

文章编号:1003-1995(2009)06-0096-05

国内外钢轨铝热焊接技术研究现状和发展

崔成林,高松福,迟俊杰,王宝秀,裘德海

(中国铁道科学研究院 金属及化学研究所,北京 100081)

摘要:总结了国内外钢轨铝热焊接技术的研究现状和发展状况,重点介绍了钢轨铝热焊接技术的发展历史,焊剂、砂型及铝热焊接工艺的研究现状,并重点说明部分钢轨铝热焊接前沿技术。

关键词:钢轨焊接 铝热焊接 技术综述

中图分类号:U213.9⁺2 **文献标识码:**B

铺设无缝线路是适应铁路提速重载运输发展,减小列车对轨道冲击作用,延长轨道使用寿命的有效手段。钢轨铝热焊接技术是铁路无缝线路钢轨焊接的重要焊接技术之一,在新线建设和既有线日常维修时均可采用钢轨铝热焊进行焊接。

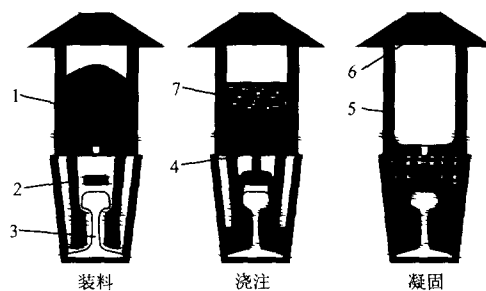
随着铁路运输提速和重载的发展,列车作用在轨道上的冲击载荷将加大,而焊接接头的平顺性直接影响冲击力的的大小。此外,高密度、大运量的运输方式又减少了线路维修作业时间,对焊接方式灵活快速性的要求大大提高。与其它钢轨焊接方法相比,钢轨铝热焊接方法设备简单、接头平顺性高、作业时间短、焊接占用空间小,目前在联合接头、辙岔、锁定焊、既有线应力放散、断轨抢修和日常换轨等工作中大都采用钢轨铝热焊接,因此,钢轨铝热焊接技术已成为铁路新线建设和既有线维护不可或缺的一种焊接方法^[1-3]。

1 钢轨铝热焊接的特点

钢轨铝热焊接就是将铝粉、氧化铁和其它合金添加物配制成的铝热焊剂放在特制的反应坩埚中,用高温火柴点燃,引发铝热反应。在反应过程中,放出大量的热熔合金添加物,与反应生成的铁形成为钢液,由于其密度大沉于坩埚底部,反应生成的熔渣较轻而浮在上部,在很短时间,高温的铝热钢水融化坩埚底部的自熔塞,浇注到与钢轨外形尺寸一致的砂型和局部预热待焊钢轨形成的封闭空腔中,同时铝热钢水本身又作为填充金属,与熔化的钢轨共同结晶、冷却,将两段钢轨焊成整体。图1为钢轨铝热焊接示意图。

由于铝热化学反应释放出大量的热,铝热反应产物的温度可达3 000 ℃,但实际焊接铝热钢水的温度一

般只需2 000 ℃左右即可。



1—焊剂;2—砂型;3—钢轨;4—钢水;
5—坩埚;6—坩埚盖;7—熔渣。

图1 钢轨铝热焊接示意图

钢轨铝热焊接的主要特点有:

1)设备简单。钢轨铝热焊接充分地利用了原料的化学反应放热,因而不需要或只需要一个很小的激发反应就可实现铝热钢水的生成。完成钢轨铝热焊接接头所需要设备的总重约400 kg,最重设备不超过85 kg,特别适合现场流动作业。

2)填充焊接。钢轨铝热焊接采用反应生成的铝热钢水填充待焊钢轨之间的间隙,焊接过程不需要拉伸钢轨,不影响即有铺设钢轨的位置。此外,接头的平顺性仅取决于对轨精度,焊后无需对接头进行校直,接头的平顺性高。

