

钢轨生产与使用

刘宝昇 赵宪明 编著

北 京
冶金工业出版社
2009

前 言

我国从1953年末开始生产43型钢轨,起初是沿用前苏联的钢种、型号和生产工艺。为了适应我国的具体情况,鞍钢首先进行了技术规程的修改和试验研究,并将研究成果纳入了规程,应用于生产。随着钢轨生产和使用要求的不断提高,钢轨的型号逐步增大,1955年末开始生产50型钢轨,1989年60型钢轨进行批量生产。几十年来,我国钢轨的生产与科研主要围绕着两个方面,其一是减少结疤、裂纹、分层、低倍组织等钢质不良缺陷;其二是提高钢轨的耐磨、耐压性能而进行新成分钢轨的研制。开始生产钢轨时由于缺乏生产和管理经验,成品钢轨的结疤、裂纹等钢质不良缺陷严重,随着生产经验的积累、操作技术和科技水平的提高,钢轨的一级品率逐年上升,曾达到88.2%,结疤和裂纹等缺陷逐年减少。20世纪50年代末至60年代初期间钢轨质量又一度变差。之后,加强了生产管理,重视科研工作,钢轨的一级品率又逐年上升,到1965年达到96%以上,达到了国际水平。

随着国民经济的快速发展,碳素钢轨不能满足铁路运输日益发展的要求,铁道部要求提高钢轨的强度,企业也多次提高钢轨中的碳含量,但仍不能满足使用要求。根据国家科委的要求,冶金、铁道部门的技术人员会同鞍钢、武钢等有关企业的技术人员一起进行线路考察,发现碳素钢轨最严重的问题是不耐磨、不耐压。为此,由冶金、铁道部门会同鞍钢等企业共同组建钢轨研究机构,鞍钢钢研所科研人员与铁道部科学研究院的科研人员成立研究小组,在鞍钢共同进行新成分钢轨的试验研究。试验表明,试验钢轨的强度明显高于碳素钢轨的强度,冶金、铁道部门的专家一致认为新成分钢轨的强度能满足当时的使用要求,命名该钢轨为API(鞍平1),并决定扩大生产。1980年进行鉴定转产,1984年全国推广,钢号名称由API改为U71Mn。以后又研制了耐磨钢轨U74SiMnV,鞍钢与铁道部还进行了高硅钢轨完善化的研究。

钢轨的生产技术总是不断向前发展的。我国钢轨的生产技术从冶炼工艺到轧制工艺,从装备水平到生产技术水平都发生了巨大变化。为了适应铁路运输日益发展的要求,钢轨的单重由43 kg/m、50 kg/m发展到60 kg/m、75 kg/m,钢轨的定尺长度由12.5 m发展到100 m、150 m,钢轨的强度由700 MPa发展到1000 MPa、1100 MPa。利用轧后余热实现钢轨全长淬火的技术,为廉价的全长淬火钢轨开辟了广阔途径,无损探伤技术的应用提高了检测水平,能检查出细微的钢轨表面缺陷和内部缺陷。但钢轨的控制轧制和控制冷却技术有待进一步

的开发。在钢轨生产线上,从炼钢、连铸到万能轧机轧制及随后的处理工序已实现了自动化控制和信息自动化过程,为今后钢轨生产技术的进一步发展提供了条件。

本书系统总结了新中国成立近 60 年来,有关钢轨的生产技术、工艺操作经验和教训,全面介绍了提高产品质量所进行的研究工作和钢轨的新钢种开发情况以及钢轨的现代生产技术。本书适合于钢轨生产企业及使用部门的科研和技术人员以及高等院校相关专业师生参考。

本书的编写是由刘宝昇、赵宪明二人共同完成的。刘宝昇编写第 1 章、第 2 章和第 4 章,赵宪明编写第 3 章,栾瑰馥负责全书的主审工作。在拟定编写大纲、审查稿件以及指导编写等方面,栾瑰馥教授做了大量的工作,在此表示深深的感谢。

由于水平有限,书中不妥之处欢迎批评指正。

作 者

2009 年 3 月

目 录

1 国内外钢轨生产的发展	1
1.1 钢轨生产技术沿革	1
1.2 国外钢轨生产技术的发展	4
1.2.1 改进钢轨质量	4
1.2.2 改进钢轨断面外形和尺寸	6
1.2.3 提高成材率	6
1.2.4 高强度耐磨钢轨	6
1.2.5 贝氏体和马氏体钢轨	12
1.2.6 钢轨的重量、长度和专门试验设备	13
1.3 我国钢轨生产技术的发展	14
1.3.1 概述	14
1.3.2 钢轨的生产和设备更新	14
1.3.3 高强度耐磨钢轨的开发	15
1.3.4 钢轨控轧控冷的研究	16
1.3.5 提高钢轨质量和成材率	17
参考文献	17
2 我国钢轨生产技术回顾	19
2.1 平炉钢轨钢的熔炼与钢锭浇铸	19
2.1.1 平炉钢轨钢的熔炼	19
2.1.2 钢轨钢锭的浇铸	23
2.2 钢锭加热及初轧机开坯轧制	24
2.2.1 钢锭加热	24
2.2.2 初轧机钢锭的开坯轧制	27
2.3 钢坯表面缺陷清除及加热	30
2.3.1 钢坯表面缺陷清除	30
2.3.2 连续式加热炉及钢坯加热	32
2.4 轨梁轧机轧制及轧制缺陷调整	35
2.4.1 轨梁轧机轧制	35
2.4.2 轧制缺陷调整	48
2.5 钢轨钢质不良缺陷研究	57
2.5.1 钢轨的结疤、裂纹和分层	57

