

高速铁路焊接工程系列专著

GAOSU TIELU HANJIE GONGCHENG XILIE ZHUANZHU

高速列车 铝合金车体的 焊接技术

王元良 陈辉 \ 著

GAOSU LIECHE LVHEJIN CHETI DE HANJIE JISHU

西南交通大学出版社
http://press.swjtu.edu.cn

高速铁路焊接工程系列专著

高速列车铝合金车体的焊接技术

王元良 陈辉 著

西南交通大学出版社

• 成 都 •

图书在版编目 (C I P) 数据

高速列车铝合金车体的焊接技术 / 王元良, 陈辉著.
—成都: 西南交通大学出版社, 2012.1
(高速铁路焊接工程系列专著)
ISBN 978-7-5643-1427-9

I. ①高… II. ①王… ②陈… III. ①高速列车—铝
合金—车体—焊接工艺 IV. ①U292.91②TG457.14

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 191988 号

高速铁路焊接工程系列专著
高速列车铝合金车体的焊接技术
王元良 陈辉 著

责任编辑	黄淑文
特邀编辑	赵雄亮
封面设计	何东琳设计工作室
出版发行	西南交通大学出版社 (成都二环路北一段 111 号)
发行部电话	028-87600564 028-87600533
邮政编码	610031
网 址	http://press.swjtu.edu.cn
印 刷	四川森林印务有限责任公司
成品尺寸	185 mm × 260 mm
印 张	12.75
字 数	319 千字
版 次	2012 年 1 月第 1 版
印 次	2012 年 1 月第 1 次
书 号	ISBN 978-7-5643-1427-9
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

前 言

我国高速列车研究的发展始于“八五”末期，我校（西南交通大学焊接所）参与了高速列车国家“八五”攻关项目中由我校主持的高速列车不锈钢车体动力车（太原机车车辆厂制造）和长春客车厂主持的高速列车轻量化铝合金车体所含与焊接有关的三个子项目：

- ① 高速动力车体不锈钢车体不锈钢蒙皮的焊接；
- ② 高速列车铝合金选材和焊接工艺的研究；
- ③ 高速列车铝合金焊接材料的选择及研制。

课题组针对上列项目内容进行了广泛研究。由于处于初创时期，项目主要侧重国内材料的选择和焊接工艺，研究内容偏于基础和规律，所用结构和焊接材料除 6005 为进口材料外，均为国产材料，发表了 20 余篇试验研究报告，培养了多名研究生，参与了我国第一辆高速动力车和铝合金车辆试验车的制造工作。“八五”攻关结束后，高速铁路建设计划暂停，高速列车也未能正式生产，但在有关工厂在地铁车辆和一些特殊车辆上仍有采用不锈钢和铝合金焊接结构。我校虽未继续对高速列车不锈钢和铝合金焊接进行研究，但与铁道部内外的一些单位合作，继续进行了一些不锈钢和铝合金焊接的研究，陆续公开发表了一些研究成果。

近年来我国高速铁路发展很快。根据报载资料：到 2008 年为止，我国 250 km/h 的高速铁路已达 846 km；200 km/h 的高速铁路已达 6 008 km；新建的京津客运专线全长 120 km；和谐号高速列车于 2008 年 8 月 1 日开通，时速可高达 350 km/h，从北京到天津只要不到半小时；正在建设的京沪高速运行速度将达 350 km/h；其他十多条 200 ~ 300 km/h 高速客运专线已开工或即将开工。大量的各类高速铁路将应运而生。现在，高速列车的试运行速度倾向于要求达到 400 km/h 以上，而且采用铝合金结构，因此在车体结构、焊接材料的品质、焊接设备、工艺的优化、焊接结构的强度及安全可靠性等方面，都必须迈上一个新台阶。

本书的基本内容以我们前期的试验研究报告为基础，分类总结；为了便于阅读，适当增加了相关的基础内容，使之自成系统，形成章节，因此，本书对今天高速列车铝合金焊接结构的选材和及焊接基本规律认识和材料的国产化有重要的参考作用。由于我们前期工作定位于选材和工艺，对焊接接头静载强度研究较多、韧性研究较少，焊接接头的疲劳强度和断裂韧性未能涉及，这里有大量的基础研究和应用研究要做，因此，在焊接接头强度这一部分较多地引用了国内外最新资料，以期寻求一些新的研究领域。同时，新的搅拌摩擦焊和激光-MIG 焊是提高焊接接头强韧性和疲劳强度的重要途径，特别是对高强度铝合金焊接接头的强韧性和疲劳强度提高十分明显，但目前国内高速列车生产中很少应用，因而特别引用有关资料，介绍搅拌摩擦焊、激光-MIG 焊，特别对搅拌摩擦焊焊接接头强度列出专门章节，以说明开

