

# 我国高速列车焊接技术及其新发展

王元良, 骆德阳, 王一戎

(西南交通大学 焊接研究所, 四川 成都 610031)

**摘要:** 阐述了我国高速列车焊接技术及其新发展, 包括: 机车车辆转向架结构及焊接、车体结构的焊接、高速动车不锈钢耐候钢混合车体的焊接、铝合金高速列车车体焊接。回顾了现状, 探讨了发展。

**关键词:** 机车车辆; 焊接结构; 焊接技术

**中图分类号:** TG40; U26

**文献标识码:** C

**文章编号:** 1001-2303(2008)08-0008-05

## Welding and its development of bullet train

WANG Yuan-liang, LUO De-yang, WANG Yi-rong

(Welding Research, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

**Abstract:** Expounded the welding technology and new development of bullet train, including the rolling stock bogies structure and its welding, the structure body's welding, stainless steel mixing body's welding of bullet power and aluminum bullet train. Reviewed the history and explore the development.

**Key words:** locomotive; welding constructure; welding technics

## 0 前言

铁路机车车辆工厂是焊接工作量很大的生产单位, 主要产品有车体结构、车底架结构、转向架结构、制动风钢结构、罐车结构等, 这些都是重要的承载焊接结构。铁路机车车辆使用材料广泛, 包括低碳钢及低合金钢、中高碳钢、合金钢。在高速重载运输中, 减轻车体自重非常重要, 而要发展不锈钢或铝合金的焊接结构, 就需要开发新的焊接方法和工艺。在此仅对发展高速列车中几个主要问题作一些阐述和探讨。

## 1 机车车辆转向架结构及焊接

### 1.1 机车车辆转向架结构

转向架结构原为铸钢结构, 后改为焊接结构; 原来采用 A3 钢, 现用 16Mn 或 09Mn2 钢制造。转向架是一个复杂的动载结构, 它由两个焊接箱型侧梁、两个焊接横梁及两个焊接端梁组焊成一个目型

构架, 并在此构架上安装焊接制动缸座、中间制动座、上下拉杆座、侧挡座、减震器座、轴箱止挡、筋板和补板等零部件。现在高速列车的摆式列车转向架结构更为复杂。因此, 高速重载运行的机车车辆转向架结构必须在设计构造细节和焊缝设计方面综合考虑, 减少应力集中和合适的焊后处理都是提高疲劳强度和抗脆断能力的重要途径, 是列车安全运行的关键。

### 1.2 转向架结构的焊接

转向架结构的焊接过去采用 4043 焊条手工焊, 目前大多在转胎上采用 H08Mn2Si 焊丝+CO<sub>2</sub> 气保护焊或混合气体(Ar+CO<sub>2</sub>)保护焊, 以减少焊接变形, 可提高生产率 2~3 倍<sup>[1]</sup>。现在有的工厂已采用机器人焊接, 这将大大提高焊接质量, 减少因焊接缺陷引起的应力集中, 提高疲劳强度和抗脆断能力。如能改 16Mn 钢为 14MnNb 钢或更高强度的大线能量低裂纹敏感性钢 WDL610D2, 匹配相应的焊接材料, 改进焊接方法、焊接工艺和焊后加工处理, 还有可能进一步提高焊接接头部位的性能, 进而提高疲劳寿命和抗脆断能力。减轻簧上质量也是列车轻量化措施之一, 国外除在研制高强钢转向架之外,

收稿日期: 2008-07-21

作者简介: 王元良(1929—), 男, 重庆人, 教授, 中国桥梁钢结构协会理事, 四川省及成都市焊接专业委员会副主任委员, 主要从事焊接工程方面的软科学研究以及焊接材料、自动化系统工程的研究和教学工作。

也在研究开发铝合金和复合材料转向架。

1.3 焊接转向架结构的疲劳强度及提高

在初期铸改焊时,由四方车辆研究所对初期铸改焊时的客车转向架侧架焊接结构实物进行了疲劳试验。为了调整和减低焊接残余应力峰值,采用热时效处理和震动时效处理,分别对转向架整

