,引入对应的 ΔK 演化路径,对钩舌上下牵引凸缘裂纹扩展过程进行数值求解,获得裂纹扩展长度与运行里程之间的关系,如图 18、图 19 所示。其中偏置量为 0mm 的工况表示载荷作用点与钩舌几何中心重合的对称加载状态,将其定义为无偏置基准工况,用于与不同偏置载荷条件下的裂纹扩展行为进行对比分析。

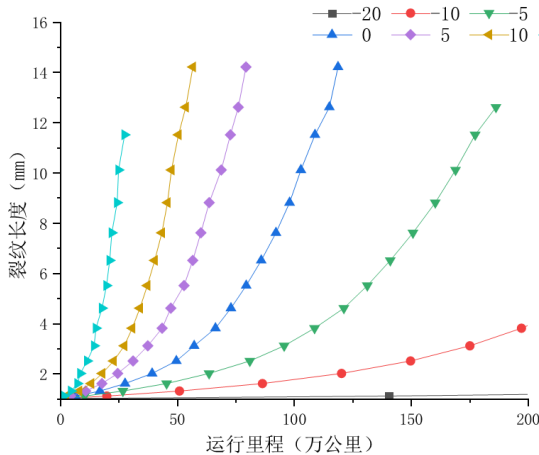


图 18 偏置载荷的钩舌上牵引凸缘疲劳寿命分布
Fig.18 Distribution of Fatigue Life of Upper Traction Flange of Coupler Tongue under Offset Loading

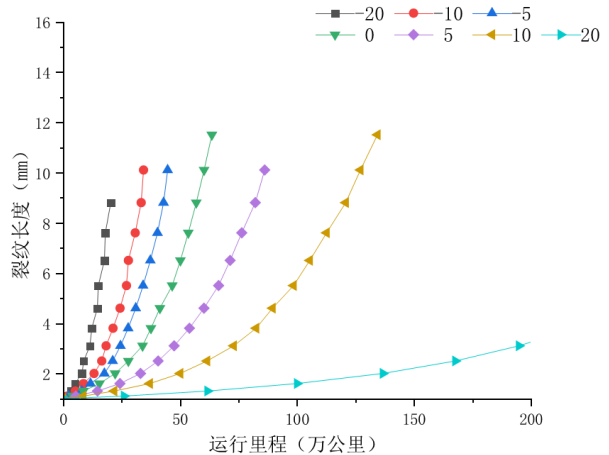


图 19 偏置载荷的钩舌下牵引凸缘疲劳寿命分布
Fig.19 Distribution of Fatigue Life of Lower Traction Flange of Coupler Tongue under Offset Loading

从图 18 与图 19 可以看出,在不同偏置载荷作用下,钩舌上下凸缘裂纹疲劳寿命随偏置量变化呈现明显差异性分布特征。总体随着载荷偏置量的增大,裂纹扩展寿命呈下降趋势,但不同结构部位的响应具有显著非对称性。其中,上牵引凸缘裂纹对载荷偏置变化更为敏感,其寿命随偏置变化幅度较大,并

呈现非线性衰减特征；而下牵引凸缘裂纹寿命变化相对平缓，对载荷偏置的敏感性较低。

该结果表明，载荷偏置通过重构裂纹前缘应力强度因子 ΔK 空间分布，改变裂纹扩展驱动力的局部集中程度，引起不同位置裂纹寿命响应的差异性。

根据裂纹扩展过程中前缘应力强度因子的计算结果，可得到以下寿命预测结论：

1) 不同载荷偏置条件下，裂纹扩展速率与剩余寿命之间存在稳定的定量映射关系，以载荷偏置为输入变量、裂纹扩展速率为中间变量、剩余寿命为输出变量的预测模型得以建立，可实现重载机车钩舌在不同偏置工况下剩余里程寿命的定量预测。

2) 不同结构位置对载荷偏置的响应具有显著差异，其中上牵引凸缘裂纹寿命及临界裂纹尺寸对载荷偏置更为敏感，而下牵引凸缘响应相对稳定。

4 结论

基于裂纹扩展模型与应力强度因子分析，本文围绕重载机车钩舌裂纹扩展行为及疲劳寿命预测开展研究，得到如下结论：

1) 裂纹分布与应力场耦合特征明确。裂纹主要集中于销孔、牵引凸缘及挽面接触区，对应有限元分析中的高应力集中区域，表明结构几何突变与载荷传递路径是裂纹萌生与扩展的主导因素，其中牵引凸缘区域为钩舌疲劳失效的关键危险部位。

2) 基于 ΔK 的裂纹扩展机制可有效描述裂纹演化过程。裂纹前缘应力强度因子呈显著非均匀分布特征，并在约 1mm 表层区域出现峰值集中区，随着载荷偏置量增加，裂纹前缘 ΔK 空间分布发生偏移，局部裂纹扩展驱动力增强，导致裂纹扩展速率、扩展路径及失稳位置发生变化。结果表明，载荷偏置是影响钩舌裂纹扩展行为的重要因素。

