



高等学校土木工程专业规划教材

轨道工程

Railway Track

杨荣山 主 编
刘学毅 主 审



人民交通出版社
China Communications Press

高等学校土木工程专业规划教材

轨道工程

杨荣山 主 编
刘学毅 主 审

人民交通出版社

内 容 提 要

本书首先介绍了轨道的组成及发展状况,然后系统地介绍了有砟轨道结构、轨道的几何形位、无砟轨道、道岔、无缝线路、轨道结构受力分析与设计、轨道施工、轨道的检测与监测、轨道的维护与管理等内容。

本书可作为土木工程专业铁路与城市轨道交通方向的本科教材,也可作为工程技术人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

轨道工程/杨荣山主编. —北京:人民交通出版社,
2013.2
高等学校土木工程专业规划教材
ISBN 978-7-114-10046-8

I. ①轨… II. ①杨… III. ①轨道(铁路)—高等学校—教材 IV. ①U213.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 201324 号

高等学校土木工程专业规划教材

书 名: 轨道工程

著 作 者: 杨荣山

责任编辑: 李 喆

出版发行: 人民交通出版社

地 址: (100011)北京市朝阳区安定门外外馆斜街3号

网 址: <http://www.ccpres.com.cn>

销售电话: (010)59757969, 59757973

总 经 销: 人民交通出版社发行部

经 销: 各地新华书店

印 刷: 北京盈盛恒通印刷有限公司

开 本: 787×1092 1/16

印 张: 24.75

字 数: 630 千

版 次: 2013 年 2 月 第 1 版

印 次: 2013 年 2 月 第 1 次印刷

书 号: ISBN 978-7-114-10046-8

定 价: 49.00 元

(有印刷、装订质量问题的图书由本社负责调换)

前 言

近年来,我国铁路行业迅速发展,相继修建了大规模的高速铁路,截至 2012 年年底我国高速铁路总里程已达到 9356km,预计到 2020 年将达到 1.6 万 km 以上。同时,北京、上海、广州、武汉、成都等多个城市正在扩建、兴建或计划修建地铁。轨道交通在中国正以前所未有的速度迅速发展。

随着经济水平的不断提升,人们对轨道交通的舒适性及安全性有了更高的要求。在此背景下,轨道作为铁路、地铁的主要技术装备,在各个方面都面临着更高要求。为了适应轨道交通对轨道要求的提高,轨道工作者借助于新材料、新技术、新工艺,在轨道的设计理论、设计方法、检测、维护和管理等方面都有新的突破,并取得了一定的成果。为了满足教学及工程技术人员工作的需要,特编写此书。

全书共分为十章。第一章介绍了轨道的组成、作用、特点及其发展状况;第二章介绍了有砟轨道结构;第三章介绍了轨道的几何形位;第四章对国内外无砟轨道的形式进行了简要介绍;第五章从功用、构造、尺寸等方面对道岔进行了介绍;第六章介绍了无缝线路的原理、稳定性及其设计,并对无缝道岔及桥上无缝线路进行了介绍;第七章从轨道结构受力角度对轨道结构的设计进行了介绍;第八章分别介绍了有砟轨道和无砟轨道的施工方法;第九章介绍了轨道的检测与监测;第十章介绍了轨道的维护与管理。

本书由西南交通大学杨荣山主编,刘学毅主审。各章节编写人员如下:杨荣山(第一、二、五、七、八章),赵坪锐(第四章),郭利康(第九章),肖杰灵(第六章),任娟娟(第三章),陈嵘(第十章)。

本书以《铁道工程》(2000 年,郝瀛主编)中轨道部分的体系和内容为基础,在此向有关编写者表示衷心的感谢。本书还引用了有关规范和文献资料,在此一并致以衷心的感谢。

编 者

2012 年 3 月

目 录

第一章 绪论	1
第一节 轨道的组成及其作用	1
第二节 轨道结构的发展状况	2
第二章 有砟轨道结构	4
第一节 钢轨	4
第二节 轨枕	15
第三节 联结零件	21
第四节 碎石道床	27
第五节 轨道的工作特点	32
第六节 运营条件与轨道类型	33
第三章 轨道的几何形位	37
第一节 机车车辆走行部分构造	37
第二节 直线轨道的几何形位	40
第三节 曲线轨距加宽	44
第四节 曲线轨道外轨超高	47
第五节 缓和曲线	51
第四章 无砟轨道	58
第一节 无砟轨道概述	58
第二节 无砟轨道结构	66
第三节 我国客运专线的主型无砟轨道	90
第四节 地铁及轻轨轨道结构	96
第五节 无砟轨道扣件	105
第五章 道岔	117
第一节 道岔的功用及类型	117
第二节 单开道岔的构造	118
第三节 单开道岔的几何尺寸	128
第四节 单开道岔的总布置图	133
第五节 过岔速度与提高过岔速度的措施	139
第六节 高速道岔	144
第六章 无缝线路	154
第一节 无缝线路概述	154
第二节 无缝线路的基本原理	155