体结构进行了 200 万次以上的疲劳试验,试验结果如表 1 所示。由表 1 可知,热时效可提高启裂寿命和总寿命(断裂失效寿命),震动时效处理更是明显,因此震动时效优于热时效,是一种节能、快速、高效和经济的降低焊接残余应力和提高疲劳强度的好方法。

表 1 客车焊接转向架不同时效后的疲劳试验结果<sup>①</sup>

结构	时效类型	启裂寿命	提高率	总寿命	提高率
转向架侧梁 1	未时效	145 100	—	456 000	—
转向架侧梁 2	热时效	158 000	比侧梁 1 提高 10.4%	491 500	比侧梁 1 提高 7.8%
转向架侧梁 3	震动时效	362 000	比侧梁 2 提高 129%	934 300	比侧梁 2 提高 90.1%
转向架整体 1	热时效	0.75×10 <sup>6</sup>	—	2.72×10 <sup>6</sup>	—
转向架整体 2	震动时效	1.16×10 <sup>6</sup>	比整体 1 提高 55%	3.26×10 <sup>6</sup>	比整体 1 提高 20%

在高速动力车研制中,西南交通大学对高速内燃机车转向架焊接结构(太原机车厂制造)进行了 6×10<sup>6</sup> 万次模拟运行状态受力的疲劳试验,在结构应力集中处和焊趾应力集中处产生疲劳裂纹启裂,启裂寿命 1.51×10<sup>6</sup>,裂纹扩展率为 10<sup>-7</sup>~10<sup>-6</sup>,2×10<sup>6</sup> 次以上止裂,以后又增加载荷试验仍为止裂状态,直至大于 6×10<sup>6</sup> 万次停止试验。如能采取阶梯加载直至断裂还可求出真正的疲劳寿命。本转向架如采用上述微合金化钢或震动时效,预计还可提高启裂寿命和疲劳寿命。近期西安交通大学对内燃机车转向架焊接结构震动时效后残余应力进行实测,其消除率达到 51%,较热时效后的 45%要高,峰值应力消除率平均达到 62%,个别部位达到 86%。

近几年由西安交通大学和西南交通大学对资阳内燃机车厂生产的柴油机体用四川立应公司生产的 VA3506 型全自动振动消除应力专家系统分别用磁应变法和小孔释放法测试都证明,各测试区应力分布不同,振动时效后有均匀化的趋势,高区降低最多,低区变化很小。西安交通大学磁测结果是整个机体降低平均值大于 30%,高应力区平均降低值大于 70%;西南交通大学小孔释放法测试结果是两个高应力区降低值为 81.3%和 89.7%。这与振动时效处理的机理完全吻合。从另一个侧面也证明了振动时效消除残余应力的效果。只要整个机体的峰值应力区(焊接结构一般都在焊缝及热影响区)残余应力下降,就会提高该区的启裂寿命和抗脆断能力。

转向架结构是机车车辆的重要结构。由于结构复杂,位置多变,最好采用机器人焊接;如能用微合金化的药芯焊丝气保护焊可获得高的焊缝韧性和低的应力集中敏感性;如采用焊缝的层间或焊后锤击(风动或超声锤击)处理,既可消除表面一定深度的拉应力,还能消除由此引起的焊接残余变形,达到焊后不校正或少校正的目的。

2 车体结构的焊接

车体结构是机车车辆的主体,分为内燃机车或电力机车车体结构(装载动力设备)、货车车体结构(敞车和棚车为载运货物)和客车车体结构(载运旅客),还有一些特殊车辆。虽然用途不同,制造厂家也不同,但结构型式和焊接大体相同。

2.1 车体结构

车体结构的主要承载结构为底架,底架由中梁或牵引梁、枕梁、横梁、侧梁、端梁等梁类结构和波纹地板及车电、制动、供水等组件组焊而成,再将侧墙、端墙和车顶组焊成车体。车体结构及其载重通过摇枕、转向架及其簧下结构传到钢轨;另一方面,机车动力通过中梁或牵引梁带动整个车体及其载重运行。因此底架是一个承受复杂载荷(包括冲击和振动)的重要结构,在材料上目前广泛采用 09MnCuP 耐候钢,且随着高速列车的发展,朝着铝合金和不锈钢方向发展,对机车车辆工厂的生产是一个重大突破。

2.2 车体结构焊接半自动和自动化

在焊接方法上,钢制车体广泛采用埋弧自动焊和 CO<sub>2</sub> 气保护焊。20 世纪 50 年代初,齐齐哈尔车辆

<sup>①</sup>庞德馨等.振动处理技术对焊接构件疲劳特性的影响,振动消除应力及 VA 系列振动消除应力设备,四川立应科技股份有限公司,2001.

