

# 加工硬化对轨道裂纹裂尖力学状态的影响

樊亚玲

西安铁路职业技术学院 机电工程学院, 中国·陕西 西安 710014

**摘要:** 为了解加工硬化对铁路轨道中微裂纹尖端应力应变分布的影响, 利用实验获得铁道常用材料 U71Mn 在不同加工硬化程度下的力学特性, 在此基础上, 借助有限元模拟手段, 分析了不同加工硬化程度下裂纹尖端的应力和应变分布规律。结果表明, 加工硬化增大了材料的屈服强度, 改变了裂尖应力应变分布, 沟型裂纹尖端 Mises 应力和拉伸应力随着加工硬化程度的增大而增大, 并且 Mises 应力在裂尖正前方出现突降; 裂尖等效塑性应变和拉伸应变随着材料加工硬化程度的增大而减小。

**关键词:** 断裂力学; 力学特性; 应力应变; U71Mn

## The Influence of Work Hardening on the Mechanical State of Track Crack Tip

Yaling Fan

School of Mechanical and Electrical Engineering, Xi'an Railway Vocational & Technical Institute, Xi'an, Shaanxi, 710014, China

**Abstract:** To understand effect of work hardening on stress-strain distribution at tip of micro-cracks in railway tracks, experiments were used to obtain the mechanical properties of commonly used railway material U71Mn under different work hardening degrees. On this basis, using finite element simulation methods, the distribution of stress and strain at crack tip under different degrees of work hardening is analyzed. The results show that work hardening increases the yield strength and changes the stress and strain distribution at the crack tip. Mises stress and tensile stress at crack tip increase with the increase of work hardening, and Mises stress drops suddenly in front of the crack tip. The equivalent plastic strain and tensile strain at crack tip decrease with the increase of the work hardening degree of the material.

**Keywords:** fracture mechanics; mechanical properties; stress-strain; U71Mn

## 0 前言

轨道在腐蚀介质中会产生腐蚀产物, 腐蚀产物的厚度及体积的积累增强的轨道和空气的隔绝作用, 可以减轻轨道的腐蚀行为<sup>[1]</sup>。但在轨道服役过程中, 轨道会受到载荷的作用而使轨道表面的腐蚀产物再次破坏, 轨道再次遭到破坏, 尤其是在轨道微小裂纹尖端, 应力集中加剧材料表面腐蚀物的破裂而加速材料失效, 减少材料服役寿命。铁路轨道材料生产制造和服役过程不可避免的会产生不同程度的拉伸和压缩变形, 使材料发生不加工硬化程度。加工硬化会影响材料力学性能, 提高材料的屈服强度和极限拉伸强度<sup>[2]</sup>。不同的初始载荷和应力强度因子对 U71Mn 钢轨的疲劳裂纹及力学特性有较大的影响<sup>[3]</sup>。加工硬化改变了材料力学特性, 是加剧材料断裂及腐蚀开裂的最主要因素之一<sup>[4]</sup>。加工硬化也会使裂尖塑性应变梯度增加而塑性区减小, 同时加工硬化可以显著提高应力裂纹扩展速率<sup>[5]</sup>。U71Mn 重轨钢实际裂纹缺陷较多, 同时裂纹处的应力集中对钢轨的寿命有显著影响<sup>[6]</sup>。研究表明, 在实际服役中, U71Mn 钢轨表层距角处的硬化程度最严重, 破坏性的微裂纹也容易在此处产生, 同时裂纹间隙中的氧化物对裂纹的扩展有较大的促进作用<sup>[7]</sup>。U71Mn 在海洋大气环境等苛刻条件下, 轨道微裂纹尖端形成一层钝化膜, 钝化膜破裂理论被广泛地应用于断裂力学及

应力腐蚀裂纹扩展速率的预测模型中, 材料在应力和腐蚀介质的共同作用下, 钝化膜破裂后在裂尖很快会形成一个沟型裂纹, 随着沟型裂纹的扩展, 裂尖钝化膜破裂, 从而使裂纹尖端向前推移, 金属基体表面重新生成裂尖钝化膜, 这种循环过程使得裂纹不断扩展, 并最终导致构件失效<sup>[8]</sup>。因此, 研究轨道材料的加工硬化对微裂纹裂尖力学特性的影响具有重要的实际意义。

