

DOI: 10.3901/JME.2022.24.178

高速列车 S38C 车轴外物致损模拟与 疲劳性能研究*

高杰维^{1,2} 余明华³ 朱顺鹏¹ 廖鼎¹ 李亚波⁴ 韩靖³

- (1. 电子科技大学机械与电气工程学院 成都 611731;
2. 西南交通大学牵引动力国家重点实验室 成都 610031;
3. 西南交通大学材料科学与工程学院 成都 610031;
4. 中车青岛四方机车车辆股份有限公司 青岛 266111)

摘要: 外物致损是造成高速列车车轴疲劳失效的典型因素之一。采用立体显微镜分析 CRH2 系列高速列车 S38C 车轴表面的损伤,借助轻型空气炮向取于 S38C 车轴表面的四点弯曲疲劳试样发射多种角度、速度的球形和正方形钨钢弹体,模拟外物致损。采用逐步加载法来确定损伤试样的疲劳强度,在场发射扫描电镜下观测损伤特征和疲劳断口形貌。结果表明,车轴表面的损伤大部分是刮擦,少部分是缺口。球形弹体垂直冲击损伤随着速度的增大变得逐渐恶劣,材料缺失和微裂纹分布在损伤边缘,底部出现绝热剪切带引发的裂纹;球形弹体斜冲击损伤出射区主要以形变和剪切作用下的掉块为主;方形弹体冲击损伤形态各异。不考虑损伤形成的工况,试样疲劳强度随着损伤深度的增加而降低,深度作为损伤评价参数具有可操作性,本研究为车轴外物致损检修标准的制定提供参考。

关键词: 高速列车; S38C 车轴; 外物致损; 疲劳性能

中图分类号: TB31

Fatigue Behavior Analysis and Simulation of Foreign Object Damage on S38C High-speed Railway Axle

GAO Jiewei^{1,2} YU Minghua³ ZHU Shunpeng¹ LIAO Ding¹ LI Yabo⁴ HAN Jing³

- (1. School of Mechanical and Electrical Engineering,
University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731;
2. State Key Laboratory of Traction Power, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031;
3. School of Materials Science and Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031;
4. CRRC Qingdao Sifang Co., Ltd., Qingdao 266111)

Abstract: Foreign object damage(FOD) is one of the typical issues leading to fatigue failure of high-speed railway axles. Morphologies of the damage on S38C high-speed railway axles were observed by stereomicroscopy. FODs were simulated by firing tungsten steel spheres or cubes under different velocities and incident angles to the outer surfaces of specimen extracted from S38C axle. Step-loading method was employed to determine the four-point bending fatigue strength. Morphologies of damages were investigated by scanning electron microscopy(SEM), and also the fracture surfaces. Statistics of surface damages on S38C axles show that a large fraction of damages are scratches and the percentage of notch is small. Damage volume of normal impact by spherical projectiles increases with improvement of impact velocity. Material losses and microcracks appear in the crater rim and cracks

* 国家自然科学基金(12232004)、国家重点研发计划子课题(2018YFB1201704-03)、四川省杰出青年基金(2022JDJQ0024)、四川省重点研发计划(2021YFG0210)和牵引动力国家重点实验室自主课题(2019TPL-T21)资助项目。20220126 收到初稿, 20220930 收到修改稿

initiated by adiabatic shear band can be found on the floor. Chipping due to deformation and cutting is the feature of damage by incline impact. The shape of impact damage by tungsten cube is various. Regardless of the impact condition, fatigue strength declines with increase of damage depth and it is feasible to assess impact damage by depth alone. The results provide guidance to the maintenance of S38C railway axles subjected to FODs.

Key words: high-speed railway; S38C axle; foreign object damage; fatigue behavior

0 前言

车轴是车辆转向架的核心部件, 如果发生断裂, 极可能造成列车脱轨事故, 尤其高速列车车轴^[1-4]。近些年, 我国针对高速列车车轴国产化开展了大量研究, 除了设计和制造, 车轴结构完整性评价和寿命预测也是保障高速列车安全运行的重要研究内容^[3-8]。高速列车车轴设计寿命不少于 20 年, 循环周次约为 4×10^9 , 影响车轴疲劳寿命的主要因素有夹杂、腐蚀、微动和外物致损^[9-13]。针对前三种因素的研究较多, 而车轴外物致损的研究较少。

外物致损的研究源于航空发动机叶片疲劳失效, 学者针对外物致损与叶片疲劳性能的关系开展了系列研究, 研究成果为高速列车车轴外物致损的研究提供了方法, 但是仍然需要针对高速列车车轴开展系统工作, 主要原因如下: 首先, 材料的基本力学性能决定冲击响应。相同条件下, 不同材料的损伤程度和损伤形貌均有差异, 例如, 韧性材料受到冲击时可能伴随着剪切和形变, 材料堆积或者移除, 而脆性材料可能形成材料缺失和绝热剪切裂纹。其次, 靶体几何形态造成损伤形貌差异, 这会影响不同损伤参数在疲劳强度和疲劳裂纹扩展上的权重。类似叶片试样前缘较薄, 外物冲击可以造成通透的缺口, 车轴尺寸较大, 损伤主要形式类似点缺陷。另外, 服役工况不同。具体而言, 名义应力影响损伤处裂纹的萌生和扩展, 名义应力的也影响残余应力的再分布。高应力下, 残余应力释放比例较大。有效应力比提高, 裂纹扩展门槛值降低。上述因素表明, 叶片损伤研究结果不能直接应用于车轴外物致损评价, 针对车轴外物致损评价需要进一步开展工作。

本研究对象为 CRH2 系列高速列车所装配 S38C 车轴, 车轴材料为普通中碳钢, 热处理方式为表面感应淬火+低温回火, 具有优异的抗微动疲劳性能^[7,14]。高杰维开展了 S38C 车轴损伤相关的研究, 初期采用硬度计压痕、电火花烧蚀坑模拟表面损伤, 对损伤与车轴钢试样疲劳强度的关系进行了探索^[15]。相同时期, 林浩博针对 S38C 车轴采用类似

