四川省重点图书出版规划项目
高速铁路焊接工程系列专著

高速列车中的残余应力

苟国庆　陈 辉　王晓敏　王元良　　著

王执锐　主审

西南交通大学出版社

·成　都·

图书在版编目（CIP）数据

高速列车中的残余应力 / 苟国庆等著. —成都：西南交通大学出版社，2015.12
（高速铁路焊接工程系列专著）
ISBN 978-7-5643-4438-2

Ⅰ. ①高… Ⅱ. ①苟… Ⅲ. ①高速列车 - 残余应力 Ⅳ. ①U292.91

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2015）第 307776 号

高速铁路焊接工程系列专著

高速列车中的残余应力

苟国庆　陈　辉　王晓敏　王元良　著

责任编辑	李　伟
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 （四川省成都市二环路北一段 111 号 西南交通大学创新大厦 21 楼）
发行部电话	028-87600564　028-87600533
邮政编码	610031
网　　址	http://www.xnjdcbs.com
印　　刷	成都蓉军广告印务有限责任公司
成品尺寸	185 mm×230 mm
印　　张	13.75
字　　数	299 千
版　　次	2015 年 12 月第 1 版
印　　次	2015 年 12 月第 1 次
书　　号	ISBN 978-7-5643-4438-2
定　　价	68.00 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

作为代表中国高端装备制造的亮丽名片 — 高速列车是高速铁路的技术核心，它涉及材料科学、机械科学、信息科学、管理科学等众多科学领域，是尖端科技的优质产物。日本研制了新干线高速动车组，设计最高商业运营速度 320 km/h，试验运营速度 360 km/h；德国研制了 ICE 高速列车，设计最高商业运营速度 330 km/h；法国研制了 TGV 高速列车，设计速度达到 350 km/h，最高运营速度也达到 300 km/h，创造了 574.8 km/h 的试验运行速度。中国高速铁路经过几年的大发展 ,成功研制了运行速度 200 km/h、300 km/h 的 380A、380B、CRH1、CRH2、CRH3、CRH5、CRH6 型高速列车及城际动车组 ,创造了 486.1 km/h 的试验运行速度。中国已经成为世界上高速铁路系统技术最全、集成能力最强、运营里程最长、运行速度最快、在建规模最大的国家。目前，我国高铁已经陆续开通了京津、武广、京沪、哈大等线路，运营里程已经达到 9 356 km，在建里程 1.7 万千米，为缓解我国的客运、货运压力提供了巨大的支持。

车体是高速列车的关键系统，高速列车车体结构主要包括底架组成、侧墙组成、车顶组成、端墙组成、车下设备舱及车顶设备组成等。车体底架有的是由底架前端、地板及底架边梁组成，有的是由牵引梁、枕梁、侧梁（边梁）、端梁、横梁和地板等组成。高速列车车体结构承受了大量的复杂载荷作用，既有由于自身质量、整备质量而引起的垂直载荷作用，又有由于列车运行等所产生的牵引和压缩力造成的纵向载荷，还有大风对侧墙造成的侧向载荷以及隧道条件下的气密载荷。由于速度的提升，尤其是在车速 350 km/h 以上高速条件下，车体承受的轮轨激励和气动载荷等激励更为复杂，车体的安全性、可靠性和舒适性等性能要求更为突出。目前，国内外均刚开始大规模进行车速 350 km/h 以上高速列车的运营工作，因此可供参考的完善的车体设计、制造、试验与评估等相关标准和规范较为缺乏，开展高速列车车体技术的研究是支撑我国高速铁路装备快速发展壮大，增强我国轨道列车装备的企业自主创新能力和产业核心竞争的迫切需求。

西南交通大学轨道交通材料工程中心（筹）近年来参与了大量的高速列车研发、设计、试验、在线跟踪等基础研究工作，尤其是参与了 CRH2A、CRH2 380A、CRH3 380B、CRH6

城际动车组及中国标准高速列车的研究工作，积累了大量的基础试验研究数据，取得了一定的研究成果及进展。

本书主要介绍高速列车中的残余应力。这些研究成果是西南交通大学轨道交通材料工程中心（筹）中的“轨道交通关键材料及服役安全评价技术四川省青年科技创新研究团队”经过大量的数据分析、总结、研究的基础上整理出的最新科研成果。

