

钢轨力学与钢轨伤损

颜 秉 善
王 其 昌 编著

西南交通大学出版社

的作用。研究我国钢轨在新形势下伤损的主要类型，发展规律，尤其是接触疲劳伤损的萌生、发展机理和破坏特征等都是很必要的、迫切的课题。它能加深我们对钢轨工作状态的认识并有助于合理使用钢轨和延长其使用寿命。这就是我们编著此书的主要目的。

本书着重从理论上说明钢轨伤损机理，并引用了国内外一些文献及著作中的公式、结论和观点，也参考和引用了在一些学术会议上交流的、有价值的论文和科研报告，这些素材丰富了本书的内容，特向其作者刘恽、冯先需、梁健博、陈峙生、叶庆佟、范俊杰、陈岳源、吴觉波、谢世波、张绍华、杨绍勋、张贺林、孙翔等同志表示感谢。

由于编著者水平有限，缺点错误之处在所难免，望各界读者批评指正。

编著者

1988年11月

内 容 提 要

本书介绍了钢轨标准、力学性质、材质问题,阐述了作用于钢轨上的诸力及其对钢轨损伤的影响,系统地说明了钢轨磨耗、螺栓孔裂纹与轨腰裂纹、轨头剥离与核伤的机理及钢轨损伤预测等问题,也介绍了一些国际上对钢轨损伤的研究成果。

本书可供从事铁道线路设计、铺设及维修的工程技术人员使用,也可供钢轨制造公司有关技术人员参考,另外可做为大专院校、中等技术学校铁道工程专业选修课教材。

钢 轨 力 学 与 钢 轨 伤 损

GANGGUI LIXUE YU GANGGUI SHANGSUN

颜秉善 王其昌 编著

*

西南交通大学出版社出版发行

(四川 峨眉山市)

四川省新华书店经销

西南交通大学出版社印刷厂印刷

*

开本: 787×1092 1/32 印张: 11.3125

字数: 248千字 印数: 1—1000册

1989年11月第1版 1989年11月第1次印刷

ISBN 7-81022-105-1/U 005

定价: 2.40元

前 言

解放初期，由于铁路运量较小，轴载较轻，运营钢轨的伤损并不突出。可近廿年来，铁路担负着越来越繁忙的运输任务，很多干线运量、轴载、行车密度和速度不断提高，使钢轨伤损日趋严重，尤其是轨头的接触疲劳伤损和曲线钢轨的磨耗已成为干线铁路钢轨失效的主要原因。近来，电力机车、ND₅型等内燃机车及组合列车的行驶，不仅加大了对轨道的动力作用，也使过去很多磨耗并不突出的半径较大的曲线磨损问题明显加剧起来。

我国山区铁路颇多，运营条件复杂；而目前钢轨材质并不理想，轨型偏轻；尤其可预见的2000年时25亿人次和25亿吨的繁重运输任务，更会加重钢轨的负担。

近年来，发生过钢轨疲劳裂纹扩展引起的脆断的重大恶性事故，颠覆列车，堵塞干线运输，给人民生命、财产及国民经济带来巨大损失，还有些钢轨裂纹是由于养路工人及时发现和处理，才幸免造成重大事故。

轨道是行车的基础，钢轨是轨道最重要的组成部件，钢轨的技术状态直接影响线路的通过能力和行车安全。在科学研究领域内，钢轨承力方面的问题一直受到人们的重视，专著较多，在这方面的探讨也较活跃。但对钢轨使用中的问题（如疲劳、伤损、磨耗及失效等），尤其对钢轨现代化科学管理方面研究的不够，认识不深。目前的使用钢轨现状和繁忙的运输任务都迫使我们要注意研究钢轨作为导向轨路

目 录

✓ 第一章 钢轨的性能、断面、验收及材质·····	1
§ 1-1 钢轨应具备的性能与我国钢轨现状·····	1
一、对现代钢轨的要求及钢轨断面·····	1
二、我国铁路运营与钢轨现状·····	6
§ 1-2 钢轨材质、尺寸公差及钢轨验收·····	10
一、轨钢的化学成分·····	11
二、钢轨的力学性能·····	13
三、钢轨的金属组织及热处理·····	17
四、钢轨公差与钢轨验收·····	18
§ 1-3 钢的缺陷及对钢轨性能的影响·····	21
一、炼钢、铸锭过程中钢内缺陷的形成·····	22
二、非金属夹杂物的性质·····	26
三、非金属夹杂物对钢轨的影响·····	28
第二章 钢轨力学·····	35
§ 2-1 钢轨断面上应力的发生位置·····	35
§ 2-2 轨底弯曲应力·····	36
一、连续弹性基础梁理论·····	36
二、轨下基础弹性模量·····	39
三、钢轨弯曲应力准静态计算·····	40
四、影响钢轨轨底弯曲应力的因素·····	43
§ 2-3 轮轨接触应力·····	45

