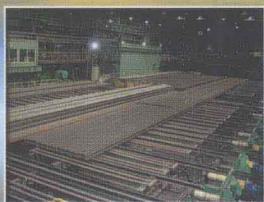




周清跃 张银花 杨来顺 黎连修 编著

钢轨的材质性能 及相关工艺



中国铁道出版社
CHINA RAILWAY PUBLISHING HOUSE

铁路科技图书出版基金资助出版

钢轨的材质性能及相关工艺

周清跃 张银花 编著
杨来顺 黎连修

中国铁道出版社

2005年·北京

内 容 简 介

作者在总结自己长期进行的钢轨材质、工艺与性能研究科研成果的基础上,在书中较为系统地论述了钢轨的生产,钢轨的材质性能,钢轨的热处理、焊接,钢轨的超声波探伤基本理论及技术发展,同时对钢轨及与钢轨相关的基本知识进行了介绍。

本书可供从事钢轨研究、生产和使用的有关工程技术人员学习、参考。

图书在版编目(CIP)数据

钢轨的材质性能及相关工艺/周清跃等编著. —北京:
中国铁道出版社, 2005.3
ISBN 7-113-06375-6

I. 钢… II. 周… III. ①钢轨-性能②钢轨-生产
工艺 IV. U213.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 011398 号

书 名: 钢轨的材质性能及相关工艺

作 者: 周清跃 张银花 杨来顺 黎连修

出版发行: 中国铁道出版社 (100054, 北京市宣武区右安门西街 8 号)

策划编辑: 傅希刚

责任编辑: 傅希刚 编辑部电话: 路(021)73142, 市(010)51873142

封面设计: 蔡 涛

印 刷: 北京盛兰兄弟印刷装订有限公司

开 本: 850 mm × 1168 mm 1/32 印张: 7.25 字数: 175 千

版 本: 2005 年 3 月第 1 版 2005 年 3 月第 1 次印刷

印 数: 1~3000 册

书 号: ISBN 7-113-06375-6/TG·27

定 价: 25.00 元

版权所有 侵权必究

凡购买铁道版的图书,如有缺页、倒页、脱页者,请与本社发行部调换。

联系电话: 路(021)73169, 市(010)63545969

序

铁路运输是我国的主导运输方式,它在国民经济发展中起着重要的作用。我国铁路自 1997 年以来,已先后实施了五次大提速,现全路共有时速超过 120 km 的线路 16 500 km,其中时速达到 160 km 的线路 7 700 km,预计明年实施的第六次提速,京广、京沪、京哈等主要干线的部分区段旅客列车最高时速将达到 200 km。铁路在实施提速战略的同时,重载也得到了快速发展。大秦运煤专线已开行了万吨重载列车,并完成了开行 2 万 t 的重载列车运行试验,货车轴重达到 25 t,年运量已达到 1.5 亿 t,今年改造完毕后年运量将达到 2 亿 t。铁路大提速及重载运输为提高铁路在运输业中的竞争能力和社会经济的持续发展做出了较大的贡献。随着国家对《中长期铁路网规划》的批准实施,我国铁路正进入一个客运高速、货运重载、客货分线、跨越式发展的新时期。

钢轨是铁路轨道的最重要部件,承担着引导车轮、传递载荷的功能。因此,钢轨在轨道交通中的重要性不言而喻。钢轨看似简单,却经历了一百多年的演变和发展,其生产和使用涉及许多知识和学科,值得认真加以研究。随着我国铁路提速和重载的不断发展以及高标

准客运专线的建设,一方面,钢轨需求数量在不断增加;另一方面,对钢轨质量要求更为严格,尤其列车提速以后,钢轨不仅需要更高的内在和外观质量,而且需要更高的安全性。

轨道的安全和寿命不仅与钢轨的材质、工艺以及所具备的性能有关,而且与钢轨的合理使用和科学维护相辅相成。钢轨的钢种及其生产技术(包括热处理技术)决定了钢轨的性能质量,钢轨的焊接技术水平在某种程度上决定了无缝线路钢轨的寿命,而钢轨的无损探伤无疑是确保安全使用的重要手段。因此,为了科学、合理地使用好钢轨,铁路工务工作者需要了解和掌握钢轨的基本知识和发展趋势。《钢轨的材质性能及相关工艺》一书,首次系统地论述了钢轨的生产、钢轨的材质性能、钢轨的热处理及焊接、钢轨的无损探伤基本理论及技术发展,许多内容为作者多年来所进行的科研成果的总结,是国内第一部系统、全面论述钢轨材质工艺方面的书籍。读一读该书,对丰富钢轨方面的知识,了解钢轨生产过程、热处理、焊接以及无损探伤技术均有裨益。该书的出版发行对提高广大技术人员的业务知识水平和我国铁路钢轨的使用水平将发挥积极的作用。

