

· 工艺材料进展 ·

铁路用钢轨及其制造技术

任安超^{1,2} 吉 玉² 周桂峰^{1,2} 袁泽喜¹

(1 武汉科技大学材料与冶金学院, 武汉 430081; 2 武汉钢铁(集团)公司研究院, 武汉 430080)

摘 要 总结分析了货运铁路和客运铁路用钢轨的典型成分体系与性能, 阐述了铁路用钢轨在冶炼、连铸、热轧等制造流程中存在的的关键技术问题, 以及该技术在国内外的新进展, 着重分析了万能轧制技术制造铁路用钢轨的特点及其关键技术。从成分体系开发、制造技术等方面分析了国内铁路用钢轨的生产现状及质量水平。

关键词 钢轨 万能轧制 生产装备 制造工艺

Rails for Railway and Its Manufacturing Technology

Ren Anchao^{1,2}, Ji Yu²; Zhou Guifeng^{1,2} and Yuan Zexi¹

(1 Institute of Materials Science and Metallurgy, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081;
2 Research and Development Center, Wuhan Iron and Steel (Group) Corp, Wuhan 430080)

Abstract The representative chemical composition system and properties of steel rails for freight transport and passenger traffic are summarized and analyzed. The key technologies of rails for railway manufacturing flow sheet including melting, continuous casting and hot rolling, and the now progress of the technologies at home and abroad are presented to put emphasis on analysis of characteristics and key technologies for manufacturing rails for railway by using universal mill. The present production status and quality level of domestic rails for railway including development of chemical composition system and manufacturing technologies are analyzed.

Material Index Rail, Universal Rolling, Production Equipment, Manufacturing Process

解决 21 世纪城市间交通问题和大城市内交通问题的最有效工具仍然是铁路, 尤其是高速铁路和地下铁路, 它们在运输的高速度、高效率、安全性、舒适性、环境保护和大运量等方面均具有优势^[1,2]。

目前, 铁路正在向着客货分离的运输模式发展, 货运重载铁路采用高强度全长淬火钢轨, 既增加了钢轨的使用寿命又提高了运输安全性; 客运采用全长无缝焊接钢轨, 由于客运专线列车轴重轻、运行速度快, 所以对轨道平顺性的要求大于其它线路^[3,4]。提高钢轨的制造精度和原始平顺性, 增加定尺长度是实现轨道平顺的根本。继续改进钢轨的内部和表

面质量、提高钢轨的强韧性以适应重载及高速铁路的要求乃是钢轨钢的发展趋势^[2,5]。

1 铁路用钢轨的成分体系与性能特点

1.1 普通钢轨和合金钢轨典型钢种成分及力学性能

国内外普通钢轨的化学成分及力学性能如表 1 所示。从表 1 可见, 由于碳是显著提高重轨强度和硬度最便宜、最有效的元素, 因此在美、俄、日等国的钢轨中碳含量已接近共析钢的水平。但由于碳含量过高使钢材的韧性、焊接性能变坏, 因此欧洲和英国将中、低碳钢使用在耐磨性能无须很高的营运线路上^[6,7]。

表 1 国内外典型普通钢轨的化学成分及力学性能

Table 1 Chemical composition and mechanical properties of typical common rail at home and abroad

国别	钢种	化学成分/%						力学性能		
		C	Si	Mn	P	S	其他	R _m /MPa	A/%	HB
美国	ARMEA	0.74~0.84	0.10~0.60	0.75~1.25	≤0.020	≤0.020	Cr≤0.25	≥980	≥9	≥300
俄国	M76(P65)	0.71~0.82	0.25~0.45	0.75~1.05	≤0.035	≤0.030		≥980	≥5	
日本	JIS60	0.63~0.75	0.15~0.30	0.70~1.10	<0.025	≤0.030		≥800	≥8	
英国	BS 11A	0.45~0.60	0.05~0.35	0.95~1.25	<0.050	≤0.050		≥710		
欧洲	UIC700	0.40~0.60	0.05~0.35	0.80~1.25	<0.050	≤0.050		680~730		
	EN260	0.62~0.80	0.15~0.58	0.70~1.20	0.008~0.025	≤0.025		≥880	≥10	260~300
	EN260Mn	0.55~0.75	0.15~0.60	1.30~1.70	0.008~0.025	≤0.025		≥880	≥10	260~300
中国	U74	0.67~0.80	0.13~0.28	0.70~1.00	≤0.030	≤0.030		≥780	≥10	
	U71 Mn	0.65~0.77	0.15~0.35	1.00~1.40	≤0.030	≤0.030		≥880	≥10	
	U75V	0.71~0.80	0.50~0.70	0.70~1.05	≤0.030	≤0.030	V:0.04~0.12	≥980	≥9	280~320
	U76 NbRE	0.72~0.80	0.60~0.90	1.00~1.30	≤0.030	≤0.030	Nb:0.02~0.05	≥980	≥9	280~320

