

## 基于晶体塑性理论的内外缺陷耦合对车轴裂纹萌生的影响

周素霞<sup>1,2</sup> 尚豪<sup>1,2</sup> 张昭<sup>3</sup>

(1. 北京建筑大学 机电与车辆工程学院, 北京 100044)

(2. 北京建筑大学 城市轨道交通车辆服役性能保障北京市重点实验室, 北京 100044)

(3. 中国原子能科学研究院, 北京 100044)

**摘要:**【目的】探究高速列车车轴内部与外部缺陷耦合作用对疲劳裂纹萌生的影响机制。【方法】首先,基于晶体塑性理论,在介观尺度上建立了车轴多晶体有限元模型;其次,对车轴试样进行了拉伸与冲击试验,结合有限元仿真分析了缺陷附近的应力场及结构变形;最后,基于应力分布和塑性应变能密度分布特点,对裂纹萌生位置进行了预测。【结果】结果表明,两缺陷间的相互作用随内部缺陷靠近表面外部缺陷而增强,从而促进裂纹萌生;当内部夹杂物缺陷位于模型中心时,两缺陷间相互作用最小,外部缺陷成为导致裂纹萌生的主导因素。

**关键词:** 晶体塑性理论; 缺陷耦合; 裂纹萌生; 应力场; 塑性应变能密度

**中图分类号:** U278.2 **DOI:** 10.16579/j.issn.1001.9669.2026.05.007

## 0 引言

车轴是高速列车转向架的关键零部件,是重要的承载部件,可以传递各种力,其疲劳破坏直接危及运输安全<sup>[1]</sup>。所以,在车轴设计中,通常按照无限寿命原则进行设计。在过去的几十年里,高速列车断轴事故引发了人们对车轴服役寿命的关注<sup>[2]</sup>,车轴断裂的发生概率虽然小,但一旦发生,通常会导致高速列车脱轨事故,造成大量人员伤亡和经济损失。

研究发现,车轴发生断裂的主要原因是车轴存在缺陷。据统计,车轴缺陷类型可分为内部夹杂物缺陷、冲击缺陷、划伤缺陷等<sup>[3]</sup>。车轴钢材料为优质碳素结构钢,硫、磷及其他有害杂质含量较低,纯度和化学成分均匀性较高,其中除含有铁、碳、硅、锰和有限量的磷、硫等杂质元素及其余元素外,不含其他作为合金元素有意加入的元素。所以,在车轴制造过程中既要保证其化学成分,又要保证其力学性能,就会不可避免地存在夹杂物缺陷。夹杂物通常为硫化物和氧化物<sup>[4]41-45</sup>,而这些夹杂物缺陷将会破坏车轴钢材料的连续性。

在车辆运行过程中,车轴会受到不同种类载荷的共同作用,夹杂物缺陷的存在会使车轴内部出现不同程度的应力集中现象,极大地增加车轴裂纹萌生的可能性,给车辆运营带来了巨大的安全隐患。DENG

等<sup>[5]</sup>采用有限元方法,分析了夹杂物尺寸、形状对非均匀性材料疲劳性能的影响,结果表明,夹杂物的大小对表面应力分布的影响比夹杂物的类型更大。在车辆运行过程中,环境复杂性很大,车轴表面存在遭受异物冲击并形成缺陷的可能性增加。据统计,这些缺陷最深可达2 mm<sup>[6]</sup>,车轴表面缺陷的产生会造成车轴局部的塑性变形,破坏车轴表面的连续性,同时在缺陷周围产生应力集中现象,加速疲劳裂纹的萌生,从而损害车轴的疲劳性能<sup>[7]</sup>。周素霞等<sup>[8]</sup>采用试验与有限元相结合的方法,研究了不同冲击缺陷类型对车轴材料疲劳性能的影响。结果表明,其试验所预制的4种缺陷都会或多或少对车轴疲劳性能带来不利影响,其中四棱锥缺陷对车轴危害最大。当车轴材料内部及表面不存在缺陷时,其疲劳可靠性可以满足车辆的正常运行。

现阶段对车轴缺陷及车轴裂纹萌生机制的研究主要集中于异物对于缺陷车轴裂纹萌生机制及寿命预测,即由异物冲击造成的外部缺陷对车轴裂纹萌生的影响。所采用的理论主要有名义应力法、局部应力应变法<sup>[9]</sup>等。尚德广等<sup>[10]</sup>以临界面上的最大剪切应变和两个最大剪切应变折返点间的法向应变为疲劳损伤参量,建立剪切形式的多轴疲劳损伤参量,不仅适用于光滑件比例加载与非比例加载条件,而且适用于缺口试件的多轴损伤的描述。

收稿日期: 2024-05-24 修回日期: 2024-06-17

基金项目: 北京市自然科学基金项目(L211007)

作者简介: 周素霞,女,1971年生,河南浚县人,博士,教授;主要研究方向为结构的疲劳和断裂;E-mail:zhousuxia@bucea.edu.cn。

尚豪(通信作者),男,1998年生,贵州铜仁人,硕士研究生;主要研究方向为车轴疲劳断裂;E-mail:995454515@qq.com。

引用格式: 周素霞,尚豪,张昭. 基于晶体塑性理论的内外缺陷耦合对车轴裂纹萌生的影响[J]. 机械强度,2026,48(5):58-65.

ZHOU Suxia, SHANG Hao, ZHANG Zhao. Effect of inner and outer defect coupling on crack initiation of axle based on crystal plasticity theory[J]. Journal of Mechanical Strength, 2026, 48(5): 58-65.



