

“十一五”国家重点图书

铁路客运专线（高速）轨道结构关键技术丛书

# 无缝道岔 计算理论与设计方法

王平 刘学毅 著

WUFENGDAOCHA  
JISUANLILUN YU SHEJIFANGFA



西南交通大学出版社  
[Http://press.swjtu.edu.cn](http://press.swjtu.edu.cn)

国家高技术研究发展计划(863计划)资助  
新世纪优秀人才支持计划资助  
教育部博士点基金成果  
西南交通大学创新团队培育计划资助

“十一五”国家重点图书

铁路客运专线(高速)轨道结构关键技术丛书

# 无缝道岔计算理论与设计方法

王平 刘学毅 著

西南交通大学出版社

·成都·

---

图书在版编目 ( C I P ) 数据

无缝道岔计算理论与设计方法 / 王平, 刘学毅著. 一成都: 西南交通大学出版社, 2007.12 (2008.5 重印)  
(铁路客运专线 (高速) 轨道结构关键技术丛书)  
ISBN 978-7-81104-540-6

I. 无… II. ①王…②刘… III. ①无缝线路轨道—道岔—计算②无缝线路轨道—道岔—设计 IV. U213.6

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 199701 号

---

铁路客运专线 (高速) 轨道结构关键技术丛书

无缝道岔计算理论与设计方法

王 平 刘学毅 著

\*

责任编辑 万 方

责任校对 李 梅

封面设计 本格设计

西南交通大学出版社出版发行

(成都二环路北一段 111 号 邮政编码: 610031 发行部电话: 028-87600533)

<http://press.swjtu.edu.cn>

四川森林印务有限责任公司印刷

\*

成品尺寸: 170 mm × 230 mm 印张: 19.125

字数: 355 千字

2007 年 12 月第 1 版 2008 年 5 月第 2 次印刷

ISBN 978-7-81104-540-6

定价: 38.00 元

图书如有印装质量问题 本社负责退换  
版权所有 盗版必究 举报电话: 028-87600562

# 序

铁路客运的高速化是适应社会需求的一项重要技术政策。根据国家“十一五”规划,至2010年底,我国将建成5 000公里客运专线,至2020年将初步建成12 000公里的高速铁路运输网。

由于铁路客运专线客车运行速度高,振动荷载大,传统的有砟轨道变形快,轨道几何尺寸维护难,轨道平顺性差,难以满足高速列车舒适性与安全性要求。因此,无缝道岔、无砟轨道、高速道岔等结构技术便成了高速铁路轨道结构中的关键技术。

“十一五”国家重点图书出版规划中,《铁路客运专线(高速)轨道结构关键技术丛书》为系列专著,主要包括《无缝道岔计算理论与设计方法》、《无砟轨道结构与设计方法》、《轨道结构理论与轨道动力学》、《车辆—轨道—路基系统动力学》、《高速道岔设计理论与实践》、《桥上无缝道岔计算理论》等,系作者们在承担国家自然科学基金规划项目——铁路客运专线轨道结构及修建技术的研究工作中攻克的主要难题和取得的主要成果的总结,它反映了我国客运专线(高速)轨道结构研究的最新技术水平。将这些成果编著出版,对我国客运专线的设计与修建具有重要的指导作用和现实意义。

《无缝道岔计算理论与设计方法》为系列专著的首册。无缝道岔钢轨受力与变形的计算是无缝道岔设计的核心与难点。由于道岔外股基本轨基本不动,内股尖轨和心轨则处于可伸缩状态,使得钢轨的温度力与伸缩位移

的理论分析比较复杂。我国不少学者及科研工作者各自提出了不同的理论计算方法，对无缝道岔的理论研究做出了有益的贡献。作者在上述计算理论的基础上，吸收了各种计算理论的优点，对于某些局限作了必要的补充，采取了有限单元分析方法，建立了新的模型，其合理的单元划分使道床阻力、扣件阻力、限位器、间隔铁等阻力因素（非线性）得到较全面、真实的反映。这种无缝道岔有限元法计算理论，其特点是能更方便地对道岔的每个作用力的变化、对道岔结构各个部分的作用进行具体分析。作者利用有限单元计算理论，对影响无缝道岔钢轨内的温度力与位移的 12 种主要影响因素进行了大量的计算分析，得出了一般性的规律，这对加强道岔结构和道岔设计起到了理论指导作用。