2.5.2 钢轨的低倍组织缺陷	68
2.6 钢轨的破损	86
2.6.1 核伤	86
2.6.2 鞍形磨耗	87
2.6.3 淬火过渡层掉肉	88
2.6.4 轨端淬火层金属剥落	89
2.6.5 波浪形磨耗	89
2.6.6 钢轨螺孔裂纹	91
2.6.7 压溃与不耐磨	93
2.6.8 剥离	93
2.6.9 钢轨的锈蚀	94
参考文献	94
3 现代钢轨生产技术	96
3.1 吹氧转炉冶炼钢轨钢及大方坯连铸	96
3.1.1 铁水预处理	96
3.1.2 吹氧转炉炼钢	98
3.1.3 炉外精炼	104
3.1.4 大方坯连铸	108
3.1.5 我国钢轨生产工艺与技术	115
3.2 钢坯加热	124
3.2.1 钢坯表面缺陷及清除	124
3.2.2 步进式加热炉及钢坯加热	128
3.3 钢轨的轧制	132
3.3.1 钢轨轧机及典型布置	132
3.3.2 钢轨万能轧机轧制	143
3.4 钢轨的轧后处理	157
3.4.1 钢轨的白点与缓冷处理	157
3.4.2 钢轨矫直	163
3.4.3 钢轨轨头淬火	173
3.5 钢轨的检测技术	191
3.5.1 钢轨无损检测技术	191
3.5.2 钢轨的平直度检测	196
3.5.3 钢轨残余应力检测	197
参考文献	203
4 钢轨新钢种开发	207
4.1 概述	207
4.2 中锰钢轨的开发	211

4.2.1 研制过程	211
4.2.2 线路局部考察和全面使用	233
4.2.3 鉴定转产	237
4.3 高硅钢轨的开发	238
4.3.1 研制过程	238
4.3.2 高硅钢轨接触焊接的研究	248
4.4 SiMnV 耐磨钢轨的开发	257
4.4.1 研制过程	257
4.4.2 科技成果鉴定	268
参考文献	268

1 国内外钢轨生产的发展

1.1 钢轨生产技术沿革

火车起源于西方,欧洲古代道路史记载希腊与埃及时代就有轨道模型,凿石为辙,置车其上,用牛马曳之,表明最早的轨道是石轨。路的辙宽、轨距,出现的年代有先后之分,意义相同,都是车轮运行的轨迹。钢轨和铁道,机车和车辆,它们的关系密不可分,它们的发展以机车的动力为主,方向是大运量和高速度;它们之间的发展关系是互动的,其用途是客、货运输。但古今中外的战车包括近代的坦克,在战场上是没有轨道可言的,战争往往在一个地区内进行。由于战争的特殊性,不论是战胜方的乘胜追击或战败方的奔逃,古代战车的驱动力必然是马。在我国,公元前 700 多年以前的春秋战国时代,战车的数量代表一个国家的威力和力量。在西方也是一样,公元前 55 年,古罗马的军队乘坐轮距为 143.55 cm 的战车侵入大不列颠岛。当地人仿制了很多这样的战车,在英国的道路上到处都深深地印有轮距为 143.55 cm 的车辙。

16 世纪以前以四轮马车为主的旅客和货物的长途运送已相当普及,为了使四轮马车沿着这种车辙行驶,英国人制造了很多轮距为 143.55 cm 的车,后来相沿成习。当英国出现火车的时候,火车的轮距、轨距也就采用了这个宽度,这就是大多数国家铁路的标准轮距都采用 143.55 cm 的由来。

对路、轨道的要求是运输方便,使客、货运量增大。道路也是随着人类社会的进步而发展的。随着炼铁技术的出现,人类进入铁器时代,从原始的自然通风,以农户为主的制铁户,过渡到用人力通风,官家和私人的炼铁厂。铁产量的不断增加,铁矿石和煤炭的采运量也迅速增加,随着社会对铁的需求量急剧增多,采矿运输业的兴起,要求提高运输能力。1660 年英国的纽卡司安坦矿将石轨改为木质轨,在实践中发现木质轨不耐磨,为解决耐磨问题起初在木质轨上钉木条,效果并不显著,又改为钉铁条。由于木制轨不能经久,承受不住越来越多的铁矿石运输,而这时炼铁的能力已大大提高,铁产量增加了,人们开始采用铸铁为轨,生铁轨比木质轨耐磨,铸件容易成形,其价格虽然比木质轨贵,但由于耐磨性能好、寿命长,生铁轨逐渐取代了木质轨。由于铸铁轨道的出现,人们就将其命名为铁道,这就是铁道名字的起源。铁道的出现也使畜力车增大了体积和载重量,同时提高了运输能力。因为畜力运输管理困难,天气变化、马匹伤病等原因无法保证运输稳定,因此急需寻找动力更大并能保证稳定运输的动力。

1820 年英国人瓦特发明了蒸汽机,他以煤炭做燃料,这种以蒸汽机为动力的机器问世,便迅速地应用到工业领域,并推动了英国的工业革命,也开始用蒸汽机作货车、客车的牵引。蒸汽机的功率比马车大得多,但早期制造的蒸汽机热效率低,功能有限。1829 年英国人乔治·斯蒂文森经多方考察和实验,发明了采用热交换原理,在炉膛内装置大量热交换管道,使管道内流动的水产生大量水蒸气,再由水蒸气推动活塞做功,带动拐臂并推动机车的主动轮,使之推动火车在铁道上运行,这一发明对机车的改进是革命性的。这种机车的牵引力和

速度超过了当时任何其他机车,其原理以后被普及并沿用了 100 多年。这种蒸汽机车的出现,大大提高了铁路运输能力,但生铸铁轨容易脆断的问题也暴露了出来。

1784 年发明了把生铁炒炼成熟铁的方法,生铁经反复炒炼可减少碳、磷、硫等低熔点杂质,提高了韧性,可以进行锻造或轧制防止轨道折断。1824 年又出现了经改进的炒炼熟铁的方法,扩大了熟铁的来源。从 1784 年到大约 1830 年,这些熟铁轨的形状大致为 T 字形。T 字形轨头的凸缘能限制车轮脱轨下道,人们为节省金属把 T 形轨镶嵌在木质或石质底座上。1831 年波奥·奥埃伯设计了每米重为 18 kg 的工字形轨,其断面形状已接近现代钢轨。以后有人设计出 U 字形断面铁轨,但在使用中 U 形轨被淘汰。

在工业革命的推动下,冶金技术迅速发展。1855 年美国发明了贝塞麦转炉炼钢法,廉价钢开始供应社会,酸性转炉炼钢法的出现,使钢轨的生产技术达到了一个新的阶段,酸性转炉钢轨的寿命比熟铁轨提高了 10 倍。

1858 年钢轨的形状基本固定下来,断面成工字形。当时钢轨每米重量为 38 kg。

托马斯发明了碱性转炉炉衬,可以在炼钢过程中去除硫、磷等有害杂质,碱性转炉生产的钢轨又比酸性转炉生产的钢轨质量好,这时轧钢机开始出现。

1865 年美国首先用轧制法生产了每米重量 22.6 kg 的钢轨。用轧制法生产的钢轨,无论是钢轨组织的致密程度、生产效率和断面尺寸的精度都比铸造方法生产的钢轨好,钢轨工字形断面形状与现代钢轨基本相同。钢轨虽然代替了铁轨,但因为起初命名叫铁道,铁道的名字一直沿用至今。