表2 欧洲典型合金钢轨的化学成分及力学性能
Table 2 Chemical composition and mechanical properties of typical alloy steel rail in Europe

国家	钢种	化学成分/%						力学性能		
		C	Si	Mn	P	S	Cr	V	R_m /MPa	A/%
德国	Cr	0.65~0.80	0.30~0.90	0.80~1.30	<0.030	<0.020	0.70~1.20		≥1 080	≥9.0
	Cr-V	0.55~0.75	≤0.70	0.80~1.30	<0.030	<0.020	0.80~1.20	<0.3	≥1 080	≥9.0
英国	Cr-Mn	0.68~0.78	≤0.35	1.10~1.40	<0.030	<0.020	1.10~1.30		≥1 080	≥11.0
EN 标准	320 Cr	0.60~0.80	0.50~1.10	0.80~1.20	<0.020	<0.025	0.80~1.20	<0.18	≥1 080	≥9.0

目前国内大量使用的普通及微合金钢轨主要有4个钢种,即抗拉强度等级为780 MPa级的U74、880 MPa级的U71 Mn、980 MPa级的U75V和U76 NbRE。而随着炼钢全连铸,U76 NbRE已淡出钢轨市场^[5]。

合金钢轨尤其是铬钢轨、铬钼钢轨不仅具有高强度,而且还保持较好的塑性,在很多国家特别是西欧得到广泛的应用。由于抗拉强度等级为1 180 MPa的珠光体型合金钢轨断裂韧性低($< 25 \text{ MPa}/\text{m}^2$),综合性能不好,该等级的合金钢轨现已基本不再生产^[2]。目前1 080 MPa级的合金钢轨仍在许多国家使用,欧洲1 080 MPa级的合金钢轨的化学成分和力学性能如表2所示。

1.2 热处理钢轨

钢轨热处理技术发展经历了3个主要阶段,如表3所示。通过钢轨热处理方法细化其组织中的珠光体片间距及原奥氏体晶粒尺寸,不仅可以提高强度,而且可以改善韧塑性。S-Q 淬火工艺的实施要求钢轨的碳含量应在共析成分(0.76%~0.77%)。因此,世界各国热处理钢轨的碳含量均控制在0.72%~0.82%。随着喷风冷却技术的采用,另在钢中加入少量的推迟珠光体转变的合金元素(如Cr),不但可以提高热处理钢轨的强度,而且可以节省淬火冷却时压缩空气的消耗,降低成本^[8-10],另外,在余热淬火钢轨中还添加一些阻止奥氏体晶粒长大的微合金元素,如V、Nb^[11]。

1.3 国外高强度钢轨最新研究动向

1.3.1 过共析珠光体钢轨

通过添加Cr、Mo等合金元素和热处理可获得

表3 钢轨热处理技术发展主要阶段
Table 3 Main stages for development of heat treatment technologies for rails

20世纪	钢轨热处理技术	备注
70年代前	离线Q-T 淬火工艺	Q-T工艺: 淬火马氏体后回火球状珠光体
70~80年代	离线S-Q 淬火工艺	S-Q工艺: 直接冷却得到细片状珠光体
80年代末	在线S-Q 淬火工艺	利用轧制余热, 进行控制冷却, 得到细片状珠光体

细珠光体组织,以提高耐磨性能和硬度。随着货车轴重的增加,要求钢轨的耐磨性能进一步提高^[4,8]。对于共析钢来说,通过上述两种方法提高硬度已经十分困难,因为轨头表面会形成不希望出现的脆性贝氏体和马氏体组织。