本书内容对无缝道岔的计算理论和设计方法的普及与提高起到了有益的推动作用。该书对从事轨道工程教学、科研、设计及工程管理人员具有重要的参考价值。

— 万 复 光 —

2007 年 8 月

# 前 言

无缝线路是 20 世纪轨道结构进步的突出标志，是与重载、高速相适应的轨道结构。跨区间无缝线路最大限度地减少了钢轨接头，全面提高了线路的平顺性和整体强度，其优越性较普通无缝线路更为突出，因而从 20 世纪 90 年代开始在我国推广应用。

无缝道岔是实现跨区间无缝线路的关键技术之一。随着我国铁路干线的六次提速及客运专线的建设，无缝道岔技术得到了全面发展：直向过岔速度已从 120 km/h 逐渐提升至 160 km/h、200 km/h、250 km/h 乃至 350 km/h；道岔系列也不断完善，已自主研发了 9 号、12 号、18 号、30 号、38 号、42 号无缝道岔；辙叉型式由固定辙叉逐渐发展成长翼轨可动心轨辙叉；转换锁闭结构由联动内锁逐渐发展成燕尾分动外锁、钩型分动外锁和自调式分动外锁，锁闭能力逐渐加强，且更能适应无缝道岔尖轨及心轨的伸缩；为实现既有线道岔的无缝化改造，引进和研发了高锰钢辙叉与普通钢轨的厂内焊接技术，开发了奥贝氏体钢组合辙叉，可实现心轨与区间钢轨的焊接；等等。

但是，由于我国无缝道岔技术起步较晚，在理论分析、结构设计、运输铺设、养护维修等方面积累的经验尚不够充分，致使道岔出现了转换卡阻、传力部件破损变形、尖轨侧拱、心轨爬台等病害，特别是在大号码道岔中，长大尖轨的转换卡阻问题尚未得到彻底解决。这一方面需要对外锁闭结构进行优化设计，另一方面也需要对无缝道岔的结构进行优化设计，尽可能控制尖轨及心轨的伸缩位移，同时又能保证钢轨及传力部件的强度与稳定性。

在无缝道岔发展过程中，其计算理论也得到了迅速发展。国内专家学者先后提出了当量阻力系数法、两轨相互作用法、广义变分法等计算理论，本书即是在这些计算理论的基础上，基于有限单元法，将其进一步完善和发展的。由于影响无缝道岔受力与变形的因素很多，如轨温变化幅度、各种阻力、道岔结构、焊接方式、道岔群布置形式等，采用有限单元法可以较详细地对这些影响因素进行综合分析，因而在无缝道岔结构设计中得到了较好的应用。

随着跨区间无缝线路的推广应用，无缝道岔开始铺设于无砟轨道基础上、铺设于桥梁上，无缝道岔—桥梁—墩台的相互作用较桥上无缝线路和路基上无

缝道岔更为复杂,需要将桥上无缝线路与无缝道岔计算理论相结合并进一步发展才能掌握无缝道岔与桥梁的纵向相互作用规律,才能指导无缝道岔铺设于桥梁上的设计。

全书共分五章。第一章介绍了国内外无缝线路的发展概况;第二章介绍了无缝道岔的结构特点与设计方法;第三章在总结分析关于无缝道岔各种计算理论的基础上,建立了无缝道岔有限单元计算理论及稳定性分析方法,提出了计算参数的选取、设计检算项目与检算指标;第四章分析了影响无缝道岔受力及变形的各种因素,为道岔结构及跨区间无缝线路设计提供了有益的参考;第五章分析了无缝道岔铺设于隧道洞口、无砟轨道基础上和桥梁上时的受力与变形规律,建立了岔—桥—墩纵向相互作用计算理论,提出了无缝道岔铺设于桥梁上的设计原则。

在开展无缝道岔设计理论与设计方法研究的过程中,得到了铁道部科技发展计划项目、教育部博士点基金项目和新世纪人才基金项目资助;同时还得到了北京交通大学范俊杰教授和高亮教授、铁道科学研究院卢耀荣研究员和马占国副研究员、中南大学陈秀方教授、中铁山桥集团有限公司王柏重教授级高工、中铁宝桥股份有限公司王全生教授级高工的大力支持和帮助。在写作过程中,轨道教研室的杨荣山讲师及作者指导的硕士研究生、博士研究生们提供了大量的算例,在此一并表示感谢。特别要感谢万复光教授对本书的成稿给予了热情鼓励和关心,并亲自为本书审稿、作序。

本书由西南交通大学出版基金资助出版。本书作者对支持、帮助和关心本书出版的各位同行、出版者致以诚挚的谢意!