第三节	无缝线路的稳定性	162
第四节	普通无缝线路设计	177
第五节	无缝道岔	179
第六节	桥上无缝线路	191
第七节	桥上无缝道岔	198
第八节	跨区间无缝线路	205
第七章	轨道结构受力分析与设计	210
第一节	概述	210
第二节	轨道结构竖向受力的静力计算	211
第三节	轨道强度计算的有限单元法	217
第四节	轨道动力响应的准静态计算	219
第五节	轨道部件强度的检算	222
第六节	无砟轨道结构设计计算	227
第七节	钢轨接头受力分析	236
第八节	轨道结构横向受力分析	239
第九节	车辆的脱轨条件	245
第八章	轨道施工	249
第一节	概述	249
第二节	有砟轨道施工	249
第三节	无砟轨道施工	269
第九章	轨道的检测与监测	308
第一节	轨道检查	308
第二节	轨道质量状态评价	312
第三节	轨道静态检查技术	317
第四节	轨道几何状态动态检测技术	330
第五节	钢轨探伤车	344
第六节	综合检测列车	348
第十章	轨道的维护与管理	362
第一节	概述	362
第二节	轨道的维护	362
第三节	轨道的管理	364
第四节	线路大修	366
第五节	缩短轨及曲线整正计算	368
第六节	轨道精调	377
参考文献		387

第一章 绪 论

第一节 轨道的组成及其作用

铁路轨道由钢轨、轨枕、联结零件、道床和道岔等主要部件组成。它的作用是引导机车车辆运行,直接承受由车轮传来的巨大压力,并把它传递给路基或桥隧建筑物。轨道必须坚固稳定,并具有正确的几何形位,也就是说,轨道各部分应有正确的几何形状、相对位置和基本尺寸,以确保机车车辆的安全运行。

钢轨是轨道的主要部件,用于引导机车车辆行驶,并将所承受的荷载传递给轨枕、道床及路基。同时,为车轮的滚动提供阻力最小的接触面。钢轨按每米大致的质量(kg/m)来划分类型。重型钢轨适用于运量大、速度高和行驶重载车辆的铁路;轻型钢轨则适用于运量较小的铁路和站线。

轨枕也是轨道结构的重要部件,一般横向铺设在钢轨下的道床面上,承受来自钢轨的压力,并将其传递给道床。同时利用扣件有效地保持轨道的几何形位。轨枕主要有木枕和混凝土枕两类。

联结零件是联结钢轨或联结钢轨和轨枕的部件。前者称为接头联结零件,后者称为中间联结零件(包括扣件)。其作用是长期有效地保证钢轨与钢轨或钢轨与轨枕间的可靠联结,尽可能地保持钢轨的连续性与整体性,阻止钢轨相对于轨枕的纵向及横向移动,确保轨距正常,并在机车车辆的动力作用下,充分发挥缓冲减振性能,延缓线路残余变形的积累。

道床是轨枕的基础,在其上面以规定的间距布置一定数量的轨枕,用以增加轨道的弹性和纵向、横向移动的阻力,并便于排水和校正轨道的平面和纵断面位置。道床的主要材料有碎石和筛选卵石等。

道岔是机车车辆由一股轨道转入或越过另一股轨道必不可少的线路设备,在铁路站场布置中应用极为广泛。它是轨道结构的重要组成部分。

由钢轨、轨枕和道床组成的轨道结构是世界各国广泛采用的一种传统结构形式。百余年来,这种结构形式变化不大,其基本特征是用不同力学性质的材料构筑而成。对这种结构来说,虽然力的传递方式是合理的,建筑费用也是经济的,但就其整体性而言,各组成部分之间的联结不够坚固稳定,使用寿命差异较大。特别是道床的存在,使传统轨道成为一种很不稳定的结构,在列车荷载的重复作用下,产生较大的下沉,通过一定运量后就会出现各种各样的病害,必须加以整修。尽管如此,由于这种轨道结构形式具有投资小、弹性好和易于维修等优点,迄今仍被各国铁路作为一般轨道的主要结构形式普遍使用。

随着铁路行车速度、机车车辆轴重和运量的增加以及科学技术的发展,已经出现了一些对传统轨道结构的某一组成部分或其整体进行重大改进或根本改革的新型轨道结构,以适应高速、重载、大运量、高密度铁路运输的需要,达到改善轮轨相互作用和轨道各部分应力、应变分布状态,延长设备使用寿命,推迟养护维修周期等目的。

第二节 轨道结构的发展状况

轨道随着铁路运输的发展而发展。自第一条铁路建成以来,世界铁路建设经历了初期发展、建设高潮和建设鼎盛时期。20 世纪 40 年代后,由于其他运输方式的激烈竞争,铁路发展一度进入艰难状态。随着重载运输和高速运输的发展,铁路才有了新的生命力,同时,也促进了轨道的不断强化,以满足重载、高速运输的需要。

近年来,我国运能与运量的矛盾越来越突出,与公路、航空运输的竞争也越来越激烈。为了适应客运高速,货运重载的运输要求,并借助于新技术、新材料的应用,我国铁路在强化轨道结构方面做了大量的工作,取得了一系列成果。