免费获取

近些年来,随着科技水平的提高,研究人员开始使用晶体塑性有限元法从介观尺度对材料的变形行为进行研究。晶体塑性有限元法是从材料塑性变形过程中晶体滑移机制的物理本质出发,在分析过程中,考虑了材料微观结构的非均匀性<sup>[11]</sup>。CONG 等<sup>[12]</sup>基于 Voronoi 图和晶体塑性模型,构建了具有孔隙和夹杂物的多晶体塑性模型,分别计算了无缺陷与有缺陷模型在不同应变载荷下的应力-应变结果,研究表明,夹杂物是影响疲劳寿命分散的主要因素。靖雅等<sup>[13]</sup>通过建立晶体塑性模型,与试验结果进行对比,研究了缺口对裂纹萌生的影响,为缺口效应下的疲劳寿命预测提供参考。FINCATO 等<sup>[14]</sup>通过介观尺度的三维有限元分析,研究软、硬夹杂物周围局部塑性滑移的形成现象。结果表明,氧化铝的缺陷通常比硫化锰更有害,因为氧化铝在较低的标称应力条件下就会诱导铁氧体的塑化。同时,还构建了各向同性的含有  $\text{Al}_2\text{O}_3$  和  $\text{MnS}$  球状夹杂物缺陷的晶体有限元模型,研究了模型在拉伸载荷下夹杂物周围的晶体取向、应力分布以及塑性应变的形成规律。发现  $\text{Al}_2\text{O}_3$  球状夹杂物更容易引起疲劳裂纹萌生。PRASTITI 等<sup>[15]</sup>建立了镍合金晶体塑性有限元模型,对单晶镍疲劳裂纹萌生行为进行了模拟,通过裂纹萌生过程中的塑性应变能量密度,预测了裂纹萌生位置。

无论车轴存在的是内部缺陷还是外部缺陷,均会对列车运行带来极大的安全隐患,因此对于此方面的研究很有必要。现如今,单独对车轴内部夹杂物和外部划痕的研究比较成熟,但车辆在实际运行中往往同时存在车轴内、外缺陷,并且目前对该情况下车轴的研究少之又少。因此,对同时存在内、外缺陷车轴的研究具有重要意义。本文基于晶体塑性理论,建立同时含有内、外部缺陷的有限元模型,研究内、外缺陷耦合作用对车轴裂纹萌生的影响,更为全面地分析缺陷对车轴疲劳性能的影响。

## 1 晶体塑性理论

晶体塑性理论由 HILL<sup>[16]</sup>提出,认为晶体的变形由弹性变形和塑性变形共同影响。晶格的畸变和刚性运动引起晶体的弹性变形,滑移引起晶体的塑性变形<sup>[17]</sup>。图 1 所示为晶体变形运动的几何图示。晶体的变形过程可分解为:① 初始构型通过滑移引起的塑性变形运动到中间构型;② 中间构型经过晶格的畸变和刚性运动,最后形成当前构型。

变形梯度张量  $\mathbf{F}$  用于描述材料的变形量,其既包括塑性变形和弹性变形,也包括旋转变形和拉伸变形。因此,其计算式可分解为

$$\mathbf{F} = \mathbf{F}^* \mathbf{F}^p \quad (1)$$

式中,  $\mathbf{F}^*$  为由刚体旋转和晶格变形引起的弹性变形梯度;  $\mathbf{F}^p$  为与晶体沿滑移方向的均匀剪切有关的塑性变形梯度。

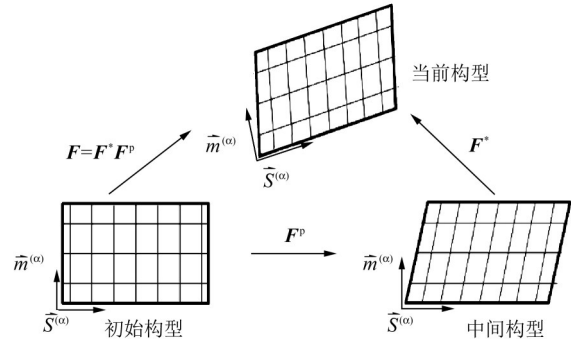


图 1 晶体变形几何图示

Fig. 1 Geometric diagram of crystal deformation

为描述变形体的动力学行为,连续介质力学引入塑性速度梯度  $\mathbf{L}^p$ ,其表达式为

$$\mathbf{L}^p = \dot{\mathbf{F}}^p \mathbf{F}^{p-1} = \sum_{\alpha=1}^N \dot{\gamma}^{(\alpha)} (\mathbf{s}^{*(\alpha)} \otimes \mathbf{n}^{*(\alpha)}) \quad (2)$$

式中,  $N$  为滑移系数;  $\mathbf{s}^{*(\alpha)}$  为第  $\alpha$  滑移系上的单位矢量;  $\mathbf{n}^{*(\alpha)}$  为第  $\alpha$  滑移系上滑移面法向矢量;  $\dot{\gamma}^{(\alpha)}$  为第  $\alpha$  滑移系中晶体产生的塑性应变速率,其表达式为

$$\dot{\gamma}^{(\alpha)} = \dot{\gamma}_0 \left( \frac{|\tau^\alpha - \tau_b^\alpha|}{\kappa^\alpha} \right)^{\frac{1}{m}} \text{sgn}(\tau^\alpha - \tau_b^\alpha) \quad (3)$$

式中,  $\tau_b^\alpha$  为第  $\alpha$  滑移系上的背应力;  $\dot{\gamma}_0$  为参考剪切应变率;  $\tau^\alpha$  为第  $\alpha$  滑移系上的分解剪应力;  $\kappa^\alpha$  为第  $\alpha$  滑移系硬度;  $m$  为应变率敏感参数。

则背应力演化方程为

$$\dot{\tau}_b^\alpha = A \dot{\gamma}^\alpha - B |\dot{\gamma}^\alpha| \tau_b^\alpha \quad (4)$$

式中,  $\dot{\tau}_b^\alpha$  为第  $\alpha$  滑移系统的背应力演化速率;  $A$ 、 $B$  均为材料参数。

假设所有滑移系统以相同的速率硬化,则硬化强度为

$$\dot{\kappa} = \psi_0 \left( \frac{\kappa_s - \kappa}{\kappa_s - \kappa_0} \right) \sum_{\alpha=1}^N |\dot{\gamma}^\alpha| \quad (5)$$

式中,  $\psi_0$  为位错积累引起的初始硬化模量;  $\kappa_0$  为初始硬化强度;  $\kappa_s$  为饱和硬化强度。

对于车轴钢体心立方材料,其滑移系数  $N$  为 48,分别为 12 个主滑移系和 36 个次滑移系。车轴钢材料的塑性参数  $\dot{\lambda}_0$  为材料的塑性应变速率。根据本文试验条件,设置为 0.01;材料硬化参数、 $\psi_0$ 、 $\kappa_0$ 、 $\kappa_s$ 、 $m$  可根据文献<sup>[18]</sup>确定一个大致的范围,如表 1 所示。