专题讨论——现代铁路焊接技术与装备

厂的货车生产就已形成各种梁类结构简似的有熔剂自动回收的细丝埋弧自动焊生产线,推广到各厂应用至今。在组装焊接上,由大连机车车辆厂首先采用  $\text{CO}_2$  气保护焊并在全国机车车辆厂推广,为了提高焊缝质量,不少工厂改用混合气体保护焊,药芯焊丝气体保护焊尚待推广。多数工厂在墙体和地板生产中采用  $\text{CO}_2$  气保护自动焊,但在很多梁类结构的筋板和墙体、地板和顶棚的组装焊接中仍采用手工  $\text{CO}_2$  气保护半自动焊,这尚待进一步自动化。内燃机车水套、锅炉烟管都由专机进行  $\text{CO}_2$  气保护自动焊。内燃机车立柱、齿轮罩等由专机进行双头  $\text{CO}_2$  气保护自动焊;在由两根工字钢和上下盖板组成的箱形中梁焊接中,采用专机进行四头  $\text{CO}_2$  气保护自动焊。采用双头或四头  $\text{CO}_2$  气保护自动焊接,其好处是不仅提高生产率,更重要的是能够减少焊接变形,大大减少焊后矫正变形的工作量<sup>[1]</sup>。以上实例均是早期由工厂自己设计制造而成,甚至连焊机都必须自制或外委。现在已有专门设计制造各种新型高性能焊接电源、自动焊机、专机和成套设备,也有各种转胎、滚轮架和焊接中心标准产品,可方便地组装成各种自动生产线,如焊研威达就为沈阳车辆厂建立了侧墙和地板生产线。在难焊位置、焊缝集中区域和焊接位置多变的焊缝采用焊接机器人代替手工焊或半自动焊以提高焊接质量和减轻工人劳动强度。

在客车生产中,底架与货车和内燃机车相似,但壳体较薄,一般为 2~3 mm,平整度要求高,采用  $\text{CO}_2$  气保护焊较手工焊提高生产率一倍以上,焊接变形大大减少。在上下墙板焊接中,建立了由料车、机械手(电磁上料)、冷却铜垫、自动压紧和卸载装置组成的上下墙板  $\text{CO}_2$  气保护自动焊接生产线,提高了焊接质量,增加了墙板整体和焊缝处的平整度,使总生产率提高两倍。在接板下料中,有的客车厂引进了水下等离子切割设备,在接板中引进了加焊料带的接触对焊机,提高薄板坯料的平整度。在一些墙和立组柱连接中,目前多采用向下  $\text{CO}_2$  气保护半自动立焊和  $\text{CO}_2$  气保护半自动点焊。由此看来,在车辆生产中,全位置轻型智能化的  $\text{CO}_2$  气保护自动焊设备的研究开发与推广应用很有必要。

### 3 高速动力车不锈钢耐候钢混合车体的焊接

在高速铁路动力车研制中采用不锈钢耐候钢

混合车体结构以减轻车辆自重,底架及车体骨架采用耐候钢 09MnCuPCrNi-A,蒙皮采用 1.5 mm 厚不锈钢 1Cr18Ni9Ti。对于耐候钢的焊接,机车车辆工厂采用  $\text{CO}_2$  气保护焊接已有多年历史。在此仅对不锈钢接板焊接及不锈钢蒙皮与耐候钢骨架的焊接加以阐述。

