

含异物击打伤高速动车组车轴疲劳寿命预测

车轴是高速动车组的关键部件。车轴断裂极有可能造成动车组脱轨，导致灾难性的后果。根据欧洲铁路管理局（ERA）铁路安全性能报告的统计，平均约每 5 000 万 km 运营里程发生 1 次断轴事故。断轴事故调查分析表明，高周疲劳是车轴的主要失效模式[1]，且以车轴表面缺陷导致的疲劳最为常见。动车组高速运行时异物很有可能高速冲击车轴，形成外物损伤缺陷（Foreign Object Damage，FOD）。FOD 周围的残余应力场对短疲劳裂纹扩展有显著影响[2-4]。部分学者分析了高铁车轴表面典型缺陷的表征方法和疲劳特性，研究缺陷大小等参数对车轴疲劳性能和疲劳寿命的影响规律[5-6]。部分学者从断裂力学或损伤的角度评估了车轴的疲劳强度和损伤容限[7-11]，表明小于临界尺寸的表面缺陷对 25CrMo4 车轴或 EA4T 车轴的疲劳强度几乎没有影响。但也有研究表明，超过临界尺寸的表面缺陷将导致车轴在低于疲劳极限的载荷作用下断裂[12-13]。疲劳损伤是与时间正相关的塑性应变高度局部化损伤，基于此理念提出损伤过程区（Damage Process Zone，DPZ）的概念[14]，认为疲劳损伤局限在 DPZ 中。可引入疲劳指示参数（Fatigue Indicator Parameter，FIP）[15]表征累积损伤的程度，进而建立 FIP 与疲劳寿命的关系。

在修程修制改革的工作要求下，延长检修周期成为车轴运维的必然要求。而车轴表面击打伤影响车轴疲劳性能，成为延长检修周期的制约因素。为预防由于 FOD 引发的断轴事故，维护铁路运输安全，有必要加强对车轴 FOD 问题的深入研究，为动车组车轴修程修制改革提供试验基础和理论支撑。

本文以小试样寿命预测模型为基础，考虑尺寸效应，构建含异物击打伤实物车轴寿命预测模型。以缺陷尺寸和交变应力为主要参量，对实物车轴进行寿命预测和台架验证。

1 试验设备、材料和方法

1.1 小试样疲劳试验

试验用疲劳小试样取自动车组新造 EA4T 车轴轴身距表面 10 mm

处，光滑小试样尺寸如图 1 所示。采用升降法确定疲劳极限，按成组试验法在较高应力水平下进行试验。试验设备为四连式悬臂梁型旋转弯曲疲劳试验机。

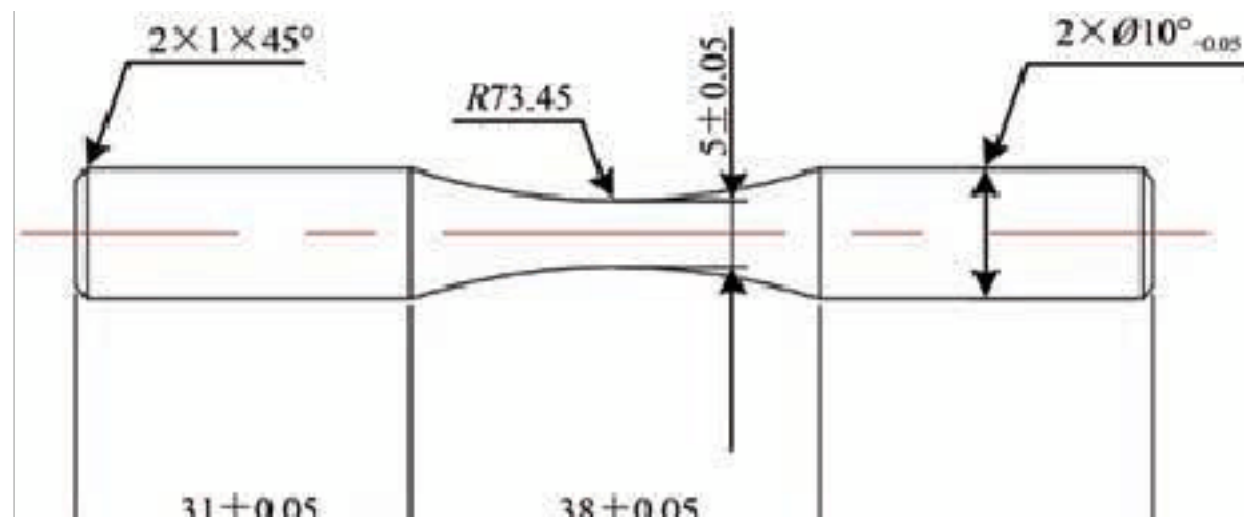


图 1 旋转弯曲疲劳小试样（单位：mm）

采用霍普金森压杆（SHPB）试验方法模拟车轴表面异物击打伤，试验装置如图 2 所示。试验时，采用正方体状钨钢弹丸高速冲击旋转弯曲疲劳小试样长度方向的中部位置，冲击速度为 $100 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。钨钢弹丸与车轴钢试样的接触方式较为随机，有面接触、棱边接触以及角接触 3 种方式，如图 3 所示。考虑较不利情况，选取棱接触或角接触损伤试样进行旋转弯曲疲劳性能测试。