表 1 晶体塑性模型参数

Tab. 1 Crystal plasticity model parameters

| $\psi_0$ /MPa | $\kappa_0$ /MPa | $\kappa_s$ /MPa | $m$ |
|---------------|-----------------|-----------------|-----|
| 50            | 788             | 580             | 3.2 |

## 2 材料的制备与试验

### 2.1 材料与试样

目前,世界范围内广泛使用的车轴钢材料可以分为碳素体和合金钢,而我国服役车辆主要使用的是合金钢材料。在车轴钢材料中,碳元素和硅元素含量会影响屈服强度和抗拉强度;锰元素和铬元素含量会影响强度和硬度;磷元素和硫元素含量的升高会导致车轴钢的脆性增加,车轴更容易发生脆断;镍元素可以提升钢的强度,并保持材料的塑性、韧性和耐腐蚀性;钼元素和钒元素可以将钢材料晶粒细化<sup>[19]</sup>。EA4T车轴钢材料中各化学元素含量如表2所示。

表2 EA4T车轴钢化学成分

| Tab. 2 Chemical composition of EA4T axle steel |      |      |      |       |       |     |      |      |      | % |
|------------------------------------------------|------|------|------|-------|-------|-----|------|------|------|---|
| V                                              | C    | Si   | Mn   | P     | S     | Cr  | Cu   | Mo   | Ni   |   |
| 0.04                                           | 0.25 | 0.37 | 0.74 | 0.012 | 0.002 | 1.1 | 0.23 | 0.23 | 0.27 |   |

由于实体车轴外表面应力高,表面晶粒受的约束少易滑移,表面易腐蚀,表面可能有加工痕迹或伤痕,使其疲劳强度降低。因此,在实体车轴外表面位置处,使用线切割的方法对车轴进行金相试样切割。分别使用400、600、800、1 000、1 200、1 500目砂纸对切割样品进行打磨,并进行机械抛光,再使用4%硝酸酒精对样品进行腐蚀。在金相显微镜下观察样品材料组织。EA4T车轴钢材料金相组织为回火马氏体和贝氏体,为体心立方结构,微观组织如图2所示。其中,材料内部夹杂物类型为D类球形氧化物夹杂物、B类氧化铝夹杂物以及DS类颗粒形氧化物。

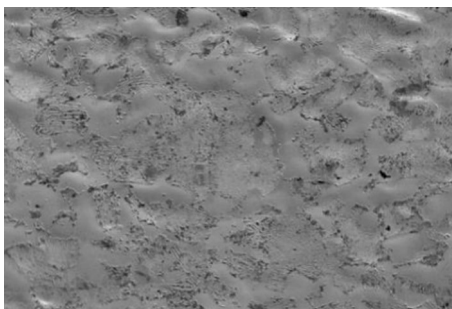


图2 车轴钢微观组织

Fig. 2 Microstructure of axle steel

根据EN 13261标准,依次在EA4T实体车轴中心位置、1/2半径处、外表面进行取样,具体位置如图3所示,并按照图4的尺寸进行试样制备。

### 2.2 材料力学性能试验

在CMT5305电子万能试验机上分别对3组实体车轴不同位置制备的试样进行拉伸试验。不同位置测量的屈服极限、抗拉极限、材料断后伸长率如表3所示。

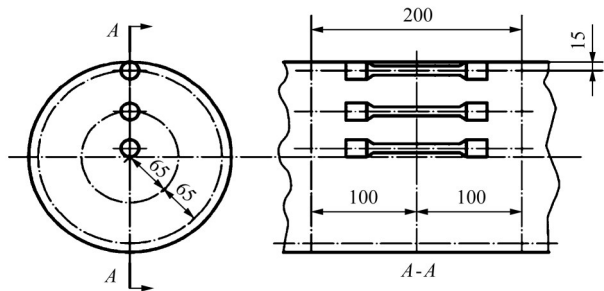


图3 试样选取位置

Fig. 3 Sample selection location

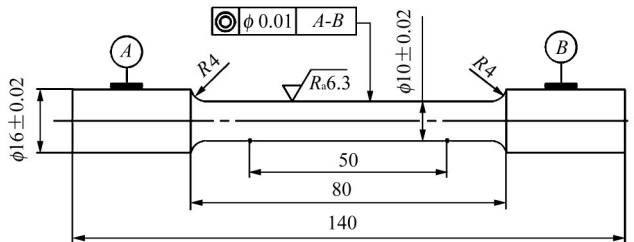


图4 试样尺寸

Fig. 4 Sample size

表3 EA4T车轴材料常规力学性能

| Tab. 3 Conventional mechanical properties of EA4T axle material |          |          |       |
|-----------------------------------------------------------------|----------|----------|-------|
| 位置                                                              | 抗拉强度/MPa | 屈服强度/MPa | 伸长率/% |
| 中心位置                                                            | 715      | 590      | 24.0  |
| 1/2半径                                                           | 733      | 466      | 19.5  |
| 外表面                                                             | 746      | 434      | 20.5  |
| 均值                                                              | 731      | 497      | 21.3  |
| EN 13261 标准<br>(1/2半径处)                                         | 650~800  | ≥420     | ≥18   |

EA4T实体车轴中心位置的抗拉强度为715 MPa,低于外表面位置的抗拉强度746 MPa,两者相差31 MPa,但中心位置材料的屈服强度却明显高于其他两处位置。产生这一现象的原因是实体车轴轴身较厚,在制备过程中车轴钢中心位置没有淬透,导致铁素体含量较多,因此中心位置材料的抗拉强度变低。不同位置处的伸长率也不同,中心位置处的抗拉强度虽较小,但其伸长率较大、抗塑性能较好。根据EN 13261标准,选取的EA4T实体车轴1/2半径位置处的各项常规力学性能均符合标准,实体车轴中心位置处的准静态拉伸应力-应变曲线如图5所示。