#### 3.1 不锈钢接板的焊接<sup>[2]</sup>

不锈钢接板的下料最好采用水下等离子切割,不能用一般的等离子切割,国外也有用砂轮片切割的实例。焊接采用加焊料带的接触对焊或填丝脉冲自动 TIG 焊,也可使用加少量  $\text{O}_2$  或  $\text{CO}_2$  的自动 MIG 焊。焊后不得用火焰切割和热矫正。试验证明,采用 H0Cr18Ni9Ti、H0Cr19Ni129Mo2、H0Cr20Ni10Ti 三种焊丝 TIG 焊均无裂纹,三种焊丝 TIG 焊和 MIG 焊焊接接头的腐蚀率与母材相近,抗应力腐蚀能力也较好,只有 H0Cr20Ni10Ti 的接头出现晶间腐蚀(刀蚀),当加热至 600 °C 以上时刀蚀严重,700 °C 时出现通长刀蚀,失重率提高 20~30 倍,因此要严防热矫正。

#### 3.2 不锈钢与耐候钢焊接

不锈钢蒙皮与耐候钢立柱焊接是一个难题,由于两者成分差异很大,焊缝边缘会出现马氏体组织,再加上两者膨胀系数差异很大,出现裂纹的倾向大,选用含 Ni 高的焊丝,有利于减少裂纹倾向,故选用 H0Cr24Ni13 焊丝,根据工厂现有条件选用 MIG 下向焊。焊缝侧采用有铜垫板的压紧卡具,以加快冷却和防止变形。在不锈钢蒙皮与耐候钢立柱或纵梁翼缘外伸部分连结处,采用断续 MIG 角焊。为了减少焊接变形,根据需要委托成都天府公司设计制造了长臂(1 200 mm)DN2-60X 一体式悬挂点焊机,并专门制造了三种插入式电极(电极直径均为不锈钢侧 9.5 mm 和耐候钢侧 14 mm)以满足各种焊接要求,总机价格大大低于进口相应焊机。根据 1.5 mm 厚不锈钢与 3 mm 厚耐候钢的焊接规范优选参数的试验结果,其单点剪切强度均大于 7 500 N/点,在 10 个试件中,除一个为 8 575 N/点外,其余均为 10 682~14 337 N/点。焊点无裂纹,变形很小<sup>[2-3]</sup>,不锈钢平整无压痕,因此采用接触点焊进行墙板与骨架的焊接十分必要。如对目前生产的动车组,不锈钢蒙皮与不锈钢立柱焊接只要适当调整电极和焊接规范,也可用此设备进行焊接。

### 4 铝合金高速列车车体结构及焊接<sup>[4]</sup>

运载工具轻量化是国内外运载工具设计和使



用者长期追求的目标,因为可以节能和提高运行速度,增加运输质量,减少能源消耗和大气污染等,而铝合金化是首选方案。如 18M 铁路货车采用铝合金轻量化与钢车比较:节能 10%,增效 10%,修理费少,废铝合金车回收价为钢车的 4 倍。客车及地铁车辆用铝合金可减轻质量 34%~53%。目前我国已开始生产的时速 200~350 km/h 的高速动车组也已广泛使用铝合金车体结构。

4.1 铝合金车体结构

铝合金车体结构与钢结构完全不同,它由不同型式的空心型材结构组成以提高刚度,空心型材由铝加工厂按车体长度挤压成型,最大宽度达 600~700 mm,壁厚 2~3 mm。早期研制高速车时国内尚不能生产这种型材,为了单台开模具,经济不划算,故按 ICE 高速列车结构组件进口型材,其结构组件型式示意如图 1 所示。地板宽 598 mm,其他结构为宽 200~599 mm 的平面或弧形,焊接接口处压成搭对接以防焊漏,组焊时这些主要受力构件均为纵向联系焊缝。材料采用焊接性良好的 6005 铝合金。在底架部分采用了国产 919 铝合金,很多焊缝属于工作焊缝。