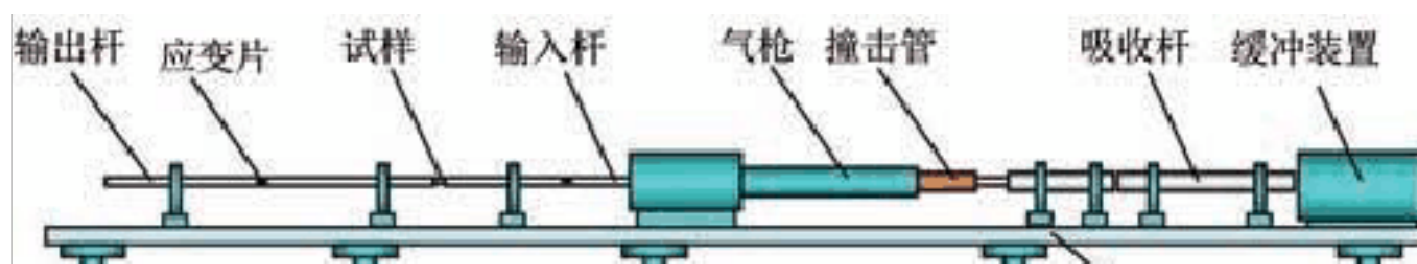


图 2 霍普金森压杆（SHPB）试验装置

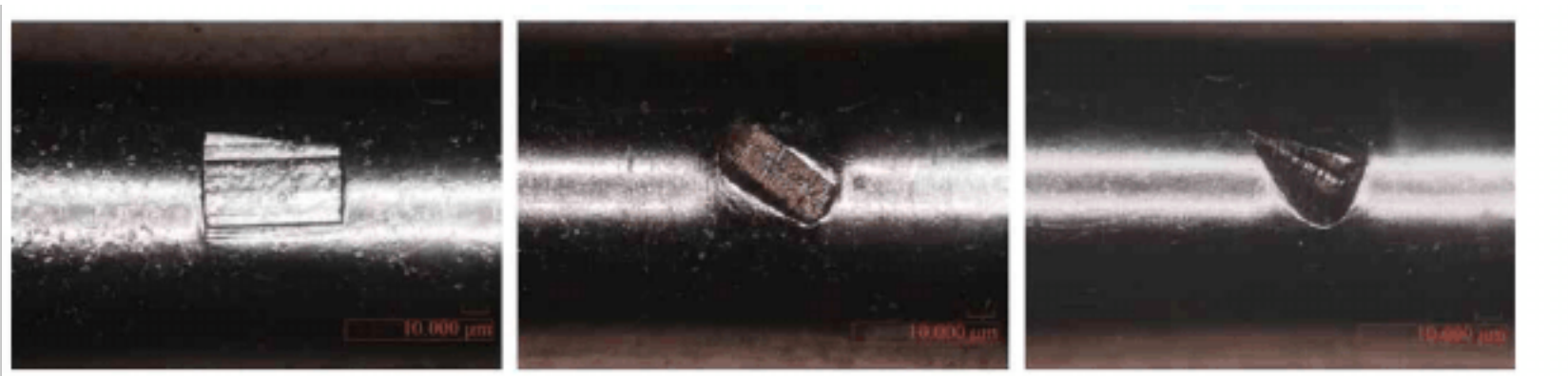


图 3 模拟冲击损伤时钨钢弹丸与车轴钢试样接触方式

1.2 实物车轴台架试验

试验用实务车轴为某 CRH380BL 型动车组 A4 级修时表面含严重异物击打伤车轴，如图 4 所示，已运行 76.334 万 km。将轮对退卸后的含击打伤车轴按要求加工疲劳试样，压装工装轮后组成半轮对，在全尺寸疲劳试验台上进行疲劳试验，如图 5 所示。该设备的原理是使

测试试样的振动频率尽可能接近共振频率，通过一定的振幅在试样的测试截面上获得目标应力水平。



图 4 含异物击打伤车轴

由于动车组车轴强度校核中，动力车轴空气制动最大截面应力 118.8 MPa ，动力车轴正常行驶过程中载荷均小于 70 MPa 。因此，台架试验时选用最苛刻的 118.8 MPa 恒定载荷施加于考核缺陷处。采用 Shapescan3D GFM 现场型光学三维划痕缺陷测量仪对缺陷位置、深度、面积、体积以及缺陷底部尖锐程度进行统计。