3) 建立了考虑载荷偏置效应的疲劳寿命预测模型。基于 Paris 定律与 ΔK 演化关系，实现基于 ΔK 演化的裂纹扩展路径驱动的寿命定量预测。结果表明，裂纹扩展寿命随载荷偏置增加整体呈下降趋势，并表现出显著的结构位置依赖性。

本文主要针对稳定裂纹扩展阶段开展研究，尚未考虑材料组织随机性、残余应力、接触磨损以及多裂纹耦合作用等因素对裂纹扩展行为的影响。本文裂纹扩展分析主要基于典型等效载荷谱工况，复杂线路环境下随机载荷作用对裂纹扩展路径及寿命演化的影响仍有待研究。后续将结合更多服役数据、随机载荷模型以及更复杂的三维断裂模型，提高重载车钩剩余寿命预测的准确性与工程适用。

参考文献：

- [1] 朱海燕, 许晋华, 徐晨钊. 基于深度学习的列车制动盘剩余使用寿命预测研究[J]. 华东交通大学学报, 2025, 42(04): 48–60.
- [2] INFANTE V, BRANCO C, BRITO A. A failure analysis study of cast steel railway couplings used for coal transportation[J]. Engineering Failure Analysis, 2003, 10(4): 475–489.
- [3] THIES P R, JOHANNING L, HARNOIS V. Mooring line fatigue damage evaluation for floating marine energy converters: Field measurements and prediction[J]. Renewable Energy, 2014, 63: 133–144.
- [4] YIN M, ZHU T, XU J. Service reliability of a heavy-haul wagon coupler body based on the SMOTE-Bootstrap-Bayes method[J]. Engineering Failure Analysis, 2020, 118: 104836.
- [5] 耿平, 段元勇, 兆文忠. 车辆铸钢件疲劳寿命预测方法对比分析[J]. 大连交通大学学报, 2015, 36(02):

26–29.

- [6] 王悦东, 张佳宇. 基于改进的 Goodman 曲线的车轮疲劳强度评估方法研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2017, 14(04): 827–832.
- [7] 薛海. 基于实测载荷谱的重载货车车钩疲劳可靠性研究[D]; 北京交通大学, 2017.
- [8] REN X, WU S, XING H. Fracture mechanics based residual life prediction of railway heavy coupler with measured load spectrum: X. Ren et al[J]. International Journal of Fracture, 2022, 234(1): 313–327.
- [9] 秦天宇, 任鑫焱, 胡飞飞. 基于实测载荷谱的重载铁路货车车钩钩尾框剩余寿命预测[J]. 力学学报, 2022, 54(07): 1830–1838.
- [10] 吴圣川, 任鑫焱, 康国政. 铁路车辆部件抗疲劳评估的进展与挑战[J]. 交通运输工程学报, 2021, 21(01): 81–84.
- [11] CHUNDURU S P, KIM M J, MIRMAN C. Failure analysis of railroad couplers of AAR type E[J]. Engineering Failure Analysis, 2011, 18(1): 374–85.
- [12] 尹敏轩, 朱涛, 杨冰. 基于可靠性的重载货车钩舌疲劳断裂寿命[J]. 机械工程学报, 2021, 57(04): 210–218.
- [13] 徐京涛, 朱涛, 尹敏轩. 一种重载货车车钩强度的分析方法[J]. 机械制造与自动化, 2022, 51(02): 29–33.
- [14] 丁浩谓, 郭力荣, 李宗治. 考虑车端接触与车钩失稳的高速列车三维碰撞动力学模型[J]. 西南交通大学学报, 2026, 61(01): 243–252.
- [15] MORGADO T. Fatigue life extension study in cast steel railway couplings used in freight trains[J]. International Journal of Mechanical Engineer and Applications Special Issue: Structural Integrity of Mechanical Components, 2015, 3(2-1): 1–6.
- [16] 白淑萍. 大秦线 C80 型货车 16、17 号车钩裂纹原因分析及应对措施[J]. 铁道技术监督, 2008, (09): 17–19.
- [17] 肖利民, 秦晓锋. 力拓矿石车用 F51AE 型钩舌断裂失效分析[J]. 大连交通大学学报, 2011, 32(04): 43–47.
- [18] 杨海滨. 铁路重载货车车钩剩余寿命研究[D]. 西南交通大学, 2019.
- [19] 尹敏轩. 基于数据驱动的货车车钩全寿命及剩余寿命预测方法研究[D]. 西南交通大学, 2021.



第一作者: 戴云龙 (2000—), 男, 硕士研究生, 研究方向为轨道交通智能运维。



通信作者: 昌超 (1992—), 男, 博士, 研究方向为铁路大系统动力学。