

文章编号:1003-1995(2016)08-0001-09

既有铁路木枕替代材料的研究现状及发展趋势

曾志斌^{1,2}

(1.中国铁道科学研究院 铁道建筑研究所,北京 100081;2.高速铁路轨道技术国家重点实验室,北京 100081)

摘要 在世界各国铁路轨枕中木枕所占比例约为90%。木枕容易腐朽和开裂,使用寿命较短,不能满足车辆轴重日益增大、列车速度不断提高、运输量日益增长的需要,因此大量劣化和损伤的木枕需要更换,但是用于制作木枕的优质木材供应量却持续下降。采用杂酚油对木枕进行防腐处理不仅污染环境,而且有害职工健康,因此研究木枕的替代材料成为世界各国铁路部门的难题。尽管采用木材、混凝土、钢等普通材料制作轨枕还是主流,但是复合材料轨枕逐渐受到世界各国重视。本文首先介绍采用复合材料加固既有木枕的研究现状。其次重点介绍以长玻璃纤维增强为代表的玻璃纤维增强发泡聚氨酯合成轨枕和以短玻璃纤维或无玻璃纤维增强的回收塑料复合材料轨枕,并简单介绍了其他形式的复合材料轨枕。最后指出轨枕的抗弯曲和剪切性能、握钉能力、黏结层的强度、耐久性、寿命周期成本是今后复合材料轨枕的研究重点。

关键词 木枕;替代材料;复合材料;玻璃纤维增强发泡聚氨酯合成轨枕;塑料复合材料轨枕

中图分类号 U213.3 **文献标识码** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1003-1995.2016.08.01

按照制造材料的不同,铁路轨枕主要分为木枕、混凝土枕和钢枕3种。目前世界上正式运营的铁路里程约120万km,其中90%的轨枕为木枕,总数超过25亿根。国际铁路联盟(UIC)对欧盟内UIC成员国不同铁路轨枕占有率(大致覆盖了欧盟铁路基础设施的70%)的调查结果^[1]显示,木枕、混凝土枕、钢枕占全部轨枕数量的百分比分别为48.9%,46.9%和4.2%。根据2013年《中国铁道年鉴》^[2]统计,我国全路在线轨枕23 899.0万根,其中木枕1 382.8万根,约占5.8%,混凝土枕20 224.9万根,约占84.6%,其他枕2 291.4万根,约占9.6%;正线轨枕17 358.8万根,其中木枕277.5万根,约占1.6%,混凝土枕15 571.3万根,约占89.7%,其他枕1 510.0万根,约占8.7%。尽管木枕的使用历史悠久且优点突出,但是其容易腐朽和开裂等缺点也很明显,而且优质木材资源日益稀缺,因此研究木枕的替代材料,以更换大量劣化的木枕,是摆在世界各国铁路部门面前的难题。国内外对采用耐久性更好、强度更高、经济适用的材料替换劣化和损伤的木枕进行的研究和试用主要集中在:①继续使用普通轨枕材料,如人工林木材、钢和预应力混凝土;②采用复合材料加固既有铁路木枕;③采用复合材料(如

聚合物混凝土、增强塑料、橡胶和纤维复合材料等)制

1 铁路木枕替代材料研究的必要性

木材是一种天然高分子材料,是人类最早应用的材料之一。由于以木材为原料制成的木枕具有很多优点,例如形状简单,质量轻,弹性好,绝缘性能较好,容易制造和加工,与钢轨的连接比较简便,运输、铺设和养护维修方便等,故木枕一直在世界轨枕市场中占据显著位置。但是木枕存在以下缺点:

- 1)木枕要消耗大量优质木材,随着资源日益匮乏,木材原材料供应量逐渐减小,从而推高其价格。
- 2)制造木枕的木材种类和部位不同,其强度和弹性不完全一致,在机车车辆作用下会形成轨道不平顺,增大轮轨动力作用。
- 3)在列车荷载的长期冲击和碾压下,木枕易受机械磨损,从而缩短其使用寿命,并引起线路的弹性不一致。
- 4)木枕上的道钉孔会因使用日久而松弛,持钉能力下降;木材有显著的干燥收缩和遇湿膨胀特性,其变形会引起轨距和轨向发生变化,造成行车安全隐患。
- 5)随着机车车辆轴重的增加、列车速度的提高以及运量的增加,木枕的强度不足以长期承受列车运行带来的巨大应力。

收稿日期:2016-06-18;修回日期:2016-06-29

基金项目:中国铁道科学研究院基金(2013YJ025)

作者简介:曾志斌(1969—),男,研究员,硕士。

6) 在露天条件下受环境和气候的影响,容易腐朽和开裂,甚至在轨枕中间形成空洞。

7) 使用寿命较短,经过防腐处理的木枕,使用寿命为15年左右。对于采用明桥面的钢桥,在其设计使用期内,需要多次更换木枕。

8) 对木枕进行防腐处理时化学防腐剂会影响自然环境和员工的健康。

9) 尽管养护维修简单,但是工作量大。为了延长木枕的使用寿命,需要定期对木枕进行养护,采用密封胶封堵裂纹,之后刷涂沥青。

10) 在工厂制造或现场加工(如钻孔或凿孔、开槽)过程中,新制木枕容易出现裂纹等缺陷,从而降低木枕的成品率。

按照木枕防腐的工艺要求,木枕必须进行高压油仓注油处理。现在我国木枕的质量参差不齐,不仅存在浸油深度不够的现象,甚至有些木枕仅仅在表面刷涂了沥青。另外,还存在尺寸不符合规范要求的现象。

当存在缺陷或者质量不合格的木枕投入实际使用,其劣化速度会加快,从而增加养护维修工作量,且使用寿命缩短,即缩短木枕的更换周期。多次更换木枕不仅需要反复投入人力、物力和财力,而且会增加轨道系统的生命周期成本。