3)作业时间短。钢轨铝热焊接过程中,对断面清理的要求低,每个铝热焊接接头从准备到最后打磨完工,可在1 h内完成。修复断轨焊接两个焊接接头可在1.5 h内完成。

4)占用空间小。钢轨铝热焊接时,接头处横向间隙>50 cm即可,这是其它焊接方法无可比拟的。特别适合于道岔焊接。

5)占用工程时间少。新线建设过程中,仅需将待

收稿日期:2008-07-21;修回日期:2008-03-09

作者简介:崔成林(1963—),男,辽宁锦州人,副研究员,博士。

焊接头按要求预留合适的轨缝,焊接作业仅需松开接头两端各两个扣件,不影响其它工种作业。

2 钢轨铝热焊接技术发展历史

钢轨铝热焊接技术始于1983年,当时主要用于断轨修复。尤其在二战期间,钢轨铝热焊接技术快速修复轨道的能力得到更多的重视,各国都大力进行钢轨铝热技术的研究,使铝热焊接技术得到了空前的发展。由于钢轨铝热焊接接头金属为铸造组织,其强度和韧性较钢轨母材低,造成钢轨铝热焊接技术的折断率较高,加上近年来其它钢轨焊接技术的发展,因而钢轨铝热焊接技术方便快速修复断轨的特点没有得到充分发挥,其在无缝线路钢轨焊接中的影响也在减小。但是,由于轨道应急处理的需要和断轨修复快捷的优点,各国正着手于提高钢轨铝热焊接接头性能的研究。

世界各国发展无缝线路钢轨焊接技术各有特点。在世界各国铁路中,德国的钢轨铝热焊技术发展较早。早在20世纪中后期,西德的钢轨铝热焊技术及其使用范围、焊接材料和焊接机具都有很大发展。多年来,德国在铁路上全面采用钢轨铝热焊接技术,使该项技术得以不断改进。目前,现场普遍采用的“短时预热快速铝热焊法”,几乎成为德国联邦铁路现场焊接钢轨接头的唯一方法。德国“短时预热快速铝热焊法”的最大特色是改进了预热的加速器,将铝热焊的预热时间大大缩短,从而使铝热焊接头的焊接时间缩短为8~9 min,并改善了焊头的材质性能,使焊接接头更加可靠^[4]。除了焊接工艺和耗材之外,德国施密特集团还开发了整套铝热焊专业设备和焊接辅助材料,如液压钢轨推瘤装置,一次性使用坩埚等。

法国在高速铁路钢轨焊接技术上发展较快,基地焊接采用接触焊法,现场线上焊接有移动式接触焊和QPCJ铝热焊。QPCJ铝热焊可以成功地完成一个钢轨接头的焊接,有严密完整的焊接工艺。从焊接现场前的准备工作、焊接现场的准备工作、轨道的准备工作、钢轨端头的准备、钢轨端头的对正、砂模的准备、预热、焊药包的准备、浇注、拆除砂模和推瘤、热打磨、冷打磨到收尾工作共分13个步骤,每一步骤都有详细的规定和注意事项^[4]。

我国铁路长钢轨的焊接始于1957年,当时采用的是由捷克引进的电弧焊接技术。使用中,发现这类焊接方法焊接质量低、铺后断折率高,后相继拆除。之后,又由前民主德国引进铝热焊技术,焊剂也是由前民主德国进口的。至1963年,我国铁路开始采用气压焊、接触焊等方法,并相继建成几十个焊轨厂,现场联合接头焊接和断轨再焊采用铝热焊和小型气压焊^[4]。

中国铁道科学研究院于1957年开始钢轨铝热焊接技术的研究,1966年开始成批生产铝热焊剂用于湿模铝热焊接法。20世纪70年代中期,采用干型小焊筋快速预热工艺,并研制了中耐磨焊剂。20世纪80年代中期,研究了定时预热工艺,并研制了高耐磨焊剂。进入90年代,在铝热焊剂、焊接工艺和焊接设备上均有不同程度的改进。直到1997年我国铁路大提速前,全路铝热焊剂每年用量为3 000份左右。中国铁道部原工务局于1993年引进法国Railtech公司焊剂,经铁道部科学研究院检验和鉴定合格,开始使用和推广。广铁集团于2000年应用德国THERMTI公司SKV钢轨铝热焊技术,采用双侧顶浇注、短时快速预热、大剂量焊剂及自熔塞和焊瘤推除等先进工艺焊接钢轨,较好地提高了焊接质量,减少了铸造缩孔等缺陷。该铝热焊具有预留轨缝25、50、80 mm可供选择,能满足不同焊缝宽度的焊接需要,能采用多次性坩埚或一次性坩埚,并具有坩埚支架为一体的特点。2003年,经过五次大提速,线路改造力度逐渐加大,钢轨铝热焊接产品的使用量已达到3万份。2005年,钢轨铝热焊接产品年使用量在10万份以上。目前,钢轨铝热焊接产品90%以上由法国Railtech公司进口。

