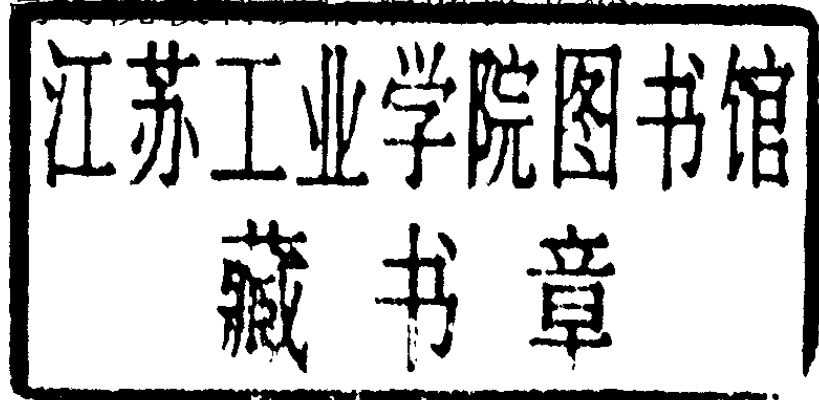


高速铁路的养护与维修

(译文集)

铁路高等院校科技情报网秘书处



中国铁道出版社

1994年·北京

编 者 的 话

为了配合铁路“八五”计划的实施，促进我国铁路高速运输的发展，我们铁路高等院校情报网各成员单位，共同编译了这本高速铁路的养护与维修的论文集。

本书稿的原文除从英、日、德、俄等文种的铁路期刊中挑选外，还从“Track Technology”(Thomas Teleford Ltd. London 1984.) 以及“Shinkansen high speed Rail Network of Japan”(A. Straszak and R. Tuch, Editors 1980.) 两本书中摘译了有关章节。

在翻译和审校过程中，铁路各高校的专家和教授给予了大力支持和帮助，我们表示衷心地感谢。希望这份资料在某些方面能对读者有参考作用。对译文中的错误和不妥之处，请读者不吝赐教。

铁路高等院校科技情报网秘书处

一九九三年三月

注：本届秘书处的成员单位及代表是

长沙铁道学院 黄 牧

石家庄铁道学院 李 英

咸阳铁道管理干部学院 郭海成

(京)新登字063号

内 容 简 介

本书是从英、日、德、俄等文种的铁路期刊以及《Track Technology》和《Shinkansen High-Speed Rail Network of Japan》两书中收集了23篇论文,介绍国外关于高速铁路的养护维修技术,以配合我国铁路“八五”计划的实施,促进我国铁路高速运输的发展。有些文章对指导既有线路的养护维修以及机车车辆和电气化铁道的设计也可起到一定的作用。

本书可供铁路部门各专业的科技人员阅读。

高速铁路的养护与维修 (译文集)

铁路高等院校科技情报网秘书处

*

中国铁道出版社出版发行

(北京市东单三条14号)

责任编辑 王俊法 封面设计 王毓平

各地新华书店经售

中国铁道出版社印刷厂印

开本: 787×1092 毫米1/32 印张: 7.5 字数: 165 千

1994年7月 第1版 第1次印刷

印数: 1—1500 册

ISBN 7-113-01709-6/TU·365 定价: 11.60元

目 录

1. 钢轨的磨耗与疲劳极限.....	1
2. 有碴线路上的高速试验.....	13
3. 高速铁路的维修.....	26
4. 新建高速铁路的养护与维养.....	37
5. 法国巴黎——东南线高速铁路的养护.....	44
6. 提高新干线列车速度的技术课题.....	51
7. 关于提高行车速度的最新话题.....	65
8. 高速运行系统——地面设施.....	79
9. 新建高速铁路与环境保护	101
10. 高速铁路维修的关键问题	111
11. 关于电气化铁路大修时安全用电的建议	117
12. 揭开轮轨之谜	123
13. ICE/V列车空气动力学阻力的确定	127
14. TGV车辆走行装置的开发经过与特征	144
15. 德国高速列车ICE	151
16. 法国铁路使用机器人喷砂清洗工作	160
17. 实现高速运行的因素	163
18. 高速运行系统——电动车组	173
19. 事故预防系统	181
20. 列车运行控制系统	199
21. 调度设备	209
22. 意大利国营铁路的E402型三相交流 电力机车	222
23. 国际铁联(ORE)在铁路线路维护 方面的研究	227

1. 钢轨的磨耗与疲劳极限

【摘要】 历史证明，钢轨的磨耗极限关系到列车的运营和安全。但随着新技术的应用，确定极限的标准则变得至关重要。本文根据实验并结合现场实际，定量描述了作用到钢轨上的应力。并运用数据分析和断裂力学的原理，结合材料的疲劳特性，综合确定钢轨在运营条件下的“安全”磨耗极限。