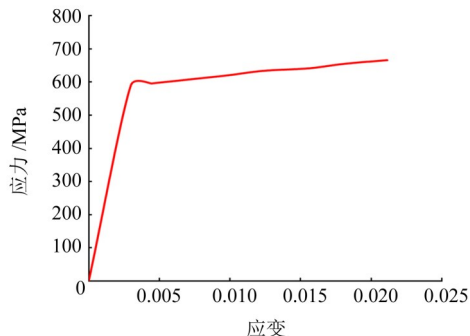


图5 EA4T车轴材料应力-应变曲线

Fig. 5 Stress-strain curve of EA4T axle material

现实车辆运行中,异物冲击会对车轴造成破坏<sup>[20]</sup>,影响车轴的使用寿命。从车轴材料本身考虑,要预防车轴的破坏,车轴材料还需具备一定的抗冲击能力。根据 EN 13261 标准,从实体车轴中心位置、1/2 半径处以及外表面处截取试样,将试样按照国家标准 GB/T 2975 制备为 6 根冲击试样,在常温环境下进行冲击试验。常温下 EA4T 车轴材料的冲击性能如表 4 所示。

表 4 EA4T 车轴试样冲击性能 (20 °C)

Tab. 4 Impact performance of EA4T axle specimens (20 °C)

| 位置                          | 纵向冲击功/J |    |    |     | 横向冲击功/J |    |    |     |
|-----------------------------|---------|----|----|-----|---------|----|----|-----|
|                             | 1       | 2  | 3  | 均值  | 1       | 2  | 3  | 均值  |
| 中心位置                        | 60      | 51 | 72 | 61  | 56      | 48 | 48 | 51  |
| 1/2 半径                      | 54      | 61 | 70 | 62  | 55      | 51 | 64 | 57  |
| 外表面                         | 60      | 57 | 75 | 64  | 49      | 50 | 61 | 53  |
| EN 13261<br>标准<br>(1/2 半径处) | —       | —  | —  | ≥40 | —       | —  | —  | ≥25 |

EA4T 车轴外表面、1/2 半径、中心位置的纵向冲击功均值分别为 64、62、61 J;横向冲击功均值分别为 53、57、51 J,均高于规定标准。但由于车轴中存在沿纵向分布的带状组织<sup>[4]41-45</sup>。因此,EA4T 车轴的横向冲击韧性相对较差,在使用过程中应尽量避免横向的冲击。

### 3 有限元模型构建

#### 3.1 内、外缺陷耦合的多晶有限元模型构建

在车轴钢材料的缺陷中,块状内部夹杂物缺陷和环状外部划痕缺陷更加容易诱发材料的疲劳裂纹萌生<sup>[21]</sup>。由金相结果和文献<sup>[4]41-45</sup>可知,EA4T 车轴钢材料中的夹杂物主要为氧化铝块状夹杂物以及硫化钙球状夹杂物。为探究两种缺陷耦合时对车轴钢材料裂纹萌生行为的影响,以及两种缺陷同时存在时初始裂纹萌生的位置,建立了同时含有 1 mm×1 mm×1 mm 块状内部夹杂物缺陷以及 0.1 mm 深度的环状外部划痕缺陷的有限元模型。将环状划痕缺陷固定在车轴表面位置不变,通过改变夹杂物缺陷的位置设定两缺陷间的距离。内、外缺陷间的距离分别设置为 1.0、1.5、2.5、5.0 mm。距离为 1.0 mm 时夹杂物缺陷靠近车轴试样模型表面位置,距离为 5.0 mm 时,夹杂物缺陷靠近车轴试样模型中心位置。模型建立如图 6 所示。

#### 3.2 有限元模型加载后晶粒取向

对车轴试样模型施加四点弯曲疲劳载荷,以模拟模型在旋转弯曲加载下缺陷部位的最大受力状态<sup>[22]</sup>。图 7 所示为缺陷附近的晶粒信息,表 5 为缺陷附近晶粒加载前、后取向的变化。当两缺陷相距 5.0 mm 时,缺陷附近的晶粒无论是处于易于开动的方向,还是处于不易于开动的方向,模型加载前、后的晶体取向差

都很低,晶粒几乎均处于未开动状态。而当两缺陷相距 1.0 mm 时,块状夹杂物缺陷附近的晶体产生了明显的取向差。由表 5 可知,两种缺陷间的距离越小,其缺陷附近晶粒的取向差变化越显著。这说明当内部夹杂物缺陷在模型中心位置时,外部缺陷是导致材料微结构发生塑性变形的的主要原因。随着夹杂物缺陷向模型表面靠近,两缺陷均会导致材料微结构发生塑性变形。

