

DOI: 10.3901/JME.2020.02.035

不同钢轨材料棘轮行为试验研究*

樊译璘 阚前华 赵吉中 徐 祥 康国政
(西南交通大学力学与工程学院 成都 610031)

摘要: 棘轮行为诱导的滚动接触疲劳失效是钢轨伤损的主要形式之一, 分析不同钢轨材料在循环载荷作用下的棘轮行为演化规律, 对线路钢轨选材具有重要指导意义。针对现役的热轧 U71Mn、热处理 U71Mn、热轧 U75V 和热处理 U78CrV 四种钢轨材料分别限定初始最大塑性应变和峰值应力相同, 开展了循环塑性变形行为试验研究, 讨论不同钢轨材料棘轮行为的演化规律的差异。结果显示: 在试验涉及的四种钢轨材料中, 热处理 U78CrV 和热轧 U71Mn 分别拥有最高和最低的屈服强度、极限强度; 当棘轮应变初始值相近时, 热处理钢轨棘轮应变演化速率无论是初期还是稳定期都高于热轧钢轨; 当峰值应力相同时, 强度更高的钢轨抵抗塑性变形的能力更高。不同钢轨材料在失效棘轮应变相近时的疲劳寿命差异较大, 疲劳寿命随失效棘轮应变的增加而降低, 且稳定棘轮应变率可用于钢轨危险位置的疲劳裂纹萌生寿命预测。

关键词: 钢轨; 棘轮行为; 塑性累积; 应力循环; 稳定棘轮应变率

中图分类号: O341

Experimental Study on Ratcheting Behavior of Different Rail Steels

FAN Yilin KAN Qianhua ZHAO Jizhong XU Xiang KANG Guozheng
(School of Mechanics and Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031)

Abstract: The rolling contact fatigue failure induced by ratcheting behavior is one of the main modes of rail damage. The investigations of ratcheting behavior evolutions of different rail steels under cyclic loadings are useful for guiding the rail material selection in service. Experimental investigations on cyclic plastic deformation behavior of hot-rolled U71Mn, heat-treated U71Mn, hot-rolled U75V and heat-treated U78CrV rail steels are carried out. The maximum initial plastic strain and peak stress are limited in the same values, respectively, the difference in ratcheting behavior evolutions of different rail steels is discussed. The results show that, for the four materials investigated in experiments, the heat-treated U78CrV and hot-rolled U71Mn rails have the largest and smallest yield strength and ultimate strength, respectively; when the initial ratcheting strain values are similar, the ratcheting strain rates of heat-treated rail steels are larger than that of hot-rolled rail steels, no matter in the initial stage or in the stable stage; when the peak stress is constant, the higher strength rail steel is more resistant to the plastic deformation. The fatigue lives of different steels at a similar failure ratcheting strain are very different, the fatigue lives decrease with the increasing failure ratcheting strain, and the stable ratcheting strain rate can be used for predicting the fatigue crack initiation life at a critical location of different rails.

Key words: rail; ratcheting behavior; plastic accumulation; stress cycling; stable ratcheting strain rate

0 前言

随着我国日益增加的行车频次、速度和轴重, 轮轨接触状态日趋复杂, 接触应力不断增大^[1], 钢轨表层的磨损、剥落及波磨等伤损日益显著^[2]。合理的钢轨选材对于维持轮轨型面、优化接触条件、延长轮轨的综合使用寿命具有重要意义^[3]。目前, 既有线路上广泛使用热轧或热处理的 U71Mn、

U75V 和 U78CrV 等类型钢轨, 但由于材料成分及工艺的不同, 上述钢轨的强度和韧性指标并不一致, 因此, 上述类型钢轨的运营条件各不相同^[4]。

循环滚动接触载荷诱发的棘轮行为是钢轨疲劳失效的主要原因^[5]。因而, 已有诸多学者开展了钢轨材料的棘轮行为试验研究。例如, BOWER^[6]、MCDOWELL^[7]、KANG 等^[8-10]、方涛^[11]和 PUN 等^[12]分别对碳轨钢、U71Mn 钢、U75V 钢、U78CrV 钢以及日本的 HE1 和 HE2 钢的循环塑性变形行为进行了研究, 主要关注其中某一种钢轨材料的棘轮应变与加载应力状态、加载路径和加载历史的联系。上述研究结果表明: 热轧 U71Mn 钢为循环稳定材

* 国家重点研发计划(2017YFB0304500)、国家自然科学基金(U1734207)、四川省杰出青年基金(2017JQ0019)和四川省国际合作(2017HH0038)资助项目。20190225 收到初稿, 20190730 收到修改稿

料,其棘轮行为演化与加载的平均应力和应力幅密切相关^[8-10];U75V 为循环软化材料,其循环特性与加载应变幅相关且棘轮应变率表现出非线性演化^[11];而 U78CrV 钢的多轴棘轮行为明显弱于单轴棘轮行为,且棘轮行为的演化显著依赖于非比例加载路径^[12];从中发现:不同钢轨表现出不同的循环变形特性和棘轮行为演化规律,深入了解不同钢轨材料的循环变形行为对轮轨材料匹配研究至关重要^[13-17]。目前,已有一些学者开始关注不同钢轨材料工艺和基本力学性能的对比^[18-19],对国内现役的不同钢轨材料棘轮行为演化规律的对比研究仍非常缺乏。