一、引言

由重载列车和单元列车运营造成的更新钢轨，是运营消费的主要损失。

钢轨磨耗、塑性变形和疲劳使钢轨组织破坏是缩短钢轨寿命的主要原因。钢轨的常规磨耗和变形，可由线路维修人员测出，并作为是否更换钢轨的依据。而钢轨疲劳所涉及的问题则在于：

a) 达到临界状态的疲劳伤损可以导致断轨，并成为列车脱轨的潜在因素。

b) 疲劳伤损常依赖超声探伤检查，其费用昂贵。

c) 伤轨更换不仅耗资大，而且影响正常的运营计划。

d) 钢轨的容许磨耗量是由材料的疲劳特性决定的。

近几年来，将控制钢轨疲劳作为延长钢轨寿命的主要手段，已显得比较重要，这主要是采用了高强钢轨和改进了润滑技术以及改善了轮轨相互作用特性的缘故。因为这些技

术，使钢轨的磨损和变形明显减少。特别在曲线线路更是如此。

在任何结构材料中（钢轨也不例外），防止缺陷和小裂纹的产生，常常既不是技术上、也不是经济上可能达到的。因此，寻求一个评价其性能和效应的方法是至关重要的。断裂力学为定量结构中的裂纹萌生、扩展和最后断裂阶段的性质提供了一个可以接受的基础理论和方法。下面将详细叙述断裂力学原理怎样与材料的疲劳性质一起用于指导实际的制造和设计。并特别强调钢轨头表面疲劳萌生和早期裂纹扩展阶段，类似的原理也可以应用于钢轨表面的其它部位。

二、表面缺陷和疲劳

1. 一般概念

以前，由于钢轨表面缺陷产生的疲劳裂纹萌生没有得到充分注意，因此，现在研究的第一阶段的目的在于，表面疲劳裂纹扩展初始阶段并评价所确立断裂力学分析的有效性。

尖锐表面疲劳深度（ a ）与作用应力范围（ $\Delta\sigma = \sigma_{\max} - \sigma_{\min}$ ）关系的基本方程是

$$\Delta K = Q \Delta\sigma \sqrt{\pi a} \quad (1)$$

式中 ΔK —— 应力强度因子范围；

Q —— 常量，取决于线路几何形状和线路构造

由于研究集中在疲劳裂纹的成核上，上式可改写成

$$a_{th} = \frac{1}{\pi} \left(\frac{\Delta K_{th}}{Q \Delta\sigma} \right)^2 \quad (2)$$

式中 a_{th} —— 不引起疲劳裂纹扩展所容许的最大表面裂纹深度；

ΔK_{th} —— 应力强度因子门槛值（可测的材料参数）。

对各类裂纹的几何形状, 参数 Q 的确定方法已汇总在参考文献中*。在一个承受均匀单轴拉应力板上的半椭圆表面裂纹, 当深度与板厚之比小于0.1, 与半宽(c)之比为0.4和0.5时, Q 值分别为0.94和0.88。因此, 方程(2)成为

$$a_{th} = 0.36 \left(\frac{\Delta K_{th}}{\Delta \sigma} \right)^2, \quad a/c = 0.4 \quad (3a)$$

$$a_{th} = 0.41 \left(\frac{\Delta K_{th}}{\Delta \sigma} \right)^2, \quad a/c = 0.5 \quad (3b)$$

图1—1表示了在以前的研究中, 利用压缩—拉伸试件确定的 A.R.E.A. 标准碳素钢轨的疲劳裂纹扩展特性。从图中看到, ΔK_{th} 的测量值是在 $12 \sim 15 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$, 据此, 相对于各种 ΔK_{th} 值, 方程(3)可以用来获得 a_{th} 和 $\Delta \sigma$ 之间的关系(所选择的值是在测量范围的较低值部分)。如图1—2所示, 如果上面的概念是正确的, 就一个特定的 $\Delta \sigma$ 值而言, 低于曲线深度的裂纹是不会扩展的。

2. 实验方法

断裂力学是在明显裂痕的基础上分析的, 其实质是很保守的。因为在钢轨制造时产生的大多数表面缺陷, 如划痕和加工痕迹是不明显的。尽管如此, 为一致起见, 实验时在钢轨试样的头部几个部位, 用电火花切割成不同深度的明显缺口(根部半径0.06mm), 如图1—3所示。用不同直径的铜片, 来测量上述特定的裂纹深度, 使最终的 a/c 值在0.4~0.5范围内。沿钢轨长度, 各缺口相隔不少于50mm, 以便将一个缺口对相邻缺口尖端处的应力强度因子的影响限制在2%以内。但用电火花切割, 会在缺口表面产生一薄层马氏体, 增加实验的难度。