展搅拌摩擦焊和激光-MIG 焊焊接技术及其接头强度研究的必要性，对高速列车铝合金焊接研究和制造工作者有重要的引导和推进作用。

焊接结构的失效与断裂一般都是由焊接接头部位启裂而扩展至断裂，其原因是焊接接头成分、组织和性能不均质性。焊接接头既是焊接残余拉应力的峰值区，又是焊接应力的集中区，还有可能产生焊接缺欠而引起应力集中，成为焊接结构的薄弱部位。因而导致焊接结构失效，大多启裂于焊接接头。因此，焊接接头的强度研究比母材更重要，而且试验研究的工作量与复杂程度比母材研究大得多。焊接接头强度的变化规律对焊接方法和工艺的依赖性很大，寻求提高焊接接头的强度的焊接方法和工艺，以保证焊接结构的高质量和可靠性，进而保证高速列车运行的安全性，同时形成中国特色高速列车的设计和制造规范是目前极为迫切。这方面的研究需要长期积累、发展和深入，必须一步一个脚印，不可能一跃而成。

进几年来，我国高速列车焊接结构的制造技术发展很快，在“引进消化”的基础上有所创新，本书的目的在于抛砖引玉，以把我国高速列车焊接结构的制造技术和结构品质推上一个新的台阶。因此，殷切希望有关研究和生产单位与我们合作，对此加以补充修正，提供更多资料，联合进行更多的试验研究和生产实践，共同把我国高速列车焊接结构的焊接制造技术和结构品质提高到一个新水平。

全书主体内容由陈辉立项和组织编写，王元良主笔统稿，王一戎主审。本书实际上是很多同志辛勤劳动的成果。特别是王一戎教授参加了第 3、4 章的编写并对全书进行了认真的审阅与修改，周友龙副教授参加了 6、8 章的编写，刘拥军教师参加了第 10、12 章的编写。近一两年来，在高速列车国家项目的支持和陈辉教授的领导下，我们对近期生产的高速列车在焊接方法、组织性能变形应力及焊接强度等方面作了大量工作，分别编写了相关内容，列于相关章节的最后部分，这部分由苟国庆讲师、李达讲师、王晓敏讲师参加编写各章新发展部分的工作，本书的终稿又经过了王一戎教授和霍树辉教授的审阅。本书具有一定的系统性和科学性，适宜于作相关专业的教学参考书和相关技术人员阅读。

本书的出版得到了国家科技支撑计划课题“高速列车车体技术”（项目编号：2009BAG12A04）下设的子任务“高速列车车体结构焊接工艺及焊接残余应力研究”（项目编号：2009BAG12A04-B03）以及国家科技支撑计划课题“关键材料及部件可靠性”（项目编号：2009BAG12A07）下设的子任务“高速列车车体铝合金焊接接头可靠性研究（项目编号：2009BAG12A07-B03）”的支持。同时也感谢南车青岛四方机车车辆股份有限公司、唐山轨道客车有限责任公司科研工作人员提供的支持。

作 者

2011 年 9 月

目 录

第 1 章 高速列车发展中的焊接技术	1
1.1 高速列车	1
1.2 各国高速列车的发展	3
1.3 高速列车轻量化的结构材料选择	4
1.4 高速列车轻量化的焊接结构的特点	6
1.5 高速列车轻量化的焊接方法及其发展	8
1.6 高速列车铝合金其他焊接新方法	9
1.7 高速列车铝合金焊接性能	10
1.8 结束语	11
参考文献	11
第 2 章 高速列车铝合金结构材料及焊接材料	12
2.1 铝合金结构材料	12
2.2 常用的几种铝合金焊接材料	19
2.3 几种铝合金各种匹配方案的焊接接头的力学性能	20
2.4 关于提高焊接材料性能的探讨	21
2.5 结束语	24
参考文献	25
第 3 章 高速列车用铝合金结构材料的焊接性	26
3.1 焊接接头组织性能特征	26
3.2 不同类型合金的焊接性	27
3.3 铝合金的焊接裂纹倾向	28
3.4 铝合金焊接的气孔倾向	31
3.5 铝合金焊接接头的抗蚀性	35
3.6 铝合金焊接接头的工艺缺陷	36
3.7 结束语	37
参考文献	37
第 4 章 几种高速列车铝合金焊接接头组织性能分析	38
4.1 5000 系铝合金焊接接头组织性能	38