限于作者水平,书中错误之处在所难免,敬请广大读者批评指正。

王 平 刘学毅

2007年6月28日于成都

# 目 录

|                               |     |
|-------------------------------|-----|
| 第一章 概 述 .....                 | 1   |
| 第一节 国外铁路无缝线路的发展 .....         | 1   |
| 第二节 我国铁路无缝线路的发展 .....         | 4   |
| 第三节 跨区间无缝线路关键技术 .....         | 9   |
| 第二章 无缝道岔结构与设计 .....           | 11  |
| 第一节 国外高速铁路无缝道岔设计理念及结构 .....   | 12  |
| 第二节 我国的无缝道岔结构 .....           | 24  |
| 第三节 无缝道岔结构设计 .....            | 48  |
| 第四节 跨区间无缝线路设计 .....           | 61  |
| 第三章 无缝道岔计算理论 .....            | 66  |
| 第一节 无缝道岔计算理论的发展 .....         | 66  |
| 第二节 无缝道岔有限单元法计算理论 .....       | 101 |
| 第三节 无缝道岔稳定性分析 .....           | 118 |
| 第四节 无缝道岔计算参数 .....            | 125 |
| 第五节 无缝道岔检算项目与检算指标 .....       | 130 |
| 第六节 无缝道岔试验与验证 .....           | 139 |
| 第七节 无缝道岔计算方法与举例 .....         | 153 |
| 第四章 无缝道岔受力与变形规律 .....         | 156 |
| 第一节 计算参数 .....                | 157 |
| 第二节 无缝道岔的钢轨温度力及位移分布规律 .....   | 158 |
| 第三节 轨温变化幅度对无缝道岔受力与变形的影响 ..... | 160 |
| 第四节 不同号码的无缝道岔受力与变形分析 .....    | 164 |
| 第五节 不同辙叉形式的无缝道岔受力与变形分析 .....  | 169 |
| 第六节 不同辙跟形式的无缝道岔受力与变形分析 .....  | 173 |
| 第七节 不同连接形式的无缝道岔群受力与变形分析 ..... | 176 |



|      |                                |     |
|------|--------------------------------|-----|
| 第八节  | 不同焊接形式的无缝道岔受力与变形分析.....        | 183 |
| 第九节  | 扣件纵向阻力对无缝道岔受力与变形的影响分析.....     | 191 |
| 第十节  | 道床纵向阻力对无缝道岔受力与变形的影响分析.....     | 194 |
| 第十一节 | 限位器阻力对无缝道岔受力与变形的影响分析.....      | 197 |
| 第十二节 | 间隔铁阻力对无缝道岔受力与变形的影响分析.....      | 202 |
| 第十三节 | 相邻线路及道岔铺设轨温差对无缝道岔受力与变形的影响..... | 205 |
| 第十四节 | 其他因素对无缝道岔受力与变形的影响分析.....       | 210 |
| 第十五节 | 结 论 .....                      | 225 |
| 第五章  | 特殊地段上的无缝道岔 .....               | 229 |
| 第一节  | 隧道洞口处的无缝道岔 .....               | 229 |
| 第二节  | 无砟轨道上的无缝道岔 .....               | 235 |
| 第三节  | 桥上无缝道岔 .....                   | 240 |
| 参考文献 | .....                          | 295 |

# 第一章 概述

无缝线路是由许多普通标准钢轨连续焊接而成的长钢轨线路,又称焊接长钢轨轨道(Continuous Welded Rail),它是轨道结构技术进步的重要标志,是与重载、高速铁路相适应的轨道结构,其优越性得到了世界各国铁路界同行的认可。

由于无缝线路消除了轨缝、台阶、折角等接头缺陷,具有行车平稳、延长钢轨使用寿命、节约养护维修劳力和材料、节约能耗等显著特点,综合技术经济效益突出,在世界各国得到了竞相发展,技术已日臻完善。

跨区间无缝线路则是在完善了桥上无缝线路、高强度胶接绝缘接头、无缝道岔等多项技术后,把闭塞区间的绝缘接头乃至整区间、多个区间都焊接(或胶接)在一起,取消了缓冲区的无缝线路,其优越性较普通无缝线路更为突出,彻底实现了线路的无缝化,全面提高了线路的平顺性和整体强度。取消缓冲区后,钢轨磨耗和养护维修工作量进一步减少;钢轨接头的取消,进一步改善了列车运行条件;伸缩区与固定区交界处因温度循环而产生的温度力峰及伸缩不能复位而产生的温度力峰,都由于伸缩区的消失而消失;跨区间无缝线路的防爬能力较强,纵向力分布比较均匀,锁定轨温容易保持,提高了线路的安全性和可靠性。