从 20 世纪初开始,平炉钢轨的生产得到了很大的发展。生产和使用数据证明,平炉钢轨的使用情况比酸性转炉钢轨和碱性转炉钢轨都好,约半个多世纪用平炉炼钢法生产钢轨一直占据优先地位。到 20 世纪 50 年代 LD 转炉炼钢法的出现,吹氧转炉又逐渐取代平炉,其优点是环保、节能、热效率高。以后炉外精炼、真空除氢、大方坯连铸、喷吹技术和粉末冶金的出现,使钢轨生产技术达到了更高水平。万能轧机的出现、改进与推广,提高了钢轨断面尺寸的精度和表面平直度。自动化技术、电子计算机的出现、改进和全面应用,使铁路运输业、炼钢、连铸实现了信息化、计算机自动控制,钢轨的生产技术向更高水平发展。

随着列车载重量的逐渐增大,机车牵引力不断强化,列车运行速度的逐步加快,钢轨的断面尺寸和单重也相应加大。由起初 1865 年的 22.6 kg/m,到 1900 年的 45.2 kg/m,发展到最近的 50 kg/m、60 kg/m、75 kg/m。在大运量的重载线路上,一般都采用 60 ~ 75 kg/m 钢轨,在一般的客运线上采用 50 ~ 60 kg/m 的钢轨。这些都使得钢轨生产朝现代化方向发展,一是钢轨断面和单重向重型化方向发展;二是钢轨的定尺向长轨化方向发展;三是钢轨的性能向高强度方向发展。钢轨断面的历史演变过程如图 1-1 所示。

最早铺设钢轨的时候,是一根接一根地钉在一起,夏天和冬天由于气温的变化引起钢轨热胀冷缩,把钢轨挤得东扭西歪。人们接受了这个教训,在钢轨之间留有适当的缝隙,让钢轨有伸缩余地,钢轨越长需要轨缝就越大。为了火车行驶安全,轨缝不允许太大。

但是由于轨缝的存在,又带来了不少害处,使列车经常产生剧烈振动,发出噪声影响旅客休息,同时也降低了车轮和钢轨的使用寿命,并给养路维修带来很大的麻烦。养护一条铁路花在接头处的费用要占全部养路费用的 40% 左右,而钢轨的破损有 60% 发生在接头处。长期以来人们寻找最大限度地消除轨缝的方法,于是出现了无缝线路,为此就提出了生产定尺更长钢轨的要求。