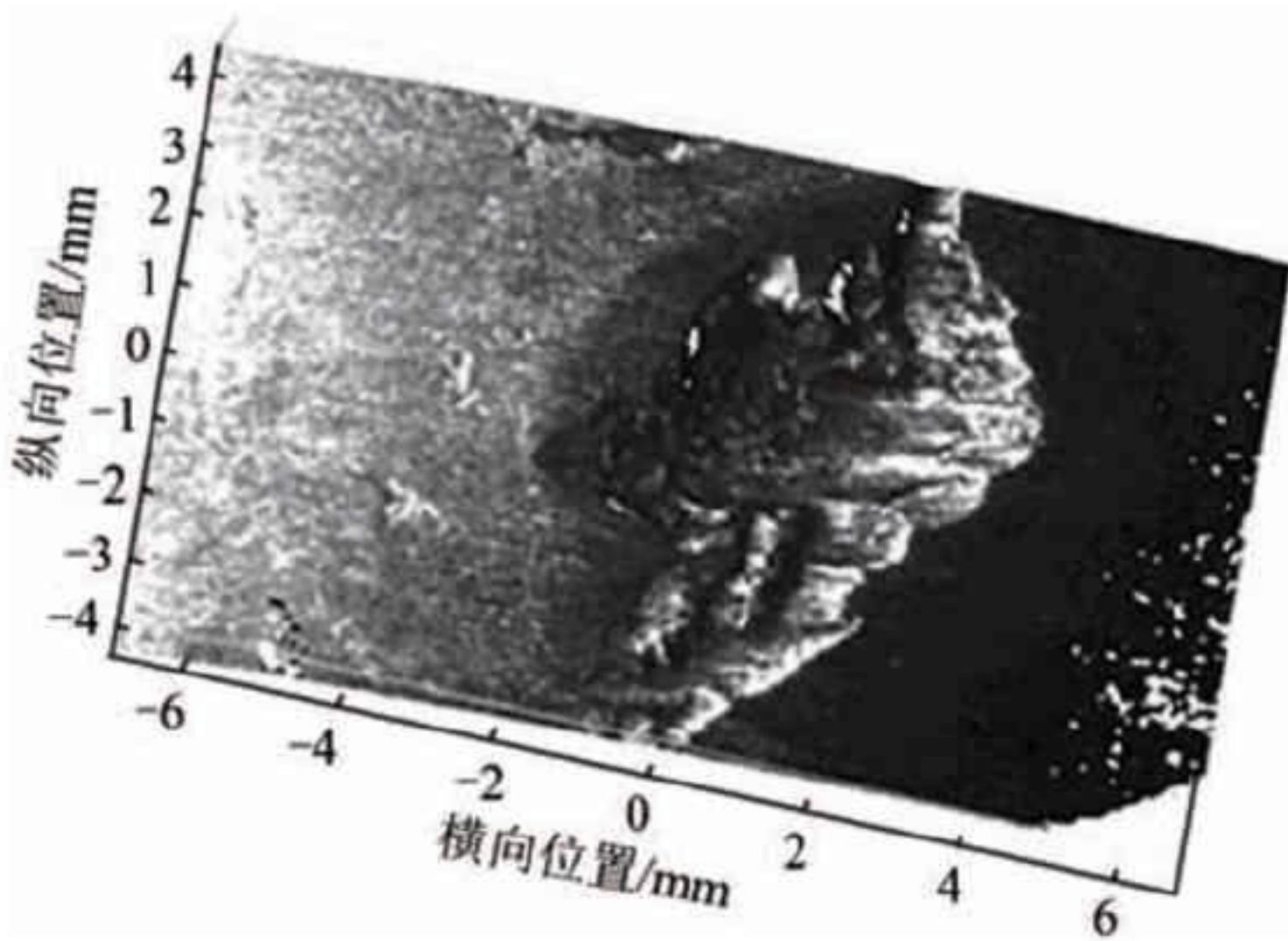
(a) 整体图



(b) 局部放大图

图 5 轮轴全尺寸疲劳试验台

采用测量设备得到含异物击打伤车轴的典型形貌及其横截面尺寸如图 6 所示。测量结果表明，击打伤深度一般不超过 2 mm 。



(a) 典型形貌

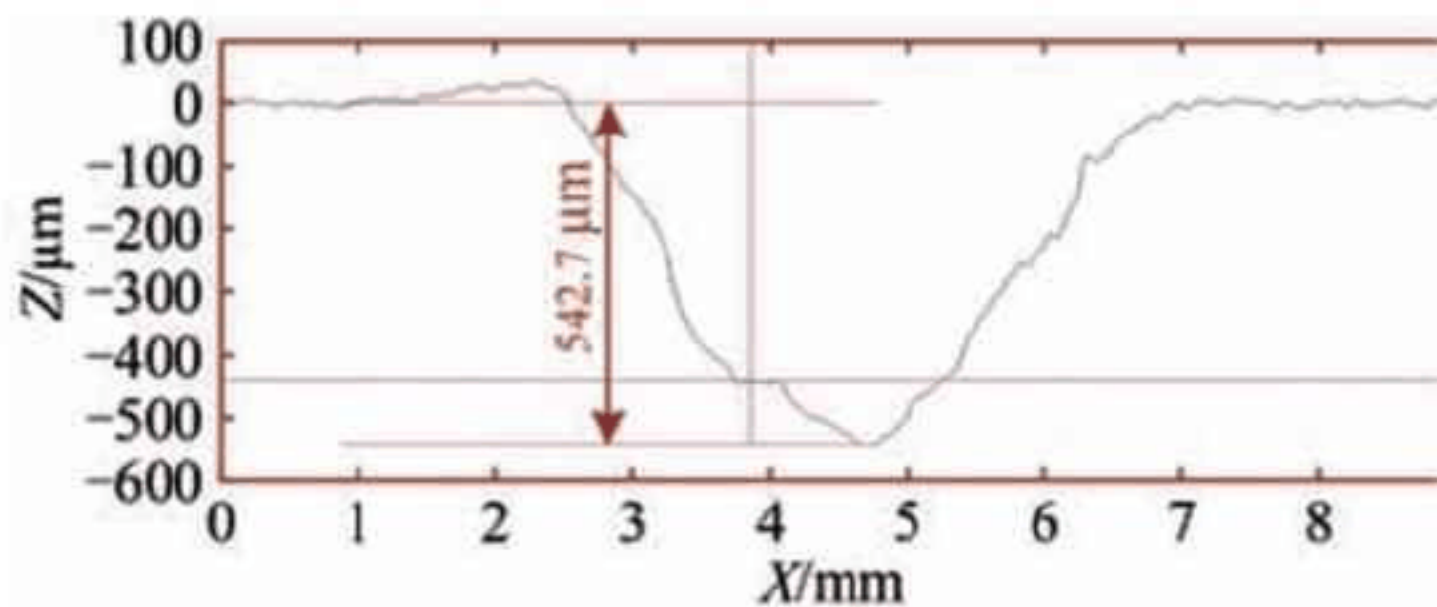


图 6 含异物击打伤车轴典型形貌和横截面尺寸

1.3 基于 FIP 的疲劳寿命预测

对于含异物击打伤车轴，引入缺陷临近区域的应力场强度（应力场强度与缺陷尺寸、远场应力、车轴的形状尺寸等相关）、滑移系上的循环变形等参数构建 FIP，FIP 的表达式[16]为

$$F_{IP} = \frac{\mu \Delta \sigma}{\sigma} \left(1 + k \frac{\Delta K}{\sigma \sqrt{a}} \right) \quad (1)$$

其中，

式中：FIP 为 FIP 值； μ 为施密德（Schmid）因子； $\Delta \sigma$ 为循环应

力幅值；E 为弹性模量；k 为与材料缺陷敏感性相关的常数，取值在 0.5~1.0 之间； ΔK_{th} 为代表损伤起始的应力强度因子幅值； ΔK 为缺陷附近的最大应力强度因子；Y 为形状因子；a 为裂纹深度。