推广应用跨区间无缝线路,可促进焊、铺、养技术全面提高。应将钢轨的重载化、纯净化、强韧化、改进外观平顺性和减小尺寸公差作为我国铁路无缝线路的长期目标;将提高钢轨胶接、焊接接头质量作为跨区间无缝线路安全应用的前提;将道岔与无缝线路直接焊连作为跨区间无缝线路的关键技术,确保道岔不发生锁闭故障或无缝线路及道岔的失稳。

## 第一节 国外铁路无缝线路的发展

无缝线路已在世界各国得到广泛应用。据 2002 年统计,全世界铺设的无缝线路总长占全世界路网总长的 34.9%,重载、高速铁路都把铺设无缝线路作为加强轨道结构的一项措施。目前,世界各国无缝线路主要结构形式为温度应

力式, 轨条连接大多采用接头夹板及螺栓; 日本等国的无缝线路连接采用的是伸缩调节器, 并设置绝缘接头, 列车通过时车辆簧下振动加速度远小于钢轨接头; 因伸缩调节器的制造加工成本较高, 英、法等国铁路研究了不设伸缩调节器的超长无缝线路; 前苏联在寒冷地区铺设无缝线路时, 初期采用的是自动放散、定期放散应力式, 但给运行和维修带来了诸多不便, 后期以发展温度应力式无缝线路为主。

钢轨是决定轨道结构类型的主要部件, 大运量和高速度的铁路干线都要求使用重型钢轨, 因此欧美各国都很重视重型钢轨无缝线路的发展。在长度尺寸相近的情况下, 混凝土枕较木枕道床阻力大, 有利于无缝线路的稳定性, 因此大多数国家的无缝线路主要铺设在混凝土枕上。无缝线路上使用的扣件, 除要求保持轨距、抗拔、抗倾覆以及在垂直和水平方向上有一定的弹性外, 还要求有足够的扣压力, 以牢固地锁定线路, 防止线路爬行, 并且还要求便于放散温度应力。美国的木枕无缝线路主要采用钩头道钉、弹簧防爬器; 日本主要采用弹片扣件; 德国的混凝土枕无缝线路主要采用有螺栓弹条扣件; 英国的混凝土枕无缝线路主要采用无螺栓弹条扣件。无缝线路上的道床应当在列车荷载作用下保证轨排框架的稳定, 通过养护维修作业能提高抵抗胀轨跑道和防止线路爬行的能力, 故一般要求在无缝线路上采用坚硬的火成岩制成的道砟。足够的道床肩宽有利于提高无缝线路的稳定性, 大多数国家无缝线路的道床肩宽约为 35 ~ 50 cm, 法国铁路无缝线路除规定道床顶面宽度外, 还要求砟肩堆高 7 cm。

德国是发展无缝线路最早的国家, 于 1926 年在线路上铺设了 120 m 长的焊接钢轨, 1945 年就做出了以无缝线路为标准线路的规定, 至 1974 年无缝线路长度达到了 5.2 万公里, 占线路总延长的 79%; 到 20 世纪 90 年代, 已焊成无缝道岔十余万组, 并与前后的长轨条焊连在一起, 构成超长无缝线路。德国规定允许铺设无缝线路的最小曲线半径, 在木枕和混凝土枕线路地段为 300 m, 钢枕线路地段为 200 m; 允许铺设无缝线路的最大坡道, 旧线不超过 25‰、新线不超过 12.5‰。桥上大量铺设无缝线路始于高速铁路的建设, 其主要技术措施是采用空心桥墩, 提高墩台刚度, 适应桥梁承受纵向力的要求。

美国于 1930 年开始在隧道内铺设无缝线路, 1933 年开始在区间铺设无缝线路, 在 20 世纪 80 年代已铺设无缝线路达 12 万公里, 是全世界铺设无缝线路最多的国家。美国在最大年轨温差 95℃ 地区铺设无缝线路, 对干线铁路容许铺设无缝线路的最小曲线半径未作限制, 并在站线  $R=170$  m 曲线上铺有无缝线路。他们对桥上无缝线路也很重视, 1992 年以来 AREA 三次修改了桥上铺设无缝线路建议草案。