的方法开展了研究^[16]。基于航空器外物致损的研究, 吴圣川等^[17-18]将空气炮应用到 EA4T 车轴外物致损模拟, 得到与实际损伤相近的结果。高杰维等^[15]构建了基于疲劳指示参数的缺陷小试样和含击打伤实物 EA4T 车轴疲劳寿命预测模型, 并进行台架试验验证。然而, EA4T 车轴在材料成分、热处理工艺和力学性能与 S38C 车轴相差很大, 检修标准也有区别^[7,14]。鉴于此, 潘向南等采用钨钢球以不同速度冲击 S38C 车轴试样, 从宏观和微观的角度总结了不同速度下的损伤形貌, 指出 S38C 外物致损与其他材料损伤的差异, 通过疲劳试验研究了损伤尺寸与疲劳性能之间的关系^[19-20]。近期, 本团队针对 S38C 车轴外物致损开展了系列研究, 设计多种冲击角度和冲击速度, 尝试了多种材质和形状弹体, 具体包括道砟、轴承钢和钨钢。

根据 CRH2 系列高速列车 S38C 车轴检修规程, 表面损伤深度大于 0.3 mm 时车轴就要报废。然而, 根据林浩博的研究结果, 表面裂纹深度 0.4 mm 的车轴仍然可以使用^[16]。如果能够在保证安全的基础上放大损伤临界尺寸, 将减少车轴报废导致的损失。因此, S38C 车轴表面外物致损的系统研究和剩余寿命预测具有科学意义和工程价值。本论文将对 S38C 车轴表面外物致损进行分析, 根据 S38C 车轴的特殊表面显微结构设计四点弯曲试样, 以钨钢球和钨钢方块为弹体, 在不同速度和角度下冲击试样表面制造损伤, 采用逐步加载法确定损伤试样的疲劳强度, 结合扫描电镜(Scanning electron microscope, SEM)损伤形貌和断口形貌分析冲击试验条件、损伤形貌和疲劳强度之间的关系, 为 S38C 车轴表面损伤的评价提供依据。

1 高速列车 S38C 车轴外物致损

采用放大镜初步鉴别 S38C 车轴表面外物致损, 将损伤位置进行标记, 利用酒精对损伤部位进行清洗, 风干后在便携式超景深显微镜下观察, 生成损伤三维形貌图并记录损伤位置、角度、深度、长度等几何信息并整理。观测结果表明, 车轴表面外物致损主要分为两类: 局部变形形成的刮擦和部分材

料缺失造成的缺口,如图 1 所示。本研究结果与林浩博对同类 S38C 车轴损伤调研结果进行对比,损伤类型和损伤尺寸均一致^[16]。刮擦类损伤深度约为 100 μm ,而缺口类损伤深度一般超过 200 μm ,个别缺口深度达 500 μm 。

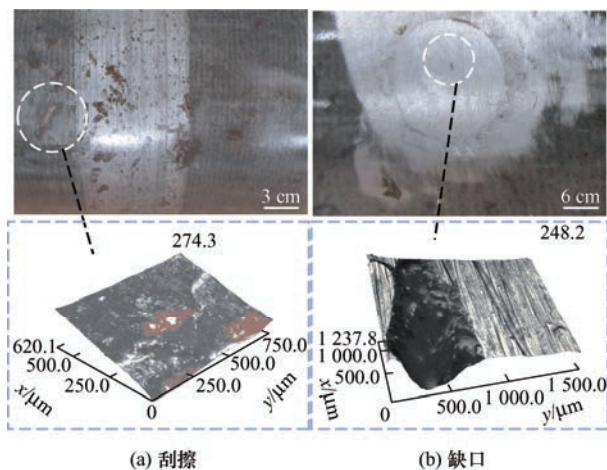


图 1 S38C 车轴上两类典型损伤



图 2 S38C 车轴表层组织分布

轴向取矩形截面拉伸试样在电子万能试验机(三思, CMT4000)进行拉伸性能测试,结果如图 4 所示。表面淬硬层抗拉强度为 1 800 MPa,基体抗拉强度约为淬硬层的 1/3,这和硬度测试结果相符。值得注意的是,车轴表面淬硬层没有明显屈服阶段,断裂延伸率小于基体材料的 1/2。根据文献可知,车轴自由面残余压应力约为 -200 MPa,此残余应力在长期服役过程中保持不变^[21]。

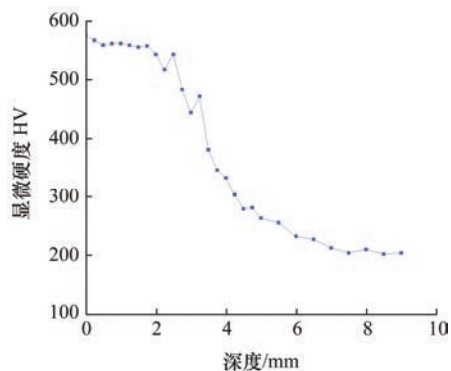


图 3 S38C 车轴表层显微硬度分布

2 外物致损模拟与疲劳试验

2.1 试验材料和试样

S38C 车轴材料成分如表 1 所示。采用激光共聚焦显微镜(基恩士, VK-9710)观测材料显微组织,利用显微硬度计(联尔, HV-1000)研究表面材料的硬度梯度。经过表面感应淬火+低温回火处理,显微组织由珠光体+铁素体转变成细小的回火马氏体,同时,显微硬度由 200 HV 提高到 560 HV。根据车轴表面淬火层显微组织梯度分布和硬度梯度分布图(图 2、3)可判断,有效淬硬层深度约为 2.5 mm。沿径向从车轴表面至深度 7 mm 层层解剖,每毫米沿

表 1 S38C 车轴钢化学成分(质量分数) %

元素	C	Si	Mn	Cr	Mo	Ni	Al
含量	0.39	0.29	0.81	0.097	0.024	0.039	0.013

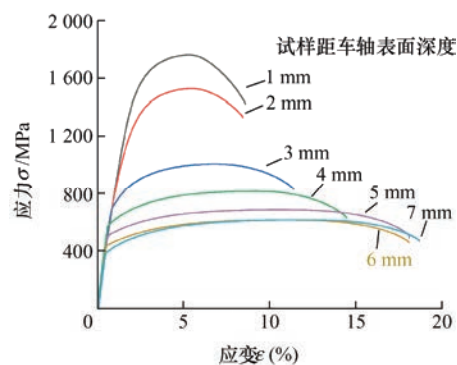


图 4 S38C 车轴表面材料抗拉强度

2.2 外物致损模拟

车轴服役过程中受到典型的旋转弯曲应力,因此以往车轴疲劳相关的研究主要采用旋转弯曲疲劳试验方法。然而,本研究对象 S38C 车轴表面感应淬火强化处理,具有组织梯度层,不适制备旋转弯曲疲劳试样。因此,本研究从 S38C 车轴表面切割取 10 mm×10 mm×100 mm 四点弯曲试样,具体流程如图 5 所示。手工打磨,获得理想状态的试样表面。采用轻型空气炮(南京航空航天大学自制)向试