本书同时参考了国内外进行残余应力研究的专家学者提供的大量经典文献资料，在此向援引的参考文献作者表示衷心的感谢。

全书主体内容由陈辉教授立项和组织编写，苟国庆副教授统稿，多伦多大学王执锐教授主审。全书共分为 9 章：第 1 章由陈辉教授、王元良教授编写；第 2 章由苟国庆副教授编写；第 3 章由陈辉教授、马传平博士、于金朋博士编写；第 4 章由王执锐教授、苟国庆副教授、陈佳讲师编写；第 5 章由王晓敏副教授编写；第 6 章由陈辉教授、王晓敏副教授编写；第 7 章由朱忠尹博士、陈静青博士、张志毅博士编写；第 8 章由陈辉教授、苟国庆副教授编写；第 9 章由苟国庆副教授、马传平博士编写。覃超、朱其猛、安江丽等同学参与了全文书稿文字的校对及图片的整理工作。

感谢国家重点基础研究计划（面向广域环境的高速列车先进焊接设计基础研究，2014CB660807）、国家科技支撑计划（下一代地铁列车关键技术研究及样车制造，2015BAG12B01）和中央高校基本科研业务经费（残余应力对铝合金车体腐蚀损伤的影响及控制技术研究，2682014CX003）、（残余应力对车体铝合金焊接接头承载性能的影响研究，2682014BR004）对本书部分研究内容的资助。

同时，本书得到了中车青岛四方机车车辆股份有限公司、中车唐山轨道客车有限责任公司、中车南京浦镇车辆有限公司对相关研究项目的支持。在本书的规划和编写过程中，美国爱迪生焊接研究所杨愉平首席工程师以及西南交通大学王一戎教授提出了很多宝贵的建议，这些建议一一体现在内容的编排和对问题的深入探讨中。

在全书的撰写过程中，本书作者团队力求使本书能够较为全面地反映高速列车中的残余应力基础研究以及工程应用研究。但由于作者知识水平与认识能力有限，加之部分研究成果尚有待于进一步更新和开展深入研究，书中难免存在疏漏和分析偏颇之处，请读者批评指正，以便进一步完善。

作　者

2015 年 8 月

目　录

1　高速列车车体结构特点 …… 1

1.1　高速列车的铝合金车体结构 …… 1

1.2　高速列车焊接技术特点 …… 4

1.3　高速列车铝合金焊接接头和结构特点 …… 5

2　高速列车残余应力的主要检测方法及测试结果举例 …… 13

2.1　切条法 …… 14

2.2　钻孔应变释放法 …… 16

2.3　X 射线法 …… 20

2.4　超声波法 …… 32

2.5　各种方法之间的异同点及互补性 …… 36

3　高速列车生产制造过程中的残余应力 …… 39

3.1　高速列车生产制造流程 …… 39

3.2　铝合金车体制造过程残余应力 …… 40

3.3　转向架构架制造过程残余应力 …… 45

4　残余应力对高速列车关键结构件断裂行为的影响 …… 54

4.1　铝合金焊接接头的设计 …… 54

4.2 金属的疲劳强度 ····· 55
4.3 铝合金焊接接头疲劳性能 ····· 58
4.4 提高焊接结构疲劳强度的方法 ····· 59
4.5 残余应力在循环交变载荷过程中的变化 ····· 60
4.6 残余应力对铝合金及其焊接接头疲劳性能的影响 ····· 75
4.7 残余应力对断裂韧性的影响 ····· 78
4.8 残余应力对低应力脆性破坏的影响 ····· 81
4.9 残余应力对应力强度因子幅值?K 的影响 ····· 82
4.10 残余应力对疲劳裂纹扩展速率的影响 ····· 83
4.11 运用粗糙集分析列车安全可靠性 ····· 84
5 高速列车铝合金及焊接接头应力腐蚀失效 ····· 88
5.1 车体铝合金零部件的应力腐蚀失效 ····· 88
5.2 车体某铝合金焊接接头应力腐蚀失效 ····· 96
5.3 残余应力对车体某铝合金焊接部件应力腐蚀失效的影响 ····· 104
6 车体铝合金及焊接接头的应力腐蚀性能及其与残余应力的关系 ····· 109
6.1 高速列车车体铝合金焊接结构的腐蚀性能 ····· 109
6.2 高速列车焊接结构的应力腐蚀性能 ····· 122