另一个日益严重的问题是使用化学防腐剂处理木枕对环境和健康的影响。例如,瑞典曾对铁路木枕中杂酚油含量与欧盟有关危险废物的条款进行过比较研究^[3],欧盟甚至通过立法严格限制使用杂酚油或用杂酚油处理过的木材^[1]。预计在不久的将来,木枕需要采用特定的处理程序进行化学防腐,甚至将逐步被废除和更换。

一方面,木枕的保有量巨大,每年都需要更换大量劣化和损伤的木枕。例如,澳大利亚铁路每年有超过250万根木枕需要维修;印度每年更换约700万根木枕;德国约1100万根木枕需要更换^[4];根据美国运输部路面运输委员会统计,2012年美国一级铁路更换和增添木枕约1585万根,约占全部5亿根轨枕数量的3.12%^[5]。另一方面,现在全世界铁路部门都面临着的最大难题是用于铁路木枕的优质木材供应量持续下降。因此,亟需研究铁路木枕的替代材料。

2 继续使用普通轨枕材料

2.1 木枕

国外许多铁路基础设施公司长期致力于采用混凝土和钢替换既有铁路轨道上的木枕,但是在铁路轨道的维修和施工中超过90%的轨枕还是木枕,采用新木

枕替换旧木枕在短期内更经济可行或者更方便。仅仅在2006年,澳大利亚昆士兰铁路公司就购买了8万根木枕用于轨道维修。长期以来,北美一直以木材作为生产轨枕的主要原材料,尽管近些年一些铁路公司在部分运营线路上铺设混凝土轨枕及其他类型轨枕,但木枕仍然占据绝大部分。根据美国铁路轨枕协会(Rail Tie Association, RTA)统计,美国木枕的采购量始终保持高水平,2014年北美铁路购买轨枕总数达到2336.6万根,比2013年增长2.2%,以保证铁路公司新建铁路和既有线改造工程建设,以及线路维修更换轨枕的需求^[6]。近年来,北美木枕制造商致力于扩大生产能力和提高产品质量;铁路公司积极采取措施开发有效的线路维修作业技术,加强对木枕的保护和再利用,延长其使用寿命;美国联邦铁路局(Federal Railroad Administration, FRA)组织开展改进轨枕生产和维修问题的研究,制定了在运营作用影响条件下木枕的保护标准和应对措施。

美国曾经对用杂酚油处理过的木枕与其主要替代材料(混凝土和塑料复合材料)制成的轨枕进行过从生产到被废止并处理的环境生命周期评估,内容包括从轨枕的生产、服役、直到最终处理的全生命周期成本和生命周期影响评估(温室气体排放,化石燃料和水的使用,以及潜在造成酸化、烟雾、生态毒性和水体富营养化的排放)。每种产品的比较限制在一个铁路轨道功能单元(1.61 km)内进行。结果表明,使用杂酚油处理过的铁路木枕使用了较少的化石燃料和水,对环境的影响比采用混凝土和塑料复合材料制造的同类产品低,只有富营养化影响指数比塑料复合材料枕高^[7]。澳大利亚温室气体办公室也报道混凝土和钢在生产过程中的二氧化碳排放量比硬质木枕高10~200倍。由于污染环境和容易引发癌症,欧盟通过立法禁止使用杂酚油,因此国际铁路联盟的欧盟成员正在研究对木枕进行防腐处理的替代产品。

鉴于大直径原木日益紧缺,为了合理利用资源,美国曾研制过方螺钉二拼组合枕(Two Pieces Steel Dowelled Laminated Crosstie, TPSDLC),即利用方钢扭制而成的螺钉将预先钻好孔并拼合在一起的一对方木组合起来,形成机械铰拼枕^[8]。美国还在20世纪70年代中期研制过定向结构板层积复合枕(Oriented Strand Board Laminated Crosstie),又称重组枕(Reconstituted Tie或Credrite Tie),或称再生枕^[9]。但是这2种技术都没有推广使用。随着木材黏合技术的进步,加拿大最近在研究采用低等级硬质木材制作层积轨枕的技术,在疲劳荷载作用下,其破坏模式表现为层间粘接失效^[10]。

所有这些现实和研究成果都表明,木材依然是替换劣化和损伤木枕的首选材料。但是,森林资源毕竟是有限的,迟早有一天适合制造木枕的优质木材资源会枯竭。为了弥补天然硬质木材供应量的不足,少数国家尝试采用软质木材代替硬质木材。软质木材大多来自种植园,并且是可再生资源,但是其不能像硬质木材那样抵抗轨距的扩大和道钉孔的扩大。另外,软质木枕也不能像硬质木枕那样有效传递荷载至道砟。澳大利亚昆士兰科技大学目前正在实施一个研究项目,对软木进行改造以适合制造铁路轨枕,现已完成的一系列试验证明软质木材应用于铁路轨枕的可行性,但是这些轨枕只在轻质的次要铁路上试用。巴西也曾用土生土长在巴西南部铁路沿线的桉木处理后制造轨枕,桉木能就地连续再生,不至于因砍伐而破坏森林,但是巴西铁路公司认为桉木只是一种特殊的木材,不能充当木枕的替代品^[11]。最近巴西还在对采用重度达到9.9 kN/m³ 柠檬桉制成的胶合层积轨枕的性能进行深化研究^[12]。

目前我国只是在明桥面钢桥上继续使用新制木枕更换劣化和损伤的木枕。

2.2 混凝土枕

混凝土枕的优点是:材料来源较广;能保证尺寸,使轨道弹性均匀,稳定性好;不受气候、腐朽、虫蛀及火灾的影响,使用寿命长;具有较高的道床阻力,有利于提高无缝线路的横向稳定性;养护工作量小,损伤率和报废率比木枕低。混凝土枕的缺点是自重大、弹性差、更换困难等^[13]。

混凝土枕因其经济性、较长的使用寿命、较低的维修成本等优势,已经在国外铁路上广泛使用。我国铁路在解放前和建国初期普遍采用木枕,20世纪50年代末、60年代初我国铁路科技工作者开始研制并推广使用混凝土枕,目前已遍及全国各条铁路,占全部轨枕数量的百分比接近90%。而且,除明桥面钢桥外,更换劣化和损伤的木枕几乎全部采用预应力混凝土枕。