样外表面几何中心发射弹体, 制造外物致损, 弹体形状、尺寸、入射角度和速度如表 2 所示。采用场发射扫描电镜(FEI, INSPECT F50)观察损伤的宏观和微观形貌, 将部分损伤进行切割, 观察损伤横截

面特征。通过电子背散射衍射仪(Oxford, Symmetry)观测未变形区和变形区电子背散射衍射图谱(Electron backscatter diffraction, EBSD), 分析损伤区域晶体形态和取向并与未变形区域对比。

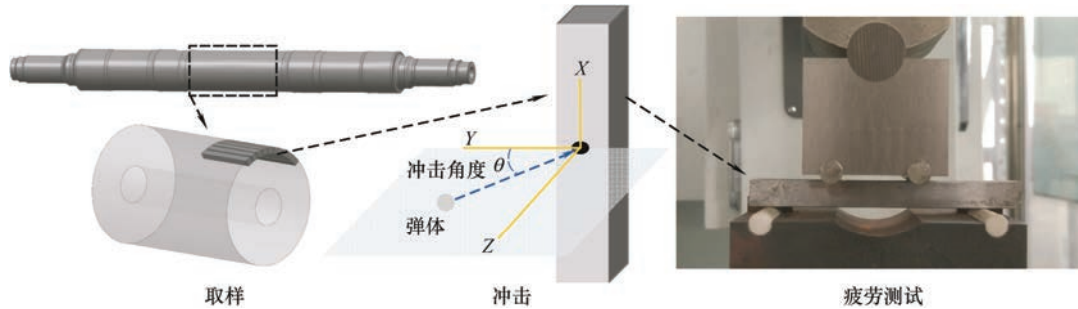


图 5 S38C 车轴冲击损伤模拟与疲劳性能试验

表 2 S38C 车轴四点弯曲试样冲击试验汇总

弹体	速度/(m/s)	角度/(°)	备注
3 mm 钨钢球	100	90	—
	200	30,45,60,75,90	每种工况 5 件
	300	30,45,60,75,90	每种工况 5 件
	400	30,45,60,75,90	每种工况 5 件
	500	90	—
2 mm 钨钢方块	100	90	每个试样表面制造 2 个损伤, 相距 15 mm, 每种工况 5 件
	200	90	
	300	90	
3 mm 钨钢方块	100	90	每个试样表面制造 2 个损伤, 相距 15 mm, 每种工况 5 件
	150	90	
	200	90	

2.3 疲劳试验方法

四点弯曲疲劳试验在高频疲劳试验机(仟邦, QB100)上完成, 试验工装和加载方式如图 5 所示, 试验应力为应力比 $R=0.1$ 的正弦波。由于冲击试验具有不确定性, 所得损伤也不相同, 特别是方块冲击损伤形态各异。试验采用逐步加载法, 设定循环周次 $N_{sl}=10^6$, 试样的疲劳强度 σ_{sl} 或者说剩余强度取决于断裂时应力 σ_f 、上一级应力 σ_p 和断裂循环周次 N_f 。

$$\sigma_{sl} = \sigma_p + \frac{N_f}{N_{sl}} (\sigma_f - \sigma_p) \quad (1)$$

3 试验结果与讨论

3.1 损伤形貌和疲劳强度

为了更全面的研究损伤程度对车轴疲劳强度的

影响, 冲击试验采用 100 m/s 到 500 m/s 多个速度, 旨在模拟出轻微损伤到最恶劣工况, 所以试验速度和高速列车实际运行速度有所差异。当弹体速度较低时(图 6a), 所产生类似压痕的弹坑, 深度较浅。弹坑边缘保持原始状态, 弹坑底部未见材料失效。200 m/s 速度冲击下(图 6b), 弹坑尺寸略有增大, 最明显的变化是弹坑边缘出现塑性变形导致的褶皱, 从截面上观察, 弹坑边缘突出原始试样表面。当试验速度增大至 300 m/s, 损伤边缘出现材料堆积, 受冲击影响的区域变大, 如图 6c 所示。弹坑表面出现白色弧线, 截面图证明这些弧线是绝热剪切带的形成造成的。并且, 少量的材料在弹体挤压作用下滑出试样原始边缘。在更恶劣的试验工况下(图 6d, 图 6e), 弹坑边缘出现大量微裂纹和材料缺失, 弹坑表面分布有多条弧线和裂纹。剖开损伤, 裂纹沿着绝热剪切带形成并已经延伸到基体里面。

选取 200 m/s、300 m/s 和 400 m/s 速度模拟多角度冲击试验, 研究角度对损伤的影响。200 m/s 速度下, 30° 和 45° 冲击损伤深度较小, 而出射区边缘出现材料缺失(图 7)。60° 和 75° 损伤深度增大, 出射区的形变量较小, 未见明显材料缺失, 逐渐接近于垂直冲击损伤。当冲击速度提高, 弹坑体积增大, 最明显的区别是弹坑材料缺失不再局限于损伤边缘, 距损伤边缘较近的弹坑表面也存在材料缺失, 并且材料缺失的体积较大。400 m/s 速度下弹坑形貌与 300 m/s 冲击损伤类似, 受影响体积更大, 此处不再赘述。

选取 200 m/s、300 m/s 和 400 m/s 速度模拟多角度冲击试验, 研究角度对损伤的影响。200 m/s 速度下, 30° 和 45° 冲击损伤深度较小, 而出射区边缘出现材料缺失(图 7)。60° 和 75° 损伤深度增大, 出射区的形变量较小, 未见明显材料缺