* 参考文献略——译者注。

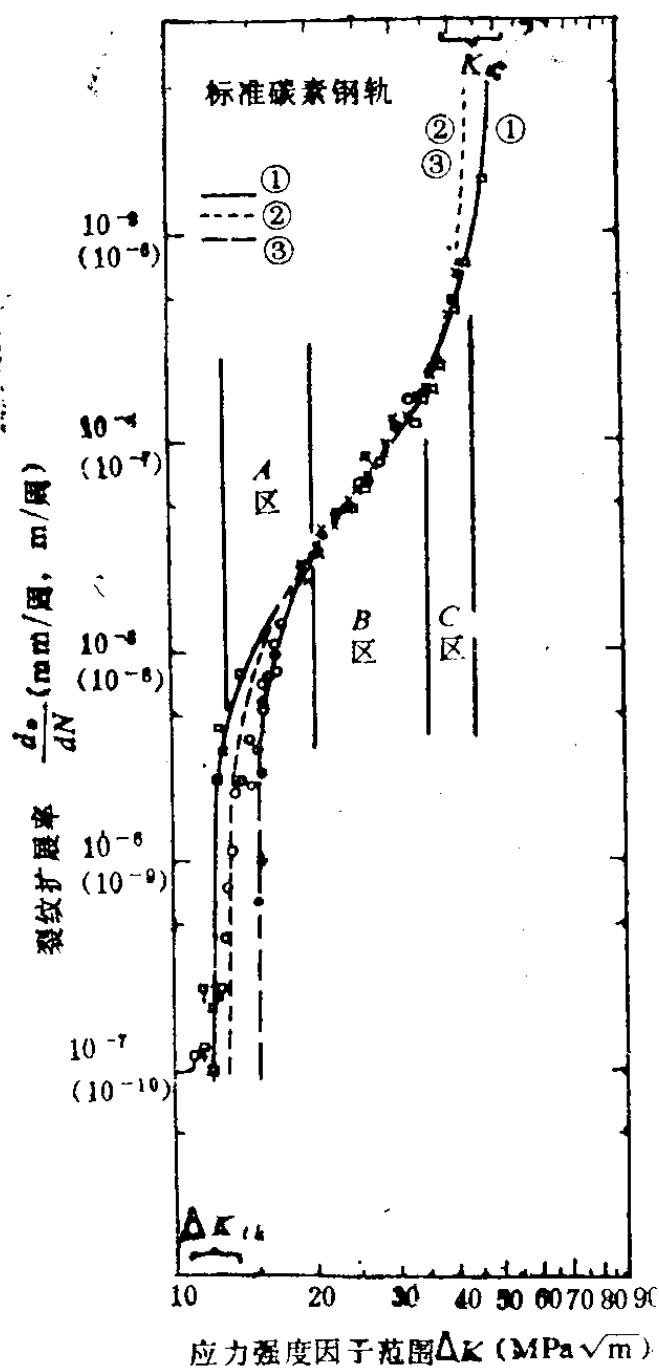


图 1—1 标准钢轨疲劳性能

A区: $\Delta K_{th} = 12 \sim 15 \text{ MPa} \sqrt{m}$

B区: $\frac{da}{dN} = c(\Delta K)^m$

$$m = 34$$

$$c = 96 \times 10^{-10}$$

C区: $K_c = 44 \sim 49 \text{ MPa} \sqrt{m}$

① $\Delta K_{th} = 12 \text{ MPa} \sqrt{m}$

② $\Delta K_{th} = 13 \text{ MPa} \sqrt{m}$

③ $\Delta K_{th} = 15 \text{ MPa} \sqrt{m}$

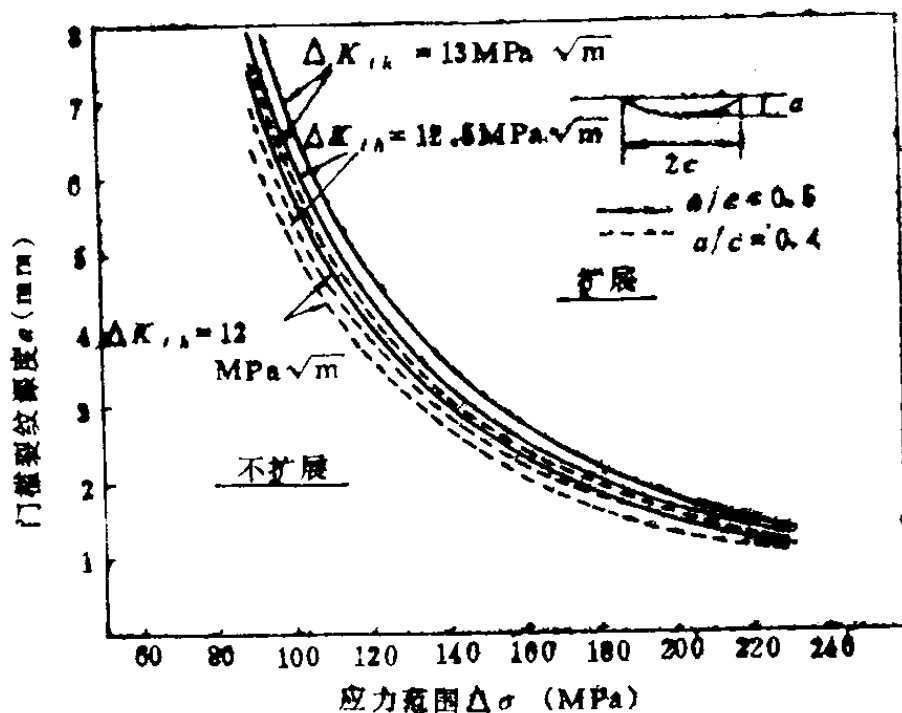


图 1—2 a_{Ih} 和 $\Delta\sigma$ 间预测关系

用滚动加载机*对带缺口的钢轨试样进行疲劳加载。安装在机器上的试样，与垂直线成 6° 角斜倾放置在机器的底板上（如图 1—3），以便模拟钢轨截面的不均匀加载和扭转影响。全部试验在150kN的垂直荷载下进行，等效于30吨的名义轴重。如图 1—3 所示，扇形试件在钢轨连续表面上运行 300mm，由钢轨试样的支承和悬臂两部分承受此加载条件。加载频率为每秒 4 次，往复循环（向前和向后）。

某些试样还被安装在钢轨拉伸台上。该设备为施加恒定的纵向拉应力而设计，相当于钢轨焊接时的零应力温度以下，钢轨由热变冷而产生的应力。在这个研究中，钢轨承受 80MPa 的应力，即相当于在零应力温度以下 35°C 。