我国曾于1984年开始研究在明桥面钢桥上铺设预应力混凝土桥枕的技术,并于1988年10月首次在长大线上主梁中心距为2.4 m的沙河桥上铺设了79根工字形截面预应力混凝土桥枕,之后又在湘桂线阳江桥和东江桥以及南宁的心墟桥上铺设了经改进后的预应力混凝土桥枕^[14]。但是由于预应力混凝土桥枕的自重比木枕大、弹性比木枕差等原因,该技术没有推广使用。

2.3 钢枕

现代钢枕已经取代了传统的钢枕,能够应对重载和不良轨道状态。一些铁路公司认为,在新线路上铺

设钢枕比混凝土枕或用杂酚油处理过的木枕更经济,钢枕已经在世界范围的铁路系统得到应用,包括重载铁路、一级铁路、地方铁路、短线铁路、矿山、电气化客运专线等^[15]。

巴西一度使用钢枕来替代木枕,在铁路主干线上安装了大约9.5万根钢枕。2002年巴西的一家地方钢铁工厂向铁路和地铁部门交付了15.2万根钢枕。钢枕的寿命期望值是50~60年,而用最好的木材或处理过的桉木制成的轨枕,在热带气候环境下的使用寿命是15年。与木枕相比,使用钢枕的优点是:数量可节省20%,因为它们排列的间距可以更大一些;重量比木枕和混凝土枕轻。从环境保护上讲,钢枕也十分有益,因为它可用废钢铁冶炼制成,钢枕报废后可以废钢铁的价格销售或回炉重造。澳大利亚也开发了拥有世界声誉的与铁路钢枕设计有关的技术。

但是钢枕价格昂贵,且由于腐蚀问题而用量较少。另一个问题就是在移动列车作用下,钢枕的紧固孔附近容易产生疲劳裂纹。总体来说,钢枕不是劣化和损伤木枕的理想替代产品。

3 采用复合材料加固既有铁路轨枕

复合材料是由2种或2种以上不同性能、不同形态的组分材料通过复合工艺组合而成的一种多相材料。它既保留了原组分材料的主要特点,又显示了原组分材料没有的新性能。复合材料具有比强度和比模量高、耐疲劳性能好、破损安全性能高、阻尼减振性能好、加工工艺性好、各项异性和性能的可设计性、多种功能性等特点,最早用于军事工业,此后,随着玻璃纤维、树脂基体和复合材料成型工艺等技术的发展,复合材料不仅在航空航天工业,而且在各种民用工业中得到广泛应用,成为重要的工程材料^[16]。复合材料在汽车、火车、轮船等交通工具中的应用已有半个多世纪的历史,复合材料的产品逐年增加,交通运输业用量所占的比例一直最大。在建筑工业中,复合材料广泛应用于各种轻型结构房屋、大型建筑结构、建筑装饰等。此外,利用碳纤维复合材料对工程结构进行加固和修补近年来显示出较好的市场应用前景。

复合材料在铁路工务中的一项应用是既有木枕的加固,即在木枕表面包裹纤维增强材料(包裹范围仅限于钢轨下方的部分木枕),或者在木枕下表面粘贴纤维增强材料。美国西弗吉尼亚大学研究了采用玻璃纤维增强聚合物或GFRP(glass fiber-reinforced plastic)包裹木枕后的性能,结果表明GFRP-木梁的性能显著改善;复合材料增加了木枕的刚度和极限承载力,同时

减小了应力,提供了坚固的表面以抵抗轨垫板的切割和道砟的磨损。包裹 GFRP 也改善了木枕对潮湿的抵抗力^[17-18]。美国位于科罗拉多州的运输技术中心(Transportation Technology Center, Inc., TTCI)于 2005 年对通过了 3 亿 t 重载运输、采用玻璃纤维布包裹的 42 根实芯木枕和通过了 1.25 亿 t 重载运输、采用玻璃纤维布包裹的 8 根带金属盖板的木枕进行了评估,结果表明采用玻璃纤维布包裹的木枕耐久性并不与预想的一样,玻璃纤维容易受到损伤,必须另外配置金属盖板以改善其耐久性^[19]。

澳大利亚的 Humpreys 和 Francey 对用纤维增强材料修复铁路木枕进行了初步研究,结果表明采用纤维增强材料加固处理后能显著提高木枕的承载能力,但是也受到剥离应力、水平剪切应力和纤维复合材料层过早剥离的限制^[20]。澳大利亚南昆士兰大学还研究了纤维增强复合材料岔枕的发展,上下表面为碳纤维层压板的单板层积材(Laminated Veneer Lumber, LVL) 包裹三向玻璃纤维。研究结果表明,尽管其替代铁路轨枕的思路可行,但是作为木材的单板层积材还存在一些维护上的问题。木材是一种可生物降解的材料,需要持续的维护^[21]。

4 复合材料轨枕的研究和应用

复合材料除了在加固既有铁路轨枕中得到应用外,还可直接采用复合材料制成铁路轨枕。目前国内的复合材料轨枕主要分为 2 大类^[22]:①以长玻璃纤维增强的复合材料轨枕,如日本研制的聚合物合成轨枕(FFU) 已经投入实际应用,印度和我国研制的玻璃钢轨枕正在试用;②用短玻璃纤维或无玻璃纤维增强的复合材料轨枕,如已经投入实际应用的美国塑料轨枕。

4.1 FFU(Fibre-reinforced Foamed Urethane) 合成轨枕

FFU 意思是纤维增强发泡聚氨酯,是由日本积水化学工业株式会社开发的一种合成木材^[23]。FFU 合成木材是一种与天然木材特性相似的材料,与木材一样容易处理和加工,而且具有和天然木材相近的质量密度,但是比后者的使用寿命长,其耐候性也较好^[24]。FFU 具有轻质、高强、抗腐蚀、防水、易于加工等特点,广泛应用于铁路结构、供水和排水系统、土木工程、水产养殖等领域。