1935 年, 苏联开始在莫斯科近效车站铺设无缝线路。由于大部分地区温

度变化幅度较大,最大幅差高达  $119^{\circ}\text{C}$ ,影响了无缝线路的发展,直到 1956 年才正式开始铺设无缝线路。长钢轨用接触焊法焊接 800 m 长,运往工地直接铺设,长轨之间设 2~6 根缓冲轨,用普通夹板联结,强调采用高强度、高韧性的重型钢轨。前苏联在严寒、轨温变化幅度很大的地区铺设无缝线路技术取得了重大突破,在西伯利亚最大年轨温差  $119^{\circ}\text{C}$  的地区铺设有 P65 型钢轨无缝线路,规定容许铺设无缝线路的最小曲线半径为 300 m,并在外高加索山区铁路 24‰ 的大坡道上铺设了无缝线路。1998 年,俄罗斯对桥上无缝线路的研究也在不断进展,并颁布了《无缝线路铺设、养护维修技术规程》修订本。

法国也是发展无缝线路较早的国家,其早年铺设的无缝线路多使用钢轨伸缩调节器,近年来正逐渐取消区间线路的钢轨伸缩调节器。轨下基础多为双块式混凝土枕、碎石道床,使用双弹性扣件固定钢轨。法国于 1949 年前后,对无缝线路进行了大量的铺设试验,并随即推广开来,至 20 世纪 80 年代末,铺设数量已达 22 457 km。法国客运和货运铁路容许铺设无缝线路最小曲线半径为 400 m。其焊接技术十分先进,成功解决了锰钢辙叉与钢轨焊接技术。法国拉伊台克公司的铝热焊技术属世界一流,铝热焊剂纯净,并创造性地使用一次性坩埚,杂质得以克服,焊接质量高而稳定。法国十分重视发展超长无缝线路,在巴黎—里昂—马赛、巴黎—勒芒、巴黎—里尔高速铁路上,以铺设跨区间无缝线路为主,其中一段长达 50 km,巴黎—里昂高速线上铺设了世界上最大号码的 65 号无缝道岔。

日本是最早修建高速铁路的国家,其东海道新干线起初铺设 50 kg/m 钢轨的无缝线路,后因其断面薄弱而换铺为 60 kg/m 钢轨、混凝土枕无缝线路。在东北、上越、北陆新干线上进一步强化了轨道结构,采用了板式轨道,构成了坚固的无缝线路轨下基础,同时逐步取消区间钢轨伸缩调节器,加大钢轨连续焊接长度,在青函隧道中铺设了一条贯穿全隧道的连续焊接长轨条,全长 53.78 km。日本铁路容许铺设无缝线路的最小曲线半径在既有线为 600 m、新干线上为 1 000 m。于 1960 年开始对新干线桥上无缝线路设计方法进行研究,并形成了设计规范、规定,提出采取减小桥上扣件阻力的办法,来减小桥上无缝线路的纵向力。日本新干线各种桥梁上全都铺设了无缝线路。

从 20 世纪 80 年代开始,欧洲继日本修筑新干线后,掀起了高速铁路建设高潮,促进了电感式、音频式无绝缘轨道电路以及高强度、高韧性钢轨胶接绝缘接头在高速铁路上的应用。再加上钢轨焊接技术取得突破性进展,为超长无缝线路的发展提供了良好契机。在法、德等国的高速铁路上,相邻区间的轨道采用谐振单元构成电气隔离,不用机械绝缘接头,保证了无缝线路的连续性。可动心轨道岔的辙叉与碳钢轧制的钢轨焊连起来,道岔区的绝缘接头用胶接绝

缘接头,从而实现真正意义的连续焊接钢轨,仅在大跨度连续梁或跨山谷高架桥上设置伸缩调节器,而调节器的基本轨与尖轨仍然与长钢轨焊接,使无缝线路的轨条长度充分延长。跨区间无缝线路顺应了高速、重载铁路对轨道结构强化和线路平顺性的更高要求,与高速、重载铁路得到了协同发展。

## 第二节 我国铁路无缝线路的发展

我国无缝线路起步较晚,直到 1957 年才开始铺设,经过铁路工作者的不断努力,目前在理论研究、设计、焊接、施工、养护维修和管理方面都取得了很大成绩。在 20 世纪 80 年代,我国铁路又在桥上、小半径曲线、大坡道和寒冷地区试铺了无缝线路,取得了突破性进展,扩大了无缝线路的铺设范围。从 1993 年开始,在解决钢轨胶接绝缘接头、无缝道岔这两项关键技术的基础上,开始试铺并推广了跨区间无缝线路,实现了真正意义上的轨线连续“无缝化”。2002 年,在解决了路基、道床状态参数指标等多项关键技术的基础上,首次在秦沈客运专线新建线上一次铺设跨区间无缝线路,标志着我国无缝线路的发展跨入了一个新的时代。截止到 2003 年底,我国铁路正线无缝线路延展长度已达 39 158 km,约占全路延展长度的 45%。