因此,本文针对现役的四种类型钢轨(热轧 U71Mn、热处理 U71Mn、热轧 U75V 和热处理 U78CrV)进行了应力控制下的循环塑性变形对比试验研究。通过对比不同钢轨材料的棘轮行为演化规律,为不同运营线路下的钢轨选材以及轮轨材料匹配研究提供试验数据支持。

1 试验过程

1.1 试验材料

试验材料为攀钢集团有限公司提供的现役新轨。不同类型钢轨具体成分见表 1。

表 1 不同钢轨材料化学组分(质量分数) %

	C	Si	Mn	Cr	V
热轧 U71Mn	0.72	0.43	0.96	0.02	0.01
热处理 U71Mn	0.74	0.51	1.03	0.12	0.01
热轧 U75V	0.71	0.25	1.00	—	0.03
热处理 U78CrV	0.79	0.71	0.79	0.33	0.08

试验选取钢轨轨头部分轮轨滚动接触附近的材料,依据 GB/T15248-2008 标准加工试样。试样工作段的直径为 10 mm,长度为 30 mm。试验前对试样表面进行抛光打磨,试验在室温下进行。

1.2 试验工况

主要基于以下两点进行不同材料棘轮行为的对比:① 经过反复尝试,使得第一个循环周次下的塑性应变值相近,重点比较不同钢轨材料的棘轮应变及其演化速率之间的差异;② 当轴重相同时,不同钢轨响应的最大应力差异较小。因此,可固定峰值应力来对比不同材料在相同轴重下的棘轮行为演化差异。根据上述原则,设计的试验工况如表 2 所示。

采用 CRISM-100kN 电子蠕变疲劳试验机,按照表 2 设计工况进行室温下的应力循环试验,通过 CCP5.0 控制系统进行控制和数据采集。根据试验

机的加载频率和试样尺寸的限制,应力速率控制在 100 MPa/s。每一个循环采集 200 个数据点,以保证获得光滑的滞回环。

表 2 不同钢轨材料棘轮行为试验工况

工况	材料	平均应力/MPa	应力幅值/MPa
001	热轧 U71Mn	100	500
002	热处理 U71Mn	200	700
003	热轧 U75V	50	600
004	热处理 U78CrV	300	800
005	热轧 U75V	100	600
006	热轧 U75V	150	450
007	热处理 U71Mn	300	700
008	热处理 U78CrV	200	800
009	热处理 U78CrV	300	700

2 试验结果与讨论

2.1 单调拉伸应力-应变曲线

分别对热轧 U71Mn、热处理 U71Mn、热轧 U75V 和热处理 U78CrV 四种钢轨材料进行单调拉伸试验,获取的应力-应变曲线如图 1 所示。从图中可知,四种钢轨材料应力-应变演化规律相似,但屈服强度 $\sigma_{p0.2}$ 和极限强度 σ_m 有明显的差别,从小到大依次为热轧 U71Mn、热轧 U75V、热处理 U71Mn 以及热处理 U78CrV。经过在线余热淬火的 U71Mn 钢相比热轧 U71Mn 钢的强度增幅十分明显,热处理 U78CrV 强度增幅最大。

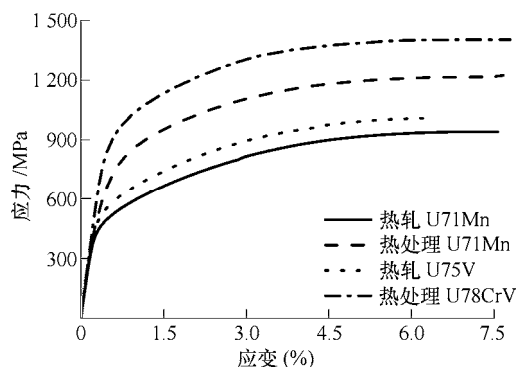


图 1 不同钢轨材料单轴应力应变曲线

每种钢轨材料通过两组重复单调拉伸试验提取基本力学性能参数。具体数值在表 3 中列出。其中,

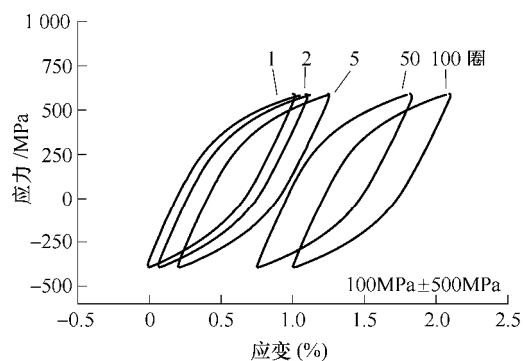
表 3 不同钢轨基本力学性能

材料类型	弹性模量 E/GPa	屈服强度 $\sigma_{p0.2}/\text{MPa}$	抗拉强度 σ_m/MPa
热轧 U71Mn	184±2.8	481±13.7	944±3.8
热处理 U71Mn	201±10.4	750±20.7	1 218±5.6
热轧 U75V	205±4.2	547±2.8	1 005±4.9
热处理 U78CrV	208±3.1	973±26.6	1 399±4.2