为使作用于钢轨试样上的机械应力适量，可将应变片贴

* 与原文有别——编者注。

在沿钢轨长度方向的悬臂点及其两侧 50mm 处的三个截面的各点上(如图 1—4 所示)。

当滚动荷载通过并完成一个全循环时，从应变仪上记录下应变读数。

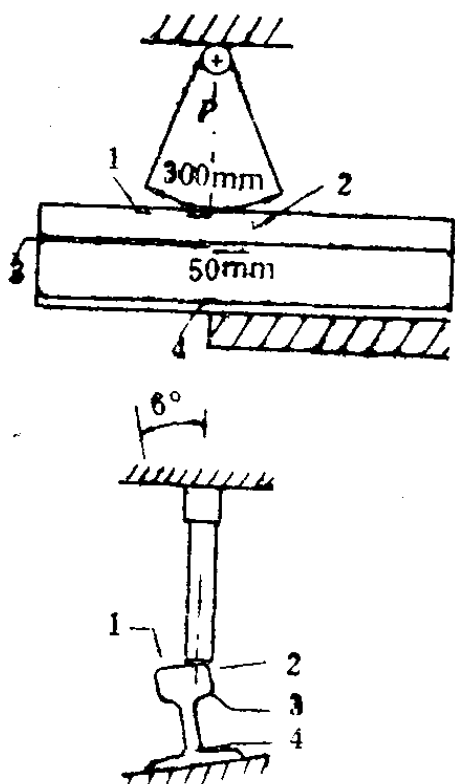


图 1—3 钢轨加载设备图

1 —— 轨顶缺口； 2 —— 轨头侧面缺口； 3 —— 轨头下腭缺口；
4 —— 轨腰底部缺口。

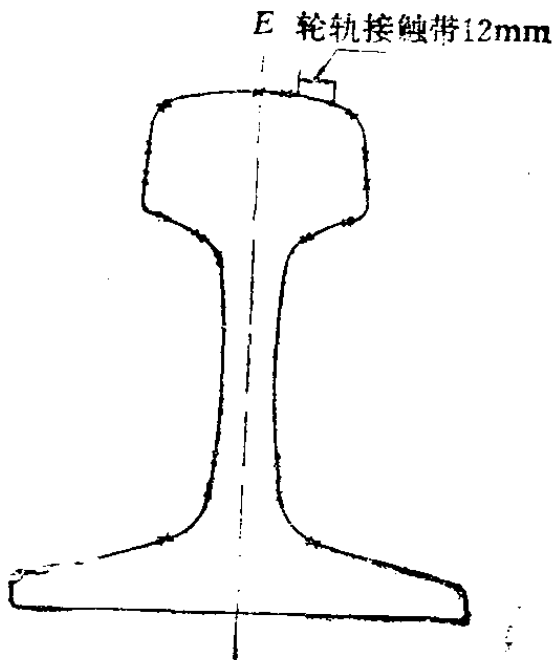


图 1—4 应变片的位置

试件悬臂点处钢轨横截面的三个点上所测量的纵向应力变化的实例如图 1—5 所示。当扇形试件在行程的终点时，悬臂点处钢轨截面上钢轨头顶部和侧面产生最大的拉应力，即产生最大的弯曲。而当扇形件直接在测点上时，在轨底产生最大拉应力，亦即应力是由于轨头的弯曲产生的。由于这种弯曲在轨头的顶部，产生了纵向压应力。钢轨的预拉力导致拉应力的全面增加。