失, 逐渐接近于垂直冲击损伤。当冲击速度提高, 弹坑体积增大, 最明显的区别是弹坑材料缺失不再局限于损伤边缘, 距损伤边缘较近的弹坑表面

也存在材料缺失, 并且材料缺失的体积较大。400 m/s 速度下弹坑形貌与 300 m/s 冲击损伤类似, 受影响体积更大。

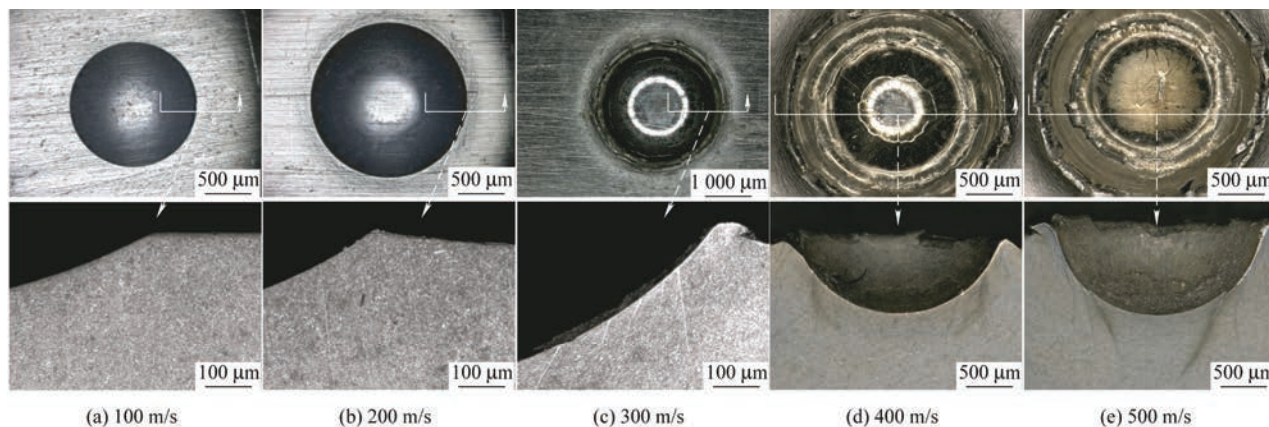


图 6 不同速度下垂直冲击损伤形貌

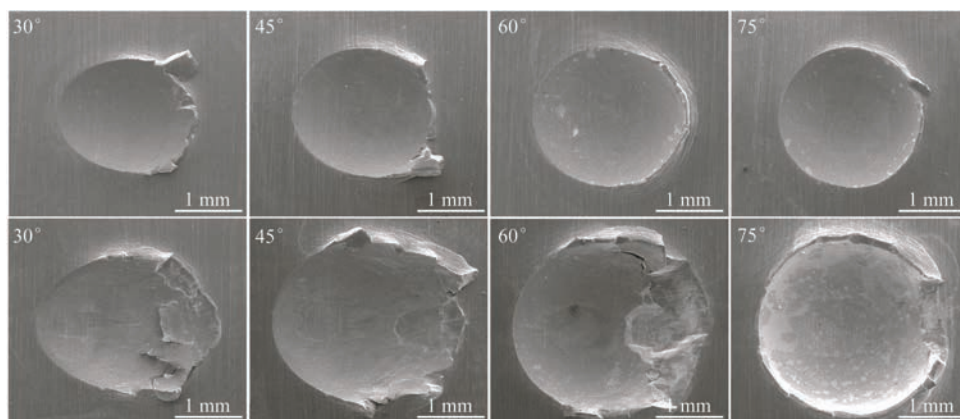


图 7 200 m/s(上部)和 300 m/s(下部)下不同入射角冲击损伤形貌

方块弹体冲击损伤可分为三种类型: 面损伤、边损伤和角损伤, 如图 8 所示。虽然冲击试验所用弹体包括边长 2 mm 方块和 3 mm 方块, 两种尺寸方块的试验速度也有所区别, 但是损伤类型不依赖于以上试验参数。换言之, 冲击损伤类型是随机的。当弹体以某个平面撞击试样, 平面正下方受到撞击发生变形, 和弹体平面边缘接触的材料受到垂直剪切作用与周围脱离, 在弹体下面材料的挤压下发生

脱落, 形成与弹体平面尺寸近似的冲击损伤。高速弹体边缘接触试样时, 弹体切入试样, 受剪切的材料向前滑动, 同时弹体受到试样的反作用而旋转, 将剪切变形的材料带出损伤, 形成轮廓清晰的边损伤。角损伤两侧的材料受到巨大的剪切作用而堆积崩裂, 形成带有一定坡度的弧形缺口。不仅损伤类型和速度没有关系, 损伤角度也是随机的。随着冲击能量的增加, 损伤深度增大。

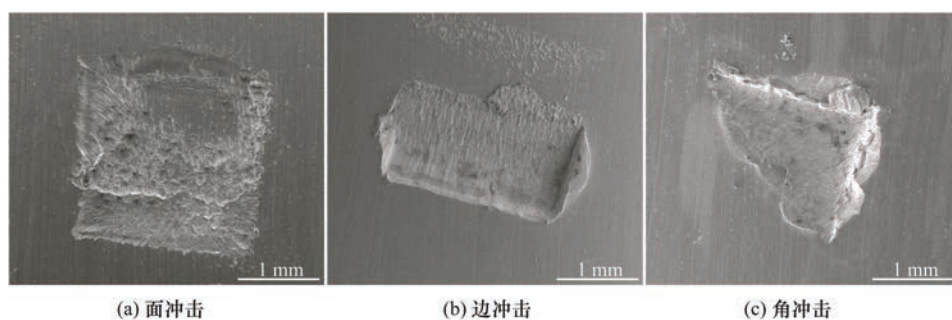


图 8 方块弹体冲击损伤形貌

EBSD 衍射花样可反映试样的晶体对称性、晶粒取向、晶粒完整性和晶格常数等信息。本研究观测了未变现区域、球形弹体冲击损伤底部和侧面、方块弹体冲击损伤底部四个位置的晶体形态。试样表面为回火马氏体，由图 9a 可知，回火马氏体晶粒细小，取向各异。300 m/s 速度下球形弹体冲击后，弹坑底部和两侧截面 EBSD 衍

射花样表明试样经历了较大的剪切变形(图 9b, 图 9c)，这一结果和图 6 中损伤截面形貌一致。表面上看弹坑周围材料较为完整，而弹坑周围隐藏着剪切破坏区。方块冲击试样表面，局部材料在弹体的高速切削作用下失去，而对损伤周围材料的影响较小，从图 9d 可知，损伤表面下材料保持初始形态。