4.2	6000 系铝合金焊接接头的组织性能	40
4.3	高强度铝合金成分和焊接接头组织性能	44
4.4	铝合金焊接接头的断裂分析	48
4.5	气孔的宏观和微观分析	50
4.6	结束语	52
	参考文献	52
第 5 章	高速列车铝合金焊接接头的微区性能	53
5.1	微型剪切试验方法	53
5.2	几种常用铝合金母材的微型剪切试验结果及分析	54
5.3	几种铝合金焊接接头的微型剪切试验结果及分析	56
5.4	几种铝合金焊接接头的自然时效的微区性能变化	60
5.5	焊接规范对铝合金焊接接头性能的影响	61
5.6	高速列车焊接接头新型 MIG 焊微型剪切试验的近期研究	61
5.7	结束语	61
	参考文献	62
第 6 章	铝合金高速列车常用的几种焊接方法	63
6.1	铝合金的接触焊	63
6.2	铝合金的钨极氩弧焊 (TIG)	66
6.3	高速列车铝合金的熔化极氩弧焊 (MIG)	70
6.4	其他熔焊新方法——双丝 MIG 双弧焊	73
6.5	高速列车铝合金新型 MIG 焊焊接方法初探	74
6.6	结束语	77
	参考文献	77
第 7 章	高速列车铝合金结构的激光焊和激光复合焊	78
7.1	激光焊接的基本原理	78
7.2	激光焊接设备	80
7.3	高速列车车辆结构的激光焊	81
7.4	激光-MIG 复合焊	83
7.5	高速列车激光-TIG 焊接研究进展	86
7.6	结束语	88
	参考文献	88
第 8 章	搅拌摩擦焊	89
8.1	解决高强铝合金焊接难题的新途径——搅拌摩擦焊	89

8.2 搅拌摩擦焊的焊接设备	91
8.3 搅拌摩擦焊工艺	97
8.4 搅拌摩擦焊的质量控制	99
8.5 搅拌摩擦焊与熔化焊的比较	100
8.6 国外搅拌摩擦焊在高速列车中的应用	102
8.7 搅拌摩擦焊在我国高速列车中的应用的可行性	104
8.8 值得研究的几个问题	105
8.9 高速列车制造搅拌摩擦焊的新进展	106
8.10 结束语	110
参考文献	111
第 9 章 铝合金的焊接变形和应力	112
9.1 铝合金焊接残余应力分析	112
9.2 铝合金焊接构件的焊接残余应力分析	117
9.3 铝合金焊接残余应力对结构强度的影响	118
9.4 低应力无变形新技术	120
9.5 焊接变形矫正	121
9.6 高速列车残余应力变形和应力后期研究的新进展	121
9.7 结束语	127
参考文献	128
第 10 章 高速列车用铝合金的焊接接头强度	129
10.1 铝合金的性能	129
10.2 焊接接头的不均质性	130
10.3 铝合金焊接接头的静载强度	132
10.4 铝合金母材及焊接接头的疲劳强度	134
10.5 铝合金结构的脆断强度	144
10.6 铝合金的断裂韧性	147
10.7 铝合金的裂纹扩展率	149
10.8 铝合金的焊接接头的应力腐蚀及其裂纹扩展率	157
10.9 高速列车铝合金焊接接头的腐蚀和应力腐蚀新进展	160
10.10 结束语	164
参考文献	164
第 11 章 搅拌摩擦焊焊接接头强度	166
11.1 焊接接头的不均质性	166
11.2 高速列车常用铝合金及其焊接接头的力学性能	167

11.3 搅拌摩擦焊焊接接头的疲劳强度	170
11.4 搅拌摩擦焊焊接接头的脆断强度	171
11.5 搅拌摩擦焊焊接接头的应力腐蚀倾向	172
11.6 结束语	173
参考文献	173
第 12 章 高速列车铝合金结构构件焊接	174
12.1 高速列车铝合金焊接结构的主要类型	174
12.2 高速动力车车顶结构与焊接	175
12.3 铝合金车体结构的焊接	177
12.4 侧墙组装焊接	181
12.5 铝合金牵引梁和底架的焊接	187
12.6 关于铝合金高速列车车体结构几个焊接问题的探讨	188
参考文献	191
附录 课题组发表的铝合金论文索引	192
后 记	194