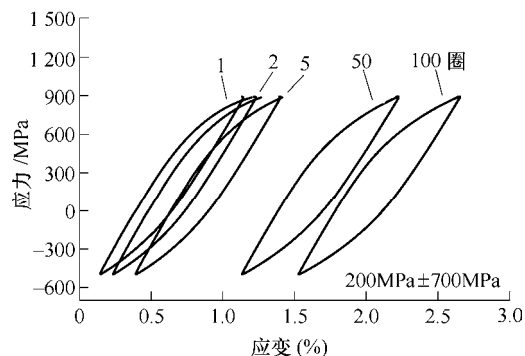
热处理 U78CrV 的屈服强度和抗拉强度分别达到 973 MPa 和 1 399 MPa, 远高于其他三类材料。

2.2 循环应力-应变曲线

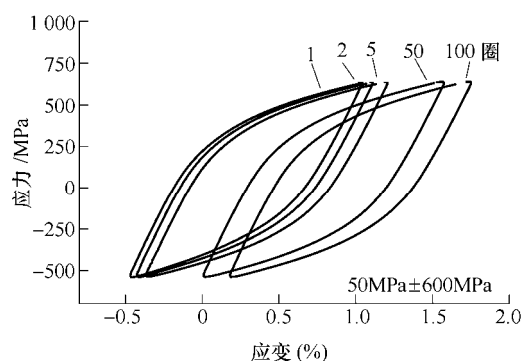
图 2 显示了不同钢轨材料的循环应力-应变曲线。由于循环周次较高时损伤将与棘轮行为发生交互作用, 不方便单独讨论棘轮行为的演化规律; 同时, 循环应力-应变曲线过于密集, 不利于清晰观察不同循环周次下应力-应变滞回环的演化过程。因



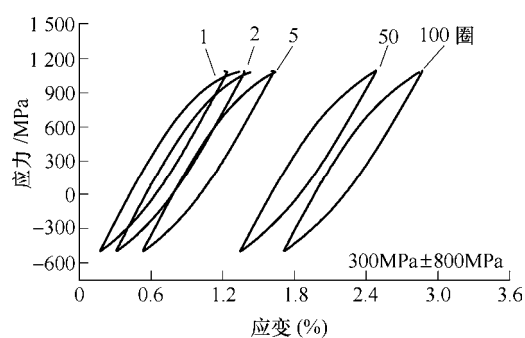
(a) 热轧 U71Mn



(b) 热处理 U71Mn



(c) 热轧 U75V



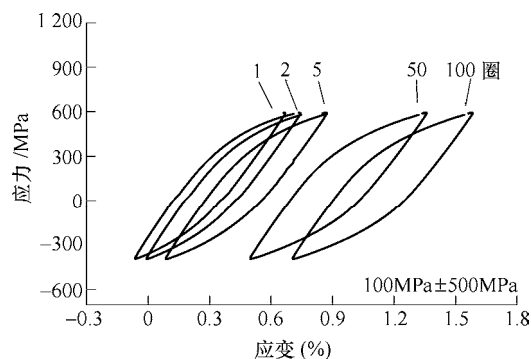
(d) 热处理 U78CrV

图 2 四种钢轨材料的循环应力-应变曲线

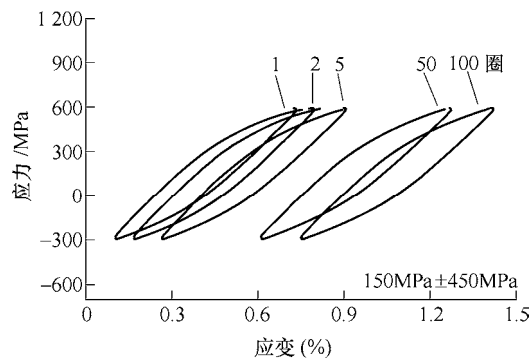
此, 图 2 中仅列出了第 1 周、第 2 周、第 5 周、第 50 周和第 100 周的应力-应变曲线。需补充说明试验情况: 由于试验为应力控制, 需要反复尝试才能获得初始塑性应变相近的工况。尽管热处理 U78CrV 在 $300 \text{ MPa} \pm 800 \text{ MPa}$ 工况下比其他三种材料在各自工况下的初始塑性应变要大约 0.08%, 但其在总的塑性应变中占比很小, 这里可认为该工况与其他三种工况的初始塑性应变相近。

从图 2 可以看出, 随着循环周次的增加, 不同钢轨材料均表现出应力-应变滞回环沿着平均应力方向的平移。不同钢轨材料在第一个循环周次时的应变峰值和谷值同后续循环中应力-应变曲线的演化并不一致, 应变最大的钢轨材料是热处理 U78CrV, 而应变最小的是热轧 U75V。对比初始塑性应变值几乎一样的其余三种钢轨材料在 100 圈后的最大塑性应变值发现: 热处理 U71Mn 最大, 热轧 U71Mn 次之, 热轧 U75V 最小。由表 1 可知, 热处理 U71Mn 的屈服强度和抗拉强度都要高于热轧 U75V, 仅次于热处理 U78CrV, 即应变的循环累积量并不完全依赖于屈服强度和抗拉强度。