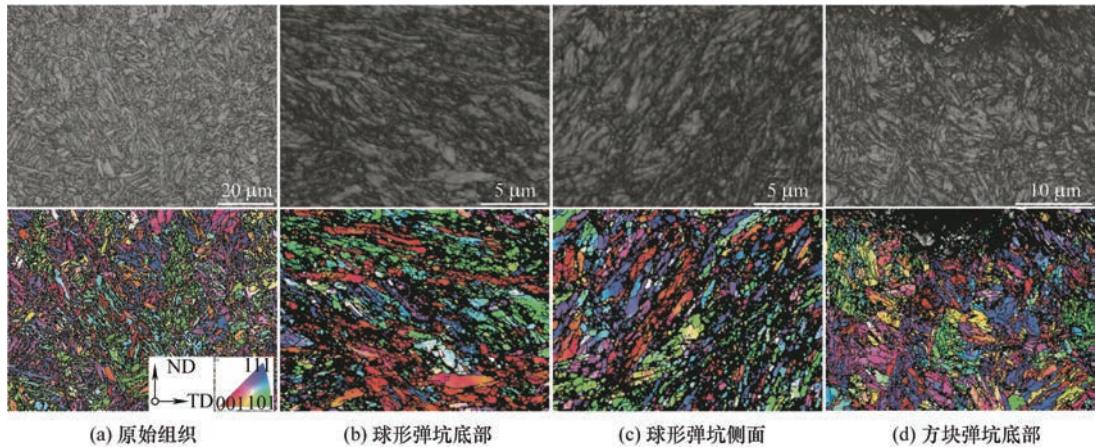


图 9 原始试样和冲击损伤后 EBSD 图

相同工况下，球形弹体冲击损伤形貌相似，深度可以采用平均值进行表示，如表 3 所示。同种工况下，方块弹体冲击损伤尺寸千差万别，无法用某一个值表示。

表 3 不同速度 v 、角度 θ 下球形弹体冲击损伤深度 μm					
$\theta/ (^{\circ})$	$v/(\text{m/s})$				
	100	200	300	400	500
30	—	182	261	373	—
45	—	247	397	594	—
60	—	293	484	750	—
75	—	348	638	871	—
90	155	395	659	699	1 020

对文中所有损伤试样进行疲劳试验，研究损伤尺寸与疲劳强度的关系，同时也测试了光滑试样的疲劳强度，约为 720 MPa。100 m/s 球形弹体冲击试样疲劳强度与光滑试样相比降低幅度约为 5%，考虑到疲劳试验试样样本较少以及疲劳试验结果的离散性，可认为此种损伤对试样疲劳强度没有影响。200 m/s 冲击速度下，试样的疲劳强度明显降低，约为光滑试样疲劳强度的 70%。随着入射角度的减小，疲劳强度受损伤的影响减弱，在 30° 入射角度下，损伤对疲劳强度的影响极小。300 m/s 速度下，垂直冲击试样疲劳强度大幅下降，约为光滑试样的 50%，

疲劳强度对弹体入射角度不敏感。当冲击速度进一步提高，试验结果与 300 m/s 类似，疲劳强度略有降低。方块弹体冲击损伤试样疲劳强度随着冲击能量的增大而降低，但是离散性较大。

球形弹体垂直冲击形成规则的弹坑，如图 10 所示。对于 200 m/s 速度下的试样，疲劳裂纹对称地萌生于弹坑边缘。裂纹从两侧扩展，在弹坑下方相遇，形成一个脊。如果冲击损伤边缘材料出现缺失或者微裂纹失效，在疲劳载荷作用下，疲劳裂纹直接从这些位置扩展。由于失效位置具有不确定性，缺陷两侧边缘的裂纹可能不在一个平面上，相遇的时候形成一个台阶。200 m/s 速度下斜冲击试样疲劳裂纹优先形成于弹坑出射区边缘，这些位置存在掉块、剥离等形式材料缺失以及微裂纹，如图 11 所示。当速度进一步提高，裂纹源不再局限于出射区边缘，靠近边缘的弹坑表面材料失效的区域也是裂纹的源头。斜冲击试样疲劳裂纹初步扩展很快穿过整个损伤区域进一步扩展至失效。

面冲击损伤深度较浅(图 12a)，损伤的某一个角深度略大并且在与主应力垂直的平面上，疲劳裂纹由此点扩展。边缺陷疲劳裂纹同样从某一个角萌生(图 12b)，同时边损伤沟槽也会萌生裂纹。角损伤疲劳裂纹从多处同时萌生扩展(图 12c)。这些裂纹源可能在损伤的某个角，也可能在损伤某一侧材料堆积区域。