对含缺陷疲劳小试样的疲劳性能进行数据拟合，得到 FIP 与疲劳寿命之间的关系为

$$N_f = \frac{E}{\Delta K} \frac{1}{Y} \frac{1}{a} \quad (2)$$

式中：Nf 为疲劳寿命； α 和 β 为拟合参数。

2 试验结果与讨论

2.1 含缺陷小试样的疲劳寿命预测

根据疲劳试验数据，得到小试样 S-N 曲线如图 7 所示。由图 7 可知，光滑小试样疲劳极限为 352 MPa，含缺陷小试样疲劳极限为 240 MPa。

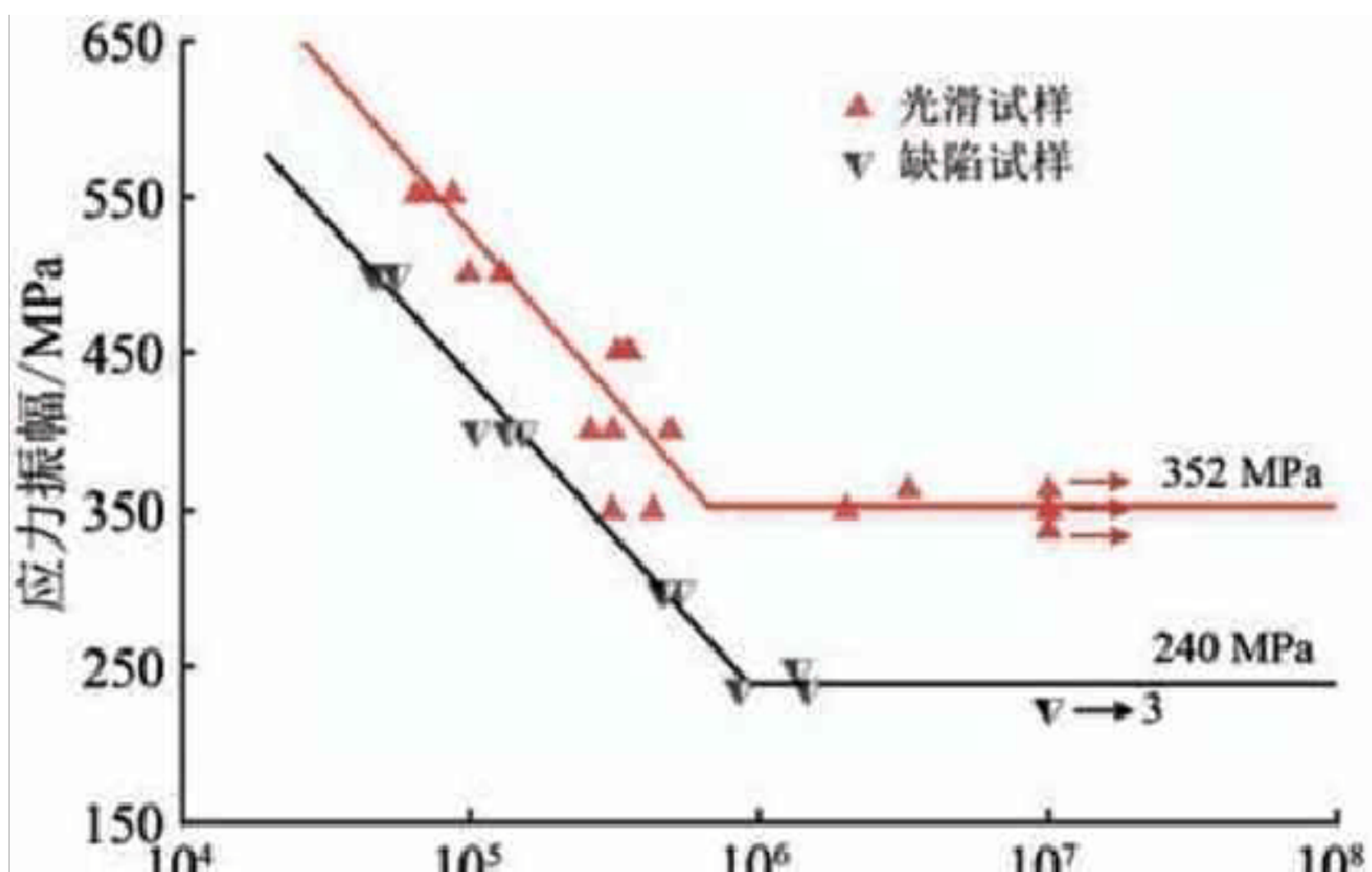


图 7 小试样 S-N 曲线

基于 FIP 损伤参量的理念，对小试样疲劳寿命进行预测。对于

EA4T 车轴材料，Schmid 因子 μ 取 $\frac{1}{2}$

0.49[17]，E 取 210 GPa， ΔK_{th} 取 10 MPa \sqrt{m} ， k 取 1。由式 (1) 可知，FIP 取决于外加循环应力 $\Delta \sigma$ 、缺陷深度 a 和与试样尺寸相关的形状因子 Y。

FIP 值与疲劳寿命 N_f 的关系如图 8 (a) 所示，拟合得到含缺陷 EA4T 车轴材料疲劳小试样寿命预测模型如式 (3) 所示，疲劳寿命预测结果评价如图 8 (b) 所示。