因为热轧材料与热处理材料的屈服强度和抗拉极限区别比较明显, 分别在 600 MPa 和 1 000 MPa 峰值应力工况下, 对比同种工艺不同材料的棘轮行为。对比热轧 U71Mn 和热轧 U75V 在 600 MPa 峰值应力下棘轮应变演化, 循环应力-应变曲线见图 2 和图 3。从图 3 和图 2a 可知, 当峰值应力恒定为 600 MPa



(a) 热轧 U71Mn



(b) 热轧 U75V

图 3 峰值应力为 600 MPa 时的循环应力-应变曲线

时, 热轧 U71Mn 的应变增长最快, 滞回环面积也最大, 另外在 600 MPa 峰值应力下对比了同种材料不同应力幅值和平均应力的工况, 结果表明: 棘轮应变演化中, 棘轮应变受到应力幅值和平均应力的影响, 在 100 圈时已有明显差异。

由于热处理 U78CrV 强度最高, 保持峰值应力至 1 000 MPa 不变(略高于屈服应力, 保证材料进入塑性区), 将其与强度较高的热处理 U71Mn 进行对比, 观察二者棘轮应变的差异。由图 4 可知, 热处理 U78CrV 的塑性应变远小于热处理 U71Mn。

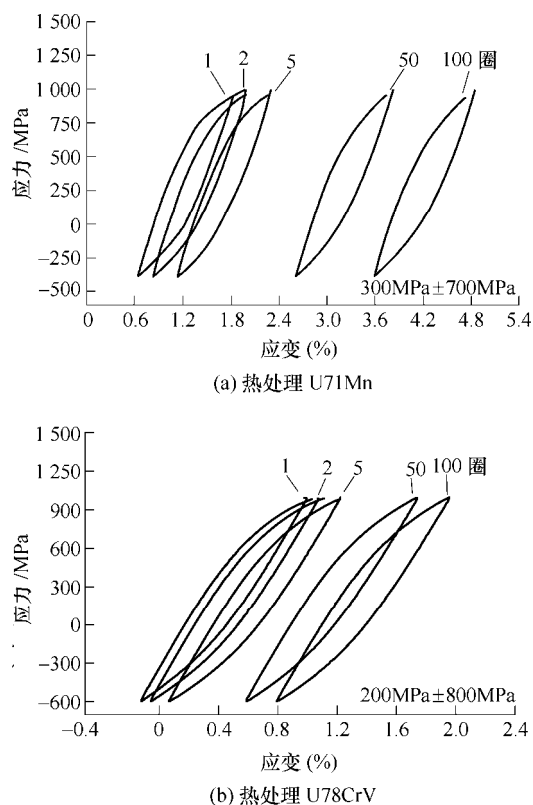


图4 峰值应力为 1 000 MPa 时的循环应力-应变曲线

2.3 棘轮行为演化分析

从第 2.2 节的分析可知, 应力-应变滞回环随循环周次的增加沿着平均应力方向平移。无论是初始应变相近组, 还是峰值应力相同组, 不同钢轨材料的平移量均不同。然而, 上述分析尚无法定量比较不同钢轨材料的棘轮行为。已有文献^[8-9, 12, 20]通常采用每个循环周次中的最大塑性应变、最大应变和最小应变的平均值、相邻循环中最大应变之差三种形式来表征棘轮行为的演化规律。由于轮轨接触是典型的压缩-卸载循环过程, 采用每个周次中的最大塑性应变演化来表征棘轮行为更为方便和直观, 后续将每个循环周次中的最大塑性应变定义为棘轮应变 ε_r 、相邻循环周次的最大塑性应变之差定义为棘轮应变率 $\dot{\varepsilon}_r$, 用来度量棘轮行为的演化和演化速率。

图 5 显示了初始棘轮应变相似组不同钢轨材料

的棘轮应变和棘轮应变率随循环周次变化的曲线。由图可知, 四种钢轨材料的初始棘轮应变值较为接近(约为 0.75%); 随着循环周次的增加, 棘轮应变迅速增加, 随后增速变缓, 棘轮应变率迅速降低, 逐渐达到准安定状态。对比不同材料的棘轮应变可知, 棘轮应变从大到依次为热处理 U78CrV、热处理 U71Mn、热轧 U71Mn 和热轧 U75V。同样, 对比不同钢轨材料的棘轮应变率可知, 在循环初期(前 20 圈), 热处理 U78CrV 初期棘轮演变速率最高(0.054%), 是初期棘轮演变速率最小的热轧 U75V 钢的 2 倍(0.027%), 且热处理材料初期棘轮演化速率高于热轧材料。棘轮应变率达到稳定时(20 圈之后), 四种钢轨材料棘轮应变率均小于 0.01%, 仍然表现为热处理材料的棘轮应变率(均高于 0.005%)高于热轧材料的棘轮应变率(均低于 0.005%)。且在热处理和热轧工艺下, U71Mn 材料的稳定棘轮应变率均分别高于其他两种钢轨材料。