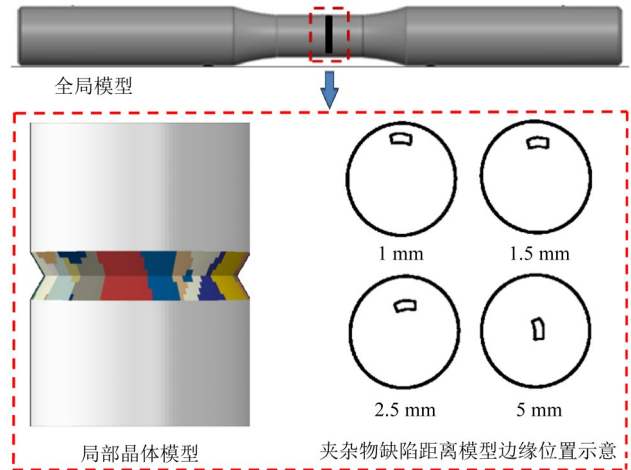


图 6 内、外部缺陷耦合模型

Fig. 6 Coupling model of internal and external defects

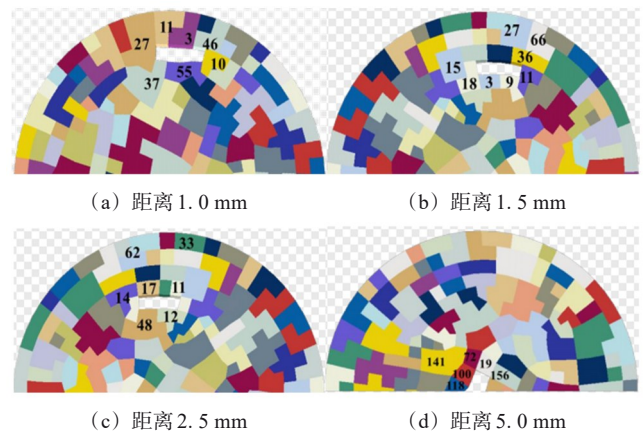


图 7 内、外部缺陷附近晶粒编号

Fig. 7 Number of grains near internal and external defects

表 5 加载前、后部分晶粒取向差

Tab. 5 Partial grain orientation difference before and after loading

| 模型        | 晶粒模型 | 加载前/(°) | 加载后/(°) | 取向差/(°) |
|-----------|------|---------|---------|---------|
| 距离 1.0 mm | 10   | 48.672  | 48.506  | 0.166   |
|           | 11   | 59.302  | 58.889  | 0.413   |
|           | 27   | 81.113  | 80.774  | 0.339   |
|           | 37   | 89      | 88.822  | 0.178   |
|           | 55   | 55.774  | 56.032  | -0.258  |
| 距离 1.5 mm | 9    | 46.672  | 46.516  | 0.156   |
|           | 15   | 50.21   | 50.361  | -0.151  |
|           | 18   | 25.859  | 25.798  | 0.061   |
|           | 27   | 59.302  | 59.05   | 0.252   |
|           | 66   | 32.95   | 32.615  | 0.335   |

| 续表        |      |         |         |         |
|-----------|------|---------|---------|---------|
| 模型        | 晶粒模型 | 加载前/(°) | 加载后/(°) | 取向差/(°) |
| 距离 2.5 mm | 11   | 37.043  | 37.204  | -0.161  |
|           | 17   | 39.54   | 39.37   | 0.17    |
|           | 33   | 18.57   | 18.955  | -0.385  |
|           | 48   | 65.4    | 65.27   | 0.13    |
|           | 62   | 80.09   | 79.79   | 0.3     |
| 距离 5.0 mm | 19   | 172.9   | 172.86  | 0.04    |
|           | 72   | 49.69   | 49.655  | 0.035   |
|           | 100  | 99.38   | 99.345  | 0.035   |
|           | 118  | 47.66   | 47.65   | 0.01    |
|           | 156  | 131.83  | 131.84  | -0.01   |

4 内、外部缺陷耦合对裂纹萌生的影响

4.1 缺陷附近应力场分析

图 8~图 11 分别为两种缺陷距离 1.0、1.5、2.5、5.0 mm 时模型的 Mises 应力分布云图。为了便于观察应力分布,在后处理中不考虑夹杂物缺陷的存在。随着夹杂物缺陷与划痕缺陷之间的距离越来越短,模型的整体应力水平逐渐增大。当夹杂物缺陷距离划痕缺陷 5.0 mm,即夹杂物缺陷处于宏观试样模型的中心位置时,夹杂物缺陷附近的应力分布很小,划痕缺陷附近的最大应力值为 433 MPa。当夹杂物缺陷距离划痕缺陷 2.5 mm 时,夹杂物缺陷周围出现应力集中现象,划痕缺陷处的应力也有一定程度的增加。当夹杂物缺陷与划痕缺陷相距 1 mm 时,可以观察到无论是夹杂物缺陷还是划痕缺陷,其附近的 Mises 应力均存在较大幅度的增大。这说明当两个缺陷之间的距离较短时,缺陷对模型的高应力分布存在着一定的促进作用。

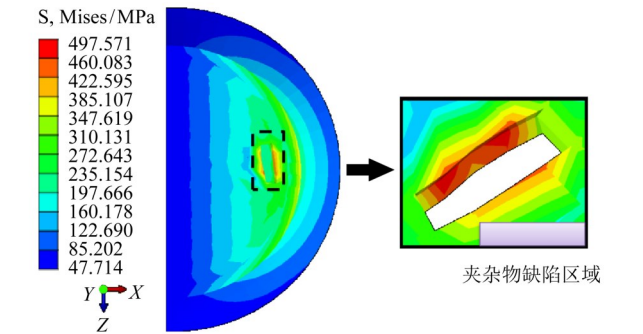


图 8 内、外部缺陷距离 1.0 mm 时应力分布云图

Fig. 8 Stress distribution nephogram at a distance of 1.0 mm between internal and external defects

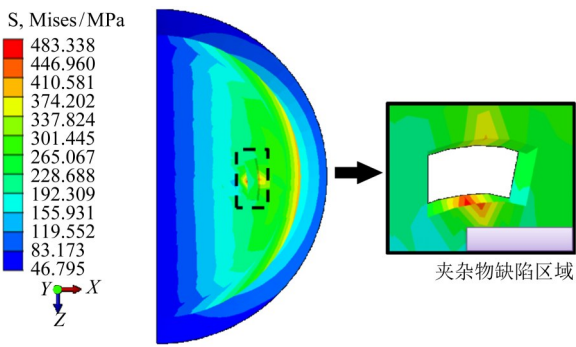


图 9 内、外部缺陷距离 1.5 mm 时应力分布云图

Fig. 9 Stress distribution nephogram at a distance of 1.5 mm between internal and external defects

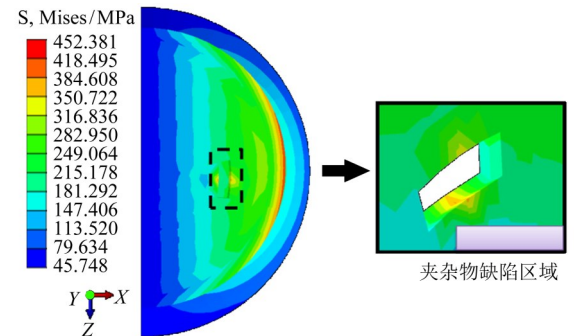


图 10 内、外部缺陷距离 2.5 mm 时应力分布云图

Fig. 10 Stress distribution nephogram at a distance of 2.5 mm between internal and external defects

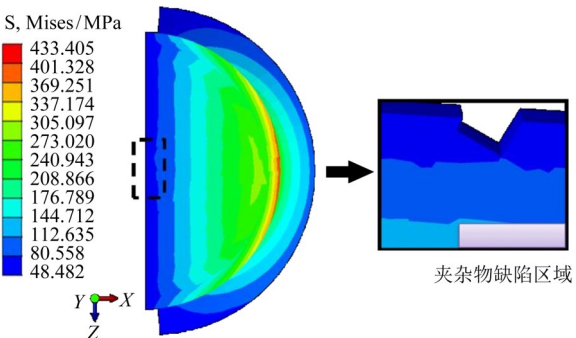


图 11 内、外部缺陷距离 5.0 mm 时应力分布云图

Fig. 11 Stress distribution nephogram at a distance of 5.0 mm between internal and external defects