第1章 高速列车发展中的焊接技术

本章主要介绍高速列车及其铝合金结构发展中的焊接技术, 简述焊接材料及高速列车轻量化的结构材料选择、所用焊接方法的发展以及铝合金焊接结构的强度等问题。

1.1 高速列车

1.1.1 高速列车的发展

高速列车是随着高速铁路的发展而发展的。过去一般列车运行速度 $\leq 120\text{ km/h}$, 称为普通列车; 经过线路改造, 列车速度提高到 $120\sim 200\text{ km/h}$, 称为快速列车; 列车速度 $\geq 200\text{ km/h}$ 则称为高速列车。日本最早发展高速铁路, 在1964年就有 250 km/h 的高速列车运行。紧接着, 德国、法国在高起点上发展高速铁路, 在1981年就分别有 300 km/h 和 320 km/h 的高速列车运行。近十年来, 国外和我国某些地区完成或在建的高速铁路, 虽线路不长, 但运行速度都定在 300 km/h 或 350 km/h , 个别达到 360 km/h , 试运行速度超过 400 km/h , 试验速度超过 500 km/h 。

高速列车运行速度高, 运输能力大, 能源消耗少, 全天候运行, 环境污染轻, 乘坐快捷、舒适、安全, 建设投资低、用地省, 经济和社会效益好。我国地域宽广、人口众多、人流频繁、运输繁忙, 更需要发展高速铁路, 也就需要大量的高速列车。

1.1.2 高速列车的运行特点及解决方法

1. 高速列车的运行特点

列车速度提高, 会使黏着系数下降, 甚至导致轮轨滑动, 使列车失去牵引力, 产生列车重量、体积与牵引动力的矛盾。日本在高速列车发展初期仍用传统的机车、车辆分离模式, 机车、车辆分别在电力机车厂和客车厂生产。由于动力集中在机车, 速度提高受到限制, 因此, 必须克服原来动力集中在机车、乘坐集中在客车的完全分离的局面。发展动力局部分散和完全分散的动车组, 减少列车编组长度, 这就使载荷分散, 与无缝线路配合, 改变了高速运行时的动力冲击作用; 但由此导致列车的生产方式和布局也发生了重大变化。

2. 列车运行时的空气阻力

列车运行时的空气阻力与速度的平方成正比, 所需牵引动力与速度的三次方成正比, 由

此可见,列车空气动力学问题突出。高速列车对车头的流线型有很高的要求,如头部长度,日本初期 O 形高速列车车头(形状变化部分)只有 4.4 m,100 型高速列车车头加长到 5.5 m,300 型高速列车车头加长到 6.0 m,700 型高速列车车头加长到 9.2 m。我国在“八五”和“九五”高速列车研究中,建议降低车头高度形成扁椭圆状,并在两侧做凹槽形成导流槽将气流引向车头两侧,从而对车体的外形、刚度、平整、密封等都提出了较高要求,对成型和组装焊接工艺,也提出了较高要求。为此,我国发展了符合车体外形,具有高刚度、高平整性的全长尺寸中空挤压专用型材和先进的组装焊接工艺。

3. 列车轻量化的材料变革

列车运行阻力与列车重量和运行速度的乘积成正比,减少列车重量就可减少运行阻力,为提高速度和节约能源创造条件。因此,采用不锈钢,特别是铝合金,在列车轻量化上有突出的效果,今后甚至还有可能向镁合金、钛合金和复合材料方向发展。

4. 列车高速运行时的冲击和振动

随着列车高速运行时速度的提高,轮轨磨损和其他运动副零件的磨损加剧,特别是大功率高速运行时定距离的列车高速制动,其制动摩擦片冲击和振动的摩擦磨损更为严重,所产生的振动和噪声既影响旅客的舒适,又影响列车运行的寿命和安全。这不仅给设计、制造和使用中的自动控制系统及智能诊断系统提出了很高的要求,而且给新的表面工程和再制造技术提出了重要的应用领域和发展空间。

1.1.3 高速列车分类^[1]

1. 独立式动力集中型

独立式动力集中型高速列车前后为独立动力车,中部为客车,各车有独立转向架。这是日本在初期高速铁路中使用的列车类型,其结构组合与原来的普通列车没有多大区别,但采用了与普通车钩缓冲连接装置不同的密接式缓冲装置。