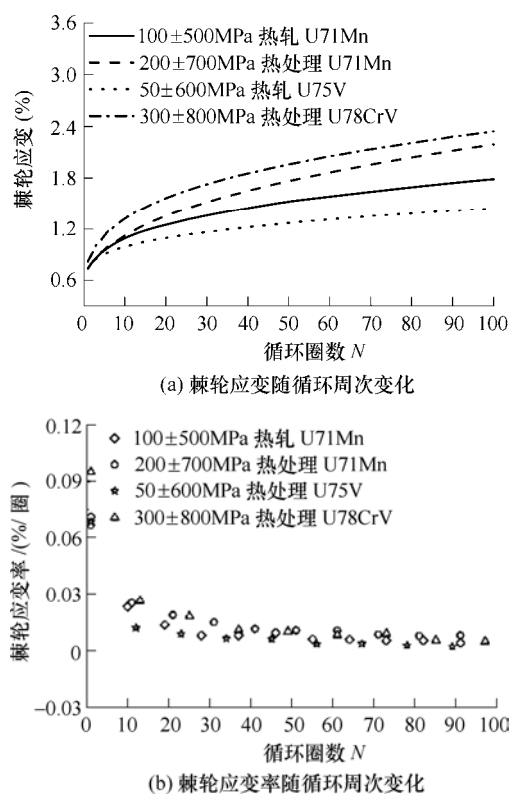


图5 不同钢轨材料棘轮应变和棘轮应变率演化曲线

结合棘轮应变及棘轮应变率变化曲线可以发现: 在同种钢轨材料间(U71Mn 钢轨材料), 相似的初始棘轮应变下棘轮演化规律是不同的, 热处理 U71Mn 演化速度高于热轧 U71Mn; 但是由于在线余热处理增加了材料基本强度, 所以热处理 U71Mn 钢轨材料达到相同的初始塑性应变值, 所需工况的平均应力和应力幅值比热轧 U71Mn 钢轨材料分别高了 100 MPa 和 200 MPa(同时), 但相近初始棘轮

应变一旦发生, 后期变形热处理 U71Mn 钢轨材料的棘轮演化速率更快, 更容易损坏或者失稳。即在线余热处理虽然增加了钢轨材料棘轮演化发生的阈值, 但却降低了材料抵抗循环塑性变形累积的能力, 相同的初始塑性变形条件下, 在线余热处理钢轨材料的棘轮应变演化速率更快。

图 6 为相同峰值应力下不同材料棘轮应变演化。在图 6a 中, 峰值应力恒定为 600 MPa, 热轧 U75V 的棘轮应变明显小于热轧 U71Mn。这同 1 000 MPa 峰值应力组(图 6b)结果一致: 热处理 U71Mn 的棘轮应变明显高于热处理 U78CrV。上述过程表明: 对于不靠近强度极限的峰值应力工况, 高强度钢轨材料由于在相同峰值应力工况下变形小, 所以对抵抗塑性变形累积能力更强。相同峰值应力下, 不同平均应力和应力幅值下热轧 U75V 和热处理 U78CrV 的棘轮应变初始值接近, 但由于棘轮应变还受到平均应力和应力幅值的影响, 在 100 个循环周次时热轧 U75V 和热处理 U78CrV 的棘轮应变已有差距。

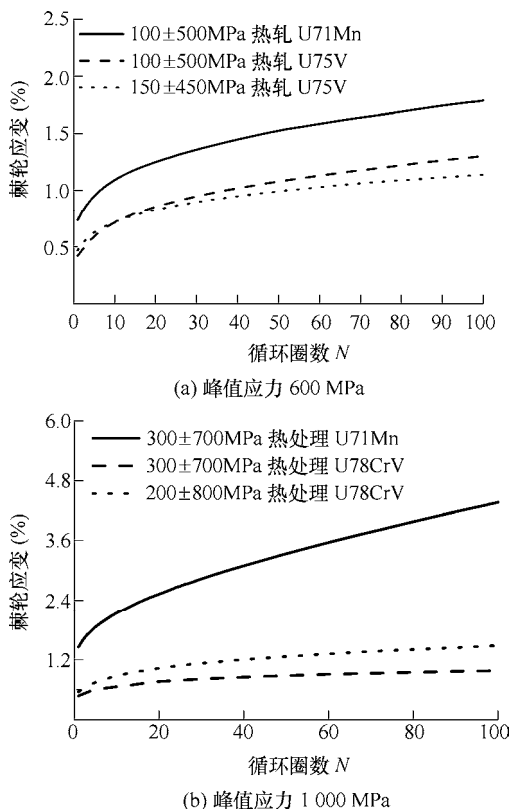


图 6 不同峰值应力下的棘轮应变随循环周次演化曲线

图 7 进一步提取了不同峰值应力下棘轮应变率随循环周次变化曲线。由图可知, 棘轮应变率随循环周次的增加迅速降低, 逐渐达到稳定状态。图 7a 显示了峰值应力为 600 MPa 时三种工况下两种钢轨材料的棘轮应变率, 它们的稳定值均小于 0.005%。在峰值应力为 1 000 MPa 时(图 7b), 热处理 U71Mn