## 1 材料 U71Mn 的加工硬化力学特性

### 1.1 试样几何尺寸

实验材料选取铁路轨道常用材料 U71Mn, 轨道在生产、安装及使用过程中会产生不同程度的变形, 使材料产生不同程度的加工硬化, 以轨道中最常见的压缩变形为研究对象, 对 U71Mn 进行不同程度的压缩变形, 使其产生不同程度的加工硬化。压缩试样的几何尺寸如图 1 所示, 试样采用电火花线切割加工成型。

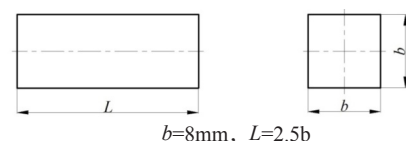


图 1 压缩试样的几何尺寸

### 1.2 加工硬化实验

选取图 1 所示尺寸的 U71Mn, 采用 200kN 压缩实验机, 此压缩实验机可进行常温和高温压缩实验, 实验过程和温度控制如图 2 所示。



图 2 150℃下压缩实验及温度控制系统

在加工硬化阶段, 采用常温压缩, 分别对轨道材料 U71Mn 压缩 3%、6% 和 9%, 使其产生不同程度的压缩变形。压缩方式采用位移控制, 压缩速率为 0.5mm/min, 对 U71Mn 进行 3%、6% 和 9% 压缩。由于高速铁路运行过程中, 轮轨相对滑动, 产生摩擦热使接触区的温度迅速升高, U71Mn 的受热温度超过 500℃, 甚至达到 900℃<sup>[9]</sup>。为了获得准确的材料力学特性, 把不同压缩变形量的 U71Mn 在 500℃的高温环境中进行压缩实验, 以获得不同压缩变形量的材料力学特性。把带有高温釜的压缩实验机的釜内温度加热到 500℃, 持续一段时间, 使釜内温度稳定, 然后把常温预压缩量为 3% 的试样放置于高温釜中, 静置 10min, 使试样温度均匀达到 500℃后, 对试样进行高温压缩实验, 压缩速率为 0.5mm/min, 测其实验数据后卸载, 重复并依次完成预压缩量为 6%、9% 和无预压缩量的压缩实验, 获得实验数据。

### 1.3 加工硬化力学性能本构关系

铁路轨道材料 U71Mn 的力学本构关系符合 Ramberg-Osgood 关系, 表达式如下。

$$\frac{\varepsilon}{\varepsilon_y} = \frac{\sigma}{\sigma_y} + \alpha \left( \frac{\sigma}{\sigma_y} \right)^n$$

式中,  $\varepsilon$  为真实应变,  $\varepsilon_y$  为屈服应变,  $\sigma$  为真实应力,  $\sigma_y$  为屈服强度,  $\alpha$  为偏移系数,  $n$  为硬化指数。

模拟过程采用标准的 1T-CT 试样, 裂纹的长度选取 2mm, 裂纹的宽度为 5 $\mu$ m, 裂尖应力强度因子  $K=30\text{MPa} \cdot \text{m}$ 。材料压缩变形量不同, 对应的加工硬化程度不同, 压缩变形量越大, 材料的加工硬化程度越高。不同加工硬化程度下 U71Mn 在 500℃的高温环境中的位移载荷曲线如图 3 所示。由图可以看出, 加工硬化程度越高, 材料的屈服强度越高, 材料的塑性变差。