2. 绞接式动力集中型

绞接式动力集中型高速列车前后为独立动力车,中部为客车,前后车共用转向架,采用了绞接式缓冲装置,与普通列车在转向架结构和缓冲连接装置上不同。

3. 独立式动力分散型

独立式动力分散型高速列车前后为独立动力头车,中部为动力客车,各车有独立转向架。

4. 绞接式动力分散型

绞接式动力分散型高速列车动力全分散在各车中,前后车共用转向架。

不同类型的高速列车,其结构生产方式和工艺有所不同,目前的高速列车都在向动力分散型发展。我国某厂生产的高速列车,对 200 km/h 的列车采用 4 动 4 拖动车组,即 T1 + M1 + M2 + T2 + T3 + M3 + M4 + T4; 300 km/h 的列车采用 6 动 2 拖动车组,即 T1 + M1 + M2 + M3 + M4 + M5 + M6 + T2,只有前后两节为拖车,这样就使动力向更加分散的方向发展。

1.2 各国高速列车的发展

1.2.1 日本新干线高速列车^[1]

1. 300 系高速列车

日本于 1964 年开始使用 O 系 210 km/h 的高速列车, 后来发展为 100、200 系 220 km/h 的高速列车, 进而在此基础上发展了 300 系高速列车。300 系 1992 年开始运营, 其特点是:

(1) 运行速度提高到 270 km/h, 试验速度达到 325.7 km/h, 转向架试验速度到 500 km/h 而不失稳。

(2) 大幅度降低轴重, 从 15~16 t 降至 11.3 t, 改善了列车对线路的冲击作用和振动噪声。

(3) 采用了交流电机驱动, 研发了再生制动, 为进一步减轻重量, 增大功率, 节约能源创造了条件。

(4) 采用铝合金轻型材料、新结构车体以及轻型转向架, 减轻了车体重量, 改善了列车性能。

2. 500 系高速列车

500 系高速列车是在 300 系的基础上发展起来的, 1997 年开始运营, 运行速度 300 km/h, 试验速度达到 350.4 km/h, 16 辆列车编组全部为动车, 总功率达 240 kW, 车头更尖长, 气动阻力更小。列车部分采用 2024 及 7075 高强铝合金和铝合金钎焊蜂窝结构, 进一步轻量化; 采用有源控制减振器, 车内噪声、舒适度和环境噪声进一步改善。

3. 700 系高速列车

700 系高速列车又是在 500 系的基础上发展起来的, 1999 年开始运营。除了具有 500 系高速列车的优点外, 700 系高速列车牵引变流器采用了开关频率更高的 IGBT 模块组件, 减轻了电气设备的重量, 改善了控制性能。

4. E4 型双层高速列车

日本发展了 E4 型双层高速列车。E4 型双层高速列车于 1997 年开始运营, 速度 240 km/h; 后来它又吸收了 STAR21 试验电动车组的成果和高速化技术, 使运行速度达到 300 km/h, 最高速度达到 400 km/h, 根据 3 种不同结构车体、8 种转向架和多种受电弓的比选, 稳定运行速度曾达 425 km/h。

1.2.2 德国 ICE 高速列车^[1]

1. ICE-1 高速列车

从 1970 年起, 德国就开始研究高速列车, 后来因故停止; 1985 年 7 月, ICE-1 的改进型——ICE-V 高速列车——投入运行, 最高时速达 317 km/h。1988 年 5 月又进行了 406.9 km/h 的试运行, 后投入批量生产, 1991 年 6 月投入应用。

2. ICE-2 高速列车

为了使列车编组灵活,可由一节动车、六节拖车和一节可载客的控制车组成半列动车组,也可两列联挂成长列运行,这种列车称为 ICE-2 高速列车。

3. ICE-3 高速列车

为使动力分散,由 8 辆车编组而成,有 16 个转向架(其中 6 个为动力转向架),即有 16 个电动轮对,首尾三辆各组成相应的动力单元的列车,称为 ICE-3 高速列车。

1.2.3 法国 TGV 高速列车^{III}

1. TGV-P 高速列车

TGV-P 高速列车于 1981 年 9 月开始运营,运行速度 270 km/h。

2. TGV-A 高速列车

TGV-A 高速列车于 1989 年 9 月开始运营,运行速度 300 km/h,1990 年 5 月创下试验速度 515.3 km/h 的纪录。

3. TGV-2N 高速列车

TGV-2N 高速列车运营速度 300~330 km/h。

1.2.4 中国高速列车

我国高速铁路发展很快,到 2008 年为止,我国 250 km/h 的高速铁路已达 846 km;200 km/h 的高速铁路已达 6 008 km;新建的京津客运专线 120 km;我国自行生产的和谐号高速列车于 2008 年 8 月 1 日开始运行,时速高达 350 km/h,从北京到天津只要不到半小时;正在建设的京沪高速最高运行速度将达 350 km/h;其他十多条 200~300 km/h 高速客运专线已经开工和即将开工,大多数省会城市都将有快速客运专线相连。大量的各类铁路高速列车也将应运而生。