FFU 合成轨枕(FFU Synthetic Sleepers) 是由拉挤或挤压成型制造出来的。玻璃纤维在聚氨酯里发泡,然后在高温下硬化,产生一种高等级、非多孔的材料,能抵抗列车遗留在轨道上的化学物质的腐蚀。

1978 年日本积水化学工业株式会社生产了第一根 FFU 合成轨枕,日本铁路综合技术研究所在实验室对其进行验证后,在羽越线的三面川桥和山阳线的关门隧道进行现场测试。1985 年 FFU 合成轨枕成为日本国有铁路(Japanese National Railways, JNR) 批准的产品。之后,FFU 合成轨枕在日本被广泛应用,特别是在道岔和桥梁上,以及其他必须将维修时间间隔最大化的区段。1989 年,列车运行速度为 270 km/h 的东海道新干线使用了 FFU 合成轨枕。

1991 年日本铁路综合技术研究所对使用 10 年的 FFU 合成轨枕进行了测试,结果表明轨枕几乎没有劣化。1996 年再次进行测试,结果表明 50 年 FFU 合成轨枕的强度褪化与 15 年旧木枕相似^[23-24]。2007 年,日本正式实施 FFU 合成轨枕国家标准,见文献[25]。

FFU 合成轨枕在日本以外的第一个用户是台湾地区,1999 年动工修建的台湾高速铁路在其车辆基地使用了 FFU 合成轨枕^[26]。

2004 年奥地利维也纳利恩(Wiener Linien) 在更换 U4 号地铁跨越维也纳河的佐拉米桥(Zollamt Bridge) 上的轨枕时使用了 FFU 合成轨枕,这是其首次在欧洲应用。同年,在跨过多瑙河的弗洛里茨多夫桥(Floridsdorf Bridge) 上铺设了仅 100 mm 高的 FFU 合成轨枕。此后,奥地利又陆续在跨 Wien 河的 U4's 桥、维也纳 Hackingerstrasse 桥、跨 Inn 河的 Karwendel 桥、跨过多瑙河的 Ostbahn 桥等桥梁上铺设了 FFU 合成轨枕。2008 年 Wiener Linien 开始一项长期计划,用 FFU 合成轨枕更换已经在其路网上使用的由其他合成材料制成的轨枕。2005 年奥地利联邦铁路(ÖBB) 首次在维也纳跨越一条道路的 Hackingerstrasse 铁路桥上采用 FFU 合成轨枕,积累经验之后,2007 年采用 FFU 合成轨枕更换了位于因斯布鲁克跨越 Inn 河的 Karwendel 桥上的轨枕,2009 年更换了维也纳跨过多瑙河的 Ostbahn 桥上的轨枕^[27]。

FFU 合成轨枕在德国的第一次应用是 2008 年,奥钢联(Voestalpine) 在靠近勒沃库森的 Bayer 化学园区的工业铁路专用线上安装了一组 74 m 道岔,使用了 136 根轨枕。2009 年 FFU 合成轨枕获得了德国联邦铁路局(EBA) 的认证。2008 年 FFU 合成轨枕通过了塞尔维亚国家铁路的审批。奥地利格拉茨工业大学(Graz University of Technology) 对明桥面钢桥上的 FFU 合成轨枕和岔枕进行了 LCC 分析,德国慕尼黑工业大学(Technische Universität München) 按照欧洲标准对 FFU 合成轨枕进行了试验研究^[28]。

美国诺福克南方铁路公司(Norfolk Southern Corporation, NS) 对日本 FFU 合成轨枕进行实验室验证

后,2011 年 12 月在西弗吉尼亚州靠近普林斯顿的一座明桥面钢桥上试铺了 FFU 合成轨枕,美国铁路运输技术中心(Transportation Technology Center, Inc., TTCI)一直在监测这些轨枕的性能,包括轨枕挠度和轨距^[29]。TTCI 除了在实验室对 FFU 合成轨枕进行了一系列试验研究外,还在位于美国科罗拉多州普韦布洛的加速运营测试研究室(Facility for Accelerated Service Testing, FAST) 的钢桥上试铺了 2 类木枕的替代轨枕,以进行对比分析。一类是分别由南方黄松(southern yellow pine)、花旗松(Douglas fir) 实芯锯材、白橡木(white oak) 和花旗松(Douglas fir) 胶合层积材制成的木枕;另一类是 FFU 合成轨枕。

我国于 2004 年在广州地铁 4 号线首先引进 FFU 合成轨枕^[30],经过几年的运营考验,使用效果满足设计要求。但是在使用初期,运营部门反映合成轨枕的质量较轻,道床阻力较小,在道床状况不好的地段轨道稳定性略显不足,增加了养护工作量。后来在合成轨枕两端增加垂直方向的钢板深入到碎石道床中,增加轨枕抗横向滑动的能力,还采用了地锚拉杆等措施,基本解决了轨道问题^[31]。2007 年中国船舶重工集团公司第七二五研究所开始研究开发 FFU 合成轨枕,并申请了国家专利^[32],2008 年 3 月 12 日生产了首批合成轨枕,交付广州地铁 5 号线使用。之后又用于南京大胜关长江大桥轻轨线路。经过在城市轨道交通线上试铺,广州市地下铁道总公司等单位编制了《聚氨酯泡沫合成轨枕》(CJ/T 399—2012) 标准^[33],规定了城市轨道交通用聚氨酯泡沫合成轨枕的原材料及合成轨枕使用条件、要求、试验方法、检验规则、产品标识和合格证、包装、运输、贮存,适用于采用连续拉挤成型工艺制备的聚氨酯泡沫合成轨枕的生产和检验。2014 年,成都铁路局在沪昆上行线新水花大桥 64 m 下承式栓焊钢桁梁上采用几何尺寸为 260 mm × 260 mm × 3 000 mm 的 FFU 合成轨枕替代劣化的木枕。这是我国铁路干线首次应用 FFU 合成轨枕^[34]。