鉴于上述情况,国外研究人员提出一种新思路:研究过共析钢轨,通过增加珠光体片中渗碳体相的密度来提高耐磨性能。在实验室条件下,过共析钢轨的耐磨性比传统热处理共析钢轨提高20%。新开发的过共析钢轨20世纪末在北美重载铁路上进行试验。试验用过共析热处理钢轨的化学成分及力学性能如表4所示。

1.3.2 马氏体钢轨

由于珠光体型钢轨已经接近研发极限,许多制造商正在试验其他高强度钢轨。近来英钢联研究开发了轨头硬度达445 HB的低碳马氏体钢轨钢,并申请了专利。尽管该钢种的耐磨性能与珠光体型热处理钢轨相似,但韧性却高很多。

1.3.3 贝氏体钢轨

目前世界上新的高强度钢轨的研发重点主要集中在贝氏体钢轨上,贝氏体钢轨强度高、韧塑性好,显示出强度和韧塑性的极好配合,尤其韧性更好,是珠光体钢轨的2~3倍。另外,高强韧性的中低碳钢空冷贝氏体钢轨由于碳含量低,具有良好的焊接性能,同时还易于与珠光体钢轨焊接。

目前国际上主要从3个角度去研究贝氏体钢轨:(1)美国、德国研制的贝氏体钢轨已上道试铺。德国研制的贝氏体钢轨在挪威北部的运煤线路300 m半径的曲线上使用,结果表明,其耐磨寿命为传统热轧钢轨的8倍,比1 300 MPa级的热处理钢轨提高25%左右。(2)法国、日本从提高快速铁路钢轨的抗滚动接触疲劳性能的角度研制的贝氏体钢轨已经上道试铺,效果良好。(3)美国、英国等从提高道岔寿命的角度出发,研制贝氏体钢轨。英国研制的贝氏体钢辙叉已上道使用1 000多组,情况良好。

贝氏体钢轨不仅能进一步提高其重载铁路上使用的耐磨性能,还能提高在提速、高速线路上抵抗接

触疲劳损伤的能力,减少钢轨打磨费用,同时贝氏体钢轨可用于制作道岔中的尖轨和辙叉,以大幅度延长道岔的使用寿命^[6,8,11~15]。德、美、英研制的空冷贝氏体钢轨,其化学成分和力学性能如表 5 所示。

2 铁路用钢轨制造技术

2.1 孔型轧制与万能轧制

普通孔型系统(图 1a)在技术上实现简单,金属变形稳定,适合大压下变形,一般用于粗轧变形(万能法生产重轨的粗轧变形也采用此种方式),控制系统简易,由于其孔型设计多是采用不对称设计,因此其成品断面的对称性不理想,其轨高、底宽、腹高等尺寸的控制精度也不高,孔型磨损较快,表面质量不易控制,轧机调整要靠经验,常常还会因孔型磨损,对轧件产生楔卡作用,造成重轨腿尖和轨底加工不良等缺陷^[14,16]。

万能孔型系统(图 2b)由 1 对主动水平辊和 1 对

表 4 过共析热处理钢轨的化学成分及力学性能

Table 4 Chemical composition and mechanical properties of hypereutectoid-heat-treated rail

化学成分/%						力学性能			
C	Si	Mn	P	S	Cr	$\sigma_{0.2}$ /MPa	R_m /MPa	A/%	Z/%
0.89	0.61	0.48	<0.014	<0.009	0.25	865	1 353	10.3	24.8

表 5 德、美、英空冷贝氏体钢轨化学成分和力学性能

Table 5 Chemical composition and mechanical properties of air-cooled bainitic rail in Germany, U. S. and British

国别	化学成分/%								力学性能	
	C	Si	Mn	Cr	Mo	V	Ni	B	σ_b /MPa	δ_5 /%
德国	0.40	1.50	0.70	1.10	0.80	0.10	-	-	1 455	13
美国 J6	0.26	1.84	2.00	1.94	0.44	-	-	0.003	1 531	4
英国	0.10	-	1.00	2.00	0.50	-	3.0	0.003	1 000	6

被动立辊组成,且 4 辊的轴线位于同一平面上,形成万能孔型,平辊对重轨的腰部进行加工,两侧立辊与平辊的侧面形成加工变形区分别对轨头、轨底进行加工。轧边机主要对轨头、轨底的端部进行加工,轧机导卫横梁直接安装在轴承座上,可以进行整体上下移动,轧钢过程实现全自动控制。