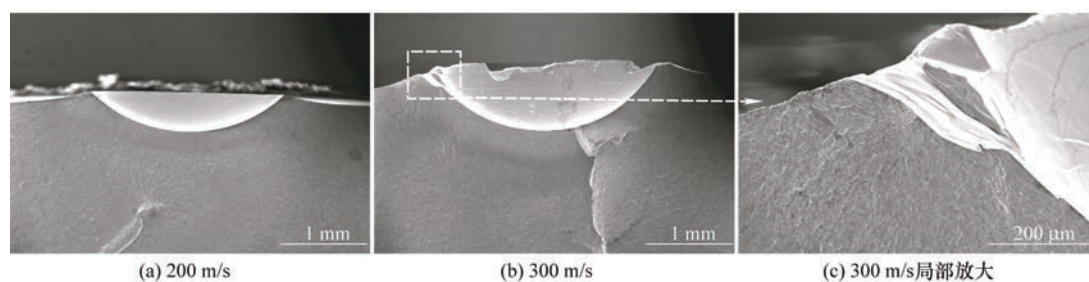


图 10 球形弹体垂直冲击损伤形貌

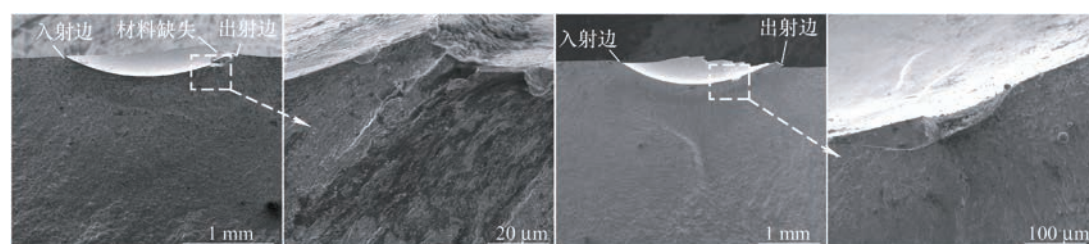


图 11 球形弹体 200 m/s 速度 45° 入射角冲击损伤形貌

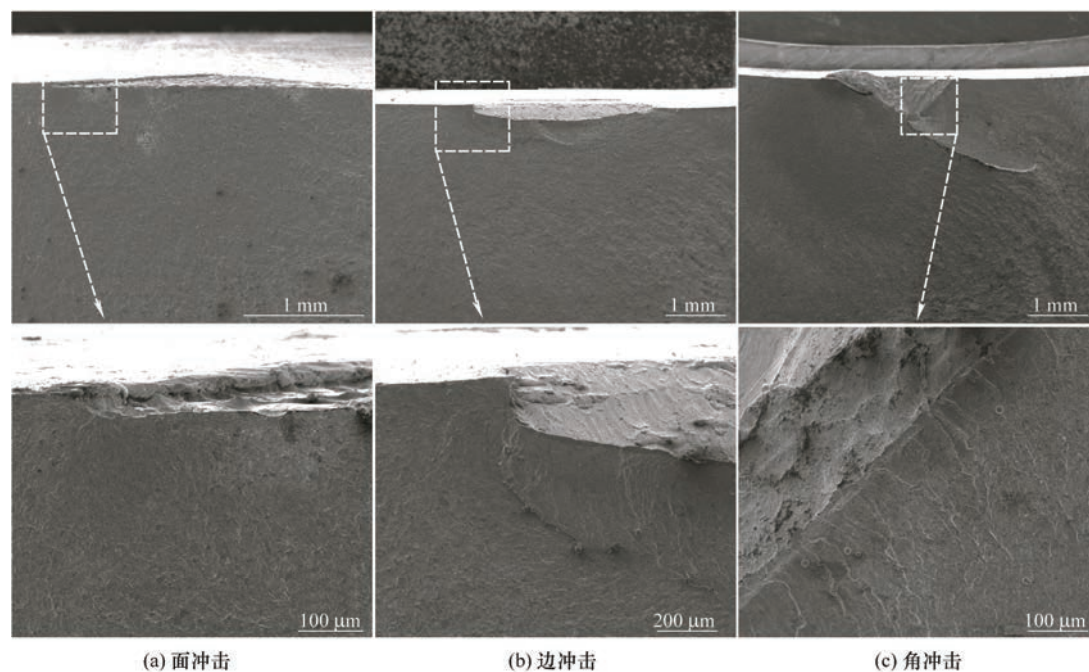


图 12 方块弹体冲击损伤试样断口形貌

3.2 损伤机理与评价

感应淬火处理的 S38C 车轴表面强度和硬度较高, 受到轻微冲击, 局部材料塑性变形, 产生类似准静态压痕的损伤。此时的损伤深度较浅, 应力集中系数较小, 加上局部形变强化作用, 此类损伤对试样疲劳强度影响较小或者说没有影响, 比如试验中 100 m/s 垂直冲击损伤以及 200 m/s 速度下 30° 的斜冲击损伤。200 m/s 垂直冲击损伤边缘突出试样原始表面, 成为最大应力集中点。根据 BOYCE 等^[22]研究显示, 损伤边缘存在残余拉应力。在这两个因素的复合作用下, 疲劳裂纹从弹坑两侧边缘对

称萌生扩展, 疲劳强度明显下降。对于 300 m/s 速度或者更高速度, 试样受到弹道冲击破坏, 损伤局部材料沿着弹体向试样表面滑移, 形成大量的显微裂纹和材料缺失。另外一个现象是弹坑表面下的材料出现绝热剪切带以及沿着绝热剪切带的裂纹, 对于此类损伤试样, 在疲劳循环载荷作用下, 微裂纹和缺口直接扩展导致试样断裂。

当弹体入射角度较小时, 产生类似刮擦的损伤, 试样疲劳强度变化可以忽略。随着入射角度的增大, 更大体积的材料受到剪切作用, 弹体速度较小时能量不足, 并不能去除弹体出射前方的材料。而速度

更大时, 出射区材料掉块严重, 形成缺口。200 m/s 速度下, 随着入射角度的增大, 损伤尺寸增加, 疲劳强度降低。冲击速度增大至 300 m/s 或者 400 m/s 时, 疲劳强度对缺陷尺寸不再敏感, 冲击速度和角度对试样疲劳强度影响较小。总之, 在一定范围内, 疲劳强度和损伤深度相关, 当损伤深度超过一定范围或者损伤破坏体积过大, 疲劳强度降至原始试样的 50% 左右。

球形弹体表面光滑, 垂直冲击形成规则弹坑, 斜冲击弹坑虽然不规则, 仍然具有一定规律。以方块为代表具有尖角弹体的冲击损伤具有多样性。边接触和面接触损伤主轴与试样主应力面存在多种夹角, 这些因素都会影响试样的裂纹萌生位置和疲劳强度。方块冲击损伤与球形弹体冲击损伤最大的区别是每一个方块冲击损伤均会产生材料的局部失效, 主要失效形式是材料缺失和微裂纹。

无论损伤产生的方法, 损伤深度随着冲击能量的增大而增大, 如图 13 所示。在能量相当的情况下, 尖锐角冲击产生更深的缺陷, 这与已有的研究结果一致^[11]。将文中所有损伤试样疲劳强度与损伤深度置于同一图中, 疲劳强度随着深度的增大而降低, 如图 14 所示。球形弹体冲击损伤试样疲劳强度相对集中, 疲劳强度对深度的依赖程度更大。方块弹体冲击损伤试样疲劳强度的分散性大于球形弹体冲击试样。损伤深度小于 400 μm , 球形弹体损伤试样疲劳强度处于分散带的上限, 而方块弹体处于分散带的下限, 可以认为球形弹体损伤是同等深度下最轻微情况, 方块弹体冲击损伤则代表最恶劣的工况。当深度大于 400 μm , 方块弹体损伤试样疲劳强度反而略高于球形弹体损伤, 这是因为球形弹体损伤底部存在材料破坏, 所测深度小于有效深度。方块冲击损伤影响区域集中在弹坑侧面, 弹坑底部受影响区域较浅。