4.2 缺陷附近微结构变形分析

图 12~图 15 所示为两种缺陷相距 1.0、1.5、2.5、5.0 mm 时,模型在四点弯曲疲劳载荷结束后的累积塑性应变分布云图。循环载荷施加结束后,划痕缺陷处的晶粒均产生了很高的塑性变形。当两缺陷相距 5.0 mm 时,夹杂物缺陷周围的晶粒变形量很低。当两缺陷相距 2.5 mm 时,夹杂物缺陷附近晶粒产生了小幅度的塑性变形。随着夹杂物缺陷和划痕缺陷之间的距离逐渐缩短,夹杂物缺陷周围越来越多的晶粒发生了塑性变形,且变形程度越来越大。当两者距离为 1.0 mm 时,夹杂物缺陷附近晶粒的最大累积塑性应变接近划痕缺陷处的累积塑性应变值。由此表明,与靠近模型中心位置的夹杂物相比,靠近表面位置的夹

杂物累积塑性应变值更大,更易变形。两种缺陷之间的距离越短,两缺陷之间的相互影响越大。

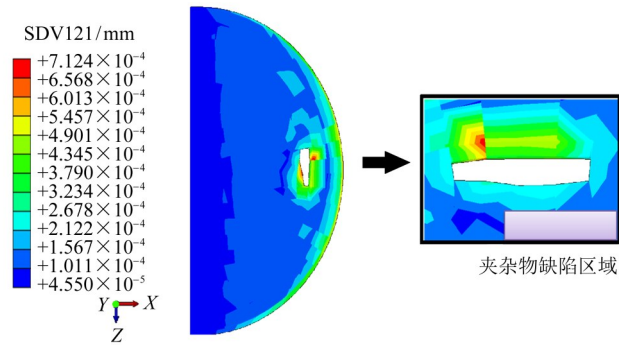


图 12 内、外部缺陷距离 1.0 mm 时累积塑性应变分布云图

Fig. 12 Nephogram of cumulative plastic strain distribution when the distance between internal and external defects is 1.0 mm

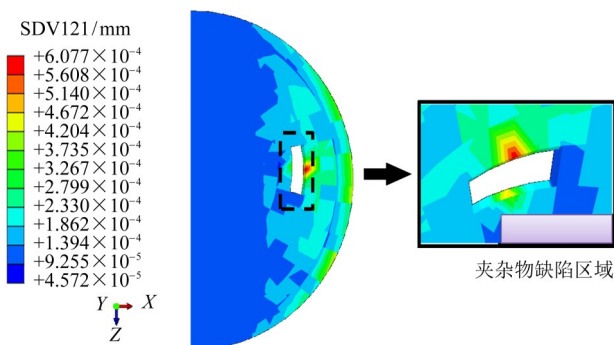


图 13 内、外部缺陷距离 1.5 mm 时累积塑性应变分布云图

Fig. 13 Nephogram of cumulative plastic strain distribution when the distance between internal and external defects is 1.5 mm

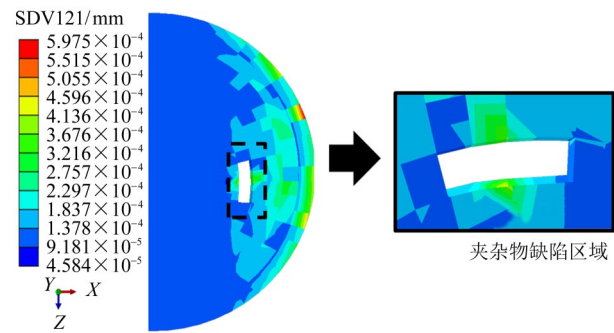


图 14 内、外部缺陷距离 2.5 mm 时累积塑性应变分布云图

Fig. 14 Nephogram of cumulative plastic strain distribution when the distance between internal and external defects is 2.5 mm

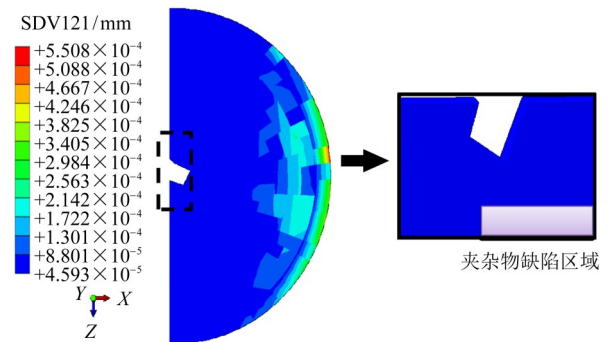


图 15 内、外部缺陷距离 5.0 mm 时累积塑性应变分布云图

Fig. 15 Nephogram of cumulative plastic strain distribution when the distance between internal and external defects is 5.0 mm

#### 4.3 裂纹萌生位置预测

图 16 所示为从划痕缺陷中心点处开始到模型中心点处结束的 Mises 应力分布曲线。由图 16 可知,两种缺陷之间的相互作用对模型疲劳性能的影响。夹杂物缺陷距划痕缺陷 1.0、1.5、2.5 mm 时,曲线的变化趋势大致相同,应力在划痕缺陷的中心点位置达到最高值然后逐渐降低,当到达内部夹杂物缺陷边缘时应力会再次增大,但是随着两种缺陷距离的增加,夹杂物缺陷附近的最大应力降低。当两缺陷距离 5.0 mm 时,应力分布曲线几乎没有起伏变化,模型的整体应力值也较前三种模型更低。由此可以说明,内部夹杂物与表面缺陷距离越近,两缺陷之间的相互作用对模型应力值的影响越大,模型的整体应力也随之增大;当夹杂物缺陷靠近模型中心部位时,其对模型整体应力分布的影响微乎其微。