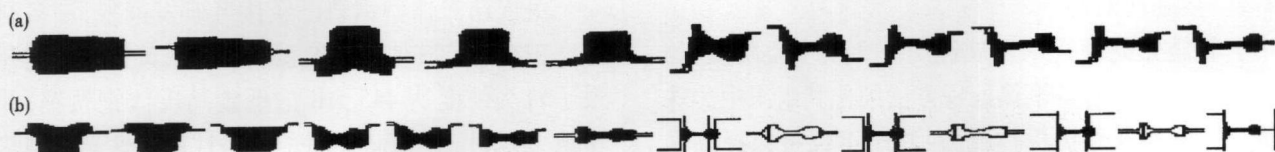


图 1 普通孔型(a)和万能孔型(b)系统

Fig. 1 Common (a) and universal (b) pass schedule

2.2 万能轧制轧机布置

万能轧机轧制重轨工艺布置主要有 3 种(以万能轧机数目区分):2 机架布置,3 机架布置,4 机架布置。3 种布置方式的共同点为:粗轧都采用 2 架二辊轧机,利用孔型轧制法将矩形坯轧制成轨形坯。

万能法轧制重轨已被世界认同,目前是生产高精度重轨的最好工艺。万能孔型轧制法与普通孔型轧制法相比,具有以下优点:改善了钢轨的表面质量,孔型对称设计、变形均匀性好,产品尺寸精度高,尤其是轨头和轨底方向压下可灵活控制,轧制内部残余应力小,轨头、轨底加工良好,轧辊磨损、电能消耗均减小,孔型的调整能力强,且自动化水平较高。

2.3 万能轧制法优点

用万能法轧制钢轨,钢轨整个断面均受到轧辊的同时压下,其形状和尺寸精度更容易保证。采用万能法轧制钢轨时,钢轨轨头形状呈外凸状,而且在整个轧制过程中均保持这一形状,这就消除了

制过程中钢轨产生的鱼鳞状或皱折缺陷,同时,钢轨接触面的各个方向均受到直接压力的作用而变形。

归纳起来,万能轧制工艺与传统轧制工艺相比,其优势主要体现在如下 5 个方面。

(1)更容易识别钢轨表面缺陷。在万能轧机孔型中,钢轨与轧辊的摩擦大幅度减小,消除了搓轧现象,因此钢轨表面光洁度显著提高,使得表面缺陷也更容易识别。

(2)减小了万能轧制过程中轧制变形力。通过开坯机孔型和先导孔轧制,进入万能轧机的轨形坯已经接近于成品钢轨断面形状,在随后的 4~5 个万能道次轧制中,其变形相对较小,因而轧制变形力也相对较小。

(3)轧机调整灵活性高,更容易保证钢轨断面尺寸精度。钢轨断面尺寸精度主要受到终轧道次轧制变形的影响,对于万能轧制来说,由于其变形分为水平方向和垂直方向两种变形,可以单独对各个方

向上的轧辊进行调整。

(4) 轧辊消耗降低。对于万能轧机来说,由于轧辊与钢轨之间的摩擦减小,而且轧辊形状简单,因而轧辊磨损降低。一般来说,万能轧机轧辊(不包括开坯机)平均消耗在 1.0 kg/t 左右,而采用传统孔型系统轧制,其轧辊(不包括开坯机)消耗一般在 2.0 kg/t 以上。

(5) 钢轨脱离轧辊的力降低。在万能轧机中,由于钢轨与轧辊之间的摩擦降低,因此钢轨更容易从孔型中脱离,钢轨脱离轧辊的分离力比常规孔型系统要小,因而轧制能耗也有所降低。

3 中国铁路用钢轨制造技术及装备

以高速铁路、重载铁路和自动化铁路为代表的高技术铁路是 21 世纪世界铁路发展的主流。为满足高技术铁路对钢轨的质量要求,中国钢铁行业从 20 世纪 80 年代就开始研制高速铁路用轨,主要采取如下新技术新工艺。