3 钢轨铝热焊接技术研究状况

3.1 钢轨铝热焊剂

钢轨铝热焊剂是钢轨铝热焊接技术最为重要的技术,各国对焊剂的研究并没有公开其原理性的设计资料,并进行专利保护。德国、法国、日本、美国均有相关铝热焊剂方面的专利保护,仅对焊剂的适用类型及应用方面的情况予以公布。目前国内市场上应用的焊剂主要有两种类型,一种是硬度为280 HB左右级别的,适用于我国U71Mn钢轨的焊接,另一种是300 HB左右级别的,适用于U75V钢轨的焊接。

随着铁路线路重载运输的发展,为提高钢轨的使用寿命,减小钢轨磨耗,采取了多种方法。其中,增加钢轨硬度是提高钢轨使用寿命的有效手段。随着钢轨硬度和耐磨性的增加^[5],热处理钢轨踏面的硬度一般都在340 HB以上,离线热处理U75V钢轨踏面的硬度高达370 HB^[8]。合金轨钢具有较普通轨更高的硬度,轧态合金轨钢的硬度可达350 HB,我国鞍钢开发的热处理U77MnCr钢轨及攀钢开发的热处理PG4钢轨的硬度可达到370~390 HB^[7]。为适应高硬度钢轨的需求,高硬度钢轨铝热焊接技术的研究也在积极进行中。

3.1.1 铝热焊接金属合金化

碳对提高钢轨铝热焊缝金属强度效果较大。增加焊接接头金属含C量可以明显提高接头的硬度。随

着含 C 量的增加,焊接接头金属中渗碳体的比例会增加,从而明显增加焊接接头的硬度。此外,在铝热焊接金属内添加少量的合金元素,可以细化珠光体晶粒和减小片层间,从而提高焊缝金属的硬度。在焊缝中添加的合金元素主要有 Cr、V 等。

英国 Schroeder L C 和 Poirier D R 尝试了在焊缝金属中添加 Cr、V 等合金元素以提高焊缝金属硬度的方法。

法国 Railtech 公司推出的高硬度铝热焊接产品,即主要通过增加焊接接头金属中的含 C 量及微合金化来提高接头的硬度。使用法国高强焊剂焊接 75 kg/m 热处理 PG4 钢轨所检测到的焊接接头的硬度为 336 HB,钢轨母材的硬度为 352 HB。焊接接头的平均抗拉强度 810 MPa,为钢轨母材强度的 65%,平均延伸率为 0.2%^[9]。

中国铁道科学研究院采用增加焊缝金属中 C 含量的方法及合金强化的手段研制成功的高强度铝热焊剂已经成功应用于 75 kg/m U77MnCr 钢轨的焊接,并通过铁道部质量检验监督中心的型式检验。

3.1.2 添加梯度分布 V 元素

由于高硬度钢轨铝热焊接接头的韧性较低,因而焊接接头的稳定性差,易在服役期间发生脆断,给铁路运营带来安全隐患。德国 Thermit 公司在焊缝金属中加入梯度分布的 V 元素,以使焊缝在轨头部位获得高硬度,在轨底获得低硬度高韧性的方法来提高钢轨铝热焊接接头的综合性能。这种梯度分布 V 元素的加入是依靠在轨顶加上一个 V 铁的合金块,见图 2。

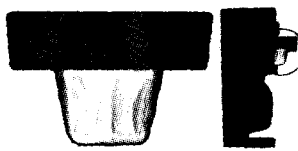


图 2 轨头合金块

当铝热钢水浇注到砂型型腔中以后,位于轨顶上部的 V 铁合金块在高温铝热钢水的浸泡作用下发生熔化,由于合金块距离钢轨顶部的距离较近,因而在轨顶得到的 V 元素的含量会较高。图 3 所示为在焊缝金属中沿钢轨高度方向 V 元素含量和硬度分布的情况。轨头部位 V 元素含量高达 0.25%,硬度约为 370 HB,而轨底部 V 元素含量约为 0.05%,硬度仅有 255 HB 左右。此外,轨头部位焊缝金属的抗拉强度为 980 MPa,延伸率仅为 0.5%,而在轨底部位,焊缝金属的抗拉强度为 810 MPa,延伸率高达 5.5%。