在使用中，钢轨承受一个总的纵向应力 (σ_T)，该应力由下列因素引起，即：

- 1) 温度应力 σ_t ，由周期性温度变化引起；

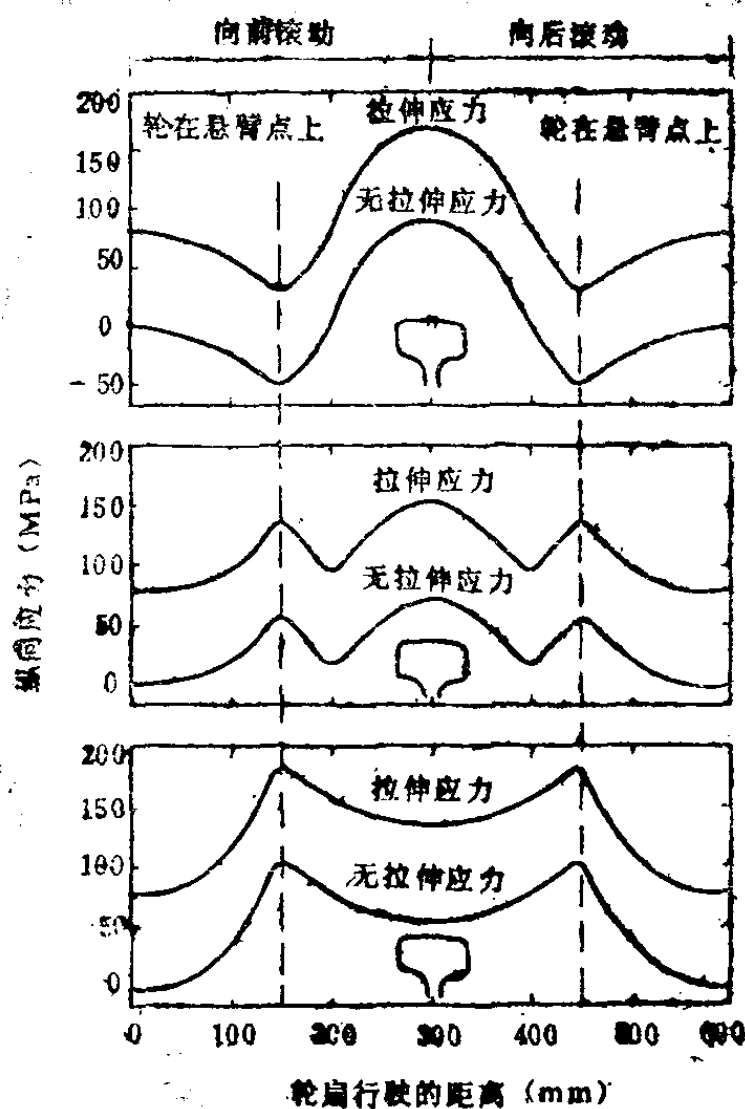


图 1—5 纵向应力循环

- 2) 弯曲应力 σ_b ，由横向和垂直车轮荷重引起；
- 3) 残余应力 σ_r ，由制造过程和使用环境产生；
- 4) 局部接触应力 σ_c ，由轮—轨相互作用产生。

因此，

$$\sigma_T = \sigma_t + \sigma_b + \sigma_r + \sigma_c \quad (4)$$

方程 (3) 中的参量 $\Delta\sigma$ ，必须考虑上面的全部应力。如前所述，在现在的研究中，通过测量钢轨截面应变，求得弯曲和模拟温度应力。而残余应力，变化相当大，取决于制