铁道部总工程师



2005年3月

前 言

钢轨是轨道结构的重要部件,是发展高速、重载以及实现繁忙铁路运输的基础。我国铁路每年使用新轨达 70 万~100 万 t 以上,耗资达 30 亿~40 亿元。钢轨性能质量的优劣以及与其相关技术工艺(包括钢轨生产工艺,钢轨热处理、焊接、探伤工艺等)的先进与否直接关系到铁路运输的效率和安全。

本书从材料工艺的角度出发,系统地论述了钢轨的生产、钢轨的材质性能、钢轨的热处理、钢轨的焊接、超声波探伤基本理论及其技术发展。全书共分六章。第一章为绪论;第二章为钢轨的生产,主要介绍传统及现代钢轨生产工艺、钢轨的制造缺陷、钢轨的断面长度、钢轨标志等内容;第三章为钢轨的材质与性能,重点介绍钢轨的组织与组织参数、钢轨钢中各元素的作用、钢轨的基本性能、钢轨钢的研究及进展;第四章为钢轨热处理,主要介绍钢轨热处理的原理、热处理钢轨的化学成分、钢轨热处理的工艺和设备、热处理钢轨的实验室及铺设使用性能;第五章为钢轨的焊接,主要介绍钢轨的焊接方式及方法、钢轨焊接原理、钢轨焊后热处理、钢轨焊接接头的性能、钢轨闪光焊接设备与工艺、焊接接头的质量控制和检验等;第六章为钢轨无损探伤,重点介绍在役钢轨和钢轨焊接接头的超声波探伤技术。

全书由铁道科学研究院铁道科学技术研究发展中心周清跃研究员主笔,由铁道科学研究院金属及化学研究所周镇国研究员主审。主要作者有周清跃(第一章、第二章、第三章部分、第四章部分)、张银花(第三章部分、第四章部分),杨来顺(第五章)、黎连修(第六章)。本书作者为长期从事钢轨材质性能与相关工

艺研究的科研人员,书中的许多内容为多年来所进行的科研成果的总结。

在全书的撰写过程中,曾得到铁科院金化所王树青、陈朝阳、詹新伟、涂占宽,鞍钢新轧钢股份有限公司科技部刘宏、鞍钢集团公司技术中心陈昕,攀钢集团公司钢研院梅东生,包钢集团公司技术中心智建国等的帮助,还得到了铁道部运输局基础部孟凡林、吴细水高级工程师的支持,在此一并表示感谢。

作 者

2005年1月3日于北京

目 录

第一章 绪 论	1
第二章 钢轨的生产	9
第一节 传统钢轨生产工艺	9
一、钢轨钢的冶炼	9
二、钢轨的轧制	13
三、钢轨的精整	14
第二节 现代钢轨生产工艺	15
一、工艺流程	15
二、轨钢的精炼	16
三、轨钢的大方坯连铸	17
四、钢轨的万能法轧制	19
五、钢轨的精加工	19
六、钢轨的质量检测	20
七、钢轨的长尺生产	21
第三节 钢轨的制造缺陷	21
一、钢轨低倍缺陷	21
二、钢轨高倍缺陷	24
三、钢轨轧制缺陷	27
第四节 钢轨的断面及长度	29
第五节 国内外钢轨标识及说明	31
一、钢轨标识的内容	31
二、主要标识代号及含义	32
第三章 钢轨的材质与性能	36
第一节 钢轨钢的组织及组织参数	36

第二节 钢轨钢中各元素的作用	39
一、碳的作用	39
二、硅的作用	40
三、锰的作用	41
四、硫的作用	42
五、磷的作用	43
六、铝的作用	44
七、氧的作用	44
八、氮的作用	45
九、氢的作用	45
十、残留元素的作用	46
十一、钒的作用	46
十二、铌的作用	47
十三、稀土的作用	47
十四、铬的作用	48
第三节 钢轨的基本性能	48
一、强度与塑性	49
二、硬 度	50
三、韧 性	52
四、疲劳性能	54
五、耐磨性能	55
六、焊接性能	55
第四节 钢轨钢的研究及进展	56
一、钢轨钢的分类	56
二、普通轨钢	56
三、合金轨钢	59
四、热处理轨钢	59
五、国外高强度轨钢最新研究动向	59
六、国内轨钢的研究方向	62