的初始棘轮应变率和稳定棘轮应变率比 U78CrV 分别高了 0.046% 和 0.017%。

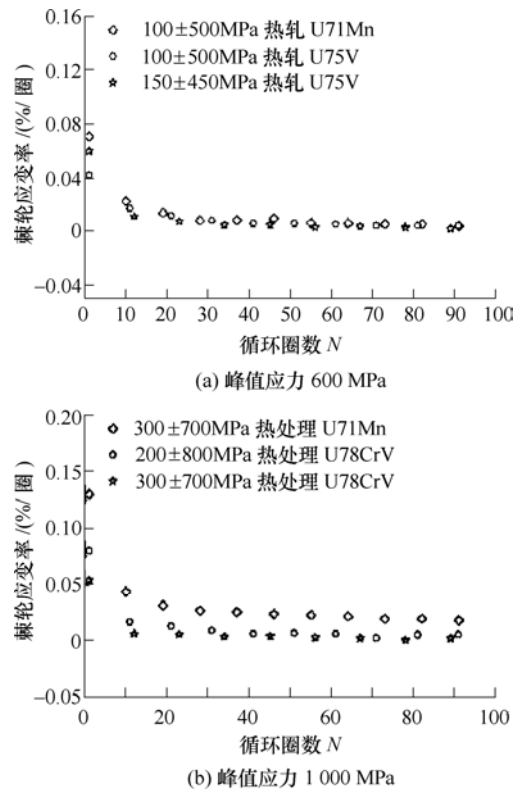


图 7 不同峰值应力下的棘轮应变率随循环周次演化曲线

2.4 棘轮行为对疲劳寿命的影响

最后, 需要进一步明确棘轮应变与疲劳寿命的联系, 从而揭示棘轮行为对疲劳寿命的影响。图 8 给出了不同钢轨材料在不同应力循环工况下, 疲劳失效时的棘轮应变(简称失效棘轮应变)和准安定时的棘轮应变率(简称稳定棘轮应变率 $\dot{\epsilon}_{rs}$)与疲劳寿命关系曲线。图 8a 可以看出, 对于同一钢轨材料, 疲劳寿命随失效棘轮应变的增加而降低。然而, 对于不同钢轨材料, 失效棘轮应变相近时, 疲劳寿命却差异较大。例如, 热轧 U71Mn 在相近的失效棘轮应变时疲劳寿命明显高于热处理 U78CrV。这是由于热处理 U78CrV 强度最高, 但伸长率稍低, 一旦发生棘轮变形, 其抵抗棘轮应变累积的能力降低。当棘轮应变率较大时, 棘轮应变累积更快, 更容易达到失效棘轮应变, 疲劳寿命也会更低。因此, 对于不同钢轨材料的疲劳寿命预测, 不能简单地采用单调拉伸时的伸长率作为失效棘轮应变判据^[12]。

由图 8b 可以看出, 对于四类钢轨材料, 疲劳寿命均随着稳定棘轮应变率的增加而降低, 且近似呈现出幂律衰减趋势。由图 5 和图 7 可知, 棘轮应变率在 100 个循环周次后达到准安定状态, 比较容易获取, 可作为疲劳寿命预测的基本物理量。

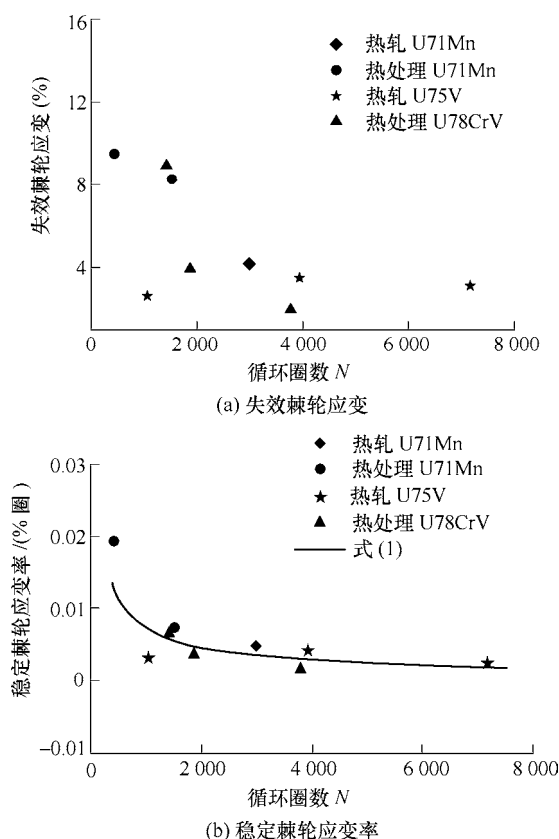


图8 失效时棘轮应变或稳定棘轮应变率与疲劳寿命关系

对图8的试验数据进行拟合,可获得如下幂律方程

$$N_f = a \dot{\epsilon}_r^b \quad (1)$$

式中, $a=15.8$, $b=-0.9$ 为拟合的材料常数。由图8可知,该方程对不同钢轨材料的疲劳寿命预测结果较为令人满意。此外,需要指出的是,轮轨接触是典型的非对称载荷控制下(压缩-卸载)的低周疲劳问题,式(1)仅适用上述情形。对于常规的对称应变循环和对称应力循环,棘轮应变率均为零,式(1)不再适用。