一、提高轨道结构整体强度

1. 钢轨重型化、强韧化

钢轨是轨道的重要部件,因直接承受车轮的巨大压力和冲击而发生弯曲变形、轨头磨耗、压溃、断裂等。因此,要求钢轨具有足够的抗弯刚度、抗冲击的韧性和耐磨性。此外,无缝线路的发展还对钢轨的可焊性提出了要求。应用强韧化的重型钢轨以提高轨道结构承载能力,目前我国正线铁路全部采用 60kg/m 钢轨,在小半径和大坡道地段尽量采用全长淬火钢轨。

2. 铺设混凝土轨枕

混凝土轨枕的自重大、刚度大。用混凝土轨枕铺成的轨道刚度均匀、稳定性好,线路整齐美观,其弹性差的主要缺点是通过采用高弹性扣件来解决的。我国自 20 世纪 70 年代开始铺设混凝土轨枕,到目前已根据运营条件发展到第三代混凝土轨枕。目前,除小部分道岔和小半径曲线上还存在木枕外,绝大部分线路已换铺混凝土轨枕。

3. 弹性扣件

混凝土轨枕的应用,特别是无砟轨道的应用对扣件提出了很高的要求。除了联结钢轨与轨枕的基本功能外,还要有调整轨距、高低功能和车辆的动力作用下的减振功能。钢轨扣件已经从传统的普通道钉、螺纹道钉、扣板等刚性扣压件过渡到弹片和弹条等弹性扣件以及方便安装的无螺栓扣件。

4. 无砟轨道

碎石道床道砟容易引起轨道的残余变形,产生轨道不平顺,整治道床占养护维修工作量的绝大部分。道床的强化方式之一是在碎石道床中灌入沥青材料或其他聚合物材料将道砟固化成整体,称为沥青道床。

用水泥混凝土或沥青混凝土取代碎石道床的轨道叫无砟轨道。无砟轨道与有砟轨道相比,具有稳定性、平顺性、刚度均匀性好,维修工作量少,简洁易清洗等显著优点,逐渐被世界上许多国家所认可并铺设。近年来,随着我国高速铁路的快速发展,无砟轨道得到了广泛应用。目前,我国已开通运营的时速 250km 以上的客运专线均铺设了无砟轨道。通过近几年的消化、吸收和再创新,我国已形成了 CRTS 系列无砟轨道技术。

二、铺设无缝线路

钢轨接头是轨道的薄弱环节之一。由于接头的存在,列车通过时轮轨冲击非常强烈,车速

越高,冲击强度越大。在接头冲击力作用下,轨道各部件的使用寿命缩短、线路状态恶化,接头区轨道养护维修占很大比重。此外,接头冲击还影响行车的平稳性和舒适性。

从 20 世纪 30 年代开始,人们一直致力于将钢轨焊接成尽可能长的长轨条,消除钢轨接头。铺设无缝线路的研究与实践,解决了接头焊接、长轨条在列车动力和温度力共同作用下的强度和稳定、长轨条与桥梁相互作用、长轨运输、铺设施工、养护维修等一系列理论和技术问题,使无缝线路在世界各国得到广泛的运用。我国从 1957 年开始铺设无缝线路,现在无缝线路已占很大比重。

无缝线路消除了大量的接头,因而具有行车平稳、旅客舒适,同时机车车辆和轨道的维修费用减少、使用寿命延长等一系列优点。目前除普速铁路外,高速铁路和轻轨铁路也采用这种轨道结构,如法国和德国高速铁路,汉堡和马尼拉轻轨高架线路。

早期的无缝线路长度受闭塞分区和道岔限制,轨道上还存在少量的接头,叫作普通无缝线路。后来由于胶接绝缘接头和无绝缘轨道电路技术的应用,使无缝线路的长度突破闭塞分区限制,而只是在道岔处不焊接,铺设了区间无缝线路。无缝道岔设计、焊接与铺设问题的解决,为铺设跨区间无缝线路创造了条件。现在,除了特殊的长大桥梁外,跨区间无缝线路长度已不受限制,所以跨区间无缝线路也叫超长无缝线路。我国从 1996 年开始铺设跨区间无缝线路,最早是在秦沈客运专线上一次性铺设跨区间无缝线路,无缝线路长达 231km。此后,所有新建快速和高速线路均采用一次性铺设跨区间无缝线路。

三、提速和高速道岔

普通道岔是控制行车速度的重要因素之一,是发展高速客运的障碍。其次,普通道岔的可焊性和道岔区复杂的结构形式使该处存在接头,影响车速提高。

提高列车过岔速度有两种途径:使用可动心轨道岔和高速道岔。

采用活动心轨型辙叉代替固定辙叉,保证列车过岔时线路连续,从根本上消除有害空间,并使道岔强度大大提高。适当加长翼轨、护轨缓冲段长度,减小冲击角,或采用不等长护轨,以满足直向高速度的要求。近年来,可动心轨道岔已铺设于提速线路。

高速道岔在功能上和构造上与普速道岔相比没有原则上的区别,只是对道岔的平纵断面、构造、制造工艺、道岔区内的轨下基础以及养护维修提出了更高的要求。我国设计制造出的 38 号道岔在秦沈客运专线通车动力试验中,直向最高试验速度为 260km/h,侧向最高速度为 160km/h,标志着我国道岔设计迈上了新的台阶,随着客运专线的建设,我国于 2006 年试制出 250km/h 的客运专线 18 号道岔,2007 年又相继研发了 350km/h 客运专线道岔,使我国道岔理论、设计和制造水平大幅度提高。