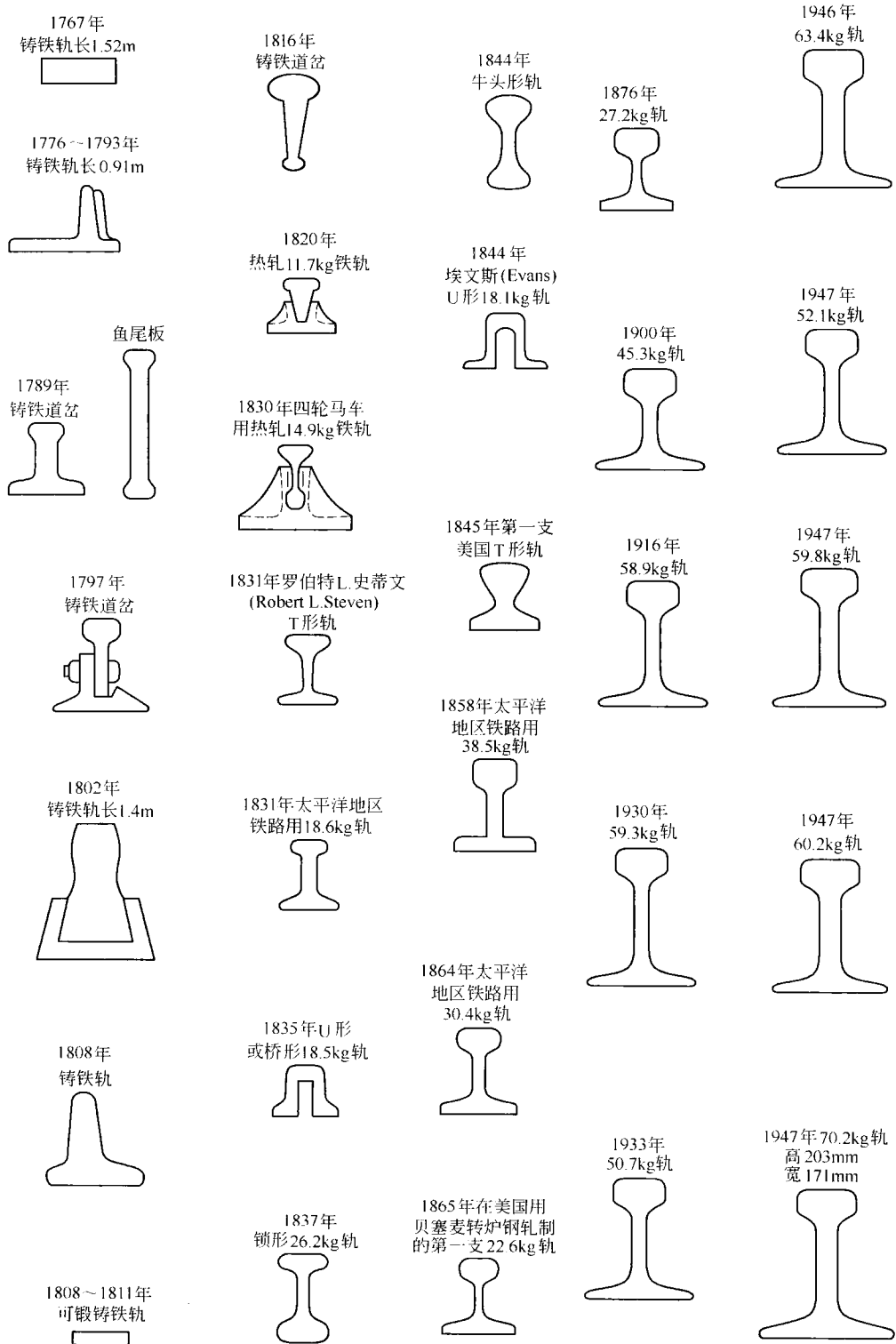


图1-1 钢轨断面的历史演变过程

无缝线路的萌芽在 20 世纪初期,1915 年德国在一条有轨电车道上,采用电弧焊方法焊接钢轨,铺设了 100 ~ 120 m 的长轨;1917 年美国在铁路的一些平交道口、站线、装煤线及过磅线上铺设了焊接长铁轨。到 20 世纪 30 年代,焊接技术获得飞速发展。1935 年德国开始将普通钢轨连续焊接起来的无缝线路正式在铁路上使用,20 世纪 60 年代进入大发展时期,到 70 年代初,世界上无缝线路超过了 20 万 km,占世界铁路总长的 16% 左右。英国铺设了一条全长 30 km 的无缝线路。无缝线路的铺设一般是先焊成 125 m 一根,其长度应该是标准定尺钢轨的倍数,运到工地后再焊成 1 ~ 2 km 长,为此就更要求钢轨制造厂生产更长定尺的钢轨。钢轨的标准定尺长度由 12.5 m 发展到 25.0 m、50.0 m,最近发展为 100.0 m,钢轨的定尺长度增长了 8 倍。

自 20 世纪 50 年代以来,铁路运输事业进入了高速发展时期,电力机车、特别是内燃机车的全面推广,结束了蒸汽机车时代,又有磁悬浮列车问世,机车的牵引力大幅提高。列车运行速度加快,从每小时 50 km 提高到 100 km、150 km、200 km、250 km、350 km 以上。矿山重载线路、运煤重载线路的出现,城市地铁的修建,线路上列车行驶越来越频繁,钢轨负荷大幅度增加,以前使用的普通碳素钢轨虽然经过多次改进,强度由 600 MPa 提高到 700 MPa、800 MPa,但仍然无法满足使用条件越来越苛刻的要求。钢轨不能满足使用要求的问题是:不耐磨、不耐压、轨端淬火层剥落掉块、钢轨出现压溃、使用寿命短,给线路养护造成很大困难。在这种情况下,迫使钢轨朝着高强度方向发展。钢轨生产厂研制、推广、大量生产合金钢轨、全长淬火钢轨,把钢轨的抗压强度提高到 900 MPa、1000 MPa、1100 MPa;硬度也从 HB240 提高到 HB260、HB280、HB300 以上。

根据断裂力学的研究,发现合金钢轨随着强度和耐磨性能的提高,其断裂韧性值降低,这表明伴随钢轨耐磨性能的提高,在线路上钢轨一旦出现重伤缺陷,发展为折断的速度会变快,必须加强检查,及时发现及时拆换。

随着电子显微镜的广泛运用,对钢轨的成分、组织与性能的关系有了较深的认识。到 20 世纪末人们普遍认为,组织为细致的珠光体即索氏体的钢轨其使用性能与金相组织是最可靠的。研究结果还表明,组织为珠光体的钢轨的性能已接近理论的极限值,大幅提高其性能的潜力很小。21 世纪铁路技术要进一步发展,可能需要开发新的钢轨钢。有人建议研究贝氏体或马氏体钢轨用钢,以期得到更好的耐磨、抗疲劳和断裂韧性好的钢轨钢。

1.2 国外钢轨生产技术的发展

国外钢轨生产技术的发展历史较长,新技术和新工艺不断涌现,如合金钢轨与全长淬火钢轨、钢轨的形变热处理和余热全长淬火等。

1.2.1 改进钢轨质量

提高钢轨质量主要是改进钢轨的内部质量和表面质量,因为钢轨的内部和表面缺陷是加速钢轨疲劳断裂的根本原因。

钢轨的内部质量主要取决于下列因素:冶炼过程中的脱氧和脱硫,钢锭的成分偏析状况,非金属夹杂物的上浮,轧制过程缩孔的切除,钢轨白点的预防,钢轨经冷却与矫直后的残余应力大小和分布及上述缺陷的恶性演变。

在脱氧制度方面,国外一般用铝、锰铁和硅铁进行脱氧,也有用硅钙脱氧的。用铝和硅

铁脱氧的主要优点是成本低,但往往在钢中出现较多的氧化铝和硅酸盐。硅钙合金对氧有很大的亲和力,其氧化物的熔点低,漂浮快。在美国曾试验用铝铁进行脱氧,发现对减少钢的偏析有效,但不经济。前苏联试验用硅钙合金、钒铁、钛铁、硅钒铁、硅钒钙铁和硅钼脱氧,提高了钢的纯净程度。国外还广泛研究用炉外精炼,包括合成渣洗、吹氧、吹氮处理、电渣重熔、吹硅钙粉、吹碳化钙粉来净化钢液。真空处理和真空浇铸也有助于减少钢中的夹杂物和气体,例如将盛钢桶在一般真空下处理 15 min 左右,钢中的氢含量降低了 75% ~ 80%,氧含量降低了 50% ~ 75%,并显著减少非金属夹杂,这对净化钢质、提高钢的韧性有利,但也将提高钢的成本。

众所周知,氢是产生白点的根本原因,为消除钢轨的白点缺陷,美、俄、中、日等国一般采用缓冷处理,重量为 42 kg/m 以上的钢轨轧后在坑内 500 ~ 200℃ 缓冷 10 h 以上,也有采用 580 ~ 620℃ 等温处理 2 ~ 3 h 消除白点的。近年来吹氧转炉炼钢和连铸钢坯的推广,都对减少氢含量有利,随着这些设备的大量使用,白点问题得到了基本解决。

钢锭的形式和重量对控制钢轨的内部质量和保证定尺有很大意义。良好的钢锭应该保证钢轨质量均匀,改善偏析和消除有害杂质。以前美、日、英等国是采用上小下大不带保温帽的钢锭模浇铸钢轨钢,内部普遍存在二次缩孔。为提高质量,近年来也逐渐采用上大下小带保温帽的钢锭。从组织生产的角度来考虑,钢锭模的种类和形式应当简化,要尽量采用统一模型,因此研究选择最合理的钢锭形式和重量是非常重要的。国外钢轨用钢锭的重量一般为 8 ~ 10 t,采用大的钢锭轧制钢轨,总压下量相对会大一些,这对改善质量有利,但是在选择大钢锭时,还必须依据初轧机、均热炉及装炉机的能力来考虑。