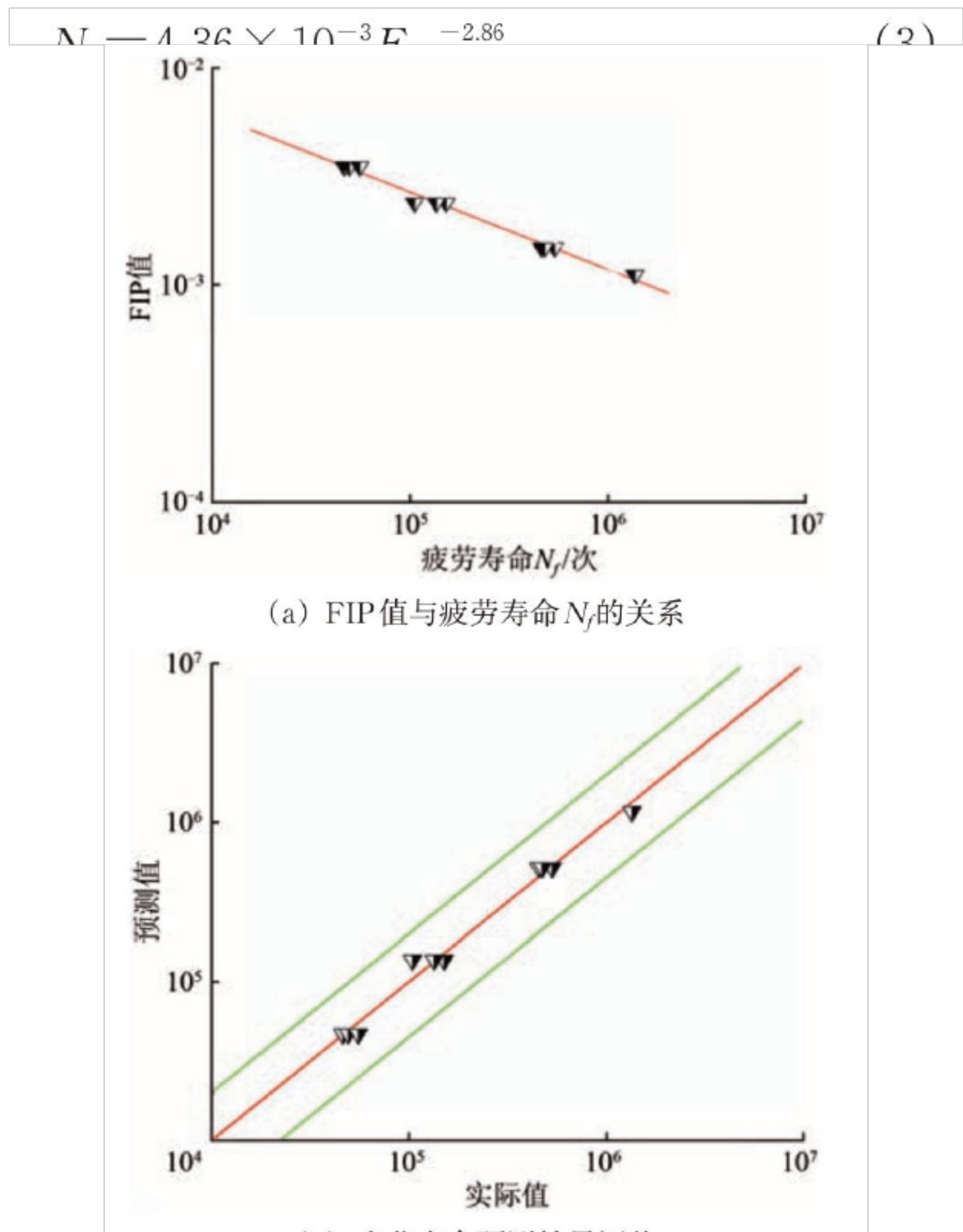


图 8 含击打伤 EA4T 车轴材料疲劳小试样寿命预测

由图 8 (b) 可知，疲劳寿命试验数据均在预测值的 2 倍线内，说明预测模型具有很高的精度，基于 FIP 的寿命预测模型适用于车轴疲劳

寿命的预测。

2.2 缺陷处残余应力

依据车轴疲劳小试样和正方体钨钢弹丸尺寸，采用 Abaqus 软件构建有限元模型。为保证冲击仿真的精度，在疲劳小试样中部与钨钢弹丸接触位置进行网格加密处理。为获取冲击后损伤附近区域的残余应力，在疲劳小试样的 2 端施加无反射边界条件，以缩短数值计算时疲劳小试样内部应力趋于稳定的时间。疲劳小试样和钨钢弹丸的有限元模型及网格划分如图 9 所示。

不同钨钢弹丸与疲劳小试样接触方式下冲击损伤附近区域的残余应力云图如图 10 和图 11 所示。

厌食症是指排除全身性和消化道器质性疾病，以较长时间的食欲减退或消失、食量减少甚至拒食为表现的病症，是一种饮食行为异常，多发生于 1~6 岁儿童，城市发病率高于农村[1]。长期厌食会导致贫血、营养不良、生长发育迟缓，并可造成机体免疫力下降，容易患其他疾病[2]。近年来，小儿厌食症有增长的趋势，本文从中西医角度对本病的病因概述如下。

从图 10 可知：在各个接触方式下冲击损伤附近区域的残余应力分布特点基本相似，均为冲击损伤上下 2 侧存在局部的拉伸残余应力，而左右 2 侧存在一定程度的压缩残余应力。

对胡家庄碳酸岩型稀土矿低盐度和高盐度包裹体使用等容线相交法，大致推测流体均一温度为 $190 \sim 230^{\circ}\text{C}$ ，均一压力为 $30 \sim 95\text{MPa}$ ，盐度变化范围为 $(15 \sim 20)\text{wt}\%\text{NaCl. eq}$ ，为碳酸岩型稀土矿，与国内第二大稀土矿——四川牦牛坪碳酸岩型稀土矿矿石类型相似，四川牦牛坪稀土矿 H 类包裹体均一温度集中在 $230 \sim 265^{\circ}\text{C}$ [17]，而山东微山稀土矿 H 类包裹体盐度变化为 $(16.0 \sim 22.4)\text{wt}\%\text{NaCl. eq}$ ，均一温度变化为 $121 \sim 238^{\circ}\text{C}$ ，故该稀土矿与微山稀土矿流体包裹体特征更具相似性。