第二章 有砟轨道结构

轨道是铁路的主要技术装备之一,是行车的基础。轨道的作用是引导机车车辆运行,直接承受列车荷载作用,并把荷载分布传递给路基或桥隧建筑物。轨道结构应该保证机车车辆在规定的最大载重和最高速度运行时,具有足够的强度、稳定性、平顺性和合理的维修周期。

传统轨道结构由钢轨、轨枕、道床、道岔及联结零件等主要部件组成。

第一节 钢 轨

一、钢轨的功能及类型

1. 钢轨的功能

钢轨是轨道最重要的组成部件。它的功能是为车轮提供连续、平顺和阻力最小的滚动表面,引导列车运行;直接承受车轮的巨大压力,并分布传递到轨枕;在电气化铁路或自动闭塞区段,还兼做轨道电路之用。

2. 钢轨的类型

钢轨类型以每米大致质量(kg)数划分。我国铁路的钢轨类型主要有 75kg/m、60kg/m、50kg/m 及 43kg/m 四种。

二、钢轨断面特征

列车作用于直线轨道钢轨上的力主要是竖直力,其结果是使钢轨挠曲。钢轨被视为支承在弹性基础上的无限长梁,而梁抵抗挠曲的最佳断面形状为“工”字形。因此,钢轨采用工字形断面,由轨头、轨腰和轨底三部分组成。钢轨断面设计应满足以下要求。

1. 钢轨头部特征

钢轨头部是直接和车轮接触的部分,应有抵抗压溃和耐磨的能力,故轨头宜大而厚,并应具有和车轮踏面相适应的外形。钢轨头部顶面应有足够的宽度,使其上面滚动的车轮踏面和钢轨顶面磨耗均匀。钢轨头部顶面应轧制成隆起的圆弧形,使由车轮传来的压力能集中于钢轨中轴。钢轨被车轮长期滚压以后,顶面近似于半径 200~300mm 的圆弧,因此,在我国铁路上,较轻型钢轨的顶面,常轧制成一个半径为 300mm 的圆弧,而较重型钢轨的顶面,则用三个半径分别为 80mm、300mm、80mm 或 80mm、500mm、80mm 的复合圆弧组成。

2. 钢轨腰部特征

钢轨腰部必须有足够的厚度和高度,以使钢轨有足够的承载能力和抗弯能力。轨腰的两侧为曲线。轨腰与钢轨头部及底部的连接,必须保证夹板能有足够的支承面。

3. 钢轨底部特征

钢轨底部应保持钢轨的稳定,轨底应有足够的宽度和厚度,并具有必要的刚度和抵抗锈蚀

的能力。

钢轨的头部顶面宽度(b)、轨腰厚度(t)、钢轨高度(H)及轨底宽度(B)是钢轨断面的四个主要参数。钢轨高度应尽可能大一些,以保证有足够的惯性矩及断面系数来承受竖直轮载的动力作用。但钢轨越高,其在横向水平力作用下的稳定性越差。钢轨高度与轨底宽度间应有一个适当的比例。一般要求钢轨高度与轨底宽度之比为 1.15~1.20。为使钢轨轧制冷却均匀,要求轨头、轨腰及轨底的面积分配,有一个较合适的比例。

我国主要钢轨类型的断面尺寸及特征见表 2-1,60kg/m、75kg/m 钢轨断面尺寸如图 2-1 所示。

钢轨断面尺寸及特性

表 2-1

项 目	类型(kg/m)				
	75	60	50	43	UIC60
每米质量 $M(\text{kg})$	74.414	60.64	51.514	44.653	60.34
断面积 $F(\text{cm}^2)$	95.04	77.45	65.8	57	76.86
重心距轨底面距离 $y_1(\text{mm})$	88	81	71	69	80.95
对水平轴的惯性矩 $J_x(\text{cm}^4)$	4489	3217	2037	1489	3055
对竖直轴的惯性矩 $J_y(\text{cm}^4)$	665	524	377	260	512.9
下部断面系数 $W_1(\text{cm}^3)$	509	396	287	217	377
上部断面系数 $W_2(\text{cm}^3)$	432	339	251	208	336
轨底横向挠曲断面系数 $W_y(\text{cm}^3)$	89	70	57	46	68.4
轨头所占面积 $A_h(\%)$	37.42	37.47	38.68	42.83	—
轨腰所占面积 $A_w(\%)$	26.54	25.29	23.77	21.31	—
轨底所占面积 $A_b(\%)$	36.04	37.24	37.55	35.86	—
钢轨高度 $H(\text{mm})$	192	176	152	140	172
钢轨底宽 $B(\text{mm})$	150	150	132	114	150
轨头高度 $h(\text{mm})$	55.3	48.5	42	42	51
轨头宽度 $b(\text{mm})$	75	73	70	70	74.3
轨腰厚度 $t(\text{mm})$	20	16.5	15.5	14.5	16.5

由于铁路市场的国际化,UIC60 钢轨在我国也得到部分生产及应用,为了比较 UIC60 钢轨与我国铁路钢轨的断面及性能,在表 2-1 中还列出了 UIC60 钢轨的断面尺寸及特征,其断面尺寸图见图 2-2。