2.5 钢轨疲劳裂纹萌生寿命预测方法

在滚动接触过程中,棘轮效应导致的塑性变形累积将降低接触压力,棘轮应变率逐渐衰减。通过有限周次的轮轨滚动接触有限元模拟(视加载条件不同,10~50个循环周次即可达到准安定状态),可获取不同循环周次下的棘轮应变演化曲线,通过特定的判据来确定稳定的棘轮应变率,再应用式(1)即可获取钢轨危险位置的裂纹萌生寿命。参照文献[21]的建议,稳定棘轮应变率可通过式(2)判断

$$\left| \frac{(\dot{\epsilon}_r)_N - (\dot{\epsilon}_r)_{N-1}}{(\dot{\epsilon}_r)_{N-1}} \right| \leq 0.5\% \quad (2)$$

式中, $(\dot{\epsilon}_r)_N$ 和 $(\dot{\epsilon}_r)_{N-1}$ 分别为第 N 圈和第 N-1 圈的棘轮应变率。

限于篇幅,图9给出了钢轨疲劳裂纹萌生寿命预测的具体过程。

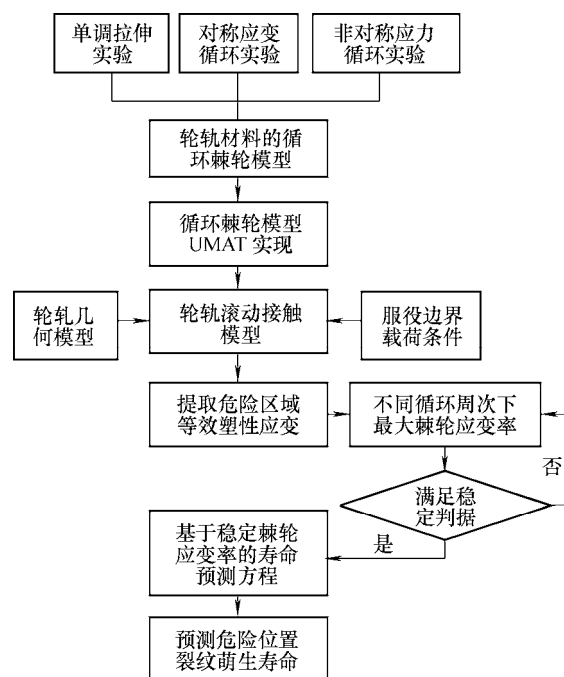


图9 钢轨疲劳裂纹萌生寿命预测流程图

3 结论

(1) 四种现役钢轨材料,按照屈服强度和极限强度由小到大排列如下:热轧 U71Mn、热轧 U75V、热处理 U71Mn 和热处理 U78CrV。

(2) 初始棘轮应变相近时,棘轮应变从大到依次为热处理 U78CrV、热处理 U71Mn、热轧 U71Mn 和热轧 U75V,且对比棘轮应变率:热处理钢轨棘轮应变演变速率无论是初期还是稳定期都高于热轧钢轨。

(3) 在相同峰值应力工况下,强度更高的钢轨材料抵抗变形和动态变形的能力更高。相同钢轨材料,在相同峰值应力工况下,棘轮应变和应变率受到应力幅值和平均应力的影响,在100圈时已显现明显的差异。

(4) 不同钢轨材料在失效棘轮应变相近时的疲劳寿命差异较大,且失效棘轮应变越高,疲劳寿命越低;稳定棘轮应变率可用于钢轨危险位置的疲劳裂纹萌生寿命预测。

参考文献

- [1] 金学松,张雪珊,张剑,等.轮轨关系研究中的力学问题[J].机械强度,2005,27(4):408-418.
JIN Xuesong, ZHANG Xueshan, ZHANG Jian, et al.