网络的早期服务主要通过三方面技术，分别为电子邮件、网页以及数据挖掘。在搜索引擎中此三项技术得到充分应用，尤其在挖掘邮件内容的过程中，此三项技术起到了关键性作用。近几年，随着我国

wed 等技术的发展与应用，视频、文本以及图像等内容发生了不同程度的变化，与此同时，半机构化以及非机构化技术也相继出现，促使网络在应用期间出现移动网络以及物联网产生的数据化内容。

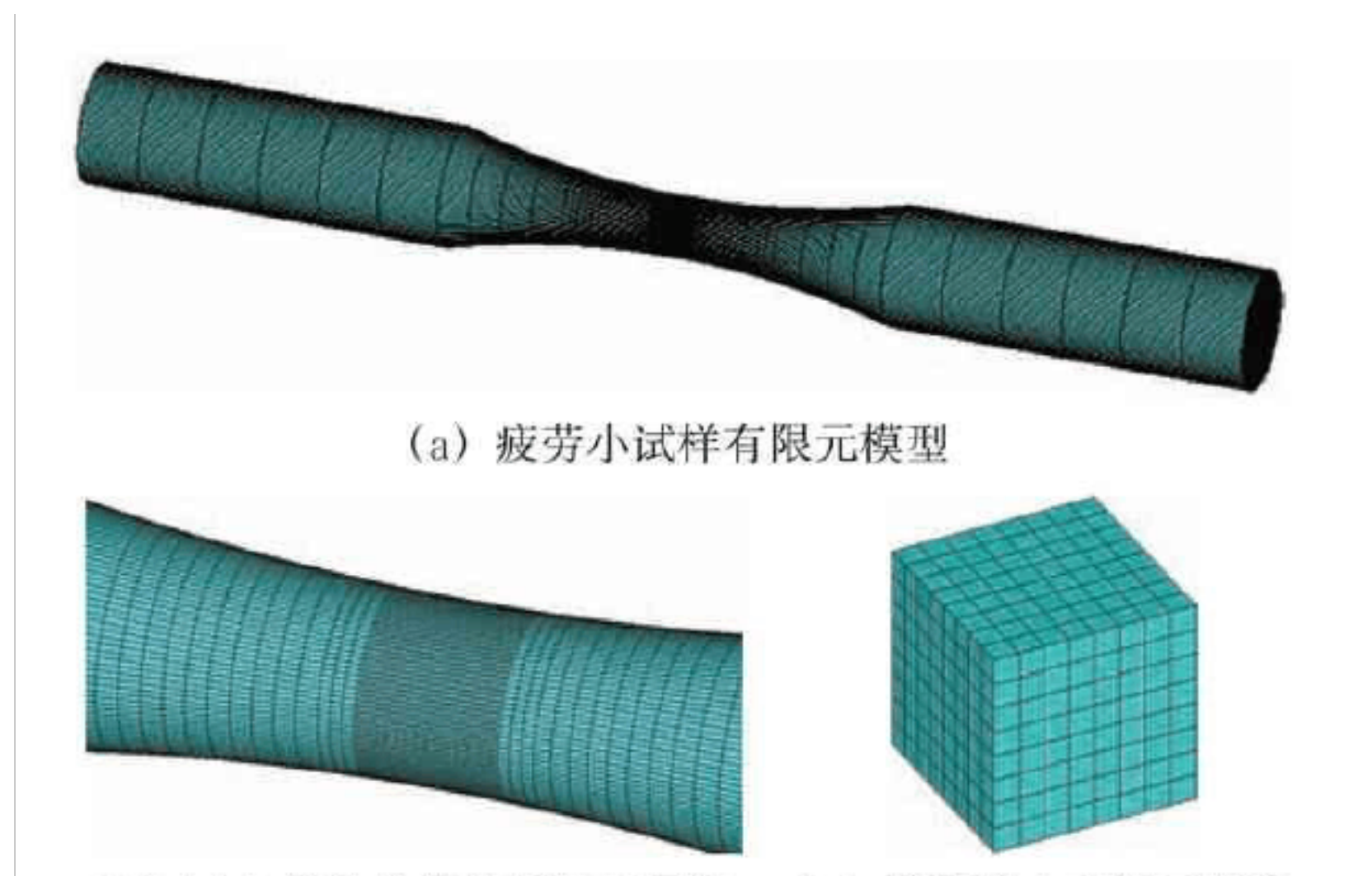
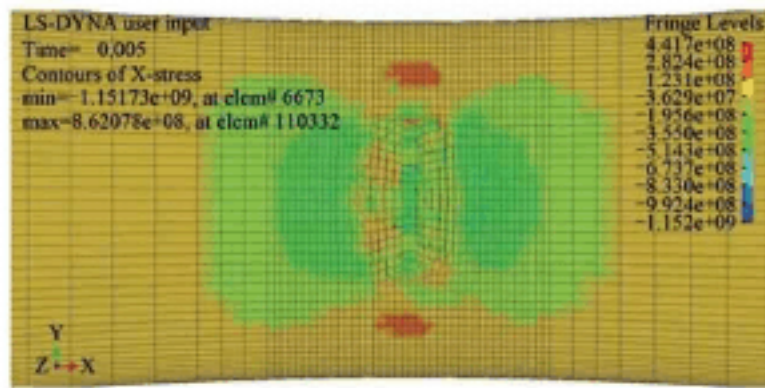