三、钢轨的材质和机械性能

钢轨的材质和机械性能主要取决于钢轨的化学成分、金属组织及热处理工艺。

1. 钢轨钢的化学成分和力学性能

钢轨钢的化学成分主要为铁(Fe),其他还含有碳(C)、锰(Mn)、硅(Si)、磷(P)、硫(S)等元素。

碳对钢轨的性质影响最大。提高钢轨的含碳量,其抗拉强度、耐磨性及硬度都迅速增加。但含碳量过高,会使钢轨的伸长率、断面收缩率和冲击韧性显著下降。因此,一般含碳量不超过 0.82%。

为 0.15%~0.30%。提高钢轨的含硅量,也能提高钢轨的耐磨性能。

磷与硫在钢中均属有害成分。磷过多(超过 0.1%),会使钢轨具有冷脆性,在冬季严寒地区,易突然断裂。硫不溶于铁,无论含量多少均生成硫化铁,在 985℃时,呈晶态结晶析出。这种晶体性脆易溶,使金属在 800~1200℃时发脆,在钢轨轧制或热加工过程中容易出现大量废品,所以磷、硫的含量必须严格加以控制。

另外,在钢轨的化学成分中适当增加铬(Cr)、镍(Ni)、钼(Mo)、铌(Nb)、钒(V)、钛(Ti)和铜(Cu)等元素,制成合金钢轨,可有效提高钢轨的抗拉强度和疲劳强度,以及耐磨和耐腐蚀的性能。

我国用于轧制钢轨的主要钢种化学成分及力学性能见表 2-2。

钢轨钢的化学成分及力学性能 表 2-2

钢号	化学成分(%)						力学性能		使用范围 (钢轨类型) (kg/m)
	C	Si	Mn	Cu	P	S	抗拉强度 σ_b (MPa)	伸长率 δ_5 (%)	
U ₇₁	0.64~0.77	0.13~0.28	0.60~0.90		≤0.040	≤0.050	785	10	50
U ₇₄	0.67~0.80	0.13~0.28	0.70~1.00		≤0.040	≤0.050	785	9	50、60、75
U ₇₁ Cu	0.65~0.77	0.15~0.30	0.70~1.00	0.10~0.40	≤0.040	≤0.050	785	9	50
U ₇₁ Mn	0.65~0.77	0.15~0.35	1.10~1.50		≤0.040	≤0.040	883	8	50、60、75
U ₇₀ MnSi	0.65~0.75	0.85~1.15	0.85~1.15		≤0.040	≤0.040	883	8	50
U ₇₁ MnSiCu	0.65~0.77	0.70~1.10	0.80~1.20	0.10~0.40	≤0.040	≤0.040	883	8	50
PD ₂	0.74~0.82	0.15~0.35	0.70~1.00		≤0.040	≤0.040	1175*	8	50、60、75
PD ₃	0.70~0.78	0.50~0.70	0.75~1.05	0.04~0.08**	≤0.035	≤0.035	980	8	50、60、75
U ₇₆ NbRE	0.70~0.82	0.60~0.90	0.90~1.30	0.02~0.05***	≤0.040	≤0.040	980	8	
UIC900A	0.60~0.80	0.30~0.90	0.80~1.30		≤0.040	≤0.040	880	10	

注: * 为 PD₂ 全长淬火钢轨; ** 为 PD₃ 中微钒的含量; *** 为 U₇₆NbRE 中 RE 的含量。表中除 U₇₁、U₇₄ 为碳素钢外,其他均为提高锰、硅含量或增加铜含量的中锰、高硅或含铜合金钢。

钢轨钢的物理力学性能包括强度极限 σ_b 、屈服极限 σ_s 、疲劳极限 σ_r 、伸长率 δ_5 、断面收缩率 ψ 、冲击韧性(落锤试验) α_h 及硬度等。这些指标对钢轨的承载能力、磨损、压溃、断裂和其他损伤有很大的影响。

钢轨接头处轮轨冲击力很大,为加强接头处钢轨的抗磨能力,在钢轨两端 30~70 mm 范围内进行轨顶淬火,淬火深度达 8~12mm。

为提高钢轨耐磨和抗压性能,还应对钢轨进行全长淬火处理,它是采用电感应加热的方法,加速奥氏体向珠光体的转变过程,提高奥氏体转变过冷度,使珠光体转变在更低的温度下进行,以获得强韧性兼备的精细片状珠光体组织,不得出现马氏体、贝氏体等有害组织。珠光体片层越细,不仅强度越高,断面收缩率也越大,从而提高钢轨的强度和韧性。

2. 钢轨强化及材质的纯净化

为适应铁路高速、重载的需要,钢轨要重型化、强韧化及纯净化。

采用重型钢轨可以提高轨道结构的承载能力,延长钢轨疲劳寿命和线路大修周期,具有明显的技术经济效益。但钢轨重型化后,若不采用强化技术,又会带来其他的问题。由于重型钢轨的刚度大,相应弯曲变形较小,列车车轮对钢轨的动力作用大部分作用在轮轨接触区,同时由于重型钢轨扭转中心接近轨底,轨头产生的纵向正应力远远大于轨底的纵向正应力,从而加