一、赫兹轮轨接触应力·····	45
二、确定轮轨接触椭圆的直接方法·····	49
三、接触面附近轨头内应力分布·····	58
四、车轮滚动时轨头内应力的变化·····	59
§ 2-4 轨头下棱处钢轨弯曲应力·····	63
§ 2-5 钢轨断面变形应力·····	68
§ 2-6 钢轨轴向应力·····	70
一、温度应力·····	70
二、列车纵向荷载·····	71
§ 2-7 残余应力·····	71
§ 2-8 车轮扁疤作用下的钢轨应力·····	75
§ 2-9 接头钢轨应力·····	76
一、普通接头钢轨应力·····	76
二、焊接部的钢轨应力和轮载变动·····	77
三、接头受力分析·····	78
§ 2-10 钢轨振动·····	81

✓ 第三章 钢轨使用标准与我国钢轨伤损特征·····83

§ 3-1 钢轨使用标准·····	83
一、轨型标准·····	83
二、强度标准·····	85
§ 3-2 钢轨性能在运营中的变化·····	86
一、残余应力的变化·····	86
二、疲劳强度的变化·····	90
三、轨顶硬度的变化·····	91
四、冲击韧性及静力强度的下降·····	92

§ 3-3 常见的钢轨伤损类型及当今我国钢轨 伤损特征	94
一、常见的钢轨伤损类型	94
二、当今我国钢轨伤损特征	99
§ 3-4 我国钢轨伤损分类	104
第四章 钢轨的磨损	117
§ 4-1 引述	117
一、轮轨相互磨耗参数	117
二、钢轨磨耗形态	118
三、影响钢轨磨耗的基本因素	119
四、轮轨间滑动的成因	121
§ 4-2 轮轨磨损机理	122
一、磨损现象	122
二、粘着磨损	123
三、磨粒磨损	129
四、疲劳磨损	129
五、腐蚀磨损	131
六、轮轨磨损特性	132
§ 4-3 滚动与滑动	132
一、自由滚动 (纯滚动)	132
二、滚动中的微滑	138
§ 4-4 曲线上轮轨相互作用力	149
一、运行形态	149
二、导向力及摩擦横向力	150
三、钢轨导向力及法向轮缘力	153

四、轮轨作用力及其确定方法	154
§ 4-5 曲线外轨侧磨	157
一、外轨侧磨过程	157
二、外轨侧磨参数	159
三、外轨侧磨曲线	163
§ 4-6 钢轨波状磨耗	165
一、外观及特征	165
二、波状磨耗的成因	168
三、波状磨耗的预防	170

✓第五章 钢轨接触疲劳伤损172

✓§ 5-1 接触疲劳伤损的形成过程	172
§ 5-2 剥离	174
一、轨头剥离特征及对轨道的危害	174
二、剥离形成原因	176
§ 5-3 轨头横向疲劳裂纹（核伤）	188
一、核伤形成的特征	189
二、影响核伤裂纹发展的因素	193
三、核伤临界尺寸	197
✓§ 5-4 钢轨探伤周期	207
一、确定探伤周期时应考虑的问题	207
二、钢轨核伤面积的修正	209
三、旧轨再用地段钢轨探伤周期的确定	211
四、钢轨探伤周期	213
✓§ 5-5 减缓钢轨接触疲劳伤损的措施	215
一、净化轨钢，控制夹杂物的形态	215

二、采用淬火钢轨，发展优质重轨，改进 钢轨力学性质	216
三、改革旧轨再用制度，合理使用钢轨	221
四、钢轨打磨	222
五、按轨钢材质分类铺轨	222
第六章 轨腰裂纹	227
§ 6-1 轨端螺栓孔裂纹.....	227
一、静、动态加载条件下螺孔周边应力分布	229
二、螺栓孔主应力计算	233
三、螺栓孔裂纹临界值的近似计算	237
四、影响螺栓孔裂纹的因素	241
§ 6-2 轨腰纵向水平裂纹.....	246
一、力学分析	247
二、轨腰纵向水平裂纹的临界值	254
第七章 钢轨疲劳寿命的估算	257
§ 7-1 轨头核伤扩展寿命的估算.....	258
一、利用 paris 公式估算核伤扩展寿命.....	258
二、苏联经验公式	277
§ 7-2 用最小二乘法估算钢轨大修周期.....	277
§ 7-3 威布尔分布数值特征.....	283
一、威布尔分布函数	283
二、威布尔分布密度函数	286
三、可靠度寿命、特征寿命、中位寿命及	