目前 FFU 合成轨枕已经被世界很多国家使用或者研究。截至 2012 年,FFU 合成轨枕已经累计铺设超过 210 万根,累计里程 1 300 km。

4.2 复合材料塑料轨枕

近年来,我国合成树脂和塑料加工工业迅速发展,据统计,仅 2011 年我国塑料制品就达到 5 501 万 t,其应用遍及社会的各个角落,极大地推进了社会进步和技术发展。塑料制品广泛应用的同时也带来了一系列问题,如被社会高度关注的白色污染。废物回收、变废为宝是发展循环经济、实现资源可持续发展的主要课题。处理废旧塑料最有效的途径是回收综合利用,将

废旧塑料作为基础材料,辅以其他增强填料,制成各种复合材料产品^[35]。

美国于 20 世纪 90 年代中期研制成功一种新型的铁路轨枕——复合材料塑料轨枕。其以废塑料、废轮胎、废油漆及其他工业废渣等难以降解的高分子废弃物为主要原料,辅以化学添加剂及其他固化剂,塑化混合后连续挤出而制成。该产品能高效、综合地利用塑料废弃物,避免了对树木的砍伐。根据美国 TieTek LLC 公司的统计,生产 3 300 根轨枕(约 1 英里或 1.61 km 的轨道)需要消耗 2 万个塑料瓶、900 万个塑料袋和 10 000 条废旧汽车轮胎^[36]。美国 TTCI 在 FAST 环形线上对复合材料塑料轨枕进行运行试验之后^[37],开始广泛推广使用。最近美国伊利诺大学芝加哥分校按照美国铁路工程和维护协会(American Railway Engineering and Maintenance Association, AREMA) 推荐的试验方法研究了这种高密度聚乙烯轨枕,结果表明在荷载作用下其呈现脆性断裂的破坏模式,在断裂前没有观察到开裂现象^[38]。

德国和奥地利正在合作研究利用混合废塑料生产铁路轨枕的技术,并在奥地利建立了生产线,对其生产的样品进行了道钉拔出试验、三点弯曲试验等^[39]。韩国也研发了由废旧轮胎生产的胶粉与沙子、水泥混合,用模型压制而成铁路轨枕的技术。我国在山西中南部铁路上试铺了约 2 km 长的复合材料塑料轨枕。

目前,复合材料塑料轨枕已经在加拿大、墨西哥、巴西、澳大利亚、印度等国家批量应用,累计在世界几千公里铁路线上铺设了几百万根。

4.3 玻璃钢(GFRP) 轨枕

玻璃钢是以玻璃纤维及其制品(玻璃布、带、毡、纱等)为增强材料,以合成树脂作为基体的一种复合材料,学名又称玻璃纤维增强塑料(简称玻璃钢、GFRP)。玻璃纤维、合成树脂及其界面称为玻璃钢复合材料的 3 大要素。玻璃纤维是采用玻璃球通过高温熔融拉丝形成的,是玻璃钢复合材料的主要成分,也是玻璃钢中的主要承力部分。其不仅能够提高玻璃钢的强度和弹性模量,而且能减少收缩变形,提高冲击强度。合成树脂是玻璃钢的基体,松散的玻璃纤维靠其粘接成整体。树脂主要起传递应力的作用,即对玻璃钢的强度起重要作用,尤其是对抗压、弯曲、扭转、剪切强度的作用更为显著。玻璃钢集中了玻璃纤维和合成树脂的特性,具有质量轻、强度高、耐化学腐蚀、电绝缘性好、能透过电磁波、隔音、减震、耐瞬时高温烧蚀等特点。

印度于 1997 年由其科学技术部的技术信息、预测与评估委员会(Technology Information, Forecasting and Assessment Council, TIFAC) 立项研发木枕和钢枕的替

代材料,1998 年生产了第一批 12 根 FRP 轨枕样品,提交给印度研究设计和标准组织(Research Designs and Standards Organization, RDSO) 进行静态和动态测试,结果显示其承受 200 万次疲劳循环荷载作用后依旧状态良好。2000 年 RDSO 又订制了 40 根 FRP 轨枕,2001 年进行了现场测试并先后在北方铁路的 Najimabad 桥和东南铁路的 Chengail 桥上试铺^[40]。

中国铁道科学研究院从 2007 年开始进行 GFRP 轨枕的研究,并申请了国家专利“玻璃钢轨枕及其制造方法”^[41-42],研制了 TPDS 专用玻璃钢轨枕和 GFRP 轨枕 2 种新产品^[43]。2010 年与上海铁路局科研所联合研究了 GFRP 轨枕在有砟桥上的应用问题^[44],并于 2013 年在上海铁路局一条支线铁路混凝土桥(有砟轨道)上进行了试铺。

4.4 其他复合材料轨枕

1) 纤维增强聚合物混凝土轨枕

澳大利亚南昆士兰大学图文巴分校联合澳大利亚的铁路企业进行了一些采用新型纤维复合材料轨枕取代既有铁路线上劣化硬质木枕的研究和开发项目,产品之一就是纤维增强聚合物混凝土轨枕。其设计考虑了轨枕只在 2 根钢轨下面受力的特点,采用有限元分析辅助设计^[45],具有较大的横向移动抗力和良好的电气绝缘性能,配备标准扣件,钢轨下面可以不用垫板。这种轨枕正在澳大利亚昆士兰铁路公司和美国联合太平洋铁路公司试用。

2) 纤维复合材料夹层结构

2011 年澳大利亚南昆士兰大学图文巴分校研究了采用胶合层压复合材料夹层结构(glue-laminated composite sandwich structures) 制作铁路岔枕的技术,采用 3 种不同的设计方案制作了足尺试验模型,对其抗弯曲和剪切能力进行了系统的试验研究。结果表明,采用胶合层压夹层结构制造的岔枕与既有木质岔枕的机械性能基本一致,可以作为铁路岔枕的替代材料^[46-47]。2012 年 12 月 120 根这样的岔枕交付台湾地区使用。