速了重型钢轨轨头病害的发展。一般来说,钢轨越重,钢轨的伤损数量越少,但接触疲劳伤损占钢轨伤损总数的比例提高。如前苏联实现钢轨重型化后,钢轨伤损总数量大量减少,但50kg/m、65kg/m、75kg/m钢轨的轨头伤损却分别占伤损总数的75%、80%和94%。

重型钢轨的强化有两种技术路线:一是钢轨合金化,它生产工艺简单,投资少,能源消耗少,钢轨整体强化,表层硬度均匀,可焊性好;二是碳素钢热处理,这种方法也可获得同样的高强度和表面硬度,同时韧性好,节省合金,适合大批量生产。冶金学原理及冶金工业生产实践认为:如不改变钢种,单凭碳素钢热处理,很难再大幅度地提高强度,唯有微合金与热处理相结合,两者相辅相成,才可得到既有更高强度,又有相应韧性、硬度和可焊性的优质钢轨。

目前我国使用的钢轨,抗拉强度约为900MPa。还有那分PD₂全长淬火钢轨、PD₃高碳微钒轨,抗拉强度在1000MPa以上(表2-2)。PD₃全长淬火钢轨强度高、性能好,抗拉强度可达到1300MPa,可延长钢轨使用寿命50%以上。

淬火钢轨对材质纯净度的要求比普通钢轨更高,如果不提高钢轨的纯净度,钢轨重型化及强韧化的优势也不能更好地发挥,因此材质纯净化是重型化和强韧化的基础。例如钢轨中非金属夹杂、钢轨金属薄弱区的存在等,都是钢轨产生疲劳伤损的根源,以这些疲劳源为中心形成核伤,对行车安全构成威胁。钢轨重型化、强韧化和纯净化应当有机地统一,才能获得最佳综合技术经济效益。

四、钢轨的长度与接头类型

1. 钢轨的长度

我国钢轨标准长度为12.5m及25m两种,对于75kg/m钢轨只有长度为25m一种。还有用于曲线内股的缩短轨系列,对于12.5m标准轨系列的缩短轨有缩短量40mm、80mm、120mm三种;对于25m标准轨系列有缩短量40mm、80mm、160mm三种。

随着铁路轨道朝高速、重载方向的发展,长尺钢轨的生产成为一种趋势。如法国生产的钢轨由原来的36m改造成72~80m,德国改造成120m。钢轨长尺生产便于对钢轨进行热预弯,消除钢轨矫直前的弯曲度,减少钢轨的残余应力;由于长尺钢轨两端可以锯掉0.8~1.5m,可以消除原标准长度钢轨两端的矫直盲区和探伤盲区,在提高生产率的同时可充分保证钢轨的平直度和内部质量。我国已成功研制出100m长尺钢轨并应用于我国的铁路建设中。

2. 接头类型

轨道上钢轨与钢轨之间用夹板和螺栓联结,称为钢轨接头。接头处轮轨动力作用大,相应的养护维修工作量大。因此,钢轨接头是轨道结构的薄弱环节之一。

接头的联结形式按其相对于轨枕位置,可分为悬空式和承垫式两种,如图2-3a)所示。按两股钢轨接头相互位置来分,可分为相对式和相错式两种,如图2-3b)所示。我国一般采用相对悬空式,即两股钢轨接头左右对齐,同时位于两接头轨枕间。

钢轨接头按其性能可分为普通接头及异形联结、绝缘接头、导电接头、伸缩接头、冻结接头等特种接头(图2-3)。

五、钢轨伤损及合理使用

1. 钢轨伤损

钢轨伤损是指钢轨在使用过程中,发生折断、裂纹及其他影响和限制钢轨使用性能的伤损。

为便于统计和分析钢轨伤损,需对钢轨伤损进行分类。根据伤损在钢轨断面上的位置、伤损外貌及伤损原因等分为 9 类 32 种伤损,采用两位数编号分类,十位数表示伤损的部位和状态,如 1 表示轨头剥离、掉块、擦伤,3 表示轨头裂纹,4 表示轨腰裂纹,5 表示轨底裂纹等;个位数表示造成伤损原因,如 0 表示钢轨制造缺陷引起的,1 表示金属接触疲劳引起的,6 表示焊接工艺引起的等。钢轨伤损分类具体内容可见《铁道工务技术手册(轨道)》。