1.3 高速列车轻量化的结构材料选择

1.3.1 车体结构的轻量化

1. 车体结构材料的性能及轻量化效果

几种车体结构材料性能和轻量化效果见表 1.1。从表中可以看出,高速列车生产制造的工艺和设备发生了许多新的革命性变化,使其焊接结构承载能力与原来普通列车合金结构的力学性能有明显差异。

表 1.1 几种材料性能和轻量化效果^{[1][2]}

材 质	σ_s (MPa)	δ_5 (%)	E (MPa)	密度 (g/cm ³)	每米车重 (kg)	车体重 (%)
普通低碳钢	225	24	2.1×10^5	7.8	450	100
含铜耐候钢	355	33	2.1×10^5	7.8		85~90
18-8 不锈钢	510	38	1.9×10^5	7.8	399~364	65~75
6005 铝合金	260	9	0.6×10^5	2.7	238	50~65

目前，高速列车大量使用铝合金，与不锈钢相比有更大的优势，其制造价格与轻量化效果见表 1.2。目前各国大多使用 6000 系 Al-Mg-Si 合金，日本 500 系高速列车部分采用了铝合金钎焊蜂窝材料和 2024、7075 高强铝合金制造车体，进一步减轻了车体自重。

表 1.2 几种材料的高速列车车体的制造价格与轻量化效果^{[1][2][7]}

车体材料	法国高速车体结构			日本高速车体结构			中国高速车体结构		
	材料	加工	价格	车型	车体材料	重量 (t)	车型	车体材料	重量 (t)
含铜钢制	1	1	1	100	耐候钢	10.3	CHR1	耐候钢 不锈钢	12.5
18-8 不锈钢与 含铜钢 6/4	2.78	0.88	1.05	200	铝 合 金	7.5	CHR2	挤压铝合金	6.7
大型挤压型材铝合金	5.34	0.57	1	300	挤压铝合金	6.0	CHR3	挤压铝合金	8.1

如果采用复合材料，则还可以使列车进一步轻量化。复合材料种类繁多，主要采用金属基纤维增强复合材料，其密度和弹性模量虽比铝合金低，但它强度高，因而比强度高，轻量化效果明显，当然，其加工和焊接的难度比铝合金大。

泡沫铝材是一种功能与结构一体化材料，具有密度小（约为铝材的 10%）、强度高、减振性好、隔音隔热性好的特点。德国卡曼汽车公司采用“三明治”夹层结构泡沫铝材制造轻便轿车的顶棚盖，其强度比原来的钢制构件强度提高了 7 倍，质量减轻了 25%^[2]。泡沫铝材如采用熔化焊则容易使焊接处发泡剂烧失而失去泡沫铝材性能，如采用搅拌摩擦焊焊接则仍可保持原泡沫铝材性能。^[2]

2. 车体结构材料的性能及轻量化发展方向

为了进一步减轻列车自重，镁合金可以作为一种选择。因为在世界上镁资源特别丰富，铁资源可开采 100 多年，铝资源可开采约 300 年，而镁资源则可开采在 1 000 年以上，我国镁产量约占全球产量的 40%。另外，镁的密度只有 1.7 g/cm³，为铝的 2/3，为钢的 1/4；而其弹性模量 E 只有 0.45 MPa，为铝的 3/4，为钢的 1/4。与铝合金相比，二者强度相近，焊接方法相同，但镁合金的比强度和比刚度更高，轻量化效果更好；与复合材料的结构材料相比，二者轻量化效果不相上下，但镁合金的抗扭刚度高得多，加工和焊接更容易，而且其材料易回收、回收价值高。^[3]

钛合金可以作为另一种选择，钛的密度为 4.5 g/cm³，比铝和镁都高，但它强度很高，所以比强度高，而且焊接方法与铝镁合金焊接类似。以常用的 TC4 钛合金 (Al5.5-6.8, V3.5-4.5, Ti 其余) 为例，试验证明，氩弧焊和等离子弧焊强度达到 1 006 MPa，接近母材强度 1 072 MPa；延伸率为 5.9%~6.9%，比母材低 50%。钛合金在航空航天运载工具上已有广泛应用，也是高