车轴损伤和疲劳性能关系一直是结构完整性领域研究的热点^[23]。MURAKAMI 等^[24]归纳出含缺陷试样疲劳性能与缺陷尺寸关系的经验公式。另外, Kitagawa-Takahashi(K-T)模型从断裂力学的角度评定了含有缺陷试样的疲劳极限。以上的理论都需要对损伤尺寸进行精确测量, 同时还需要对试样全局应力、局部应力(包括残余应力)进行可靠的评估, 方可获得可靠的预测结果。这种方法理论上可行, 对于实际工程应用, 这些方法的可操作性严重不足。本文试验材料来自 S38C 车轴, 试验材料和实际车轴一致; 车轴实际应力是旋转弯曲, 本文中试验应力状态和车轴实际应力状态一致。S38C 车轴许用应

力幅值约为 150 MPa, 而表面 2 mm 深度的残余压应力高于 200 MPa, 理论上, 外物致损造成的裂纹不会扩展。从本研究所制造的最大深度损伤试样疲劳强度试验结果可知, 显微镜下深度 1 mm 的损伤不影响车轴安全, 目前的车轴检修标准更为严格。需要指出的是, 本文中应力比大于实际车轴, 所得试验结果保守。以往研究采用压痕、电火花、钻孔等方式制造损伤, 这些方式和弹体冲击损伤存在一定差异。试验采用空气炮制造损伤, 损伤尺寸涵盖了实际车轴表面损伤调研结果, 能够评价损伤对车轴疲劳强度的影响。损伤深度可作为车轴疲劳强度预测的一个指标, 本研究为车轴外物致损的评价提供了可靠的试验依据。

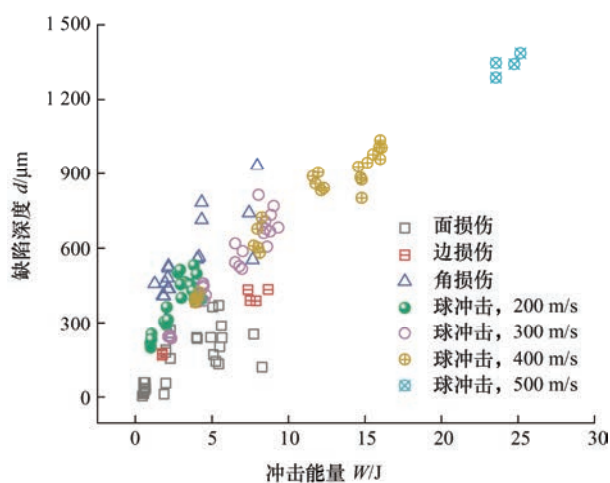


图 13 冲击能量与缺陷深度的关系

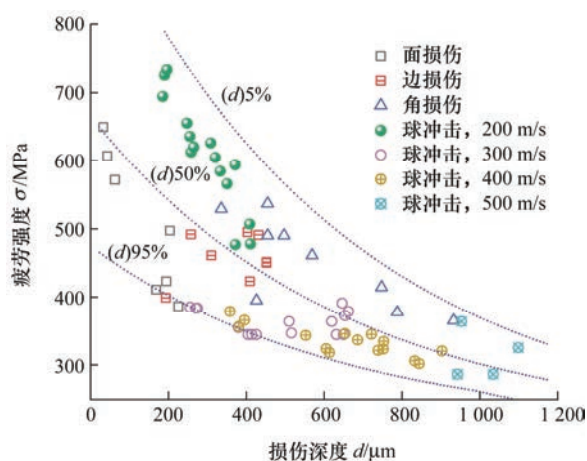


图 14 试样冲击损伤深度与疲劳强度的关系

4 结论

(1) 球形弹体垂直冲击 S38C 车轴试样形成规则的弹坑。速度为 100 m/s 时, 损伤对试样疲劳强度没有影响。200 m/s 冲击损伤边缘突出表面, 成为

疲劳裂纹萌生源, 试样疲劳强度下降 30%。当冲击速度为 300 m/s 或者更高时, 造成损伤边缘材料缺失以及微裂纹, 材料疲劳强度降至光滑试样的 50% 左右。

(2) 200 m/s 速度下斜冲击损伤对试样疲劳强度的影响随着入射角度的增大而增大。300 m/s 和 400 m/s 斜冲击试样疲劳强度对弹体入射角度不敏感, 斜冲击的垂直形变和横向剪切作用造成弹体出射区材料掉块缺失。

(3) 方块弹体冲击损伤包括角损伤、边损伤和面损伤三种类型。弹体尺寸和冲击速度两个因素与损伤类型没有明显关系, 损伤深度呈现随着冲击能量增大而增大的趋势。

(4) 不考虑损伤形成条件, 损伤试样疲劳强度随着损伤深度的增大而降低, 但是具有一定的离散性。本研究中损伤类型和尺寸囊括了实际车轴损伤, 试验方法和结果可为 S38C 车轴损伤评价提供试验依据。