(1) 采用二次精炼和真空脱气工艺,以确保钢坯的内在质量,控制钢中的残余元素和气体含量,保证钢质的纯净度^[14,17]。

(2) 采用连铸大方(矩)坯,这主要是为改善钢坯的低倍组织^[14]。

(3) 采用步进式加热炉加热钢坯,可以控制加热炉内气分,有效防止钢坯的脱碳和加热温度不均。

(4) 采用高压水除鳞,最大限度地减少因氧化铁皮造成的轧痕等^[16]。

(5) 采用万能轧机万能法孔型设计,计算机在

线调整。

(6) 采用长尺轧制、长尺冷却、长尺矫直工艺。

(7) 采用在线的质量检查中心,对钢轨通过超声波、涡流和激光检查其内部质量、表面质量和几何尺寸。

(8) 采用带硬质合金的锯钻机床进行钢轨加工。

(9) 采用控制轧制、控制冷却和在线热处理等技术,使钢轨具有最佳的组织、性能和成分。

截止 2008 年,国内 4 大生产重轨厂家全部完成了重轨线的改造,改造后的生产线均采用大方坯万能法轧制。

4 结论

当前国内生产钢轨设备非常先进,但是由于我国生产高速钢轨的时间还不长,还缺少生产和管理的经验,目前我国钢轨的实物质量与国外先进水平还存在一定差距^[12]。主要改进的方面有:

(1) 进一步改进工艺制度和提高工艺稳定性,以提高钢轨质量的稳定性。

(2) 进一步积累经验和提高管理水平,以保证上道钢轨质量的稳定性。

(3) 研究车速 350 km/h 和重载条件下的轮轨关系开发新钢种。

(4) 加强在高速条件下钢轨与列车对周围环境的影响研究,要加快开发低噪音车轮和空心车轴。

武汉市科技计划项目资助(20061002085)

参考文献

- 王传雅. 钢轨的现状和发展趋势. 特殊钢, 1999, 20(6): 54
- 董志洪, 南振卿. 国内外钢轨生产现状与发展. 轧钢, 2006, 8(3): 6
- Scott Lovelace. Heavy Haul Railways Address a Booming Market. Railway Gazette International, 2005(6): 327
- Marai S J, Vanderwalt V. An Overview of Railroad Wheel Rim Failure Modes under Heavy Axle Loads. The 14th International Wheelset Congress. USA: [S. n.], 2004
- 唐狄. 世界高速铁路发展及对钢铁材料要求. 马钢职工大学学报, 2007, 7, 13(2): 22
- Omoaki T, Myuki, Taizo, et al. High Micro-cleanliness Wheels Preventing Shattered-rim Fracture. The 14th International Wheelset Congress. USA: [S. n.], 2004
- Ichinose H, Takehara J, Uede M. High Strength Rails Produced by Two-stage Flame Heat-ing and Slack-guenching. Second International Heavy Rail Railway Conference. Colorado Springs, Colorado U. S. A.: 1982, 9
- Sang-Hgun CHO, Ki-Bong Kang, John J Jonas. The Dynamic, Static and Metadynamic Recrystallization of a Nb-microalloyed Steel. ISIJ International, 2001, 41(1): 63
- Kliber J, Schindler I. Recrystallization Precipitation Behavior in Microalloyed Steel. Materials Processing Technology, 1996(60): 597
- Chiaki Ouchi. Development of Steel Plates by Intensive Use of TMCP and Direct Quenching Process. ISIJ International, 2001, 41(6): 542
- 李云武, 陈永山, 王江. 重轨发展趋势及轨梁厂技术改造初探. 攀钢技术, 2002, 25(3): 37
- 刘越表, 武忠荣. 国外高质量重轨生产现状及发展. 现代冶金, 2003, 4(3): 70
- 陈亚平, 王彦中. 攀钢高速铁路钢轨生产技术探讨. 钢铁, 2001, 36(12): 26
- 刘彩玲, 于广民, 吴振国, 等. 鞍钢 1#、2# 大方坯连铸机的特点及新钢种的生产开发. 重型机械, 2002, 12(4): 8
- 陈永, 朱苗勇. 高速轨用钢连铸坯内部质量控制的关键技术. 钢铁, 2006, 18(12): 36
- 周清跃, 张银花, 陈朝阳. 客运专线钢轨技术研究. 世界轨道交通, 2007, 10(2):
- 吴伟, 刘浏, 李峻. 重轨钢无铝脱氧工艺的研究. 钢铁, 2007, 19(3): 33

任安超(1976-), 男, 博士生, 工程师, 高性能型钢研究。

收稿日期: 2010-03-04