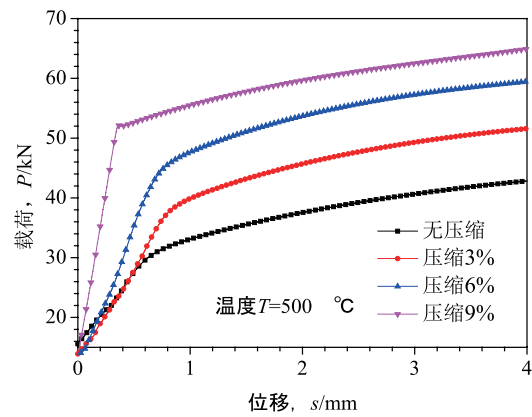


图 3 高温压缩位移载荷曲线

## 2 加工硬化对裂纹尖端力学状态分析

加工硬化对裂尖 Mises 应力的影响如图 4 所示, 由图可以看出裂尖有沟型裂纹时, 压缩变形量越大, 也就是加工硬化程度越高, 裂尖的 Mises 应力越大, 但 Mises 应力增大的幅度随着加工硬化程度的增大而减小, 加工硬化程度越高时, 材料的塑性变差, 难以发生塑性变形而使材料内部应力增大; 在沟型裂纹的正前方, Mises 应力有较大幅度的减小, 因为沟型裂纹的存在, 在此处沟型裂纹容易发生开裂而释放应力, 因此 Mises 应力会减小; 裂尖无沟型裂纹时, Mises 应力不会在裂尖正前方发生较大幅度的突变。

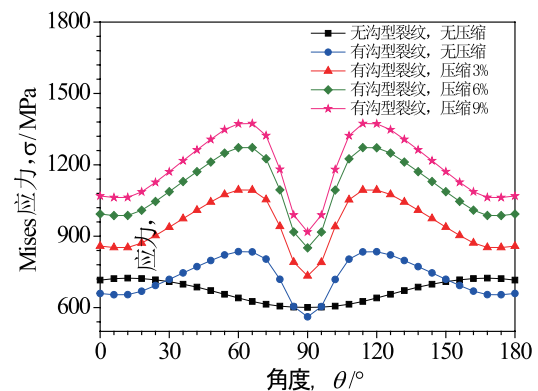


图 4 加工硬化对裂尖 Mises 应力的影响

图 5 所示为材料加工硬化程度不同时, 裂尖拉伸应力的分布规律, 可以看出裂尖有沟型裂纹形成时, U71Mn 的加工硬化程度越高, 裂尖的拉伸应力越大, 拉伸应力的最大值出现在裂尖正前方附近, 随着加工硬化程度的增大, 裂尖正前方 90° 处的拉伸应力略有减小。相对于裂尖无沟型裂纹的情况来说, 裂尖有沟型裂纹时拉伸应力较大。

加工硬化对裂尖等效塑性应变的影响如图 6 所示, 由图可以看出, U71Mn 的加工硬化程度越高, 裂尖等效应变越小, 这是因为加工硬化程度越高, 材料的塑性变形能力越差, 因此裂尖越难以发生变形, 因此, 裂尖等效塑性应变随着加工硬化程度的增大而减小。裂尖有沟型裂纹时, 在沟型裂纹正前方等效塑性应变有较大幅度的减小, 而裂尖无沟型