钢轨的表面质量越来越受到人们的重视。使用经验证明,轨底与轨头的表面缺陷对钢轨的使用寿命有很大影响,特别是轨底中央三分之一部位的裂纹、结疤、折叠等缺陷会显著降低钢轨的寿命。近年来高速列车的推广,不仅对钢轨的表面质量要求严格,同时对钢轨表面的不平顺也提出了新的要求,钢轨在使用中造成的外伤也必然损害使用寿命。为提高钢轨的表面质量,国外普遍采用在作业线上安装火焰清理机对钢坯进行全面扒皮,然后再进行补充检查处理。为防止冷坯火焰处理造成的“鸡爪”裂纹,钢坯一般是热扒皮。为改善轨底及轨头的表面质量,国外还普遍采用万能轧机,美国早在 1900 年申请了用万能轧机生产钢轨的专利,例如美国的格里厂采用万能轧机立辊使轨头和轨底得到补充加工降低了表面粗糙度。1965 年法国取得了万能轧机的专利权;日本 1968 年又从法国取得了专利技术。采用新型万能轧机生产钢轨的优点是轨底与轨头受到直接加工,因此大大改善了轨头与轨底的质量,减少头、底的缺陷,断面减缩率显著改善,旋转弯曲、疲劳性能提高 29 ~ 39 MPa。

钢轨在使用中最容易出现破损的部位是螺孔,由于疲劳裂纹沿螺孔开裂致使钢轨脆断而报废,因此对钢轨的钻孔要特别注意。钢轨钻孔后应进行扩孔、倒棱并去除毛刺,防止应力集中。据介绍扩孔 1.0 mm,疲劳强度提高 40%。随着焊接无缝线路比重日益加大,螺孔问题相对减少。

近来为提高钢轨质量采取的检测方法主要是,在作业线上进行超声波探伤。采用探伤交货的措施后,线路上事故显著减少,据法国铁道部门介绍,钢轨经超声波检查,可以挑出内部有缺陷的钢轨,并克服脆断等问题,与不经探伤的钢轨相比较,在使用头 5 年中,拆换的钢轨大约减少了 97%。采用探伤交货的办法可以防止漏检,还能发现冶炼和浇铸中的问题,指导改进操作。

为推动改善钢轨质量,铁道部门还应及时了解、收集各钢厂钢轨在使用中的质量问题,必要时还应邀请有关厂共同进行考察,以便促进钢轨质量的提高。

1.2.2 改进钢轨断面外形和尺寸

为适应铁路运输的发展,钢轨的外形、尺寸需要不断的改进。

轨顶踏面外形:国际铁路联盟美、日、德等国,为改善轨头踏面与车轮的接触条件,钢轨的顶面采用了复曲线的外形轮廓,与比较平的轨头相对比,复曲线的轨头踏面较为凸出,可使车轮的压力较集中地作用于轨顶中心,从而降低了钢轨的附加应力。

轨头侧面:一般多采用上窄下宽斜度为 1:20 的斜线,与垂直型的侧面相比较,带斜度的侧面有利于降低轨头与轨腰连接处的应力,增大鱼尾板的受力面积。

从轨头到轨腰的轮廓:大都采用一个较大半径的圆弧来连接,这会增加钢轨与鱼尾板之间的摩擦阻力,使轨缝的变化较小,也对无缝线路有利。

轨腰:大都采用复曲线,是为了使轨腰到轨底的过渡平顺。

很多国家有增加轨腰厚度的趋向,以增加钢轨的惯性矩来抵抗挠曲。美、日、俄等国逐渐增加钢轨高度,同时还考虑钢轨的稳定性,目前钢轨的高(H)宽(B)比已增加到 $H/B = 1.2$ 。

为提高钢轨断面形状、尺寸精度,俄罗斯库钢在轧制方法和孔型设计方面进行了一系列的革新。新的孔型设计是在轧制过程中保证钢轨头部的金属向腰部流动,把成品孔和成品前孔结合起来考虑,准确地控制轨头和轨底变形。成品前孔采用了在轨头中间和轨底的靠近边部为开口的形式,还适当加大了成品孔轨头的上下圆角和踏面的圆弧半径。这就使孔型的计算方法以及成品孔和成品前孔的调整发生了根本变化。钢轨出成品孔后,再经万能轧机立辊加工,使轨头和轨底表面光洁、平顺,收到了显著效果。轨头纵向不平顺减小 0.1~0.2 mm,提高了轨端的平直度,还细化了晶粒,根据三次试轧结果,P-65 型重型钢轨的一级品率高达 98.5%,已经推广应用。

1.2.3 提高成材率

提高钢轨的成材率主要是积极发展连铸坯的生产。与模铸法相比较,连铸钢轨的成材率提高约 7%。英国的谢尔顿和沃金顿厂,先后于 1971~1974 年用连铸坯生产钢轨 100 多万吨,起初只允许生产普碳轨,后来低合金耐磨轨和含铬 1% 的特级耐磨钢轨都采用连铸生产,现在英国的钢轨已全部用连铸坯生产,南非和加拿大也用连铸坯生产钢轨。1975 年苏联试验了连铸钢轨,表面质量优良,低倍组织令人满意。为改善连铸坯的内部和表面质量,1978 年日本的八幡厂采用了控制钢液温度、无氧化浇铸,合理选择浸入式水口材质,使非金属夹杂物减少了一半;通过轻微的电磁搅拌,使等轴晶比率增加 40%,改善了中心偏析;采用减少单位水量控制冷却,在防止内部裂纹上取得成效,目前已完全做到可以生产无裂纹的连铸坯,钢坯表面质量优良,内部质量稳定,成材率提高,钢轨的力学性能与模铸法相同。