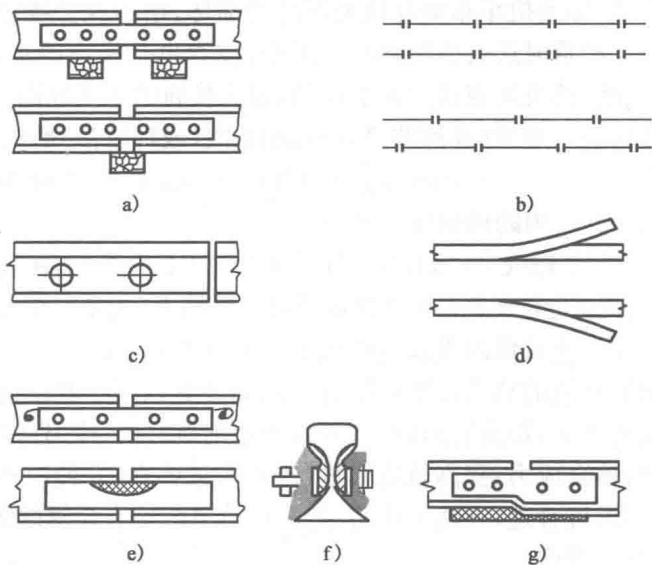


图 2-3 钢轨接头类型

a)悬空与承垫式;b)对接与错接式;c)冻结接头;d)尖轨接头;e)导电接头f)绝缘接头;g)异形接头

钢轨折断是指有下列情况之一者:钢轨全断面至少断成两部分;裂缝已经贯通整个轨头截面或轨底截面;允许速度不大于 160km/h 区段钢轨顶面上有长度大于 50mm、深度大于 10mm 的掉块,允许速度大于 160km/h 区段钢轨顶面上有长度大于 30mm 且深度大于 5mm 的掉块。钢轨折断直接威胁行车安全,应及时更换。

钢轨裂纹是指除钢轨折断之外,钢轨部分材料发生分离,形成裂纹。

钢轨伤损种类很多,常见的有磨耗、剥离及轨头核伤、轨腰螺栓孔裂纹等。下面介绍几种常见的钢轨伤损情况。

1)钢轨磨耗

钢轨磨耗主要是指小半径曲线上钢轨的侧面磨耗和波浪形磨耗。至于钢轨垂直磨耗,在所有线路上都会发生,也是直线和大半径曲线轨道上最主要的磨耗形式,其程度随着轴重和通过总重的增加而增大。轨道几何形位设置不当,会使垂直磨耗速率加快,影响轨道的抗弯刚度,这可通过调整轨道几何尺寸加以防止。

(1)侧面磨耗

侧面磨耗发生在小半径曲线的外股钢轨上,是目前曲线上伤损的主要类型之一。列车在曲线上运行时,轮轨的摩擦与滑动是造成外轨侧磨的根本原因。列车通过小半径曲线时,通常会出现轮轨两点接触的情况,这时发生的侧磨最大。侧磨的大小可用导向力与冲击角的乘积,即磨耗因子来表示。改善列车通过曲线的条件,如采用磨耗型车轮踏面,采用径向转向架等会降低侧磨耗速率。

从工务角度来讲,应改善钢轨材质,采用耐磨钢轨,例如高硬稀土钢轨的耐磨性是普通钢

轨的 2 倍左右,是淬火钢轨的 1 倍以上。

加强养护维修,设置合理的轨距、外轨超高及轨底坡,增加线路的弹性,在钢轨侧面涂油等,都可收到减小侧面磨耗的效果。

(2)波浪形磨耗

波浪形磨耗是指钢轨顶面上出现的波浪状不均匀磨耗,实质上是波浪形压溃。波磨会引起很高的轮轨动力作用,加速机车车辆及轨道部件的损坏,增加养护维修费用;此外列车的剧烈振动,会使旅客不适,严重时还会威胁到行车安全;波磨也是噪声的来源。我国一些货运干线上,出现了严重的波磨,其发展速度比侧磨还快,成为换轨的主要原因。

波磨可以按其波长分为短波(或称波纹)磨耗和长波(或称波浪)磨耗两种。短波磨耗为波长约 50~100mm,波幅 0.1~0.4mm 的周期性不平顺;长波磨耗为波长 100mm 以上,3 000mm 以下,波幅 2mm 以内的周期性不平顺。

波磨主要出现在重载运输线上,尤其在运煤矿专线上特别严重,在高速客运专线上也有不同程度的发生,城市地铁上也较普遍。列车速度较高的铁路上,主要发生波纹磨耗,且主要出现在直线和制动地段。在车速较低的重载运输线上主要发生波浪磨耗,且一般出现在曲线地段。

打磨钢轨是目前最有效的消除波磨的措施。除此还有以下一些措施可减缓波磨的发展:用连续焊接法消除钢轨接头,提高轨道的平顺性;改进钢轨材质,采用高强耐磨钢轨,提高热处理工艺质量,消除钢轨残余应力;提高轨道质量,改善轨道弹性,并使纵横向弹性连续均匀;保持曲线方向圆顺,超高设置合理,外轨工作边涂油;轮轨系统应有足够的阻尼等。

(3)钢轨磨耗的允许限度

钢轨头部允许磨耗限度主要由强度和构造条件确定。即当钢轨磨耗达到允许限度时,一是还能保证钢轨有足够的强度和抗弯刚度;二是应保证在最不利情况下车轮轮缘不碰撞接头夹板;三是波磨钢轨的波谷深度达到允许限度时不至引起轨道部件的损伤及养护工作量的急剧增加。

钢轨头部允许磨耗限度是由几种相互关联的方法制订的,包括磨耗钢轨截面的几何参数变化、磨耗钢轨的强度和刚度变化以及保证列车运行的安全限度(磨耗车轮不撞击接头夹板,磨耗量在扣件可调轨距范围内)。