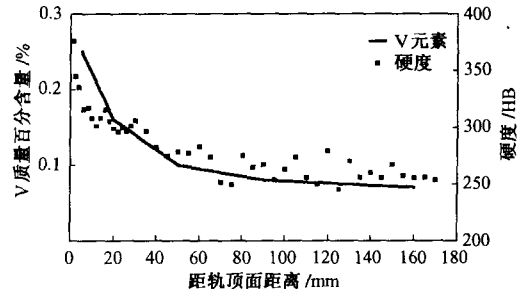


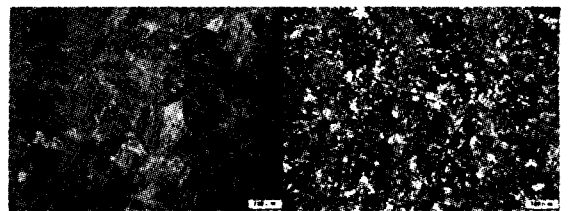
图 3 焊缝金属 V 含量及硬度在钢轨高度方向分布

在焊缝金属中添加梯度的 V 元素可大大提高轨底的延伸率,同时也可以大大提高轨顶焊缝金属的硬度,使接头具有轨头踏面高硬度及轨底高韧性的综合性能。目前,这种产品应用于欧洲铁路 UIC 60 kg/m 钢轨约 100 套,在国内应用还比较少。

3.1.3 热处理提高焊缝金属的硬度

中国铁道科学研究院尝试了采用热处理的方法提高焊缝金属的硬度。试验研究了焊后推瘤后立即进行吹风的方法来提高焊缝踏面的硬度^[8]。

焊缝金属推瘤后进行吹风,可以明显细化轨头金属组织。图 4 所示为焊缝金属未经过吹风和经过吹风的轨头组织对比。当吹风压力为 0.5 MPa,吹风时间为 3 min 30 s 时,焊缝踏面的硬度可高达 330 HB 左右,见图 5。



(a) 未吹风 (b) 吹风

图 4 推瘤后吹风处理焊缝金属组织变化

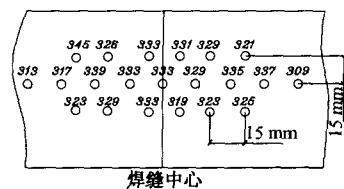


图 5 推瘤后吹风处理接头踏面硬度分布(单位:HB)

3.2 砂型设计水平的提高

砂型与待焊结钢轨一起组成了铝热金属凝固的型腔。砂型结构对铝热钢水的凝固顺序及预热情况的影响受到各国铝热焊接研究工作者的认同,但是,处理砂型结构对铝热焊接接头质量影响方法上有所不同,所得到的结论差别也很大。

Thermit 公司对浇注系统的研究较为全面,已设计成功的多种系统见图 6,并已经在实际中有所应用。这些浇注系统分别应用于不同情况下的不同焊接状态,应用最为普遍的是双冒口顶侧浇注式,如图 6(c)所示。多年来的发展可以看出,Thermit 在浇注系统的改进并不大,基本上采用这种浇注系统。