“众数”寿命	286
四、平均寿命及方差	287
五、失效率函数与平均失效率	288
六、威布尔分布参数 m 、 t_0 及 γ	289
§ 7-4 威布尔坐标纸的构造及运用	293
一、威布尔坐标纸	293
二、排列分布 (秩分布)	296
三、在威布尔坐标纸上配分布直线	299
四、威布尔分布参数估计	302
五、用皮尔逊 χ^2 分布检算理论与实际频率 的符合程度	303
§ 7-5 钢轨伤损资料的统计及其威布尔分布图 的绘制	304
一、关于寿命度量指标、钢轨失效单位及其参 数的定义	306
二、原始资料的收集和整理	308
§ 7-6 利用钢轨伤损的威布尔分布概率图研究 钢轨的合理使用问题	312
一、钢轨平均寿命、可靠度寿命及伤损趋势 的预报	312
二、在指定的通过总质量期间钢轨新生缺陷 的预报	317
三、利用威布尔概率分布图比较不同轴载对 轨道破坏的影响	318
四、预报线路大修周期及钢轨剩余寿命	319
五、研究不同线路通过一定总质量后的	

可靠度 $R(Q)$	322
六、利用威布尔分布图比较不同厂家的 钢轨质量	324
七、旧轨再用混杂地段钢轨伤损数量的预测	324
参考文献	329

第一章 钢轨的性能、断面、 验收及材质

§ 1-1 钢轨应具备的性能 与我国钢轨现状

一、对现代钢轨的要求及钢轨断面

钢轨的功用在于承受车轮的巨大压力，并传力到轨枕上，同时引导机车车辆的车轮前进。在自动闭塞线路上，钢轨还起到轨道电路的作用。钢轨必须为车轮提供连续的、平顺的和阻力最小的滚动表面，还应提供最大的粘着牵引力。

为了使机车能够牵引列车前进，要求轨顶面相当粗糙，以产生足够的摩擦。但对于车辆来说，摩阻力太大将使运行阻力增加，又要求钢轨头部有光滑的滚动表面。

钢轨好似一个弹性支座上的连续梁被支承在轨枕上。在动载作用下，钢轨产生弹性挠曲，为了抵抗弹性挠曲变形，要求钢轨具有足够的刚度。但为了保证钢轨在动载作用下，尤其寒冷季节，不至于折断和损坏，又要求钢轨具有一定的柔性。

由于车轮和钢轨接触面积很小，为了使钢轨不致被巨大压力压陷或磨损太快，要求钢轨具有足够的硬度。但硬度太高时，钢轨又容易被车轮的动力冲击所折断。因此，钢轨又应有一定的断裂韧性。

近年来, 由于在大运量、大轴载作用下, 钢轨伤损严重, 因此对钢轨进一步提出了新要求:

1. 由于钢轨内非金属夹杂物已成为钢轨疲劳伤损的源点, 所以要求非金属夹杂物在轨内含量最小且分布均匀, 其他组织缺陷也应最少。

2. 鉴于钢材是国家重要建材, 要求钢轨具有一定的使用寿命, 即使在 $R = 400 \sim 600 \text{ m}$ 的曲线地段, 也有足够的抗剥离及抗磨损能力。

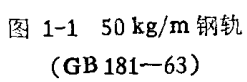
3. 钢轨断面合理、省钢。

4. 具有良好的可焊性, 以便进一步发展无缝线路。

作用于钢轨上的力主要是垂直力, 其作用的主要结果是使钢轨挠曲变形, 所以钢轨可以看成是一个置于弹性基础上的连续梁, 而梁抵抗挠曲变形的最佳断面为工字形断面, 所以钢轨外形均为工字形。钢轨头直接承受车轮滚动, 考虑到磨损及抵抗压陷, 轨头部位的钢料相对较多。轨底应有足够宽度以使钢轨稳定和便于钉连在轨枕上。轨腰应有足够的厚度和高度, 两侧常为曲线形, 以使钢轨有较大的承载能力和抗弯能力。钢轨断面的变化不宜过骤, 以免产生过大的应力集中。钢轨断面形状无论怎样设计均大同小异。轨身高 (H)、轨底宽 (B)、轨头顶宽 (b)、轨腰高 (y) 及轨腰厚 (t) 与钢轨类型 ($M \text{ kg/m}$) 的经验关系为:

$$\left. \begin{aligned} H &= 1.79 M + 59.6 & y &= 1.38 M + 8.5 \\ B &= 1.06 M + 83 & t &= 0.16 M + 6.4 \\ b &= 0.34 M + 51.7 \end{aligned} \right\} (1-1)$$