### 一、无缝线路技术积累阶段

1957 年,我国采用电弧法焊接长钢轨,首先在北京局和上海局各试铺了 1 km 的无缝线路。随后又改用气压焊和电接触焊,在工厂把钢轨焊成长度为 125~250 m 的长钢轨,用长钢轨运输车将焊好的长钢轨运至铺设工地,再按长轨条设计长度用铝热焊法焊接联合接头。长轨条的连焊长度一般为 1 000~1 500 m,在长轨条间设置 2~4 根缓冲轨,用普通夹板连接,以利调整轨缝和设置绝缘接头。

在无缝线路理论研究方面,建立了无缝线路钢轨温度力及伸缩位移计算方法、基于统一公式的无缝线路稳定性分析方法、基于变波长方法的无缝线路计算公式、无缝线路强度检算及设计方法,对无缝线路伸缩区的温度力峰、胀轨跑道机理、长钢轨的胀缩等理论问题进行了广泛的试验研究,大大促进了无缝线路的发展和科学管理水平。

在焊接技术方面,从电弧焊法逐渐发展了铝热焊、气压焊、接触焊法,认

识到长钢轨的焊接是铺设无缝线路的重要环节,其几何外形尺寸的平顺和内部质量是保证无缝线路正常运用的关键。对焊道采用铣床和砂带磨进行精修精磨,提高焊道的平顺并进行正火处理,是改进焊后工艺的重要措施,目前已普遍推广焊后正火处理,并在逐渐应用精修精磨技术。至 20 世纪 90 年代,我国铁路已建立了 17 个焊轨厂,并引进了瑞士的 Gas80 型、乌克兰的 K190 型等先进的电接触焊机。气压焊除工地焊接联合接头使用外,焊轨厂全面淘汰了气压焊法。在线路维修中,如断轨再焊仍以铝热焊法为主。

无缝线路的铺设施工由长钢轨装卸、运输、焊连、换轨、线路整修、旧轨回收等工序组成。长钢轨运输统一采用四层自动装卸列车,500 m 长的焊接钢轨一次可装 28 根,最大载运量达 14 km,利用车上分层设置的间隔器把钢轨隔开,使钢轨各就各位,利用列车中部设置的长钢轨锁定器,将长轨分层锁定,以保证运行的安全平稳。在卸车地点,先用车装钢轨引拉器把待卸的长钢轨拉到有驱动装置的平台,再开动驱动器,列车前行,长钢轨即可卸落在两侧砟肩上。工地的联合接头焊接作业将卸下的长钢轨及时焊成长轨条。最后采用换轨小车组作业或新型组合式换轨车作业方式铺设长轨条。

各国铺设无缝线路的实践经验证明,无缝线路的养护维修必须制定专门的规定,才能保证无缝线路优越性的充分发挥。为保证无缝线路抵抗胀轨的阻力不被破坏,不致诱发轨道失稳,对无缝线路的养护维修作业(如起道、拨道、捣固、更换轨枕、维修扣件等),均作了相应的规定。这些都为我国铁路扩大铺设无缝线路打下了坚实的基础。

## 二、无缝线路突破“四大禁区”阶段

寒冷地区、小半径曲线、长大坡道、长大桥上铺设无缝线路,曾是我国无缝线路的“四大禁区”。

在寒冷地区铺设无缝线路,就其结构形式而言,可分为温度应力式、定期放散温度应力式和自动放散温度应力式三种类型。沈阳铁路局于 1977 年开始在年轨温差  $96.7^{\circ}\text{C}$  的地区试铺了定期放散式、自动放散式无缝线路和钢轨焊接 250 m 的长钢轨线路,自 1982 年后,上述试验段均改成了温度应力式无缝线路。通过研究提高轨道容许升温幅度、提高轨道容许降温幅度、合理确定锁定轨温及其容许范围,采用提高轨道结构整体强度、提高养护维修作业质量、缩小设计锁定轨温的范围、采用二次锁定法最终设定锁定轨温、锁定线路等技术,解决了寒冷地区铺设温度应力式无缝线路的技术难题。目前已在年轨温差  $97^{\circ}\text{C} \sim 102^{\circ}\text{C}$  的地区广泛铺设了 60 kg/m 钢轨无缝线路。