速列车车体材料焊接结构发展的方向。

高分子材料是一些列车零部件轻量化的重要方向。2004 年,重庆长安公司就拟实现单车用镁 10 kg 的计划,这也是一种高速列车零部件轻量化的重要参考。

1.3.2 转向架的轻量化

转向架的轻量化也是一个重要目标。转向架重量要占车辆总重量的 20%~30%。目前转向架的轻量化主要以结构改变为主,如采用空心车轴、横梁采用无缝钢管贯穿侧梁多层焊接、取消端梁摇枕等结构以减轻重量,在材料上变化不大(用中低强度钢),高强度钢、铝合金和复合材料转向架还在研究中,有报道称已通过台架试验,但还未见在运行中使用。日本 300 系高速列车采用了铝合金齿轮箱和轴箱,与钢制的相比,重量分别由 160 kg 和 76 kg 减为 55 kg 和 28 kg,减重 45%;日本 500 系高速列车转向架采用了铝合金转臂以减轻自重。高速列车制动已由过去踏面制动发展为盘式制动,目前多采用合金铸铁制动盘,碳纤维制动盘和铝合金制动盘还处在研究开发之中。因此,在转向架轻量化材料的应用和焊接方面,还有很大的发展空间。^[1]

1.3.3 其他构件的轻量化

其他构件的轻量化也很重要,如仅座椅一项改用全铝合金就可由 56 kg 降到 24 kg,一辆车可减重 3.2 t 其他很多车内设备选用轻合金和高分子工程材料,可大大减轻设备重量。

1.4 高速列车轻量化的焊接结构的特点

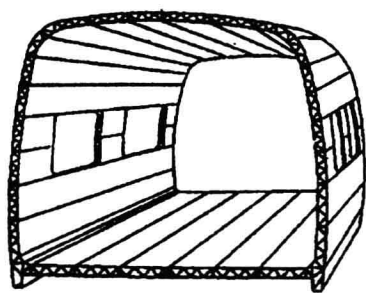
1.4.1 高速运行时的结构要求

由于需要克服高速运行时的空气阻力,因此列车头部必须符合空气动力学要求而呈流线型。日本从 O 系高速列车到 700 系高速列车的车头形状越来越接近飞机的头部。同理,车体外形也与普通列车有较大差别,其特点是箱体四角为圆弧过渡,侧墙上方向外倾斜,侧墙下方向内倾斜,箱体各表面光滑平整,采用车底封闭外罩,以减少空气阻力和遮蔽车底的各种设备。

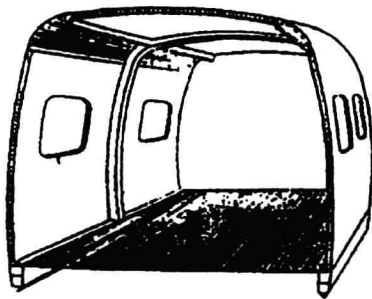
1.4.2 高速列车材料变化引起的结构变化

国外高速列车的结构形式如图 1.1 所示。现大多由于考虑高速列车车体轻量化而选用铝合金焊接结构。由于铝合金弹性模量低,故刚度差,因此必须采用大型带筋的挤压型材,特别是大型中空挤压型材。国外初期曾采用航空骨架外覆蒙皮的车体结构和大型挤压型材车体结构[见图 1.1 (c) 和 (d)],这两种结构焊接结构比较复杂,焊缝承载能力不太理想。比较

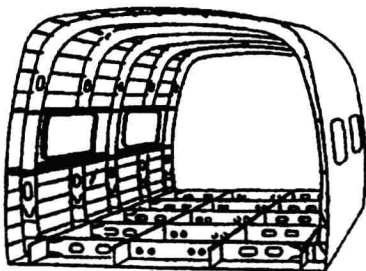
合理的是大型中空挤压型材结构 [见图 1.1 (a)], 目前我国生产的高速列车就采用了这种结构。如果要进一步轻量化, 可采用钎焊铝合金蜂窝结构或泡沫铝材的大块墙体和顶篷 [见图 1.1 (b)], 这样可以进一步减少焊接组装工作量, 特别是车头结构用钎焊铝合金蜂窝结构或泡沫铝材与纤维复合材料有独特优势。