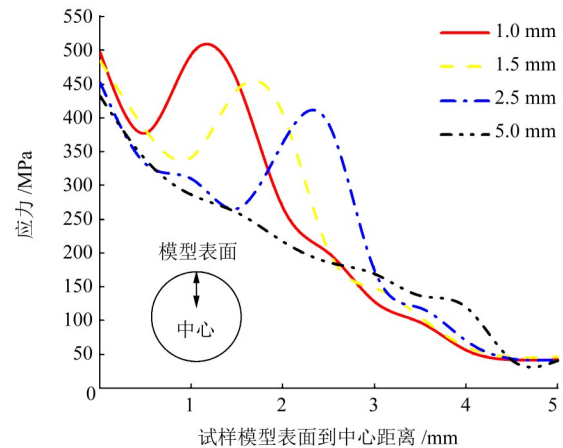


图 16 内、外部缺陷耦合作用时试样模型表面到中心的应力分布曲线

Fig. 16 Stress distribution curves from the surface to the center of the model under the coupling effect of internal and external defects

图 17 所示为内、外部缺陷同时存在时,模型的塑性应变能密度分布。模型中的塑性应变能密度分布特点与应力分布特点相似。两种缺陷相距 1.0、1.5、2.5 mm 时塑性应变能密度会在模型的两个缺陷位置处出现峰值,而当两种缺陷相距 5.0 mm 时,仅在划痕缺陷处出现峰值。同时,表面划痕缺陷处的塑性应变能密度要高于内部夹杂物缺陷处的塑性应变能密度。说明内、外部缺陷间的位置关系会对裂纹萌生行为产生影响。当内部夹杂物处在模型中心位置远离表面划痕缺陷时,划痕缺陷是诱发疲劳裂纹萌生的主要原因,疲劳裂纹优先萌生于划痕缺陷处;当内部夹杂物缺陷靠近表面划痕缺陷时,裂纹会在划痕缺陷处以及内部夹杂物缺陷处萌生,表现为外部-内部同时起裂的形式,加速材料的失效。

综上所述,内部缺陷与外部缺陷间的相互作用会影响模型中塑性应变能密度的分布。内部夹杂物缺陷越靠近模型中心位置,则其对塑性应变能密度的影

响就越小,外部划痕缺陷为裂纹萌生的主导因素;当内部夹杂物缺陷靠近表面划痕缺陷时,两缺陷间的相互作用会导致塑性应变能密度在两缺陷处同时呈现较高数值,夹杂物缺陷处以及划痕缺陷处均会萌生疲劳裂纹。

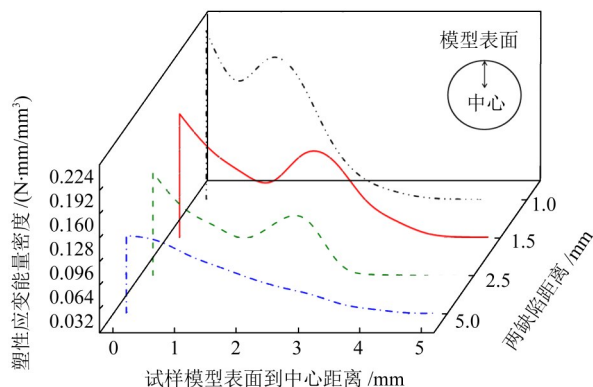


图 17 内、外部缺陷附近塑性应变能密度分布

Fig. 17 Distribution of plastic strain energy density near internal and external defects

## 5 结论

通过建立含有内、外部缺陷的晶体塑性有限元模型,模拟了在旋转弯曲载荷作用下不同内、外部缺陷周围的应力场分布以及缺陷周围晶粒的微结构塑性变形,研究了不同内、外部缺陷对车轴钢材料裂纹萌生的影响,并基于缺陷模型中的塑性应变能密度预测了裂纹萌生位置。得出以下主要结论:

1)当夹杂物缺陷与划痕缺陷相距较小时,可观察到无论是夹杂物缺陷还是划痕缺陷,其附近的 Mises 应力均有大幅增加;而两种缺陷相距较大时,结果相反。表明当两种缺陷之间的距离较短时,对模型的高应力分布有着一定的促进作用。

2)与靠近模型中心位置的夹杂物相比,靠近表面位置的夹杂物累积塑性应变值更大,更容易发生变形。两种缺陷之间的距离越近,两缺陷间的相互影响越大。

3)内部夹杂物缺陷越靠近模型中心位置,其对塑性应变能密度的影响越小,则外部划痕缺陷是裂纹萌生的主导因素;当内部夹杂物缺陷靠近表面划痕缺陷时,两缺陷间的相互作用使得塑性应变能密度在两缺陷处同时呈现出高数值,导致夹杂物缺陷处以及划痕缺陷处均会萌生疲劳裂纹。

## 参考文献 (References)

[1] 周素霞,谢基龙,宋占勋. 影响车轴疲劳强度关键因素的研究[J]. 机械制造,2008,46(1):65-67.  
ZHOU Suxia, XIE Jilong, SONG Zhanxun. Research on key factors affecting axle fatigue strength[J]. Machinery, 2008, 46(1):

65-67. (In Chinese)