过去我国对容许铺设无缝线路的最小曲线半径规定为 600 m。1967 年,我国开始在成昆线三处半径为 400 m 曲线的桥上、路基上、隧道内铺设了无缝线路,随后又在成渝线半径为 382 m 的曲线上铺设了无缝线路。1987 年又在呼和浩特铁路局年轨温差  $94^{\circ}\text{C}$ 、半径为 400 m 的曲线上铺设了无缝线路,经过试验,采取增宽道床肩宽并增设防胀挡板的加强措施获得成功。近年来,通过换铺高强度合金钢轨、加宽道床肩宽、堆高砟肩、采用 II、III 型弹条、联合接头采用小型气压焊机焊接等技术措施,郑州铁路局在太焦线  $R=290\text{ m}$  的曲线上、上海局在鹰厦线  $R=300\text{ m}$  曲线的碎石道床上试铺了无缝线路。突破了在半径小于 600 m 的曲线上铺设无缝线路的禁区。

过去我国对容许铺设无缝线路的最大坡度限制为 12‰。1967 年,我国铁路在川黔线凉风垭隧道 16.5‰ 的坡道上铺设了无缝线路,因长轨条锁定不牢,线路纵向阻力较小,在列车下坡运行的纵向力及制动力的作用下,长轨条的伸出量较大,致使前方轨缝连续挤严。后做好了线路锁定工作,长轨条爬行得以缓解。近几年又在陇海铁路 20‰ 的长大坡道上铺设了无缝线路。目前我国对容许铺设无缝线路的坡度未作限制,但要求轨条全长在连续长大坡道及制动段上,以及行驶重载列车时,宜增大扣件和轨枕纵向阻力,必要时增加轨枕配置根数。

从 1962 年开始,我国开展了无缝线路的试验研究。通过现场测试和室内模型试验,研究桥上无缝线路产生纵向力的机理,并在简支钢板梁、混凝土梁以及连续钢桁梁上试铺了无缝线路,建立了梁轨相互作用原理和各项桥上无缝线路纵向力的计算方法。此后,铺设范围不断扩大到混凝土连续梁、无砟箱梁以及柔性高墩桥上。近十年来,随着新型桥上轨道结构——预应力混凝土有砟桥枕、桥用扣件、钢轨胶接绝缘接头、双向曲线型钢轨伸缩调节器的研究和应用,进一步促进了我国桥上无缝线路的发展。目前约有 500 座长度超过 200 m 的桥梁铺设了无缝线路,并颁布了《新建铁路桥上无缝线路设计暂行规定》。

### 三、跨区间无缝线路试铺阶段

在无缝线路全面推广应用时期,我国无缝线路轨道结构也得到了进一步加强。60 kg/m 钢轨已成为我国铁路干线的主型轨,各线焊接钢轨普遍采用 60 kg/m 钢轨;轨下基础更新步伐加快,69 型混凝土枕正逐步被淘汰,II 型混凝土枕已成为主型轨枕,III 型混凝土枕也大量上道,混凝土岔枕及有砟桥面混凝土枕也已广泛采用;采用一级道砟的道床比例逐步加大。我国无缝线路无论是在数量上还是在技术上都有了长足进步。

1958年,我国就已开始钢轨胶接绝缘接头的研究。到20世纪70年代,北京、上海铁路局研制的钢轨胶接绝缘接头上道试铺,后因整体剪切强度仅为1900 kN,使用寿命仅为3~5年,因而未推广应用。1992年,我国从美国3M公司引进了热胶和常温固化胶绝缘材料,通过热胶粘接工艺及钢轨胶接绝缘接头的结构改进,研制成功了热胶绝缘槽型板,为我国钢轨胶接绝缘头的技术开发奠定了基础,使我国新一代钢轨胶接绝缘的产品质量显著提高,各项机械性能检验指标达到或接近国际先进水平,试件整体剪切强度稳定在4200~4600 kN时不被破坏。2000年以后,为适应我国铁路对现场粘接钢轨胶接绝缘接头的需求,又研究开发了常温固化胶(双组份胶)钢轨胶接绝缘接头,试件整体剪切强度达到3350~4220 kN不破坏。从1995年开始,我国铁路使用国产热胶钢轨绝缘接头,每年铺设数量超过2000个接头,至今铺设范围已遍布各主要铁路干线,铺设地段最大年轨温差为100.5℃,累积通过总重达550 Mt,胶层开裂破损率和绝缘失效率极低。这种高强度、高韧性胶接绝缘接头,为取消缓冲轨、推广铺设跨区间无缝线路奠定了必要条件,从而可显著减少线路养护维修工作量,并提高轨道电路的安全可靠性。