第四章 钢轨热处理	70
第一节 钢轨热处理技术及其发展	71
一、钢轨热处理历史回顾	71
二、钢轨热处理工艺的发展	72
三、钢轨热处理的基本类型及其特点	73
第二节 钢轨热处理原理	75
一、感应加热原理	75
二、钢轨热处理原理	75
第三节 热处理轨钢的化学成分	76
一、国外热处理轨钢的化学成分	76
二、国内热处理轨钢的化学成分	80
第四节 钢轨热处理工艺	81
一、奥氏体化温度的选择	81
二、冷却速度及方式的选择	83
三、热处理钢轨的变形及缩短	90
第五节 钢轨热处理设备	91
一、设备布置	91
二、预热和加热装置	92
三、冷却装置	92
四、钢轨输送系统	92
五、钢轨矫直	92
第六节 热处理钢轨的性能	93
一、硬化层形状及深度	93
二、轨头横断面的硬度分布	93
三、硬化层拉伸及冲击性能	93
四、断裂韧性 K_{Ic}	95
五、试样旋转弯曲疲劳性能	95
六、试样耐磨性能	96
七、显微组织、珠光体片间距及奥氏体晶粒	97

八、残余应力	98
九、国内外热处理钢轨性能对比	99
第七节 热处理钢轨的铺设使用	100
一、热处理钢轨在曲线上的使用	100
二、热处理钢轨在直线上的使用	105
三、热处理钢轨使用中出现的伤损及对策	106
第八节 热处理钢轨的焊后热处理	108
第五章 钢轨的焊接	112
第一节 焊接长钢轨和无缝线路	112
一、焊接钢轨	112
二、无缝线路的类型和锁定温度	114
三、线路上焊接钢轨的受力分析及断轨原因	115
第二节 钢轨的焊接方式及方法	116
一、闪光焊接	117
二、移动气压焊接	123
三、铝热焊接	128
四、强迫成形电弧焊接	131
五、焊接方法与焊接接头性能的关系	132
第三节 焊接原理及焊接接头构成	133
一、焊接热循环	133
二、焊缝及热影响区特征	136
三、焊接接头的力学性能	139
第四节 焊接接头的热处理	141
一、接头正火处理	141
二、热处理钢轨焊接接头的焊后再淬火	145
三、焊接接头残余应力变化	148
第五节 钢轨闪光焊机及焊接工艺	150
一、预热闪光焊机	151
二、连续闪光焊机	157

三、焊接工位与工序的基本配置	164
四、线路移动式闪光焊接钢轨	169
第六节 焊接质量和检验	173
一、焊接缺陷及产生原因	174
二、焊接检验	180
第六章 钢轨的无损探伤	185
第一节 无损检测及其在钢轨探伤中的应用	185
第二节 新轨探伤	186
一、超声波法	186
二、涡流探伤和磁粉探伤	188
第三节 在役钢轨探伤	189
一、钢轨探伤的发展	189
二、核伤探测	190
第四节 螺孔裂纹的探测	197
一、螺孔裂纹及其探测方法	197
二、螺孔裂纹的反射规律	197
三、一孔裂纹的探测和探头角度的选择	200
第五节 钢轨焊缝探伤	202
一、钢轨焊缝探伤的意义和要求	202
二、钢轨焊缝缺陷及其探伤方法	203
三、平面状缺陷的探测	204
四、钢轨焊缝不停顿探伤法	208
五、缺陷当量大小的测定	211
第六节 在役钢轨探伤设备和探伤周期	212
一、大型钢轨探伤车	212
二、钢轨探伤小车	215
三、国内外钢轨探伤设备的使用与差别	215
四、在役钢轨探伤周期	216

第一章 绪 论

我国幅员辽阔、人口众多，东部地区工业发达，中西部地区资源丰富，需要北煤南运、西煤东运、南粮北调、西棉东调等大宗货物长距离的运输。铁路运输具有能力大、运输成本低、安全、环保等特点，尤其适合中长距离客货运输。因此，铁路运输是我国陆上运输的骨干，是国民经济发展的主动脉，在我国综合交通运输体系中始终占有重要的地位。

截止到 2002 年底，我国铁路营业里程已达到 71 898 km，其中复线里程达到 23 945 km，电气化铁路里程为 18 115 km，分别占营业里程的 33.3% 和 25.2%；在国家铁路正线上，已铺设无缝线路 35 336 km；采用 60 kg/m 及以上钢轨的线路为 54 291 km。

我国铁路通过四次大面积提速，形成了“四纵两横”覆盖里程达 13 000 km 的提速网络。2002 年全路客车平均运行速度达到 61.9 km/h，特快列车的最高时速由 120 km 提高到了 160 km。