1.2.4 高强度耐磨钢轨

获得高强度耐磨钢轨的主要方法有二种:一是合金化;二是热处理。如果将合金钢轨进行热处理就会使钢轨的强度提高到更高的水平。

1.2.4.1 合金钢轨

绝大多数的合金钢轨是在热轧状态下使用,它的强化机制主要是固溶强化、弥散强化和细晶强化。固溶强化和弥散强化在提高强度的同时恶化韧性,而细晶强化是同时提高强度和韧性,因此在选择合金元素时,必须考虑应符合上述强化机理的要求。在钢轨钢中符合固溶条件的合金化元素有碳、硅、锰、铬、镍、钼、铜等,这些元素通过置换或间隙固溶强化了铁素体和珠光体,改变了珠光体和铁素体本身的组分,增强了钢的力学性能。因为硅、锰、铬等合金元素加入钢中使碳的共析点S向左移动,因此在碳含量相同的条件下,钢中加入硅、锰、铬等元素就相对地增加了珠光体的含量,提高了钢的强度。符合弥散强化和细晶强化条件的元素有铝、钒、钛、铌、锆、氮等,铝对氧有很大的亲和力,钢中加入适量的铝可以获得细晶粒的钢;钒、钛、铌、锆等是强烈形成碳化物的元素,这些碳化物在加热和冷却过程中可以固溶和弥散析出,有利于相变的形核并阻止晶粒长大,从而细化晶粒,因为这些碳化物还呈弥散析出,所以它们既起到弥散强化的作用又起到细晶强化的作用。氮是通过间隙固溶实现钢的强化;而铬与锰可以形成复合渗碳体 $(\text{Fe}, \text{Cr})_3\text{C}$ 、 $(\text{Fe}, \text{Mn})_3\text{C}$ 并提高钢轨的耐磨性能。铜、铬和适量的磷形成的氧化薄膜,可以显著改善钢轨的抗大气腐蚀能力。

研究结果还表明,符合固溶条件的元素硅、锰、铬等也可以起到细化晶粒的作用,这是因为硅、锰、铬加入钢中会阻碍碳原子和铁原子在相变时的扩散,同时它们本身在奥氏体中的扩散速度也比较迟缓,因此在加热和冷却过程中 Fe_3C 、 $(\text{Fe}, \text{Cr})_3\text{C}$ 、 $(\text{Fe}, \text{Mn})_3\text{C}$ 和硅、锰、铬等向奥氏体中的溶解或自奥氏体内向外扩散的过程较为缓慢,造成了碳化物扩散和溶解的困难,增大了奥氏体的稳定性,使钢的相变过程迟缓,因而改变了钢的相变温度,使C曲线向右移动,增大了珠光体的孕育期,导致珠光体层片间距变小,从而细化了晶粒,提高了钢的力学性能。

从国外的发展情况来看,耐磨合金钢轨按强度大致可分两类:强度大于883 MPa的耐磨钢轨和强度大于1079 MPa的特级耐磨钢轨,近年来大量生产耐磨钢轨是钢轨发展的一个重要趋势。

1.2.4.2 耐磨钢轨

耐磨钢轨是指极限强度大于883 MPa的合金钢轨。国外经过50多年的发展,目前很多国家在研究、生产和采用合金元素方面大致相近,都是在碳素钢轨的基础上,首先是充分发挥碳的强化作用,然后再适当调整碳和增加锰、硅等廉价的合金元素来达到提高强度的目的。但是对钢中碳、锰、硅等元素的具体含量,目前各国的看法并不一致,很多国家在研制、生产和使用耐磨轨方面取得了良好的经济和技术效果。例如西德从1950年开始试用合金钢轨,1970年全部生产A类耐磨钢轨,耐磨钢轨在线路的铺设量已超过50%,据报道通过1亿t运量后耐磨轨与碳素轨相比较,在平直线段磨耗量的比例为0.7:1,在坡曲线段为0.4:1。近年来西欧铁路联盟各国都生产强度不低于883 MPa的耐磨钢轨,而美国则采用并发展高碳钢轨,试验结果表明,把碳素钢轨中的硅含量提高到0.6%~0.8%可以显著降低钢轨的磨损,减少剥离缺陷,抗拉强度比碳素钢轨提高39~49 MPa。1978年苏联文献报道,把平炉钢轨的硅含量从0.13%~0.28%,提高到0.18%~0.40%,极限强度提高了15 MPa,耐磨性能提高了10%。各国耐磨钢轨的化学成分和力学性能如表1-1所示。

表 1-1 各国钢轨的化学成分及强度

国 名	标准代号	钢 号	化学成分(质量分数)/%					R_m/MPa
			C	Si	Mn	P	S	
欧 洲	UIC860	A 级	0.6 ~ 0.75	≤ 0.5	0.8 ~ 1.3	< 0.05	< 0.05	> 883
		B 级	0.5 ~ 0.65	≤ 0.5	1.3 ~ 1.7	< 0.05	< 0.05	> 883
		C 级	0.45 ~ 0.60	≤ 0.3	1.7 ~ 2.1	< 0.03	< 0.03	> 883
美国、加拿大	ASTM		0.67 ~ 0.8	0.1 ~ 0.23	0.7 ~ 1.0	< 0.04	< 0.03	> 883
			0.69 ~ 0.82	0.1 ~ 0.23	0.7 ~ 1.0	< 0.04		834 ~ 932
俄罗斯	ГОСТ	6944-54	0.67 ~ 0.80	0.13 ~ 0.28	0.7 ~ 1.0	< 0.04	< 0.05	> 785
		8160-56	0.69 ~ 0.82	0.13 ~ 0.28	0.7 ~ 1.0	< 0.04	< 0.05	> 785
日 本	JIS		0.6 ~ 0.77	0.5 ~ 0.8	0.6 ~ 0.95	< 0.04	≤ 0.035	932 ~ 1030
中 国		中锰轨 (AP ₁)	0.65 ~ 0.77	0.15 ~ 0.35	1.1 ~ 1.5	< 0.04	≤ 0.04	> 883
		U-Si	0.65 ~ 0.75	0.85 ~ 1.15	0.85 ~ 1.15	< 0.04	≤ 0.04	> 902