采用这种玻璃纤维增强的聚合物轨枕没有展现出塑性特性,可能会在轻微预警之后破坏。当在道床上使用时这通常不是主要问题,因为开裂后的轨枕还能继续为钢轨提供一定的支撑。但是作为桥枕时,这可能是一个严重的问题,因为一旦其失效将不再能支撑钢轨。为此,澳大利亚南昆士兰大学图文巴分校研制了一种混合聚合物轨枕,在轨枕内部特定位置设置了钢筋,从而能在轨枕失效前提供足够的警告。2007 年 11 月澳大利亚铁道公司(Australian Railway Transportation Company, ARTC) 在猎人谷的一座铁路桥上安装了 22

根这样的桥枕。

3) 粉煤灰基地质聚合物复合材料

2012 年澳大利亚新南威尔士大学采用粉煤灰基地质聚合物复合材料(Fly Ash-Based Geopolymer Composite) 作为铁路轨枕的替代材料,对其原材料物理和力学性能进行了试验研究,并对采用这种材料制作的足尺模型梁进行了四点弯曲试验。结果表明其满足美国 AREMA (American Railway Engineering and Maintenance-of-way Association) 对复合材料铁路轨枕的最小挠曲要求,与既有铁路轨枕相比也具有满意的性能,可以作为铁路轨枕的替代材料^[48]。

4) 工程用天然橡胶

泰国是世界最大的天然橡胶生产国和出口国,泰国交通运输部成立了一个专门委员会研究天然橡胶的工程应用,其中一种可能就是利用橡胶复合材料制作铁路轨枕^[49]。

5) 以木质剩余物为增强材料的复合材料

1992 年俄罗斯沃罗涅日(Воронеж) 林业工程技术研究院 В. И. Харчевников 教授带领的团队开始研究以木屑为主要原料制作复合材料轨枕的技术,1994 年取得成功后申请了俄罗斯发明专利。这种复合材料轨枕的主要原料是木材加工中的废弃物,其来源和树种不限,经过 8 个月试用,效果较好。1995 年开始在沃罗涅日、叶列茨(Елец) 和利佩茨克(Липецк) 铁路分局的 36 条铁路线上试铺,并进行了长时间的运营试验,各项技术指标未见异常^[50]。

我国东北林业大学肖生苓教授带领的团队致力于研究以木质剩余物为增强材料的复合材料轨枕^[51-53],共拟定 4 种结构设计方案,均选用酚醛树脂作为基体材料,木质剩余物为增强材料,工业高炉灰渣为填充材料,并对各组分的作用进行了定性分析。

6) 整体包覆式再生橡塑复合材料

我国青岛颐安泰投资管理有限公司研制开发了整体包覆式再生橡塑复合轨枕,由内芯和包覆层外壳组成,经专用设备整体一次成型。其中内芯结构分为 W 槽型内芯结构和木芯型结构,包覆层外壳是利用废轮胎、废塑料等高分子废弃物经特殊工艺处理后制成的。这种轨枕已通过美国交通运输技术中心(TTCI) 的产品检验和测试,也满足美国 AREMA 的要求,已向美国、印度、智利等国家出口^[54]。

7) 重组竹(木) 材料

中国林业科学研究院木材工业研究所对采用重组竹(木) 材料替代传统铁路轨枕材料进行了探索性研究。重组竹是一种资源节约型材料,是将竹子疏解成帘状,即不打乱竹纤维的排列方向,保留竹材的基本特

性,进而重新组成具有高强度的重组板材。重组竹具有较好的物理力学性能,其多数指标可和普通刨花板和定向刨花板媲美,静曲强度、弹性模量达到或超过木材^[55]。这种技术的研究还处于起步阶段。

5 结语

世界各国铁路运营管理部门每年需要花费大量经费更换劣化的木枕。采用何种材料新制轨枕替换既有劣化和损伤的木枕,国情不同采用的方案也不同,但是出发点都是投入成本的核算。例如美国木枕价格远低于混凝土枕^[56],因此以新制木枕为主;我国则正好相反,木枕价格远高于混凝土枕,因此几乎全部采用混凝土枕替换普通线路上的木枕。

尽管国外铁路运营管理部门在制定铁路轨枕的维修策略时,木枕还是占据重要地位,但是在木枕的使用现状和可持续发展方面还是形成了共识,就是木枕使用寿命短,森林资源日益贫乏,能够适合制作木枕的优质木材资源逐渐紧缺。另外,木枕需要采用杂酚油进行防腐处理,随着世界各国对自然环境和工人身体健康的日益重视,杂酚油将逐渐退出木枕市场。因此,研究木枕的替代材料成为国外铁路运营管理部的紧迫课题,可再生的软质木材、混凝土、钢和复合材料都是研究对象。其中采用复合材料加固或新制铁路轨枕成为最活跃的研究方向。

采用复合材料加固木枕能有效改善木枕的受力性能,但是实际试用时出现纤维增强材料开裂和剥离等问题,因此这种模式还有待继续深化研究。

近20年来,许多国家都在研制具有自主知识产权的复合材料轨枕,因此新制复合材料轨枕形式多种多样,而且随着技术的进步还将有更多的形式。复合材料轨枕的增强材料包括玻璃纤维、废旧塑料、木质剩余物、层压板、天然橡胶、重组竹、农作物秸杆等,基体材料包括聚氨酯、酚醛树脂等。按照组分材料的分布可分为匀质复合材料轨枕(如FFU轨枕、GFRP轨枕等)和非匀质复合材料轨枕(如纤维复合材料夹层结构轨枕、整体包覆式再生橡塑复合材料轨枕等)。按照截面形式可分为实芯复合材料轨枕(如FFU轨枕)和空心复合材料轨枕(如GFRP轨枕)。迄今为止,实际应用的只有日本研制的玻璃纤维增强发泡聚氨酯合成轨枕和美国研制的回收塑料复合材料轨枕,其他形式的复合材料轨枕处于研发和试用过程中。