造工艺，可用测量钢轨截面应变和切割截面技术得到。图1—6绘出了测得的结果。接触应力在分析中被忽略。因为轮—轨相互作用的局部效应，仅保持在离开表面缺口一个相当大的距离内。

裂纹扩展一旦发生，可用Krautkramer直流电位法测量，总裂纹深度在2~15mm的范围内，其精确度是±0.2mm。在承受一百万次应力循环的试件上，大体和总重四千万吨的运输量相当，裂纹扩展很小或不可能被检测。其后，将这些试件截断并做金相检验。

3. 结果和讨论

图1—7是一个机加工缺口的疲劳裂纹扩展的早期阶段纵断面图。在全部试验中，裂纹扩展发生在一个横向水平面，这表明实际上主应力基本上是单轴的，并且作用在纵向，和断裂分析中假定的是相同的。

图1—8汇总的结果，是以裂纹扩展和不扩展的两种形式获得的，作为初始裂纹深度和测量应力范围的函

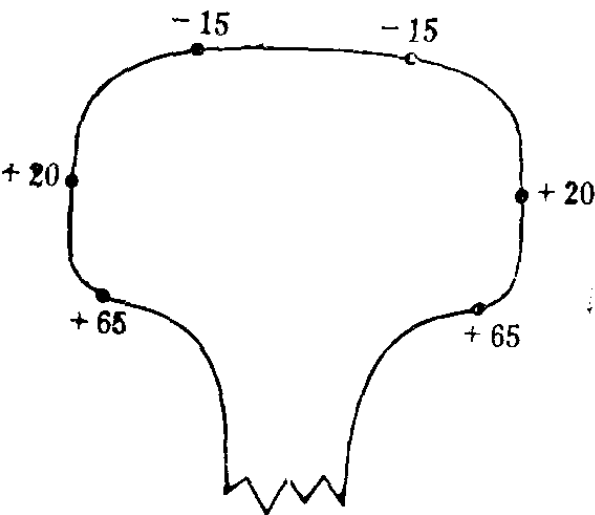


图1—6 轧制钢轨纵向残余应力

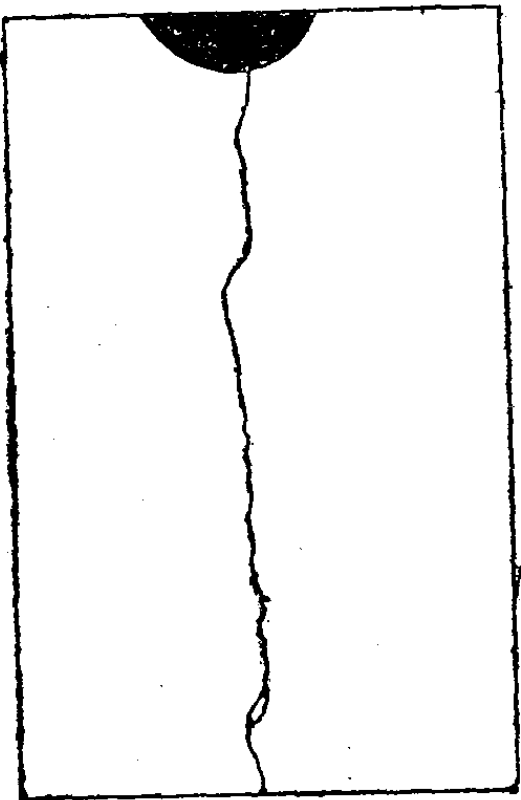


图1—7 缺口顶端的裂纹扩展

数（包括弯曲、温度和残余应力）。图上的每个点代表一个初始机加工缺口。从方程（3）得到的门槛裂纹深度与应力范围的关系曲线也在该图中示出。相应的 ΔK_{th} 值为 $12.5\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ ， a/c 值为 0.4 和 0.5 。显然，这个结果证实了断裂力学概念，也就是说，在一个特定的 $\Delta\sigma$ 值处，深度低于曲线的裂纹将不显示扩展。