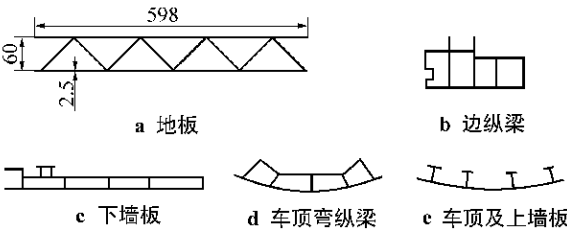


图 1 德国 ICE 高速列车结构组件型式示意

目前我国已有工厂能生产相应的中空型材,有

些工厂还在快速车体中侧墙采用整体中空型材双头自动 MIG 焊接后用数控机床开窗孔,然后将焊成的窗框镶入窗孔,简化焊接工艺,减少了焊接变形。

4.2 铝合金车体的材料及焊接材料匹配

铝合金车体在国外高速列车及地铁中已广泛应用,所用材料匹配如表 2 所示。由表 2 可知,70 系列(AlZnMg)合金、60 系列(AlMgSi)合金均为热处理强化铝合金,多用于承载结构;50 系列(AlMg)合金为冷作强化铝合金,多用于板材和焊丝;40 系列(AlSi)合金主要用作焊丝材料,试验证明用此焊丝可获得较高的抗裂性。设计前为了了解铝合金车体材料及焊接材料的匹配情况,选用与国外常用材料成分相近的国产母材匹配 5183 焊接材料进行 MIG 自动焊,试验结果如表 3 所示。由表 3 可知,60 系列铝合金中 6061 材料焊接接头性能优于 6063 的,母材及焊接接头强度高,时效强化能力强,焊缝匹配好,强度高于软化区。国产 919(相当于 7005)铝合金试验结果表明,该合金强度高,时效强化能力强,总体焊接接头强度延性自然时效后均优于 60 系列铝合金,但焊缝强度不好。各种接头的母材强度利用效率即使在自然时效提高强度后也只能到 65%~80%,因此一般许用应力取值很低,只取焊接接头强度的 33%左右,即母材强度的 21%~26%。对承受疲劳载荷的许用应力取值更低,一般高强铝合金的疲劳强度只有母材静载强度的 30%~40%,而焊接横向对接接头去余高后也只有母材疲劳强度的 87%,有余高的只有母材疲劳强度的 63%,如果是角接头可能只有 14%。因此还要根据焊接接头情况取更低的设计应力。

表 2 铝合金车体所用材料及焊材匹配

车辆	德国 ICE	英国 158	哥伦比亚地铁	日本新干线及 203
型材	AlMgSi0.7(6005)	AlMgSi0.7, AlMgSi1(6082)	AlZn4.5Mg(7020)	7N01(7001), 6N01,
	AlMg4.5Mn(5053)	AlMg4.5Mn, AlSi5(4043)	AlMgSi0.7	5083, 7005, 6005
焊材	AlMg5(5356), AlMg4.5Mn(5183)	AlSi5(4043)	AlMg4.5, AlMg4.5Mn	—

在前期高速客车研制中,使用进口 6005 铝合金作车体,部分国产 919 铝合金作牵引梁和底架,用 5156 和 5356 铝合金焊丝匹配试验,其结果如表 4 所示。由表 4 看出,6005 铝合金焊后性能优于国产 6063,低于 6061,但延性较好,焊丝用 5183 为好;而 70 系列的 919 合金焊缝强度和韧性均优于 6005,但延性低于 6005。由上可知,高速列车所用 60 系列

和 70 系列铝合金的塑性和韧性较焊接结构用钢低得多,其焊接接头的塑性和韧性更低,至于在低温和冲击载荷下会不会发生脆断,这方面报道甚少,但国外对 50 系列低温容器用铝合金研究表明,其韧性随温度降低而降低很少,对加载速度增加也不会降低,对应力集中系数大于 2.88 以后应力集中影响极小,焊接接头各区开切口低温宽板试验表明,

专题讨论——现代铁路焊接技术与装备

表 3 几种焊接材料匹配 MIG 自动焊时的各区性能

材料	母材 6063+焊丝 5183				母材 6061+焊丝 5183					母材 919(相当于 7005)+焊丝 5183						
	人工时效	焊后 5 天	焊后 32 天	人工时效	焊后	焊后 90 天	人工时效	焊后	焊后 90 天	人工时效	焊后	焊后 90 天	人工时效	焊后	焊后 90 天	人工时效
位置	母材 B	焊缝 W	软区 S	接头 WJ	母材 B	焊缝 W	软区 S	焊缝 W	软区 S	母材 B	焊缝 W	软区 S	熔区 F	焊缝 W	软区 S	熔区 F
$\sigma_b$ /MPa	226	147	137	140	290	183	185	229	217	352	165	269	228	229	278	283
$\delta$ /%	5.7	4.9	5.4	7.2	9.0	4.4	4.4	4.4	4.4	—	2.4	3.4	4.8	4.8	11.2	4.8