- [2] GÜRER G, GÜR C H. Failure analysis of fretting fatigue initiation and growth on railway axle press-fits[J]. Engineering Failure Analysis, 2018, 84: 151-166.
- [3] CARBONI M, BERETTA S, LO CONTE A. Research on corrosion fatigue of railway axles[J]. Insight-Non-Destructive Testing and Condition Monitoring, 2011, 53(7): 361-367.
- [4] 冉旭,姜明坤,韩英. 高铁用进口 EA4T 钢车轴的组织和力学性能[J]. 机械工程材料,2019,43(8):41-45.  
RAN Xu, JIANG Mingkun, HAN Ying. Microstructure and mechanical properties of imported EA4T steel axle for high-speed railway[J]. Materials for Mechanical Engineering, 2019, 43(8): 41-45. (In Chinese)
- [5] DENG Q M, BHATTI N, YIN X C, et al. Numerical modeling of the effect of randomly distributed inclusions on fretting fatigue-induced stress in metals[J]. Metals, 2018, 8(10): 836.
- [6] ZERBST U, BERETTA S, KÖHLER G, et al. Safe life and damage tolerance aspects of railway axles: a review[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2013, 98: 214-271.
- [7] 余明华,高杰维,刘里根,等. 外物损伤对 S38C 车轴钢疲劳性能的影响[J]. 材料导报,2021,35(20):20092-20098.  
YU Minghua, GAO Jiewei, LIU Ligen, et al. Influence of foreign object damage on the fatigue strength of S38C axle steel[J]. Materials Reports, 2021, 35(20): 20092-20098. (In Chinese)
- [8] 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, et al. Fatigue parameters test and simulation of different impact defects on axle surface[J]. China Sciencepaper, 2021, 16(10): 1080-1086. (In Chinese)
- [9] 周素霞. 高速列车空心车轴损伤容限理论与方法研究[D]. 北京:北京交通大学,2010:12-15.  
ZHOU Suxia. Theory and method research on damage tolerance of the hollow axles of high speed trains[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2010: 12-15. (In Chinese)
- [10] 尚德广,王大康,李明. 基于临界面法的缺口件多轴疲劳寿命预测[J]. 机械强度,2003,25(2):212-214.  
SHANG Deguang, WANG Dakang, LI Ming. Multiaxial fatigue life prediction for notched specimens based on the critical plane approach[J]. Journal of Mechanical Strength, 2003, 25(2): 212-214. (In Chinese)
- [11] 阚前华,康国政,徐祥. 非线性本构关系在 ABAQUS 中的实现[M]. 北京:科学出版社,2019:169-192.  
KAN Qianhua, KANG Guozheng, XU Xiang. Implementations of nonlinear constitutive relations in ABAQUS[M]. Beijing: Science Press, 2019: 169-192. (In Chinese)
- [12] CONG T, LI R Y, ZHENG Z G, et al. Experimental and computational investigation of weathering steel Q450NQR1 under high cycle fatigue loading via crystal plasticity finite element method[J]. International Journal of Fatigue, 2022, 159: 106772.
- [13] 靖雅,钟飞,苑光健,等. 基于晶体塑性理论的 GH4169 合金缺口效应研究[J]. 机械工程材料,2021,45(5):84-90.  
JING Ya, ZHONG Fei, YUAN Guangjian, et al. Study on notch effect of GH4169 alloy by crystal plasticity theory[J]. Materials for Mechanical Engineering, 2021, 45(5): 84-90. (In Chinese)

- [14] FINCATO R, TSUTSUMI S, SAKAI T, et al. 3D crystal plasticity analyses on the role of hard/soft inclusions in the local slip formation[J]. *International Journal of Fatigue*, 2020, 134: 105518.
- [15] PRASTITI N G, XU Y L, BALINT D S, et al. Discrete dislocation, crystal plasticity and experimental studies of fatigue crack nucleation in single-crystal nickel[J]. *International Journal of Plasticity*, 2020, 126: 102615.
- [16] HILL R. Generalized constitutive relations for incremental deformation of metal crystals by multislip[J]. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 1966, 14(2): 95-102.
- [17] DENG G J, TU S T, ZHANG X C, et al. Grain size effect on the small fatigue crack initiation and growth mechanisms of nickel-based superalloy GH4169 [J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2015, 134: 433-450.
- [18] 卢术娟. 基于晶体塑性有限元的车轴材料疲劳寿命预测方法研究[D]. 北京: 北京建筑大学, 2020: 23-32.  
LU Shujuan. Research on fatigue life prediction method of axle material based on crystal plasticity finite element model [D]. Beijing: Beijing University of Civil Engineering and Architecture, 2020: 23-32. (In Chinese)
- [19] 景财年, 王作成, 韩福涛. 相变诱发塑性的影响因素研究进展[J]. *金属热处理*, 2005, 30(2): 26-31.  
JING Cainian, WANG Zuocheng, HAN Futao. Research progress of the influencing factors on transformation induced plasticity [J]. *Heat Treatment of Metals*, 2005, 30(2): 26-31. (In Chinese)
- [20] 张恒, 尹鸿祥, 吴毅, 等. 含不同尺寸菱形压痕 EA4T 钢车轴的疲劳性能[J]. *机械工程材料*, 2021, 45(3): 61-65.  
ZHANG Heng, YIN Hongxiang, WU Yi, et al. Fatigue performance of EA4T steel axle with diamond indentation of different size [J]. *Materials for Mechanical Engineering*, 2021, 45(3): 61-65. (In Chinese)
- [21] 吕晓旭. 典型缺陷对车轴应力及疲劳寿命影响研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2019: 18-27.  
LÜ Xiaoxu. Study the influence of typical defects on axle's stress and fatigue life [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2019: 18-27. (In Chinese)
- [22] 李行, 张继旺, 徐俊生, 等. 缺陷对 EA4T 车轴钢疲劳性能的影响[J]. *西南交通大学学报*, 2021, 56(3): 627-633.  
LI Hang, ZHANG Jiawang, XU Junsheng, et al. Effect of defect on fatigue property of EA4T axle steel [J]. *Journal of Southwest Jiaotong University*, 2021, 56(3): 627-633. (In Chinese)

## Effect of inner and outer defect coupling on crack initiation of axle based on crystal plasticity theory

ZHOU Suxia<sup>1,2</sup> SHANG Hao<sup>1,2</sup> ZHANG Zhao<sup>3</sup>

(1. School of Mechanical-Electronic and Vehicle Engineering, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044, China)

(2. Beijing Key Laboratory of Service Performance of Vehicles, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044, China)

(3. China Academy of Atomic Energy, Beijing 100044, China)

**Abstract:** [Objective] This study aims to investigate the coupling effect between inner and outer defects on fatigue crack initiation in high-speed train axles to ensure operational safety. [Methods] Firstly, a multi-crystal finite element model was established at the mesoscopic scale based on crystal plasticity theory. Secondly, tensile and impact tests were conducted, and finite element simulations were utilized to analyze the stress field and structural deformation around these defects. Finally, the crack initiation location was predicted based on the characteristics of stress distribution and plastic strain energy density. [Results] The findings indicate that the interaction between the two defects strengthens as the inner defect approaches the outer defect, significantly promoting crack initiation. Conversely, when the inner inclusion is located at the center of the model, the interaction is minimized, and external defects become the primary drivers of crack initiation.

**Key words:** Crystal plasticity theory; Defect coupling; Crack initiation; Stress field; Plastic strain energy density

Corresponding author: SHANG Hao, E-mail: 995454515@qq.com

Fund: Beijing Natural Science Foundation Project (L211007)

Received: 2024-05-24

Revised: 2024-06-17

(编辑: 李立)