图 9 疲劳小试样和钨钢弹有限元模型

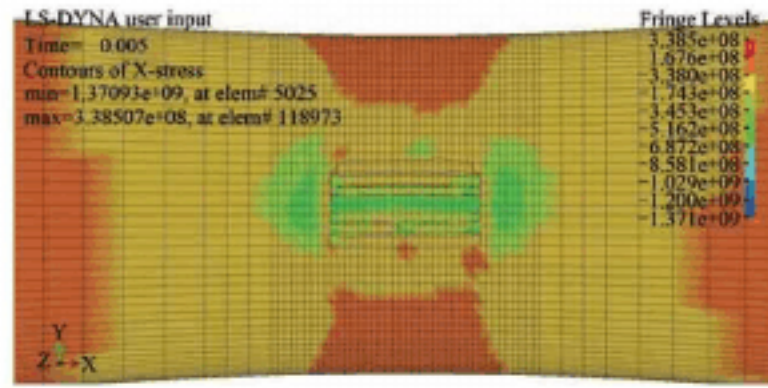
从图 11 可知：在冲击损伤底部存在一定范围的压缩残余应力，并且在所在区域的下方，还存在一定程度的拉伸残余应力，这种分布特点基本在各个接触方式中均有体现。

不同接触方式下疲劳小试样表面冲击损伤形貌如图 12 所示。从图 12 可知表面冲击损伤在小试样表面的具体分布和整体形态。

(1)检测车辆常温时启动性能。首先，要记录车辆的启动时间，测量方法过程如下：温度 $\geq 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，没有预热的情况下，按照作业规程要求直接启动车辆，与此同时用电子秒表开始记录动机开启到车辆运转的时间，并反复测试并记录三次，每次间隔时间为 2 min，并且要有两次以上的启动成功记录，以启动时间最长的一次作为最后结果。



(a) 棱边接触 (垂直)



(b) 棱边接触 (平行)

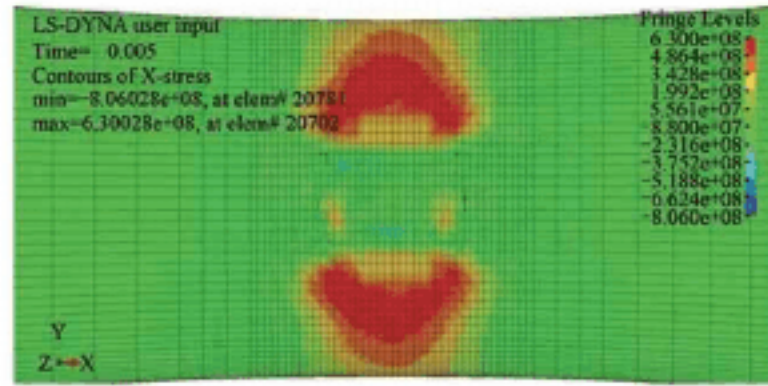
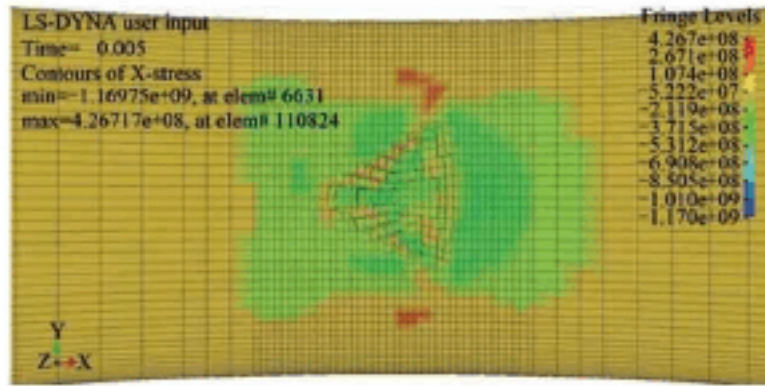


图 10 不同接触方式下冲击损伤正视图 (轴向)