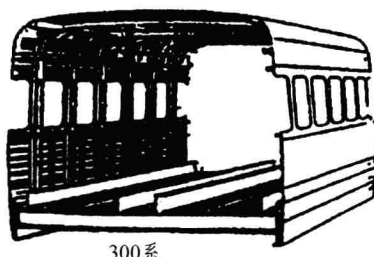
(a) 采用大型中空挤压铝型材的焊接结构



(b) 采用钎焊铝合金蜂窝车体结构



(c) 采用航空骨架式铝合金车体结构



(d) 采用大型挤压型材的焊接结构

图 1.1 国外高速列车的结构型式及其发展^[1]

1.4.3 高速列车组件的结构优化

1. 闭合截面的筒形或箱形结构的应用

高速列车组件的构件形式与构件的最终使用性能有很大关系。如车体结构采用大型中空挤压型材的筒形整体承载结构, 各向刚度增加, 特别是抗扭刚度可提高 100 倍以上, 而结构的组装焊接容易, 容易实现自动化, 焊接变形容易控制, 特别是侧墙整体焊接数控加工窗孔可进一步简化焊接工艺, 减少变形。同理, 转向架结构也可大量采用抗扭刚度高的箱形焊接结构。

2. 焊缝设计

由于焊接接头效率较低, 因此一般焊缝不作为主要传力结构, 而把中空挤压型材做成与车体等长的构件, 避免与受力方向垂直的焊缝接头, 而用联系焊缝把中空型材连接成车体, 使铝合金母材强度得到充分利用, 从而使焊接变形大大减少。如必须使用工作焊缝, 也不能把它布置在高应力区, 同时还必须考虑使焊接变形最小, 尽量减少焊接残余应力的不良影响。例如, 国外有的转向架改折线侧梁为平直侧梁, 用两根无缝管穿透侧梁腹板中部为横梁, 在

侧梁腹板与管周多层焊接,这样既让焊缝处在低应力区,又可以把焊接变形和焊接残余应力影响减到最少。

3. 焊接接头设计

焊接接头尽可能采用对接接头形式。由于铝合金熔化焊时容易塌陷,如果连接处挤压成搭对接接口,则可防止塌陷,使焊接组装工作大大简化。角接头也要充分考虑塌陷问题。

1.5 高速列车轻量化的焊接方法及其发展

我国机车车辆制造业过去一直采用钢结构,在铆接结构改用焊接结构、采用耐候钢结构以提高抗大气腐蚀能力、由手工电弧焊为主转向大面积使用高效节能的二氧化碳气体保护焊等方面都走在全国制造业的前列。目前,随着高速列车车体材料的变化,焊接方法已转向高效精控的 TIG 焊、MIG 焊、激光焊、等离子焊和搅拌摩擦焊,特别是搅拌摩擦焊的发展,解决了高强铝合金及镁合金焊接的一些困难问题。

1.5.1 铝合金的接触焊

铝合金载运工具常用的铝合金都可采用接触焊(点焊、缝焊和凸焊),但其焊接特点与钢有所不同,铝合金电阻小、传热快,故必须采用大功率、强规范快速焊接。它还存在表面易过热、氧化、粘连、压陷等缺欠,因此,对焊接设备的功率和控制精度的要求较高,对表面焊前的清理要求也很高,但无焊接材料的要求(除胶焊和加料缝焊外)。

西南交通大学研制成功的以可编程控制器(PLC)为核心的全自动铝合金焊接控制设备,成功进行了 LD2 铝合金接触焊,并投入生产使用,取得了良好的效果,再配以相应外围装置便可以用于高速列车的焊接。西南交通大学与厂家联合为初期高速列车研制的长背一体式电焊机也是一种高效节能的点焊设备,不仅可用于不锈钢焊接,而且可用于铝合金焊接。

1.5.2 铝合金的钨极氩弧焊(TIG)和熔化极氩弧焊(MIG)

由于铝合金很容易氧化,所以不能用二氧化碳气体保护焊,而要用惰性气体保护焊,因此常用 TIG 焊和 MIG 焊,用得最多的是 MIG 焊。我们对国产铝合金焊丝及母材进行了 TIG 焊试验和 MIG 焊试验,其接头性能相近。铝合金 TIG 焊要用交流方波焊接电源,以达到在除去氧化膜的前提下提高钨极的载流能力的效果,多用于超薄板铝合金焊接和铸件焊补。我们把目前铝合金载运工具使用最多的熔化极氩弧焊(MIG)改作半自动焊或自动焊,应用更方便,效率更高。如采用脉冲 MIG 焊电源,可加大电流调节范围,减小平均电流,有效地控制输入热量,对铝合金焊接工艺调整和改善焊接接头质量特别有利。