裂纹时，等效塑性应变变化较为平缓，主要因为沟型裂纹在应力作用下容易开裂而使应变减小。

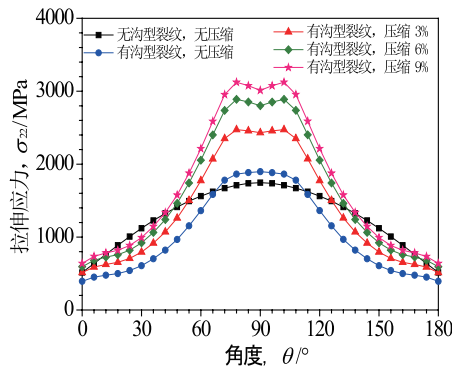


图 5 加工硬化对裂尖拉伸应力的影响

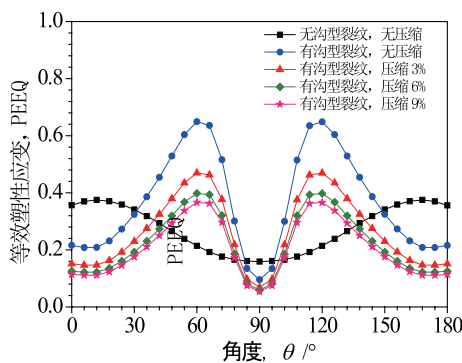


图 6 加工硬化对裂尖等效塑性应变的影响

图 7 所示为材料加工硬化程度不同时，裂尖拉伸应变的分布规律，由图可以看出，沟型裂纹尖端拉伸应变随着 U71Mn 加工硬化程度的增大而减小，材料加工硬化程度越高，塑性越差，裂尖难以发生塑性变形而使裂尖拉伸应变减小。裂尖无沟型裂纹时，其拉伸应变变化平缓。

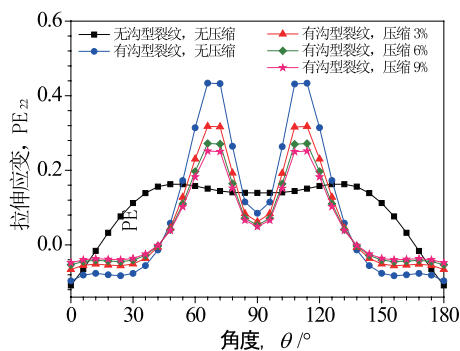


图 7 加工硬化对裂尖拉伸应变的影响

### 3 结论

①实验获得不同压缩变形量下 U71Mn 的载荷位移曲线，压缩变形量越大，材料的加工硬化程度越高，加工硬化使高温下 U71Mn 屈服强度增大，塑性变差。

②沟型裂纹尖端 Mises 应力和拉伸应力均随着材料加工硬化程度的增大而增大，而应力增大的幅度随着材料加工硬化程度的增大而减小；沟型裂纹尖端 Mises 应力有较大幅度的突降，而拉伸应力在沟型裂纹尖端的减小不明显，拉伸应力的最大值出现在裂尖正前方附近。

③材料加工硬化程度越大，沟型裂纹尖端等效塑性应变和拉伸应变越小，并且应变减小的幅度也随着 U71Mn 加工硬化程度的增大而减小；沟型裂纹尖端的等效塑性应变和拉伸应变均会出现快速减小现象。

### 参考文献：

- [1] 李梦璇,丁昊昊,安博洋,等.U71Mn钢轨在工业与海洋大气环境下腐蚀与磨损行为研究[J].机械工程学报,2023(59):1-12.
- [2] M Kamaya, H Machida. Reference stress method for evaluation of failure assessment curve of cracked pipes in nuclear power plants[J]. Journal of Nuclear Materials,2014(451):264-275.
- [3] 钟雯,胡家杰,刘启跃.U71Mn钢轨振动疲劳寿命研究[J].振动、测试与诊断,2022,42(5):893-897.
- [4] 杨宏亮,薛河,倪陈强.冷加工对316L不锈钢裂尖力学特性的影响[J].西安科技大学学报,2018,38(3):484-489.
- [5] J Nakano, Y Nemoto, T Tsukada, et al. SCC susceptibility of cold-worked stainless steel with minor element additions[J]. Journal of Nuclear Materials,2011,417(1-3):883-886.
- [6] 康伟,董方.U71Mn重轨钢高温力学性能研究[J].包钢科技,2016,42(6):55-62.
- [7] 高文理,钦凤,金滩,等.服役U71Mn钢轨疲劳裂纹萌生及扩展分析[J].湖南大学学报(自然科学版),2017,44(6):25-44.
- [8] 薛河,薛晓峰,唐伟,等.镍基合金应力腐蚀裂尖氧化膜力学特性分析[J].稀有金属材料与工程,2011,40(7):1187-1190.
- [9] 席艳君,李宪哲,董澍,等.磨损对U71Mn材料表面高温氧化行为的影响[J].表面技术,2021,50(5):289-294.

作者简介：樊亚玲（1981-），女，讲师。

基金项目：西安铁路职业技术学院 2023 年度立项课题：地铁钢轨疲劳裂纹失效力学特性研究（项目编号：XTZY23K06）。