- Mechanics in performance of wheel-rail[J]. Journal of Mechanical Strength, 2005, 27(4): 408-418.
- [2] 金学松, 刘启跃. 轮轨摩擦学[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2004.
- JIN Xuesong, LIU Qiyue. Tribology of wheel and rail[M]. Beijing: China Railway Publishing House, 2004.
- [3] 周韶博, 梁旭, 李闯, 等. 国内外高速铁路轮轨硬度匹配研究与应用综述[J]. 铁道技术监督, 2016, 44(6): 33-36.
- ZHOU Shaobo, LIANG Xu, LI Chuang, et al. Review at global research and application of wheel and rail hardness matching in high-speed railway[J]. Railway Quality Control, 2016, 44(6): 33-36.
- [4] 姚冬. 不同强度等级珠光体钢轨韧性指标对比分析[J]. 铁道建筑, 2018(7): 1-4.
- YAO Dong. Comparative analysis on toughness properties for pearlite rails of various strength grades[J]. Railway Engineering, 2018(7): 1-4.
- [5] 梁喜仁, 陶功权, 陆文教, 等. 地铁钢轨滚动接触疲劳损伤研究[J]. 机械工程学报, 2019, 55(2): 147-155.
- LIANG Xiren, TAO Gongquan, LU Wenjiao, et al. Study on the rail rolling contact fatigue of subway[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2019, 55(2): 147-155.
- [6] BOWER A F. Cyclic hardening properties of hard-drawn copper and rail steel[J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 1989, 37(4): 455-470.
- [7] MCDOWELL D L. Stress state dependence of cyclic ratcheting behaviour of two rail steels[J]. Int. J. Plasticity, 1995, 11(4): 397-421.
- [8] KANG Guozheng, GAO Qing, YANG Xianjie. Experimental study on the cyclic deformation and plastic flow of U71Mn rail steel[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2002, 44(8): 1647-1663.
- [9] KANG Guozheng, GAO Qing. Uniaxial and non-proportionally multiaxial ratcheting of U71Mn rail steel: Experiments and simulations[J]. Mechanics of Materials, 2002, 34(12): 809-820.
- [10] KANG Guozheng, GAO Qing, CAI Lixun, et al. Experimental study on non-proportional multiaxial strain cyclic characteristics and ratcheting of U71Mn rail steel[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2002, 18(1): 13-16.
- [11] 方涛. 轮轨钢材料棘轮-疲劳交互作用实验和理论模型研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2017.
- FANG Tao. Experiments and theoretical models on ratcheting-fatigue interaction of wheel and rail steels[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2017.
- [12] PUN C L, KAN Qianhua, MUTTON P J, et al. Ratcheting behaviour of high strength rail steels under bi-axial compression-torsion loadings: Experiment and simulation[J]. International Journal of Fatigue, 2014, 66: 138-154.
- [13] MARKOV D. Laboratory tests for wear of rail and wheel steels[J]. Wear, 1995, 181-183(3): 678-686.
- [14] 张向龙, 钟雯, 蒋文娟, 等. 轮轨材料匹配摩擦学试验研究[J]. 润滑与密封, 2011, 36(5): 20-23.
- ZHANG Xianglong, ZHONG Wen, JIANG Wenjuan, et al. Study on friction and wear matching tests between different wheel-rail materials[J]. Lubrication Engineering, 2011, 36(5): 20-23.
- [15] 蒋文娟, 钟雯, 张向龙, 等. 不同轴重下钢轨硬度对轮轨磨损量的影响[J]. 机械工程材料, 2011, 35(6): 80-82.
- JIANG Wenjuan, ZHONG Wen, ZHANG Xianglong, et al. The effect of rail hardness on wear loss of wheel-rail system at different axle loads[J]. Materials for Mechanical Engineering, 2011, 35(6): 80-82.
- [16] 李亨利, 李芾. 轮轨配合对重载货车轮轨磨损的影响[J]. 机械工程学报, 2016, 52(24): 130-135.
- LI Hengli, LI Fu. Effect of profile match on the heavy haul freight car wheel/rail wear[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2016, 52(24): 130-135.
- [17] 陈水友, 刘吉华, 郭俊, 等. 车轮材料特性对轮轨磨损与疲劳性能影响的研究[J]. 摩擦学学报, 2015, 35(5): 531-537.
- CHEN Shuiyou, LIU Jihua, GUO Jun, et al. Effect of wheel material characteristics on wear and fatigue property of wheel-rail[J]. Tribology, 2015, 35(5): 531-537.
- [18] 王树青, 詹新伟. U74、U71Mn、U75V、U76NbRE 钢轨欠速淬火性能研究[J]. 金属热处理, 2004, 29(3): 12-16.
- WANG Shuqing, ZHAN Xinwei. Properties of U74, U71mn, U75V and U76NbRE rails after slack quenching[J]. Heat Treatment of Metals, 2004, 29(3): 12-16.
- [19] 董华利. U71Mn、U75V 和 U78CrV 钢轨在线热处理后性能改善比较[J]. 金属热处理, 2016, 41(8): 133-137.
- DONG Huali. Comparison of property improvement of U71Mn, U75V and U78CrV rail steels by online heat treatment[J]. Heat Treatment of Metals, 2016, 41(8): 133-137.
- [20] CHABOCHE J L, NOUALIHAS D. Constitutive

modeling of ratcheting effects: part 1, experimental faets and properties of classical models[J]. Journal of Engineering Materials and Technology, 1989, 111: 384-392.

- [21] PUN C L, KAN Qianhua, MUTTON P J, et al. An efficient computational approach to evaluate the ratcheting performance of rail steels under cyclic rolling

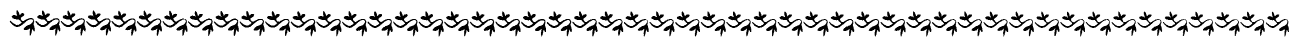
contact in service[J]. International Journal of Mechanical Science, 2015, 101-102: 214-226.

作者简介: 樊译璘, 女, 1994 年出生。主要研究方向为重载轮轨塑性匹配。

E-mail: yilinfan@foxmail.com

阚前华(通信作者), 男, 1980 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为轮轨滚动接触疲劳。

E-mail: qianhuakan@foxmail.com



(上接第 34 页)

- [15] 陈伟, 李茜, 汤伟. 基于结构风险最小化原则的径向基函数网络[J]. 化工自动化及仪表, 2009, 36(3): 34-37.
CHEN Wei, LI Qian, TANG Wei. Radial basis function networks based on structural risk minimization principle[J]. Control and Instruments In Chemical Industry, 2009, 36(3): 34-37.

作者简介: 安华, 男, 1995 年出生。主要研究方向为智能监测及控制。

E-mail: 245367067@qq.com

王国锋(通信作者), 男, 1975 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为刀具状态监控、非平稳信号处理、加工过程辨识、智能控制。

E-mail: gfwangmail@tju.edu.cn