1996年,我国研制了时速达140~160 km的60 kg/m钢轨12号可动心轨辙叉和高锰钢整铸辙叉道岔。这两种形式的道岔较普通道岔有明显的改进,结构合理,整体强度和稳固性大有提高,行车的平顺性大为改善,基本满足了提速要求。可动心轨辙叉采用长翼轨结构型,尖轨及心轨跟端设置限位器、间隔铁等传力部件。固定式辙叉的冻结及绝缘联结技术得到应用:整铸锰钢辙叉前后四个接头,联结时采用专用的高强度夹板及直径为27 mm的10.9级螺栓组成冻结接头,接头阻力可达1700~1900 kN;如果腹板与夹板内侧面采用现场胶接的措施,接头阻力值可高达2500 kN。采用铬基介质的锰钢辙叉与普通钢轨焊接技术也得到了开发性研究。60 kg/m钢轨30号等大号码道岔也已研制成功。

为消除闭塞分区间和道岔前后普通无缝线路的缓冲区轨缝,最大限度地延长固定区,使无缝线路的优越性得到充分发挥。1993年我国开始在京广、京山、大秦等线铺设跨区间无缝线路试验段。1996年开始的铁路提速推动了超长无缝线路的大发展,在解决了提高钢轨胶接绝缘接头强度和抗老化性能、完善无缝道岔设计理论和道岔焊连技术、改进无缝线路铺设工艺和钢轨折断原位焊接工艺等关键技术后,截至2003年,我国超长无缝线路总延长已达19151.4 km,其中与站内无缝化的提速道岔及其连接钢轨焊连的跨区间超长无缝线路为5502.8 km,区间两信号机之间的长轨条全部焊连起来的全区间超长无缝线路为13648.6 km,两者之和约占无缝线路总延长的49%。



#### 四、新建线一次铺设跨区间无缝线路阶段

新建线一次铺设跨区间无缝线路是相对新建铁路按有缝线路设计,经运行待路基稳固之后,再由铁路局逐段换铺成无缝线路而言,其线、桥、隧、路基、轨道结构的设计与施工技术标准,要满足一次铺设无缝线路的技术要求,与传统的换轨铺设工法相比,不仅不必备用大量周转轨,且有利于道床的稳定,有利于提高轨道支承刚度的均匀性,满足了高速铁路对轨道高平顺性的要求。各种铺轨作业的重型机械在高速铁路建设中得到应用,提高了轨道工程的施工质量和工效,为无缝线路一次铺设提供了良好的保证。

2003年,我国在秦沈客运专线建设中首次采用了一次铺设跨区间无缝线路技术。新建铁路一次铺设无缝线路必须具备稳固的基础、先进的施工技术、平顺的轨道几何形位尺寸三个技术条件,才能满足新建高速铁路竣工后即可按设计速度运行。在解决了道床状态参数指标、桥上无缝线路梁、轨相互作用力和位移计算分析、无缝道岔纵向力和稳定性计算分析、钢轨伸缩调节器设置原则和胶接绝缘接头的设置等多项关键技术后,秦沈客运专线一次铺设了长达 375.6 km 的跨区间无缝线路。在施工现场组建了钢轨焊接生产线,引进了美国 NTC 型和瑞士 TCM 型铺轨机总体设计方案和核心设备,自主研制了轨枕同车运输铺轨车等配套设备,铺设作业效率平均可达 1 500 m/d。目前,一次铺设跨区间无缝线路已纳入客运专线、时速 200 km 客运、时速 200 km 客货共线等新线设计的暂行规范中。

#### 五、跨区间无缝线路推广应用阶段

普通无缝线路缓冲区和伸缩区约占无缝线路总长的 25%~30%,在这一区段内,维修作业需要普遍加强捣固。在日常养护中,拧紧扣件螺栓较为频繁,且橡胶垫板磨损数量较多,养护维修工作和费用约占 40%~50%。采用跨区间无缝线路,可最大限度减少钢轨接头,能够有效地减少钢轨接头区的线路病害。

采用跨区间无缝线路,可消除伸缩区的温度应力峰,增强线路防爬能力,改善无缝线路工作状态,安全可靠性得到提高,还可促进焊、铺、养技术全面提高。因此,它是一项综合性技术,首先要求轨道结构各部件可靠,减少失效报废率,要求钢轨胶接和焊接技术达到一定的技术水平,如对胶接接头要求其使用寿命不得短于 5~7 年,否则将增加折断修复的作业量。跨区间无缝线路的铺设技术要求规定相邻无缝线路单元轨节锁定轨温差不能超过  $5^{\circ}\text{C}$ ,各段单元轨节的最高、最低锁定轨温差不能超过  $10^{\circ}\text{C}$ 。跨区间无缝线路的养护维修应重视防止线路爬行,最大纵向位移量不得超过 20 mm,否则要求及时采取措施消