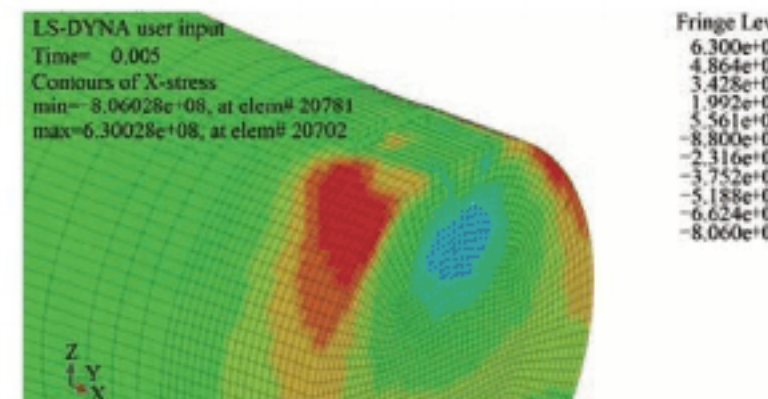
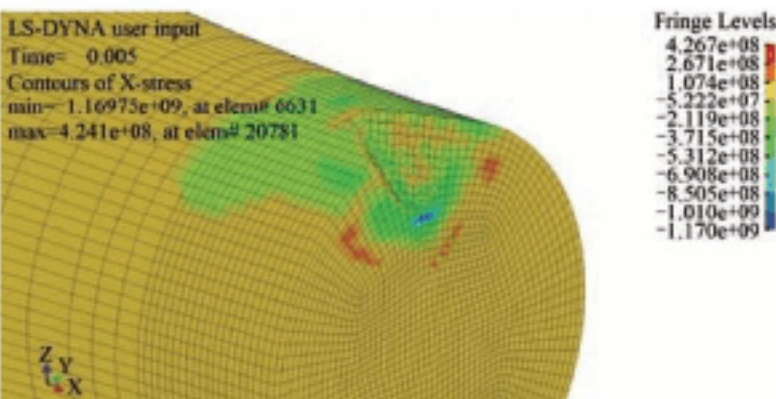
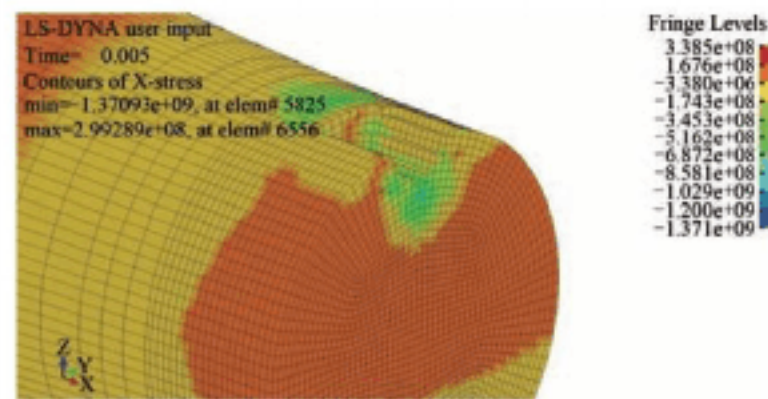
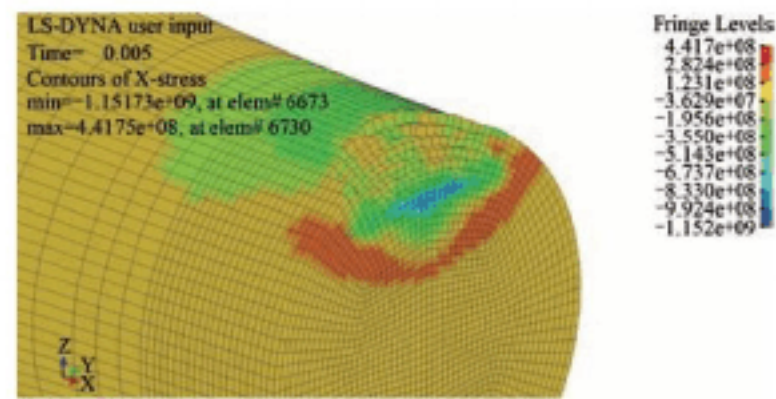
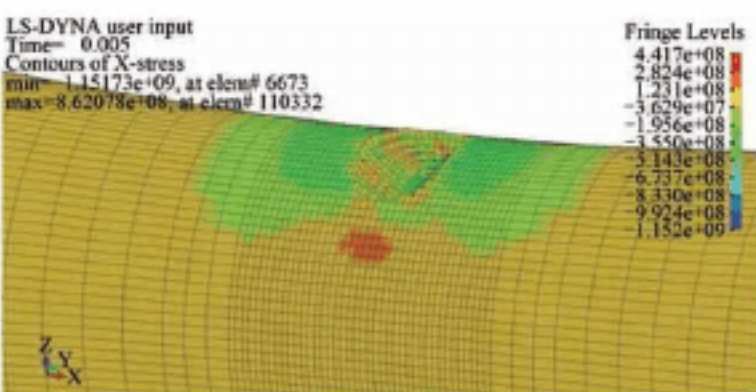
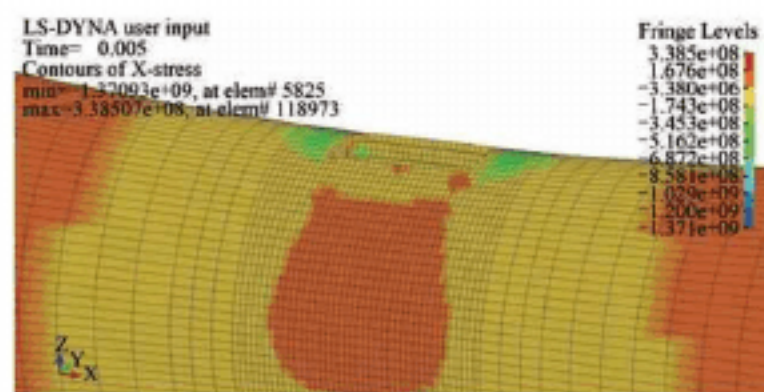


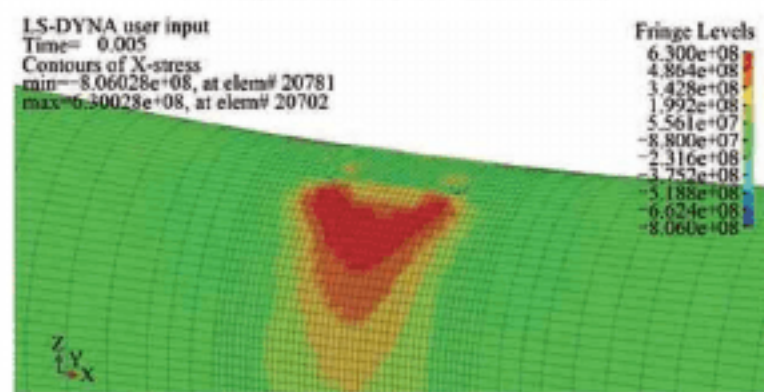
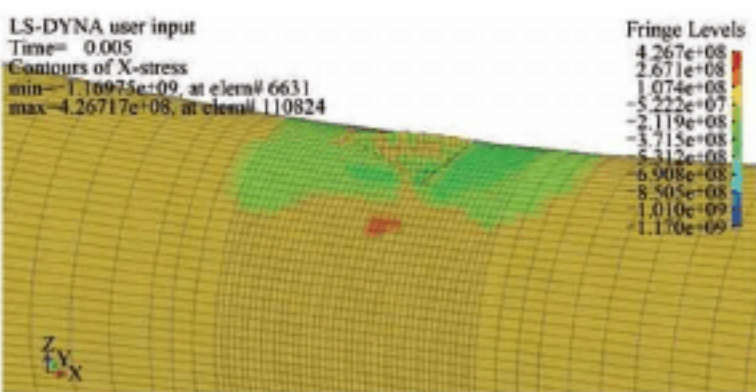
图 11 不同接触方式下冲击损伤剖面图 (轴向)



(a) 棱边接触 (垂直) 损伤形貌图



(b) 棱边接触 (平行) 损伤形貌图



以上内容仅为本文档的试下载部分，为可阅读页数的一半内容。如要下载或阅读全文，请访问：<https://d.book118.com/677152146006010001>