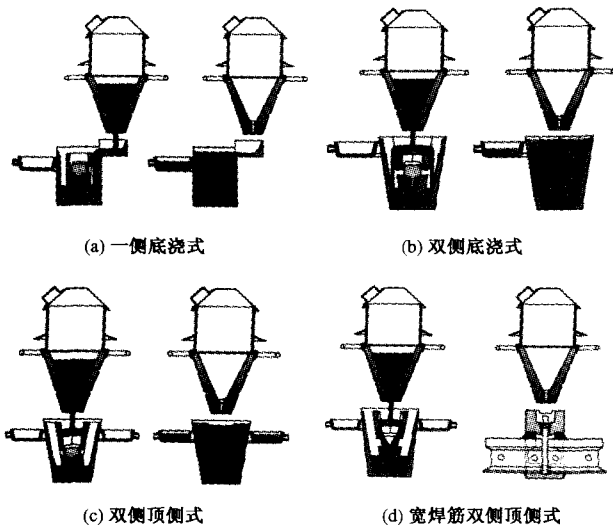


图 6 Thermit 发展的几种浇注系统

Thermit 在砂型结构设计方法上,主要采用热传导的方式,进行焊接缺陷的预测和模拟。在砂型模具的制造上采用数控一次成型模具,模型精度较高,见图 7。

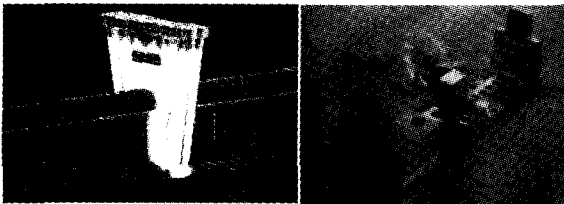


图 7 Thermit 砂型设计模拟和数控成型模具

Railtech 公司的浇注系统主要有双冒口和四冒口两种。Railtech 浇注系统的设计引入了对钢水流入时的流动方向分析,并考虑到了凝固收缩的影响,因而其焊筋设计形状较大,用于补充金属液的凝固收缩。两者各成体系。中国铁道科学研究院利用三维造型功能进行砂型模具的制作,正处于利用数值模拟的方法进行砂型结构的设计和应用的阶段。此外,还有许多学者研究了砂型焊筋尺寸对焊接接头的影响^[9],并提出了改进的措施。

3.3 坩埚设计水平的提高

钢轨铝热焊接坩埚用坩埚有两种,即耐用多次坩埚和一次性坩埚,两种坩埚均满足使用要求。

由于耐用多次坩埚成本低廉,所以在世界各国中使用较多,其设计水平和产品性能也在不断地提升。我国耐用多次坩埚的使用寿命约为 25 次,而国外公司通过改进设计,耐用多次坩埚的使用寿命在 100 次以上。

由于耐用多次坩埚工装复杂,工艺繁琐,近年来开发的一次性坩埚使用方便,用后抛弃,因而陆续投入应用。由于其成本较高,在世界其它国家的应用并不是很广泛。一次性坩埚主要有两种形式,一种是外层铁桶,内层为烘干硬化的水玻璃砂,其主要优点是适合于长途运输,搬运过程中不易破损,德国和我国一次性坩埚均采用这种形式。另一种形式的一次性坩埚是由树脂砂制作的,其突出优点是使用后溃散性好,易于现场处理,法国一次性坩埚主要采用这种形式。我国钢轨铝热焊接现场所采用的一次性坩埚主要是法国生产的树脂砂型一次性坩埚。不同国家钢轨铝热焊接生产的一次性坩埚见图 8。

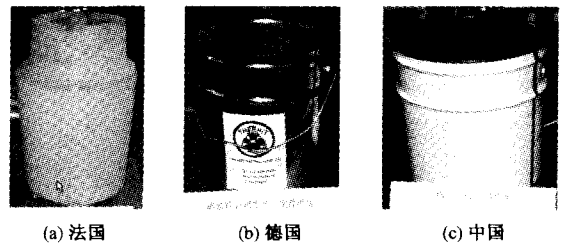


图 8 不同国家生产的一次性坩埚

3.4 钢轨铝热焊接工艺

钢轨铝热焊接工艺是影响焊接接头质量的重要因素。工艺的可操作性是影响产品性能的重要指标之一。

3.4.1 德国的 SKV 工艺

德国 Thermit 公司于 20 世纪初,第一次进行了把钢轨焊接在一起的试验。1928 年铝热焊工艺被德国帝国铁路认可用来焊接钢轨。二战之后,几乎世界上所有的铁路部门都决定开始他们的无缝钢轨焊接基础设施工作。1955 年开发的快速焊接方法“SMW”,大大减少了钢轨铝热焊所需的时间,极大地提高了经济效益。1972 年开发的新的快速焊接方法“SKV”,更进一步改善了工艺,被德国联邦铁路和全球的铁路部门认定为铝热焊工艺标准。SKV 的工艺特点是预热时间短。焊接 UIC 60 kg/m 钢轨,该工艺要求的预热时间仅为 1.5~2.0 min。

3.4.2 法国的 QPCJ 工艺

法国 Railtech 公司的钢轨铝热焊接技术即快速预热一次性坩埚焊接工艺。该焊接工艺具有焊接质量稳

定、安全可靠、设备简单、快速方便、受人为因素干扰少等诸多优点。现在,我国各个铁路局的工务部门广泛地将其应用于区间无缝线路以及跨区间超长无缝线路的铺设。法国 Railtech 公司的钢轨铝热焊接技术在法国和许多其它的国家高速铁路及普通铁路得到广泛的应用。

3.4.3 中国的 TYD 工艺

中国 TYD 工艺的主要特点是在恒定的工艺参数规范下,用时间控制钢轨端面的预热温度,保证浇注时钢轨端面温度的均匀分布,并在砂型结构的设计上,利用铝热钢水加热待焊钢轨,使其调整到完整的焊接温度范围。用定时预热工艺大大降低了人为因素的影响,使焊接质量稳定可靠。由于现场条件,预热的工艺参数很难保证恒定。近几年,进行了 TYD(定时预热)工艺的优化改进,除了预热时间外,还把观察预热端面颜色作为判断预热温度的标准,增强了焊接工艺的适用性。