我国铁路干线主要钢轨类型的标准断面示于图 1-1、图 1-2 及图 1-3。钢轨断面主要尺寸及特性列于表 1-1。



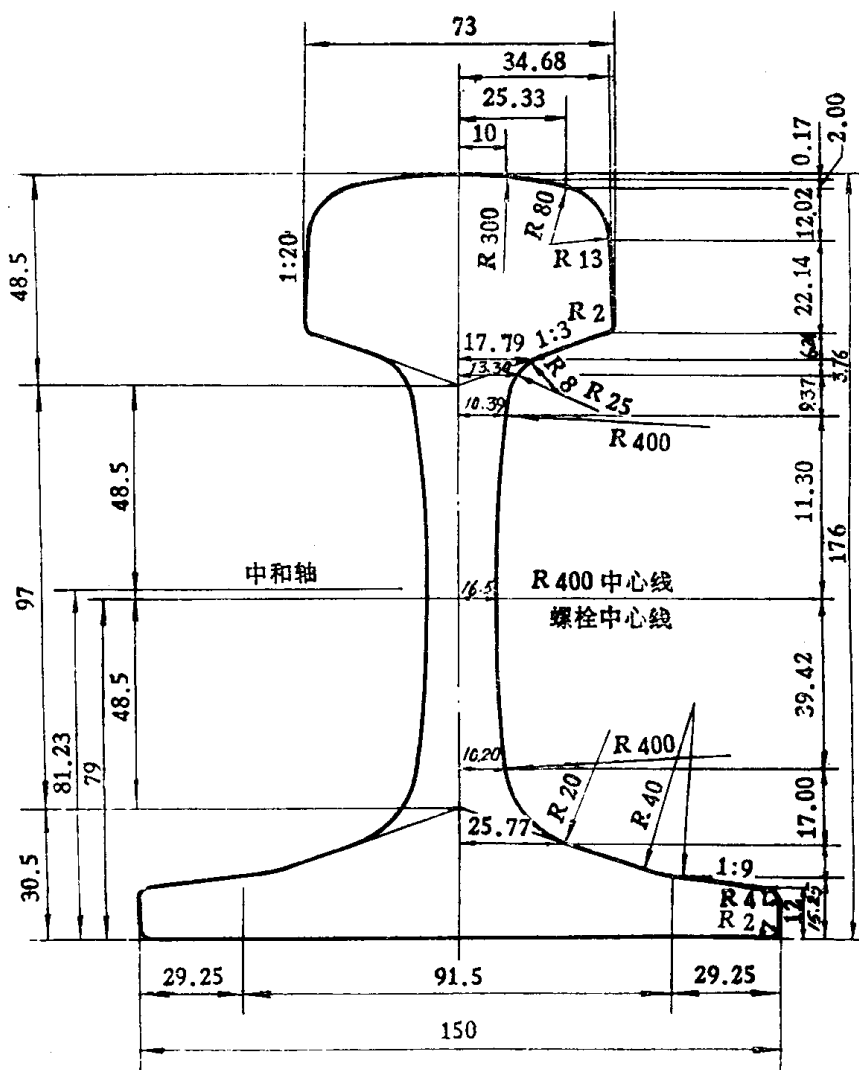


图 1-2 60 kg/m 钢轨
(专线 5160)

我国干线主要轨型尺寸及特征 表 1-1

项 目	单 位	75 kg/m	60 kg/m	50 kg/m
每米质量 M	kg	74.414	60.64	51.514
断面积 F	cm ²	95.06	77.45	65.8
重心距轨底面距离 y	mm	88	81	71
对水平轴惯性矩 J_x	cm ⁴	4490	3217	2037
对竖直轴惯性矩 J_y	cm ⁴	661	524	377
下部断面系数 W_1	cm ³	509	396	287
上部断面系数 W_2	cm ³	432	339	251
轨底横向挠曲断面系数 W_y	cm ³	88	70	57
轨头所占面积 A_h	%	37.44	37.47	38.68
轨腰所占面积 A_w	%	26.53	25.29	23.77
轨底所占面积 A_b	%	36.03	37.24	37.55
钢轨高度 H	mm	192	176	152
轨底宽度 B	mm	150	150	132
轨头高度 h	mm	55.3	48.5	42
轨头宽度 l	mm	75	73	70
轨腰厚度 t	mm	20	16.5	15.5

二、我国铁路运营与钢轨现状

(一) 运输繁忙, 钢轨负担加重

我国铁路担负着主要的运输任务, 表 1-2 为铁路在全国运输量中所占之比重。我国铁路运输量仅次于苏联而居世界第二位, 见表 1-3。