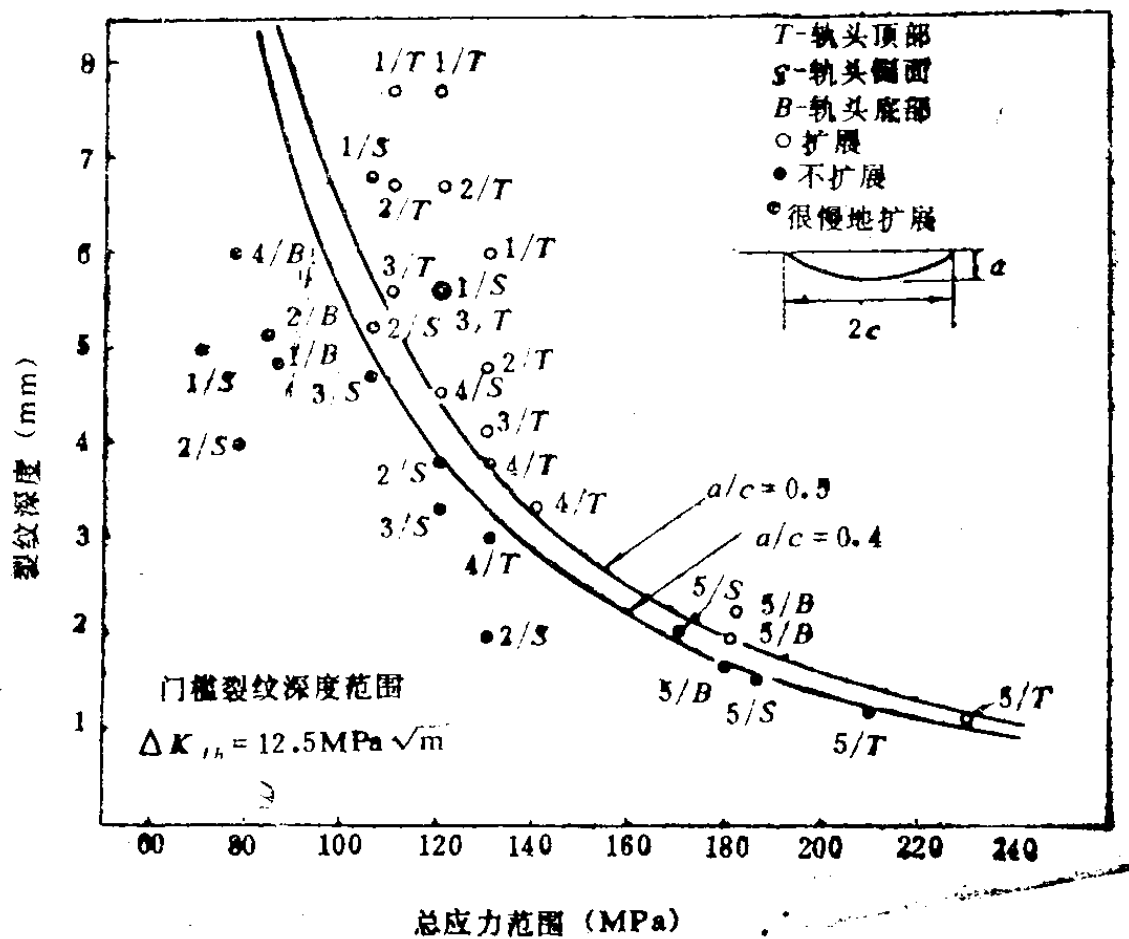


图 1—8 试验结果

与实验研究中所取得的结果相关的两方面需要解释。

1) 如图 5 所示，在无预拉伸的钢轨中，轨头的侧面和底部的缺口，承受 $R = 0$ 的应力循环 ($R = \sigma_{\min}/\sigma_{\max}$)，因此，在图 1—8 中的各个 $\Delta\sigma$ 值等于 $\sigma_{\max}$ 。

2) 在预拉伸的钢轨中, 缺口承受正 R 值。对应这些值, 在图 8 中标绘出的应力值也等于 $\sigma_{\max}$ (不是 $\Delta\sigma$)。证明如下: Cooke 和 Beevers 已经指出, 在钢轨中, ΔK_{th} 和正 R 值间的关系可以近似为方程:

$$\Delta K_{thR} = \Delta K_{th}(1 - R) \quad (5)$$

式中, ΔK_{thR} 是给定的 R 比值的门槛值。 ΔK_{th} 是相对于 $R = 0$ 时的门槛值, 也就是在本研究中试验得到和使用的值。因此, 方程 (2) 可改写成:

$$a_{thR} = \frac{1}{\pi} \left(\frac{\Delta K_{th}(1 - R)}{Q \Delta\sigma} \right)^2 \quad (6)$$

式中, a_{thR} 是在一个给定 R 此值时的门槛裂纹深度。由 $R = \sigma_{\min}/\sigma_{\max}$ 和 $\Delta\sigma = \sigma_{\max} - \sigma_{\min}$, 方程 (6) 成为:

$$a_{thR} = \frac{1}{\pi} \left(\frac{\Delta K_{th}}{Q \sigma_{\max}} \right)^2 \quad (7)$$