从国外研制复合材料轨枕的历程和发展趋势来看,多数都是从桥枕和岔枕入手,然后推广至普通线路。研究内容主要集中在轨枕的抗弯曲和抗剪切性

能、握钉能力、黏结层的强度、耐久性等方面,降低复合材料轨枕的成本也是需要解决的难题之一。

参 考 文 献

- [1] International Union of Railways (UIC) . SUWOS-Sustainable Wooden Railway Sleepers [R] . Pairs: UIC,2013.
- [2] 铁道部档案史志中心.中国铁道年鉴 2013 [M].北京:中国铁道出版社,2013.
- [3] THIERFELDER T, SANDSTRÖM E. The Creosote Content of Used Railway Crossties as Compared with European Stipulations for Hazardous Waste [J]. Science of the Total Environment, 2008, 402(1): 106–112.
- [4] MANALO A, ARAVINTHAN T, KARUNASENA W, et al. A Review of Alternative Materials for Replacing Existing Timber Sleepers [J]. Composite Structures, 2010, 92(3): 603–611.
- [5] GAUNTT J. A Tale of Two Realities Market Forces Collide, Conflict: Search for Equilibration [J]. Crossties, 2013(9/10): 6,8,10–11.
- [6] NORRELL F. Crosstie Forecast Changes: Looking Up for 2014 & 2015. [J]. Crossties, 2013(9/10): 6.
- [7] BOLIN C A, SMITH S T. Life Cycle Assessment of Creosote-Treated Wooden Railroad Crossties in the US with Comparisons to Concrete and Plastic Composite Railroad Crossties [J]. Journal of Transportation Technologies, 2013(3): 149–161.
- [8] HOWE J P, KOCH P. Dowel-laminated Crossties—performance in Service, Technology of Fabrication, and Future Promise [J]. Forest Products Journal, 1976, 26(5): 23–30.
- [9] 郭惠平. 我国铁路轨枕的现代化及其展望 [J]. 林产工业, 1998, 25(3): 4–6.
- [10] GONG M, DELAHUNTY S, CHUI Y H, et al. Use of Low Grade Hardwoods for Fabricating Laminated Railway Ties [J]. Construction and Building Materials, 2013, 41(41): 73–78.
- [11] 李玲桂. 巴西铁路试用不同材料的轨枕 [J]. 铁道知识, 2004(4): 20.
- [12] CARRASCO E V M, PASSOS L B, MANTILLA J N R. Structural Behavior Evaluation of Brazilian Glulam Wood Sleepers When Submitted to Static Load [J]. Construction and Building Materials, 2013, 26(1): 334–343.
- [13] 郝瀛. 铁道工程 [M]. 北京: 中国铁道出版社,2000.
- [14] 魏齐威, 安湘英, 仲新华. 钢桥明桥面用预应力混凝土桥枕的研究 [J]. 铁道建筑, 2002(12): 8–12.
- [15] Wikipedia. Concrete Sleeper [EB/OL]. [2016-06-18]. http://en.wikipedia.org/wiki/Concrete_sleeper.
- [16] 王汝敏, 郑水蓉, 郑亚萍. 聚合物基复合材料 [M]. 2 版. 北京: 科学出版社,2011.