3.5 钢轨铝热焊接技术探索性研究

3.5.1 挤压铝热焊

伊利诺斯大学通过挤压的途径,来提高焊接接头的质量。在铝热焊接金属还未完全凝固的时候,将两端钢轨向中间挤压,可以减少焊接金属内部的夹杂,见图 9。

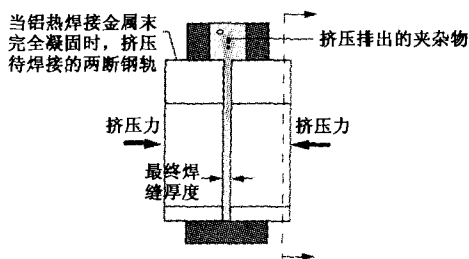


图 9 挤压铝热焊

由于挤压铝热焊需要两端钢轨的顶锻,所以会影响焊接接头的平顺性。研究的机械振击铝热焊、电磁搅拌铝热焊和超声波振击铝热焊均是通过在焊接金属未完全凝固状态施加外作用,用来影响金属枝晶的生长,达到细化晶粒和提高接头金属性能的目的。

3.5.2 铝热钢水的过滤

Schroeder L C 和 Poirier D R 尝试了使用过滤网过滤铝热钢水,以净化钢液和提高接头质量。滤网是由含 24% ZrO 的多铝红柱石制成。虽然滤网在高温钢水的作用下部分熔化,但经检测,经过滤后的铝热钢水,其中夹杂物含量明显减少。

4 结语

自 20 世纪初钢轨铝热焊接技术问世以来,由于钢轨铝热焊接技术在轨道焊接中不可或缺的地位,对钢轨铝热焊接技术的研究逐步深入,钢轨铝热焊接接头的质量、钢轨铝热接技术的应用范围均大大提升。随着无缝线路里程的逐年增加,铁路提速重载的发展,对钢轨铝热焊接产品的需求量不断增加,对钢轨铝热焊接接头质量的要求不断提升,应时一步对钢轨铝热焊接技术进行深入研究。

参 考 文 献

- [1] Ueyama Katsuyoshi, Yasuto, Fukada Yamamoto Ryuichi, et al. Improvement in fatigue strength of thermite welds on rails[J]. Yosetsu Gakkai Ronbunshu/Quarterly Journal of the Japan Welding Society, 2003, 21(1): 87-94.
- [2] Mutton P J, Alvarez E F. Failure modes in aluminothermic rail welds under high axle load conditions [J]. Engineering Failure Analysis, 2004, 11(2): 151-166.
- [3] Kristan J. Advances in rail welding. Railway Track and Structures [J]. 2004, 100(2): 15-17.
- [4] 任德亮, 李向国. 无缝线路钢轨焊接技术[J]. 焊接技术, 2003, 32(5): 4-5.
- [5] 董志洪. 21 世纪钢轨钢的展望[J]. 钢铁, 1999, 34(8): 73-74.
- [6] 周清跃, 张银花, 杨来顺, 等. 钢轨的材质性能及相关工艺[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2005: 93-96.
- [7] 张银花, 周清跃, 崔建初. 1 300 MPa 级在线热处理钢轨焊接及焊后热处理技术的研究[R]. 北京: 铁道科学研究院, 郑州铁路局, 2005: 24-26.
- [8] 崔成林, 高松福, 刘艳红, 等. 钢轨铝热焊接工艺优化及新型珠光体焊剂研制[R]. 北京: 铁道科学研究院, 2006: 30-33.
- [9] Cyre J P. Concepts for improving the fatigue resistance of thermite rail welds[D]. MS Thesis, Urbana-Champaign: University of Illinois at Urbana-Champaign, 2002.

(责任编辑 白敏华)

西班牙 ETCS 2 级试验

ETCS 是“欧洲列车控制系统”的英文缩写,它是 ERTMS 的核心部分。西班牙铁路基础设施局已开始马德里至巴塞罗那高速铁路的马德里至莱里达段进

行 ETCS 2 级的试验。ETCS 系统升级到 2 级后,采用 GSM-R 传输控制信号,无线闭锁中心可使列车的商业运行最高速度由时速 300 km 提高到时速 350 km,运能也将大大提高。

摘自《铁道知识》