1.2.4.3 特级耐磨钢轨

根据国外的使用经验,随着运输量的增加,每天平均运量在 4 万 t 以上的小半径曲线地段应该铺设特级耐磨钢轨。

特级耐磨钢轨是指极限强度大于 1079 MPa 的合金钢轨,在国外这种钢轨还用于时速 120 ~ 300 km 的线路和轴重大的弯道上。高强度合金钢轨一般对缺口都比较敏感,因此对待有明显外伤和内伤的这种钢轨,在使用过程中应当密切注意。近年来不少国家研制并积极生产特级耐磨钢轨。值得指出的是,各国选用的合金元素极不一致,例如有的用铬、铬锰、铬钼、铬硅、铬钼硅、铬钼钒,有的用硅锰,也有选择多元素综合利用的。发展特级耐磨钢轨到底选择哪些合金元素最为合适,这首先要着眼于经济问题,应当从本国的合金元素资源和来源考虑。由于各国合金元素的资源和来源不同,所以选用的合金元素也不一致。如美国、俄罗斯、加拿大等国铬的资源丰富,就着重发展以铬为主的特级耐磨钢轨;美国的钼矿较多,有条件研制含钼的钢轨;德国也发展含铬的特级耐磨钢轨。实践证明含铬的特级耐磨钢轨是成功的,在德国和俄罗斯进行了较大规模的工业生产,并取得了显著的经济和技术效果,如在德国的克虏伯钢铁公司,生产了含铬 0.7% ~ 1.2%、极限强度为 1079 MPa 以上的特级耐磨钢轨,铺设结果表明,它的耐磨性能比 A 类耐磨钢轨提高一倍;俄罗斯生产了含铬 0.5% ~ 1.0% 的钢轨,使用寿命比碳素轨提高一倍半。美国在普通碳素钢轨的基础上加入铬 0.6% ~ 1.15%、钼 0.18% ~ 0.28% 和少量的钒,铬钼钢轨的极限强度为 981 ~ 1177 MPa。澳大利亚也试验了合金钢轨。日本文献介绍了合金钢轨,强度极限为 1010 ~ 1226 MPa。德国的克虏伯钢铁公司又研制了一种极限强度为 1373 MPa 的新型钢轨,它的化学成分(质量分数)是碳 0.3%、锰 0.4%、硅 0.3%、铬 3.0%、钼 0.5%,显微组织为贝氏体,根据铺设情况,这种钢轨具有较高的耐磨、抗压和疲劳性能,同时还有较高的断裂安全系数和良好的可焊性。如果把最近国外研制的特级耐磨钢轨,按碳含量来分,有高碳、中碳和低碳三类,其中最多的是高碳类。各国特级耐磨钢轨的成分和力学性能见表 1-2。

表 1-2 各国特级耐磨钢轨的成分和力学性能

国名	厂别	化学成分(质量分数)/%											力学性能		
		C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	V	B	Al	Nb	R_m /MPa	A/%	HB
德国		0.65~0.75	≤0.05	0.8~1.5	≤0.05	<0.05							>883	≥10	
	Fried Krupp	0.65~0.80	0.3~0.9	0.8~1.3	≤0.03	≤0.03	0.7~1.2						≥1079		
		0.7	0.73	1.05			1.0						1128	12	315
		0.3	0.3	0.4			3.0	0.5					1373	16	
	Aug Thessen	0.65	0.6	1.05			1.15		0.2				1128	12	320
	Klockner	0.65	0.3	0.8			1.0	0.1	0.1				1128	12	325
日本		0.33	0.33	1.2	0.018	0.008	1.17	0.2	0.07	0.002	0.02		1079	17	320
		0.54	0.37	1.43	0.021	0.006	1.01		0.05		0.021		1010	18	290
		0.72	0.92	1.37	0.022	0.010					0.020		1010	16	270
		0.69~ 0.77	0.14~ 0.82	0.87~ 1.32	0.013~ 0.02	0.008~ 0.01	0.82~ 0.85	≤0.18	0.07~ 0.12		0.018~ 0.037		1059~ 1216	12.2~ 17.5	295~ 351
美国	CF&I	0.75	0.65	0.80									981	11	285
	Climax	0.75	0.20	0.90			0.80	0.20					1177	13	350
		0.70~0.75	0.25~0.75	0.6~1.05			0.6~ 1.15	0.18~ 0.28					981~ 1177		
俄罗斯		0.63~0.75	0.13~0.28	0.7~1.0			0.5~ 1.0						1000~ 1085		
英国		0.65~0.75	≤0.05	0.8~1.2	≤0.05	≤0.05							>883	≥10	
	British Steel	0.75	0.35	1.25			1.15						1128	11	325
	Algome	0.75	0.25	0.75			1.30						1079	9	300
加拿大	Sydney	0.70	0.20	1.65			0.60		0.10				1128	10	375
		0.70	0.55	1.10			0.80					0.04	1128	10	330
法国	Saellor	0.70		0.75			0.80						1079	9	
澳大利亚	Broken Hill	0.70	0.20	0.95			0.80	0.20	0.05				1275	13	410
UIC		0.55~0.80	0.5~0.9	0.8~1.2	<0.03	<0.03	0.7~1.1						>1079		

1.2.4.4 复合钢轨和高锰钢轨

在日本和德国都研制过复合钢轨。轨头采用耐磨的合金钢质,化学成分为碳 0.7%~0.75%、硅 0.3%~0.6%、锰 0.62%~0.75%、铬 1.0%~1.59%,硬度达 HB340,轨腰与轨底则采用高韧性的低碳钢。这种钢轨的制造工艺复杂,主要是浇铸钢锭时两种金属不易很好的焊合,因而降低使用寿命。含碳 0.9%~1.4%、锰 10%~14%的高锰钢轨一般使用在道岔上,能大大提高耐磨性能。高锰钢的组织是奥氏体,具有冷作硬化的特点,开始使用时硬度很低容易被压溃,但经过车轮的往复作用以后,在表面会形成硬度达 HB550 左右的硬化层,使用效果很好。由于高锰钢的生产工艺复杂,因此没有得到广泛使用。

日本还研制了含铬 3% ~ 5% 的耐磨蚀、耐磨合金钢轨,见表 1-3,并在青森到函馆线路的隧道中采用了金属覆膜和有机树脂处理等技术,改善了腐蚀条件。

表 1-3 耐腐蚀、耐磨钢轨

试验 编号	化学成分(质量分数)/%									力学性能	
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Cu	Mo	Nb	R_{el}/MPa	R_m/MPa
1	0.08	0.11	0.62	0.015	0.014	4.91	0.10	0.33		932 ~ 981	1177
2	0.13	1.18	0.68	0.017	0.014	4.85	0.12	0.35			1324
3	0.19	0.21	1.08	0.014	0.009	3.13	0.13		0.07		1265

1.2.4.5 热处理钢轨

热处理是改善钢轨强度提高寿命的又一重要方法,近来热处理钢轨的生产得到了迅速发展。

热处理钢轨主要是钢轨的全长淬火。全长淬火是将钢轨重新加热到 810 ~ 1020℃,或利用轧制余热进行急速冷却,获得细珠光体组织,使钢轨的性能达到特级耐磨钢轨的水平。经全长淬火的钢轨,其强度、耐磨性能获得提高的同时,冲击韧性也得到显著改善。与合金化方法相比较,热处理方法有很多优点。但是由于钢轨的长度和重量都比较大,钢轨是异形断面钢材,在热处理过程中很容易出现严重变形,给热处理以及事后的矫直带来很多麻烦,钢轨内部容易产生比较大的残余应力。因此发展热处理钢轨的先决条件是首先要有可靠的热处理设备,还要注意改进工艺。为保证淬火后钢轨的定尺长度,进行淬火的钢轨要严格控制长度,准确地测定钢轨经淬火和矫直后长度的变化量。还要进行修整,清除轨头和螺孔的毛刺。