2002 年全路货物周转量完成 19 881 亿 t·km；运用货车日产量完成 9 102 t·km；机车日产量完成 102.4 万 t·km；货运机车平均牵引总量达到 2 789 t。客货运输速度逐年增加，2002 年国家铁路的营业公里换算密度达到 3 340 万 t·km，位居世界首位。

为了实现铁路运输跨越式发展，我国铁路将加快修建高速铁路和货运重载专线的建设步伐，并对繁忙干线实施客货分线，在进一步提高客运速度的同时，将提高货车的轴重和运行速度。

不同铁路运输特点对轨道结构包括对钢轨的要求是不同的。

综观世界各国铁路,根据运输条件的不同,可粗略分为三大类:

第一类,运输密度大,行车速度高,但轴重轻,以日本和欧洲为代表。这些国家国土面积不大,基本以客运为主,对旅客运输的舒适度要求较高,因此轨道结构的可靠性和平顺性尤其重要。

第二类,以重载运输为主,机车车辆轴重大,但运输密度小且行车速度不高。北美、澳大利亚铁路基本属于这一类。受国土面积大、资源分布不匀的影响,这些国家铁路以货运为主。因此,其轨道结构则以提高强度、减少养护维修工作为主要出发点。

第三类,客、货混跑,轴重、密度、速度同时发展。这样,较高的速度要求轨道结构具有较高的平顺性,而重载运输又会引起轨道结构部件的过早折损和整体结构的剧烈变化,要保持两者相对平衡,又必须强化轨道结构和加大修理工作量,但较大的运输密度又造成了修理工作的极大困难,因此第三类情况对于轨道结构要求更为综合。

综上所述,不同运输特点的铁路对轨道结构有不同的要求,所采用的轨道结构标准也不同。

轨道结构类型的划分有两种方式:一是按铁路等级划分,二是按运营条件划分。按铁路等级划分轨道类型,要求同一等级的铁路采用同一种轨道类型。按运营条件划分轨道类型,同一等级的铁路,可以采用不同类型的轨道;不同等级的铁路,也可以采用同一类型的轨道,这样可以使轨道类型与运营条件基本适应。我国铁路目前的划分类型特重型、重型、次重型、中型和轻型,实际是以轨道年通过总量密度为主要依据的。但是,随着列车速度问题日益突出,在轨道类型中也考虑了速度的因素,如表 1—1 所示。

表 1—1 中国铁路正线轨道类型

项 目				特重型	重 型		次重型	中型	轻 型
运营 条件	年通过总质量(Mt)			>50	25~50		15~25	8~15	<8
	路段客车设计速度(km/h)			≤140	140	≤120	≤120	≤100	≤80
轨道 结构	钢轨(kg/m)			75 或 60	60	60	50	50	50 或 43
	轨 枕	混凝土枕	型 号	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ或Ⅱ	Ⅱ	Ⅱ	Ⅱ
			铺枕根数 (根/km)	1 680~ 1 720	1 680	1 840 或 1 680	1 680~ 1 760	1 600~ 1 680	1 520~ 1 640
		防腐木枕	型 号	—	—	I	I	I	Ⅱ
			铺枕根数 (根/km)	—	—	1 840	1 760~ 1 840	1 680~ 1 760	1 600~ 1 680
	碎石道床 厚度	非渗水土路基	双道碴(cm)	30	30	30	25	20	20
			层底碴(cm)	20	20	20	20	20	15
		岩土渗水土路基	单道碴(cm)	35	35	35	30	30	25

注：年通过总质量包括净载、机车和车辆的质量。单线按往复总质量计算，双线按每一条线的通过总质量计算。

由此可见，不同的铁路等级或运营条件，应与不同等级的轨道结构相匹配。而钢轨是轨道结构最重要的部件，是发展高速、重载以及实现繁忙铁路运输的基础。钢轨不仅引导机车车辆行驶，还将所承受的负载传递给轨枕、道床和路基，同时为车轮的滚动提供阻力最小的接触面。因此，国外铁路根据不同的运营条件和线路条件，对钢轨的单重以及强度等级均提出要求。欧洲、前苏联及美国铁路不同轨道结构对钢轨的要求如表 1—2~表 1—4 所示。