因此, 按标出的数据, 用 $\sigma_{\max}$ 值, 计算 R 对 a_{th} 的影响。

三、钢轨磨耗极限

延缓更换钢轨, 譬如增加钢轨磨耗极限, 可节省很大费用。

实验和现场作业均表明, 由于钢轨的弯曲和扭转, 在轨头下腭处 (图 1—9 中的点 A) 产生纵向最大拉应力。对于 68kg/m 钢轨截面, 在轨顶中央加载。图 9 示出了在各种横向与垂直力比 (L/V , $V = 150\text{kN}$) 和轨头损耗百分数下所测得的应力。从图 1—8 可以看出, 在 240MPa 应力水平上, 1mm 深的明显裂痕, 将不显示疲劳扩展。对普通铁路轨道, 湿度应力是没有意义的, 图 9 中的数据表示在 L/V 为 0.3 (600~800m 半径的标准曲线) 时, 根据疲劳性能, 刚好在

55%以下的（B点）轨头磨损极限是容许的，而在焊接长钢轨中，纵向温度应力则必须考虑。对于80MPa的温度应力（相当于在零应力温度以下35℃的轨温），可容许的轨头磨损极限是40%（点C），这两个值都比现在容许的值大得多。

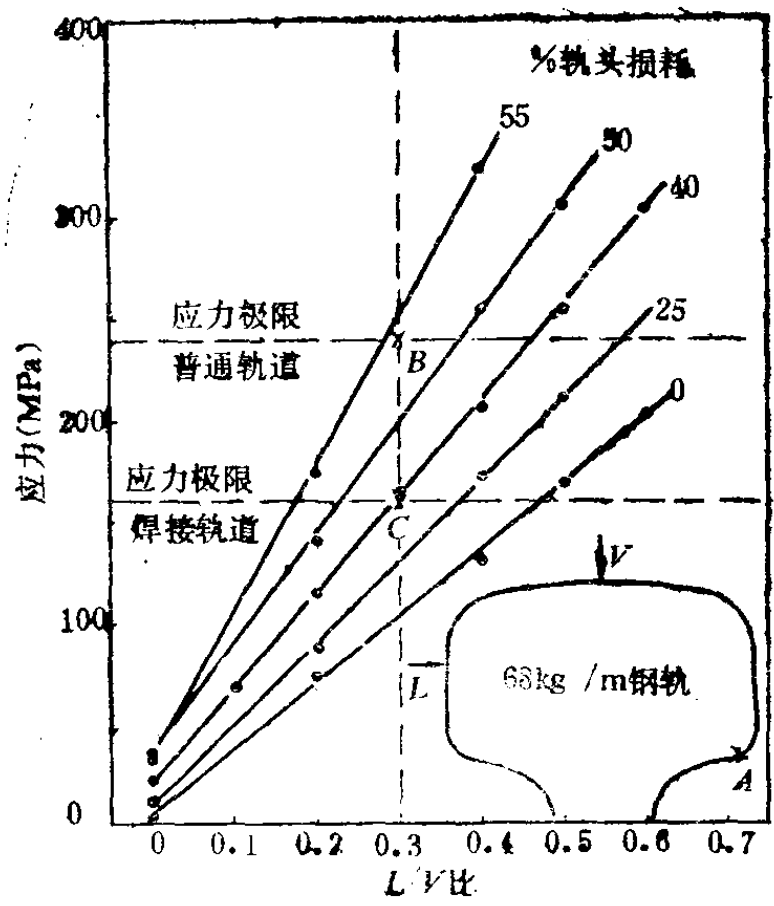


图 1—9 轨头磨损对应力的影响

类似的方法可以用于估计其他控制变量，例如轴载、车速和要求地段的线路几何形状，对钢轨表面的潜在影响。然而，必须强调，分析要求对作用于钢轨上的总应力的准确了解。这些应力从系统到系统，变化相当大，取决于特定的轮—轨相互作用特性和实际上车轮在钢轨踏面上接触的位置。

四、结 论

钢轨的疲劳裂纹成核现象和早期扩展性能，主要受控于最大作用应力（而不是作用应力范围）。这是因为最大应力对材料门槛应力强度因子有显著的影响。

前面的讨论业已证明，断裂力学概念如何与材料性能和适当的应力分析方法结合在一起，以便为铁路零部件工厂和用户提供可以遵循的准则。类似的方法适用于所有铁路零部件，包括车辆、车钩、车轴、转向架和钢轨扣件。

设计者将这个作为进行零部件设计的技术基础，而不是凭藉历史经验。经验虽然重要，但实际上至多不过是定性而已。这个方法也可由管理部门用作一种工具，对某些与实际运营中的变化有关的问题进行定量推断。

这个概念的合理采用，将改善铁路运营成本效益。

本文译自 Track Technology

1985.P.179—189

北方交通大学 王会琴 译 程育仁 校