《铁路线路修理规则》中按钢轨头部磨耗程度的不同,分为轻伤和重伤两类,见表 2-3 和表 2-4。波磨轨磨耗谷深超过 0.5mm 为轻伤轨。

钢轨头部磨耗轻伤标准 表 2-3

钢轨 (kg/m)	总磨耗(mm)				垂直磨耗(mm)				侧面磨耗(mm)			
	$v_{\max} \geq 160$ 正线	$160 \geq v_{\max} > 120$ 正线	$v_{\max} \leq 120$ 正线及到发线	其他站线	$v_{\max} \geq 160$ 正线	$160 \geq v_{\max} > 120$ 正线	$v_{\max} \leq 120$ 正线及到发线	其他站线	$v_{\max} \geq 160$ 正线	$160 \geq v_{\max} > 120$ 正线	$v_{\max} \leq 120$ 正线及到发线	其他站线
75	9	12	16	18	8	9	10	11	10	12	16	18
75 以下~60	9	12	14	16	8	9	9	10	10	12	14	16
60 以下~50			12	14			8	9			12	14
50 以下~43			10	12			7	8			10	12
43 以下			9	10			7	7			9	11

注:1. 总磨耗=垂直磨耗+1/2 侧面磨耗。
2. 垂直磨耗在钢轨顶面宽 1/3(距标准工作边)测量。
3. 侧面磨耗在钢轨踏面(按标准断面)下 16mm 处测量。

钢轨头部磨耗重伤标准

表 2-4

钢轨 (kg/m)	垂直磨耗 (mm)			侧面磨耗 (mm)		
	$v_{\max} \geq 160$ 正线	$160 \geq v_{\max} > 120$ 正线	$v_{\max} \leq 120$ 正线、到发线 及其他站线	$v_{\max} \geq 160$ 正线	$160 \geq v_{\max} > 120$ 正线	$v_{\max} \leq 120$ 正线、到发线 及其他站线
75	10	11	12	12	16	21
75 以下~60	10	11	11	12	16	19
60 以下~50			10			17
50 以下~43			9			15
43 以下			8			13

2)钢轨接触疲劳伤损

接触疲劳伤损的形成大致可分为三个阶段:第一阶段是钢轨踏面外形的变化,如钢轨踏面出现不平顺,焊缝处出现鞍形磨损,这些不平顺将增大车轮对钢轨的冲击作用。第二阶段是轨头表面金属的破坏,由于轨头踏面金属的冷作硬化,使轨头工作面的硬度不断增长,通过总质量 150~200Mt 时,硬度可达 HB360;此后,硬化层不再发生变化,对碳素钢轨来说,通过总质量 200~250Mt 时,在轨头表层形成微裂纹。对于弹性非均等的线路,当车轮及钢轨具有明显不平顺时,轨顶面所受拉压力几乎相等,若存在微裂纹,同时挠曲应力与残余应力同号,会极大地降低钢轨强度。第三阶段为轨头接触疲劳的形成,由于金属接触疲劳强度不足和重载车轮的多次作用,当最大剪应力作用点超过剪切屈服极限时,会使该点成为塑性区域。车轮每次通过必将产生金属显微组织的滑移,通过一段时间的运营,这种滑移产生积累和聚集,最终导致疲劳裂纹的形成。随着轴载的提高、大运量的运输条件、钢轨材质及轨型的不适应,将加速接触疲劳裂纹的萌生和发展。

轨头工作边上圆角附近的剥离主要是由以下三方面原因引起:①由夹杂物或接触剪应力引起纵向疲劳裂纹而导致剥离;②导向轮在曲线外轨引起的剪应力交变循环促使外轨轨头疲劳,导致剥离;③车轮及轨道维修不良加速剥离的发展。通常剥离会造成缺口区的应力集中并影响行车的平顺性,增大动力冲击作用,又促使缺口区域裂纹的产生和发展。缺口区的存在,还会阻碍金属塑性变形的发展,使钢轨塑性指标降低。

轨头核伤是最危险的一种伤损形式,会在列车作用下突然断裂,严重影响行车安全。轨头核伤产生的主要原因是轨头内部存在微小裂纹或缺陷(如非金属夹杂物及白点等),在重复动荷载作用下,在钢轨走行面以下的轨头内部出现极为复杂的应力组合,使细小裂纹先是成核,然后向轨头四周发展,直到核伤周围的钢料不足以提供足够的抵抗,钢轨在毫无预兆的情况下猝然折断。所以钢轨内部材质的缺陷是形成核伤的内因,而外部荷载的作用是促使核伤发展的外因。核伤的发展与运量、轴重及行车速度、线路平面状态有关。为确保行车的安全,对钢轨要定期探伤。

减缓钢轨接触疲劳伤损的措施有:净化轨钢,控制杂物的形态;采用淬火钢轨,发展优质重轨,改进轨钢力学性质;改革旧轨再用制度,合理使用钢轨;钢轨打磨、按轨钢材质分类铺轨等。

2. 钢轨的合理使用

钢轨是铁路线路的重要技术装备,在《铁路工务主要技术装备政策》中,除明确指出了钢轨的发展方向是重型化、强韧化和纯净化外,对合理使用钢轨也有明确规定。指出应根据钢轨综