注:位置为断裂处。

表 4 几种客车用母材及焊接材料匹配 MIG 自动焊时的各区性能

母材	焊丝	自动 MIG 焊焊接规范				焊缝性能			
		焊接电流 I/A	电压 U/V	焊速 v/m·h <sup>-1</sup>	流量 Q/L·mm <sup>-1</sup>	$\sigma_b$ /MPa	$\delta$ /%	$C_v$ /J·cm <sup>-2</sup>	Hv
6005	5356	120~160, 直流	21	16.8	21	147	3.5	10.0	76
6005	5183	110~160, 直流	21	16.8	21	171	10.6	13.0	74
919	5356	130~170, 直流	21	12.0	21	251	5.8	15.6	114
919	5183	140~180, 直流	21	22.0	22	234	7.4	17.6	117

直到-200℃也不会发生低应力脆断。但热处理强化铝合金焊接接头的疲劳和断裂问题还需进一步研究。

4.3 高速列车铝合金焊接问题及解决问题的途径<sup>[4-5]</sup>

高速列车铝合金焊接有一般铝合金焊接中的共性问题,如裂纹、气孔和塌陷等。但在高速列车铝合金中,承载部分都用热处理强化铝合金,而焊后又不能进行整体热处理,所以焊后由于有软化区的存在,会使焊接接头效率降低。国外近期采用双丝串行 MIG 自动焊和激光-MIG 共熔池焊,都可形成热影响区狭窄的温度场,并实现计算机自动控制和在卡具上的两台双丝串行 MIG 或激光-MIG 自动焊并行焊接,提高焊接接头的综合性能和生产效率。只要软化区宽厚比小,在各区共同受力情况下(包括焊缝平行和垂直受力方向),就可能提高接头强度,但仍很难与人工时效的母材等强,特别是对超高强铝合金焊接接头性能提高有限。1991 年英国焊接研究所提出了搅拌摩擦焊,其实质是用一高温硬质合金旋转头与工件连接处的相对运动摩擦产生热量加热软化膨涨后由旋转头平台相继加压并沿待连接处移动来完成焊接<sup>[9]</sup>,这实际上是一个焊接处的母材软化塑性变形再结晶的压力焊过程,可获得性能接近母材的焊接接头,能很好焊接熔焊困难的 2000 和 7000 系列超高强铝合金及铝锂合金,使高速列车的铝合金结构的选材和结构质量达到一个新水平。

5 结论

铁路机车车辆焊接工作量大,使用材料广泛,包括低碳钢及低合金钢、中高碳钢、合金钢、不锈钢、铝合金,这些都需要焊接,因此所用焊接方法也十分广泛,包括手工焊、埋弧自动焊、各种气保护焊和接触焊。目前我国大力发展高速铁路,一些机车车辆工厂将转型为铝合金和不锈钢机车车辆的制造,现在还在引进消化阶段,还有许多试验研究工作要做,通过消化—吸收—再创新,逐步达到国产化和自主创新,形成我国自己的选材、设计和工艺标准。参考国内外焊接技术的新发展,还必须在结构型式和材料的改进、焊接方法工艺和材料的更新、焊接自动化和质量控制等方面不断提高,在生产上达到自动化、智能化和信息化。

参考文献:

[1] 夏伦初.二氧化碳气保护焊在机车车辆上的应用[M].北京:北京人民铁道出版社,1978.

[2] 王一戎,车小莉,骆德阳.高速动力车焊接技术[A].西南交通大学百周年校庆论文集——材料科学与工艺分册[C].成都:西南交通大学出版社,1996.

[3] 骆德阳,车小莉,王一戎.高速动力车蒙皮与骨架点焊工艺研究[J].西南交通大学报,1996,31(8):203.

[4] 王元良,周友龙,胡久富,等.运载工具的铝合金选材及焊接[J].中国有色金属学报—材料科学与工程专辑Ⅱ,2001,11(S2):11.

[5] 王元良,周友龙,胡久富,等.解决运载工具的铝合金焊接难题的新途径搅拌摩擦焊[J].电焊机,2004,34(1):34-38.