目前钢轨全长淬火按加热方式的不同可以分为 4 类,即钢轨在煤气炉内加热淬火、中频电流感应加热淬火、火焰加热淬火和利用轧制余热加热淬火。

(1) 钢轨在煤气炉内加热淬火。钢轨的加热温度为 810 ~ 850℃,根据使用介质之不同淬火可分三种方法,即油内整体淬火、用热水沿轨头踏面淬火和用水雾沿轨头淬火并使轨底中部适当强化。

在油中进行整体淬火的钢轨,应首先在辊底式炉内加热到 810 ~ 850℃,整体移入浸在油中的滚筒内,以 100℃/min 的速度连续冷却,然后在 450℃ 的等温炉中保温 2 h 进行回火,以达到淬火层的硬度均匀一致,并减小因淬火而引起的残余应力。钢轨经垂直矫直机和水平矫直机的矫直,如果仍有局部变形,还应在冲压机上补充矫直。

要研究降低钢轨残余应力方法,使残余应力分布合理,并有利于增加轨头的接触疲劳强度,同时也增加轨腰和轨底的疲劳强度。

俄罗斯有关文献认为,钢轨整体油淬火的使用效果较好,美国的斯蒂尔顿和俄罗斯的下塔吉尔都是采用这种方法进行全长淬火。

俄罗斯的捷尔仁斯基厂使用的方法是钢轨用热水沿轨头踏面淬火。据介绍,转炉钢轨用水淬火时,轨头朝下,钢轨高速通过淬火设备。淬火设备由带有辊子的机架和纵向槽组成。槽内热水流动,轨头上部放入热水中,钢轨经淬火后,用热弯机将钢轨弯向轨底,再自身回火。预弯和自身回火结合起来可以使轨头的残余应力具有合理的分布,使轨头处于适当的拉应力状态。

(2) 中频电流感应加热淬火。感应电流加热表面淬火是轨头采用中频电流感应加热,轨底用 50 Hz 的工频电流进行预热,以防止淬火后的钢轨出现严重变形。淬火介质有的用水、水雾、压缩空气,也有试验用沸水作淬火介质,但总的趋势是采用水雾和压缩空气。这种淬火方法的主要优点是淬火后的弯曲度小(0~80 mm)。据介绍经这样全长淬火的钢轨,轨头踏面角部的不平顺不超过 0.2~0.3 mm,轨端变形不超过 0.5 mm,钢轨总的变形量很小,矫直方便。但由于淬火设备的某些不完善,淬火后钢轨的力学性能和硬度有很大的不均匀性。因此感应电加热淬火工艺有待进一步完善。美国的格里厂、俄罗斯的亚速钢厂、日本的八幡及福山大型厂都是采用这种方法进行全长淬火的。

1980 年日本试制了新热处理钢轨(NHH)用压缩空气淬火后空冷,轨头踏面淬火层深约 25 mm,获得微细的珠光体组织,其层片间距约为 0.1 mm。这种新淬火方法的突出特点是可以调整热处理装置来防止钢轨出现弯曲,淬火后钢轨几乎没有残留变形。

(3) 火焰加热淬火。这种方法过去多为铁路现场用来对弯道钢轨进行淬火,它的优点是设备简单,比较便宜,缺点是质量不稳定。1970 年美国在火焰淬火方法上公布了专利,两根钢轨可以同时固定在固定的火焰装置下面通过,用煤气和氧气加热,热量得到充分利用。在加热和淬火过程中还能防止钢轨歪扭,美国的普韦布罗厂采用火焰加热淬火。

(4) 利用轧制余热加热淬火。利用轧制余热进行全长淬火是比较经济的方法,控制终轧温度在 900℃ 左右,钢轨高速通过淬火设备,利用喷水、水雾或压缩空气进行全长淬火、自身回火,提高钢轨的强度和使用寿命,西欧、美洲和前苏联很早以前都试验过这种方法。它的缺点是质量不稳定,硬度及淬火层不均匀,容易出现淬火裂纹,钢轨的白点缺陷无法保证清除,其使用效果并不显著,因此无法推广大批量生产。

低氢冶炼、形变热处理和电子计算机、自动控制等技术的发展,为研究利用轧制余热进行全长淬火开辟了可靠的广阔前景。俄罗斯研究结果表明,形变热处理,即增大成品孔的压下量并利用余热全长淬火,可以显著提高钢轨的力学性能,出成品孔后用水雾冷却,自身回火,钢轨的力学性能达到了在油中整体淬火的水平。最近法国在全长淬火工艺方面取得了专利,这说明钢轨的形变热处理是今后研究的方向。

实现全长余热淬火的前提条件是实现低氢冶炼消除白点,采用吹氧转炉炼钢就会实现低氢冶炼。日本文献报道了用转炉炼制钢轨钢就没有白点,文献介绍用氧气转炉吹炼的钢轨钢,经连铸或浇铸成钢锭,无论是轧后或热处理后都未发现白点。这充分说明把平炉改为吹氧转炉,再注意原料、合金、大罐、整模及流钢系统的烘烤并保持干燥,就可以有效地防止白点缺陷,取消缓冷工艺。

在实现低氢冶炼取消缓冷工艺的基础上,进一步改造轨梁厂,实现全长余热淬火。在成品孔后或热锯后面安装钢轨全长余热淬火设备,包括电子计算机、自动控制装置和淬火机组等,自动地测量钢轨的温度,并根据事先选定的工艺参数自动确定淬火时间,淬火时间由钢轨在淬火机架中运送的距离自动调整,以获得细珠光体组织;同时还要保证使轧机能力和淬火处理作业线之间有可靠的平衡,并采取有效措施减小钢轨内部的残余应力。实现全长余热淬火,比现有的各种淬火方法都具有更好的经济性,节约能源且成本低,但难度也大,是高水平的新技术、新工艺。

日本开发的在线钢轨热处理技术,20 世纪 90 年代投产。经全长淬火的钢轨,淬火层的形状为帽形,深度 15 mm 以上,淬火层的硬度约为布氏 HB360。各国淬火钢轨的力学性能