钢轨性能质量的优劣以及与其相关技术工艺（包括钢轨生产工艺、钢轨热处理、钢轨焊接工艺、在役钢轨探伤工艺等）的先进与否直接关系到铁路运输的效率和安全。

铁路运营条件不同，出现钢轨伤损的类型也不同，因此对

表 1—2 欧洲铁路不同轨道类型对钢轨的要求

轨道部件		重 型 标 准	中 型 标 准	轻型标准
钢 轨	单重	$\geq 60 \text{ kg/m}$ (如 UIC60, U80, R65)	$45 \sim 60 \text{ kg/m}$ (如 UIC54, S49, U50)	$< 45 \text{ kg/m}$
	强度	$800 \sim 900 \text{ MPa}$, 曲线上 $\geq 1100 \text{ MPa}$	$700 \sim 800 \text{ MPa}$, 在一定区段 $\geq 900 \text{ MPa}$	$700 \sim 800 \text{ MPa}$

表 1—3 前苏联铁路不同轨道结构对钢轨的要求

项目	线路等级	1	2		3		4		5	
									A	B
运营条件	年通过总质量 (Mt)	> 80	$50 \sim 80$	$25 \sim 50$	$25 \sim 50$	≤ 25	$25 \sim 50$	≤ 25	≤ 25	≤ 25
	最大允许速度 (km/h)	≤ 120	≤ 120	$101 \sim 120$	$61 \sim 100$	$101 \sim 120$	≤ 60	$61 \sim 100$	≤ 60	≤ 40
轨道结构	钢轨	1 级 1 类 P65 淬火轨		P75、P65 淬火再用轨；P75、P65 热轧新轨	1 级 1 类 P65 淬火轨	P75、P65 再用轨		不宜铺设在正线上的各类再用轨		

表 1—4 美国铁路不同轨道结构对钢轨的要求

轨 道 级 别		特重型	重 型	中 型	轻型
运营条件	年货运密度 (Mt)	$20 \sim 39$	$12 \sim 25$	$6 \sim 15$	$1 \sim 7$
	机车最大轴重 (t)	34	32	32	27
	运行速度 (km/h)	$85 \sim 128$	$85 \sim 122$	$85 \sim 122$	$64 \sim 96$
轨道结构部件	钢轨单重 (kg/m)	70	66	57	50
	钢轨强度 (MPa)	直线上: ≥ 960 曲线上: ≥ 1200	直线上: ≥ 960 曲线上: ≥ 1200	直线上: ≥ 960 曲线上: ≥ 1200	

钢轨性能要求的侧重点也不同。车轮与钢轨之间接触面积很小，而来自车轮的压力却很大，为使钢轨不致被压陷或磨耗太快，钢轨应具有足够的强度和硬度，尤其是重载铁路及繁忙铁

路小半径曲线上铺设使用的钢轨更应具有高强度和高硬度，以抵抗磨损而延长使用寿命。

而针对高速铁路钢轨的服役条件以及出现的伤损特点，则要求钢轨钢质洁净，钢轨表面尤其轨头表面基本无原始缺陷，几何尺寸精度高、平直度好。另外，对高速铁路而言，钢轨的安全使用性能是最为重要的，这就要求钢轨具有良好的韧塑性及焊接性能。

由此可见，不同的线路情况，对钢轨材料应重点关注的性能指标是不同的。我国铁路已具有七万余千米的营业里程，为世界第三，除了重载运煤专用线、已经修建和即将修建的客运专线以及京沪、京广、京哈、陇海等繁忙干线外，还有其他并不是很繁忙的线路；除了在曲线上钢轨的磨耗比较严重外，在直线上钢轨并不是由于磨耗超限而下道，因此，并不是所有的钢轨都需要高强度。而高强度钢轨往往有其自身的缺点，如钢轨生产、焊接、配轨作业等相对困难，价格较高，因此需要有多种性能特点的钢轨，根据不同的线路特点进行选择。

随着铁路运输技术的发展，钢轨的生产和使用技术也得到了不断进步。

17 世纪初期，英国出现了为马车而铺设的木质轨道。18 世纪初期，在采用铸铁轨道方面取得了一些进展，但由于铸铁太脆而不能单独使用。大约 30 年后，铸铁成功地应用于韧性好的橡木轨道支撑梁的表面上，从而提高了轨道踏面的硬度和耐磨性。这大概是轨头硬化轨道的最早应用。

随着蒸汽机车的发明，火车轴重提高了，速度加快了。19 世纪初期，铸铁被可锻铸铁取代。1856 年酸性转炉冶炼法出现后，可锻铸铁又被钢所取代。早期的钢轨使用寿命比铁轨延长了 30 多倍。19 世纪末，珠光体型钢轨投入使用。

20 世纪钢轨钢的成分和微观组织没有太大的变化，基本上为亚共析钢和共析钢组织。为了提高钢轨的强度，在原亚共