- [17] QIAO P Z, DAVA LOS J F, ZIPFEL M G. Modelling and Optimal Design of Composite Reinforced Wood Railroad Crosstie [J]. *Composite Structures*, 1998, 41(1): 87–96.
- [18] DAVA LOS J F, ZIPFEL M G, QIAO P Z. Feasibility Study of Prototype GFRP-reinforced Wood Railroad Crosstie [J]. *Composite Structures*, 1999, 3(2): 92–99.
- [19] LOPRESTI J. Fiberglass Wrapped Tie Performance Evaluation Report [R]. American: Transportation Technology Center, Inc., 2005.
- [20] HUMPHREYS M F, FRANCEY K L. An Investigation into the Rehabilitation of Timber Structures with Fibre Composite Materials [C] // Proceedings of Developments in Mechanics of Structures and Materials. Perth, Western Australia, 2004: 1317–1322.
- [21] MANALO A, ARAVINTHAN T, KARUNASENA W. Fibre Composite Sandwich Beam: An Alternative to Railway Turnout Sleeper? [C] // Southern Region Engineering Conference, Toowoomba, Australia, 2010.
- [22] ERP G V, MCKAY M. Recent Australian Developments in Fibre Composite Railway Sleepers [J]. *Electronic Journal of Structural Engineering*, 2013, 13(1): 62–66.
- [23] Sekisui Chemical Co., Ltd. Products: Fibre-Reinforced Foamed Urethane [EB/OL]. [2016-06-15]. <http://www.sekisui.co.jp/index.html>.
- [24] 長藤敬晴, 阿部則次. 合成まくらぎ15年の経験 [J]. *鉄道総研報告*, 1997, 11(2): 43–48.
- [25] 日本工業標準調査会. JIS E1203: 2007 合成まくらぎ Synthetic sleepers—Made from Fiber Reinforced Foamed Urethane [S]. 日本規格協会, 2007.
- [26] TAKAI H, SATO Y, SATO K. Japanese Twenty Five Years Experiences and Standardization of Synthetic Sleeper [C] // Proceedings of the 7th World Congress on Railway Research (WCRR2006), Montréal, Canada, 2006.
- [27] KOLLER G. The Use of Sleepers Made of FFU Synthetic Wood in Europe [J]. *RTT*, 2009(2): 28–32.
- [28] KOLLER G. FFU Synthetic Sleepers Offer Material Gains [J]. *Railway Gazette International*, 2010, 166(8): 42–43.
- [29] OTTER D, PATTON R D, JOY R B. Developments in Alternative Bridge Ties for Open Deck Steel Bridges [C] // 2012 Annual Conference & Exposition, Chicago, IL., American, 2012.
- [30] 魏军. 广州地铁4号线直线电机轨道工程施工技术研究 [J]. *铁道标准设计*, 2007(7): 46–48.
- [31] 杨新民, 张立国, 张庆. 合成树脂轨枕的应用研究 [J]. *铁道标准设计*, 2009(6): 15–17.
- [32] 乔冬平, 郑劲东, 金小卫. 一种新型合成枕木: 中国, CN101314931A [P]. 2008-12-03.
- [33] 中华人民共和国住房和城乡建设部. CJ/T 399—2012 聚氨酯泡沫合成轨枕 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2013.
- [34] 成都铁路局工务处, 成都铁路工务有限公司, 西南交通大学, 等. 铁路桥梁明桥面合成轨枕研究 [R]. 成都: 成都铁路局工务处, 2014.
- [35] 王守琛. 新型高聚物复合材料轨枕成型技术的研究 [D]. 北京: 北京化工大学, 2012.
- [36] TieTek LLC. The Market Leader in Composite Ties [EB/OL]. [2016-06-15]. <http://www.tietek.net>
- [37] AXION International, Inc. ECOTRAX Composite Railroad Ties [EB/OL]. [2016-06-15]. <http://www.axionintl.com>
- [38] LOTFY I, FARHAT M, ISSA M A, et al. Flexural Behavior of High-density Polyethylene Railroad Crossties [J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F-Journal of Rail and Rapid Transit*, 2016, 230(3): 813–824.
- [39] SALLES A C N, WOIDASKY J, GRÄBE G. Polymer Railway Sleeper: One Alternative for the Plastic Waste Final Destination [C] // Plastic Europe, Identiplast 2010, London: 2010.
- [40] Permali Wallace Pvt. Ltd. FRP Composite Sleepers for Application on Rail Tracks Girder Bridges [EB/OL]. [2006-06-20]. From: <http://www.permaliwallace.com>
- [41] 凌烈鹏, 冯毅杰, 李家林. 异型玻璃钢轨枕的设计及应用 [J]. *铁道建筑*, 2012(7): 112–114.
- [42] 凌烈鹏, 李家林, 冯毅杰, 等. 玻璃钢轨枕及其制造方法: 中国, CN101289826 [P]. 2008-10-22.
- [43] 中国铁道科学研究院铁道建筑研究所. 特殊地段合成轨枕(玻璃钢枕)的研究 [R]. 北京: 中国铁道科学研究院, 2007.
- [44] 中国铁道科学研究院铁道建筑研究所. 既有线特殊地段(有砟桥)合成轨枕试验研究 [R]. 北京: 中国铁道科学研究院, 2010.
- [45] AWAD Z K, YUSA F T. Fibre Composite Railway Sleeper Design by Using FE Approach and Optimization Techniques [J]. *Structural Engineering and Mechanics*, 2012, 41(2): 231–242.
- [46] MANALO A. Behaviour of Fibre Composite Sandwich Structures: A Case Study on Railway Sleeper Application [D]. Australia: University of Southern Queensland, 2011.
- [47] MANALO A, ARAVINTHAN T. Behaviour of Full-scale Railway Turnout Sleepers from Glue-laminated Fibre Composite Sandwich Structures [J]. *Journal of Composites for Construction*, 2012, 16(6): 724–736.
- [48] FERDOUS W. Static Flexural Behaviour of Fly Ash-Based Geopolymer Composite Beam: An Alternative Railway Sleeper [D]. Australia: University of New South Wales, 2012.
- [49] PATTAMAPROM C, DECHOJARASSRI D, SIRISINHA C, et al. Natural Rubber Composites for Railway Sleepers: A Feasi-

- bility Study [R]. Thailand: Thammasat University, 2005.
- [50] 肖生灵. 我国铁路轨枕使用现状及轨枕材料发展趋势的研究 [J]. 森林工程, 2005, 21(4): 50-52.
- [51] 肖生苓, 陈玉霄. 铁路轨枕复合材料结构设计 [J]. 森林工程, 2006, 22(5): 48-50.
- [52] 肖生苓, 陈玉霄. 铁路轨枕复合材料组分的分析 [J]. 东北林业大学学报, 2006, 34(6): 90-91.
- [53] 肖生苓, 陈玉霄. 铁路轨枕复合材料组分特性及对整体性能影响的分析 [J]. 森林工程, 2007, 23(1): 85-87.
- [54] 袁强, 慕海滨. 整体包覆式再生橡塑复合轨枕的创新设计 [J]. 中国轮胎资源综合利用, 2008(7): 38-40.
- [55] 于雪斐, 刘雷, 于文吉. 重组竹(木)材料替代传统轨枕材料的探讨 [J]. 木材加工机械, 2011(6): 40-43.
- [56] The Railway Tie Association. Cost Comparison of Alternate Crosstie Materials [R]. American: The Railway Tie Association, 2006.

Research Status and Development Trend of Alternative Materials of Existing Wooden Sleepers

ZENG Zhibin^{1,2}

(1. Railway Engineering Research Institute, China Academy of Railway Sciences, Beijing 100081, China;
2. State Key Laboratory for Track Technology of High-Speed Railway, Beijing 100081, China)

Abstract Wooden sleepers occupied about 90% of the railway sleepers in the world. They have the problems including corrosion, cracking, and short service life. Thus, they can not meet the requirements of heavier vehicle axle loads, faster running train and growing volume of transport. Numerous deteriorating and damaged wooden sleepers need to be replaced while the supply of high-quality timbers for manufacturing wooden sleepers declines. Wooden sleepers' anti-corrosion treatment with creosote results in pollution and is harmful to the health of workers. An alternative materials of wooden sleepers become urgent for railway department all over the world. Currently, wood, concrete and steel are the main materials for sleepers. Composite sleeper has been attractive in recent years. In this paper, the research status of composite materials to reinforce the existing wooden sleepers is introduced. It focuses on the fiber-reinforced foamed urethane synthetic sleepers as the representative of the long glass fiber reinforced composite sleepers and the recycled plastic composite sleepers as the representative of the short glass fiber reinforced composite sleepers, and introduces briefly the other forms of composite sleepers. Finally, it is pointed out that the resistance to bending and shear, the screw-holding ability, the strength of bonding layer, the durability, and the life cycle cost of the composite sleepers require further investigation.

Key words Wooden sleeper; Alternative material; Composite sleeper; Fibre-reinforced foamed urethane synthetic sleepers; Plastic composite sleeper

(责任编辑 李付军)