参 考 文 献

- [1] 翟婉明, 金学松, 赵永翔. 高速铁路工程中若干典型力学问题[J]. 力学进展, 2010, 40(4): 358-374.
ZHAI Wanming, JIN Xuesong, ZHAO Yongxiang. Some typical mechanics problems in high-speed railway engineering[J]. Advances in Mechanics, 2010, 40(4): 358-374.
- [2] 吴圣川, 任鑫焱, 康国政, 等. 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(1): 81-114.
WU Shengchuan, REN Xinyan, KANG Guozheng, et al. Progress and challenge on fatigue resistance assessment of railway vehicle components[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2021, 21(1): 81-114.
- [3] 王超, 杨冰, 朱涛, 等. 表面强化车轴裂纹扩展及剩余寿命预测方法研究[J/OL]. 机械工程学报, 1-12[2022-09-29]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2187.TH.20220922.1930.002.html>
WANG Chao, YANG Bing, ZHU Tao, et al. Research on crack propagation and remaining life prediction method of surface strengthened axle[J/OL]. Journal of Mechanical Engineering, 1-12 [2022-09-29]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2187.TH.20220922.1930.002.html>
- [4] 周素霞, 卢俊霖, 吴毅, 等. 基于直流电位降的高铁车轴裂纹检测研究[J]. 机械工程学报, 2022, 58(14): 288-295.
ZHOU Suxia, LU Junlin, WU Yi, et al. Research on crack detection of high-speed railway axle based on direct current potential drop[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2022, 58(14): 288-295.
- [5] 朱静, 顾家琳, 周惠华, 等. 高速列车空心车轴国产化的选材和试制[J]. 中国铁道科学, 2015, 36(2): 60-67.
ZHU Jing, GU Jialin, ZHOU Huihua, et al. Material selection and trial manufacture for localization of hollow axle for high speed train[J]. China Railway Science, 2015, 36(2): 60-67.
- [6] 李亚波, 杨凯, 陈一萍, 等. S38C 车轴钢的旋转弯曲和超声振动疲劳性能[J]. 润滑与密封, 2017, 42(3): 124-128, 140.
LI Yabo, YANG Kai, CHEN Yiping, et al. Rotating bending and ultrasonic vibration fatigue properties of axle steel S38C[J]. Lubrication Engineering, 2017, 42(3): 124-128, 140.
- [7] 杜松林, 汪开忠, 胡芳忠. 国内外高速列车车轴技术综述及展望[J]. 中国材料进展, 2019, 38(7): 641-650.
DU Songlin, WANG Kaizhong, HU Fangzhong, Overview and prospect of axle technology for high speed trains at home and abroad[J]. Materials China, 2019, 38(7): 641-650.
- [8] 张闰琦. S38C 材质车轴疲劳寿命及裂纹扩展行为研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2021.
ZHANG Runqi. Study on fatigue life and crack growth behavior of S38C axle[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2021.
- [9] 任尊松, 吕晓旭, 李秋泽. 典型缺陷车轴应力分布及对疲劳性能影响研究[J]. 北京交通大学学报, 2020, 44(1): 57-63.
REN Zunsong, LÜ Xiaoxu, LI Qiuze. Research on the stress distribution of axle with typical defects and its influence on fatigue performance[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2020, 44(1): 57-63.
- [10] 吴毅, 尹鸿祥, 张澎湃, 等. 含异物击打伤高速动车组车轴疲劳寿命预测[J]. 中国铁道科学, 2021, 42(2): 116-124.
WU Yi, YIN Hongxiang, ZHANG Pengpai, et al. Fatigue life prediction of high-speed EMU axle with foreign object damage[J]. China Railway Science, 2021, 42(2): 116-124.
- [11] 周素霞, 孙宇铎, 吴毅, 等. 车轴表面不同冲击缺陷的疲劳参数试验与仿真[J]. 中国科技论文, 2021, 16(10): 1080-1086.

- ZHOU Suxia, SUN Yuduo, WU Yi. Fatigue parameters test and simulation of different impact defects on axle surface[J]. China Science Paper, 2021, 16(10): 1080-1086.
- [12] 沈训梁, 鲁连涛, 姜洪峰, 等. 车轴钢小试样及实物车轴中夹杂物尺寸对疲劳强度影响的差异分析[J]. 机械工程学报, 2010, 46(16): 48-52.
- SHEN Xunliang, LU Liantao, JIANG Hongfeng, et al. Effect of inclusion size on the fatigue strengthen of small specimens and railway alloy axles[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(16): 48-52.
- [13] 董懿辉, 鲁连涛, 李小萱, 等. 空心轴与实心轴过盈配合结构微动磨损与疲劳的仿真分析[J]. 机械工程学报, 2022, 58(5): 161-169.
- DONG Yihui, LU Liantao, LI Xiaoxuan, et al. Simulation analysis of fretting wear and fatigue of press-fitted structure of hollow axle and solid axle[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2022, 58(5): 161-169.
- [14] MAKINO T, KATO T, HIRAKAWA K. Review of the fatigue damage tolerance of high-speed railway axles in Japan[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2011, 78(5): 810-825.
- [15] 高杰维. 表面凹坑缺陷对高速列车车轴钢疲劳性能影响研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2017.
- GAO Jiewei. Research on influence of surface pit defect on the fatigue property of high-speed train axle steel[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2017.
- [16] 林浩博. 高速动车组 S38C 车轴疲劳、裂纹扩展特性及可靠性研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2017.
- LIN Haobo. Studies on the fatigue, crack propagation characteristics and reliability of EMU high speed S38C axle[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2017.
- [17] WU S C, XU Z W, KANG G Z, et al. Probabilistic fatigue assessment for high-speed railway axles due to foreign object damages[J]. International Journal of Fatigue, 2018, 117: 90-100.
- [18] WU S C, LUO Y, SHEN Z, et al. Collaborative crack initiation mechanism of 25CrMo4 alloy steels subjected to foreign object damages[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2020, 225: 106844.
- [19] 潘向南. S38C 车轴冲击损伤疲劳性能研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2018.
- PAN Xiangnan. Study on fatigue performance of impact damage on S38C axle[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2018.
- [20] GAO J W, PAN X N, HAN J, et al. Influence of artificial defects on fatigue strength of induction hardened S38C axles[J]. International Journal of Fatigue, 2020, 139: 105746.
- [21] WANG Y, LIU X, LI Z, et al. Research on evolution law of material comprehensive performance of S38C steel for high speed railway axle[J]. International Journal of Modern Physics B, 2019, 33: 1940012.
- [22] BOYCE B L, CHEN X, HUTCHINSON J W, et al. The residual stress state due to a spherical hard-body impact[J]. Mechanics of Materials, 2001, 33(8): 441-454.
- [23] GAO J W, DAI X, ZHU S P, et al. Failure causes and hardening techniques of railway axles—a review from the perspective of structural integrity[J]. Engineering Failure Analysis, 2022, 141: 106656.
- [24] MURAKAMI Y, BERETTA S. Small defects and inhomogeneities in fatigue strength: experiments, models and statistical implications[J]. Extremes, 1999, 2(2): 123-147.

作者简介: 高杰维, 男, 1986 年出生, 博士后。主要研究方向为高速列车结构完整性与寿命预测。

E-mail: jiewei@126.com

朱顺鹏(通信作者), 男, 1983 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为结构完整性与可靠性分析、损伤容限设计与寿命预测、人工智能与健康评估。

E-mail: zspeng2007@uestc.edu.cn