6.3 残余应力对高速列车焊接结构的应力腐蚀寿命的影响 …… 132

7 高速列车铝合金车体焊接构件残余应力数值模拟 …… 136

7.1 有限元法与 SYSWELD 软件 …… 136

7.2 热源模型 …… 137

7.3 焊接热弹塑性有限元理论 …… 142

7.4 标准接头应力计算及验证 …… 147

7.5 铝合金车体焊接应力场模拟 …… 150

8 高速列车残余应力的形成、控制及选择 …… 161

8.1 高速列车残余应力的主要来源 …… 161

8.2 高速列车残余应力的影响因素 …… 162

8.3 残余应力对构件服役性能的影响 …… 163

8.4 高速列车残余应力的主要控制方法 …… 163

8.5 引入残余应力进行高速列车关键结构件质量检查 …… 192

8.6 引入残余应力进行高速列车关键结构件结构设计 …… 193

9 高速列车铝合金车体焊接残余应力分布规律统计 …… 194

9.1 车体材料及使用特性 …… 194

9.2 总体残余应力分布规律统计 …… 195

参考文献 …… 207

1　高速列车车体结构特点

1.1　高速列车的铝合金车体结构

高速列车比传统的机车车辆的运行速度有大幅度提高，这要求列车车体结构的设计需考虑以下 3 个方面：

（1）为了减小空气阻力，车体外形需设计成流线型；

（2）为了提高乘坐舒适度，车体需要采用气密结构；

（3）为了降低能耗，车体需采用轻量化设计。

由于铝合金材料的密度低（只有钢材的 1/3 左右），质量较轻，具有强度大、刚度好的特点，因此在高速列车车体上得到了广泛应用。

1.1.1　高速车体承载结构的特点

由于高速车体需要承受旅客的质量和各种设备的质量，以及列车在运行过程中的纵向、横向、垂向和扭转等载荷，所以车体需有足够的强度和刚度。刚开始设计的高速列车采用板材和型材组合的焊接结构，由于铝合金的弹性模量 E 只有钢的 1/3，因而刚度较差。现有高速列车车体采用铝合金中中空型材组成的筒形整体承载结构，如图 1-1 所示，不但能够达到必要的强度和刚度，同时实现了结构轻量化。

筒形铝合金中空型材组成的车体结构的最大优点是工艺性好、减轻了车辆自重、降低了能耗、减少了运行成本和维护成本。由于高速车体大量采用大型、中空、薄壁的铝合金挤压型材，实现了纵向大幅度自动焊接工艺，提高了车体质量和生产效率。

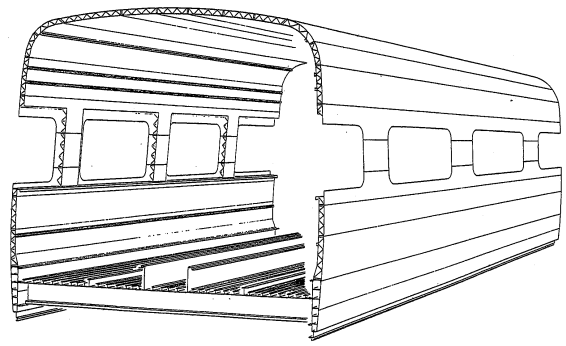
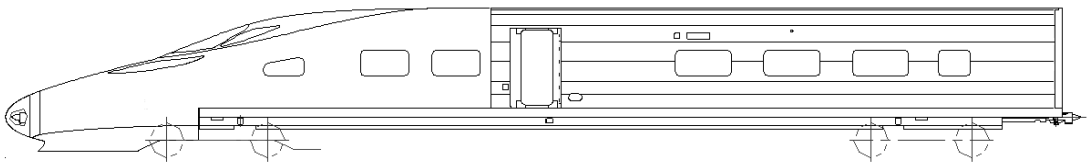


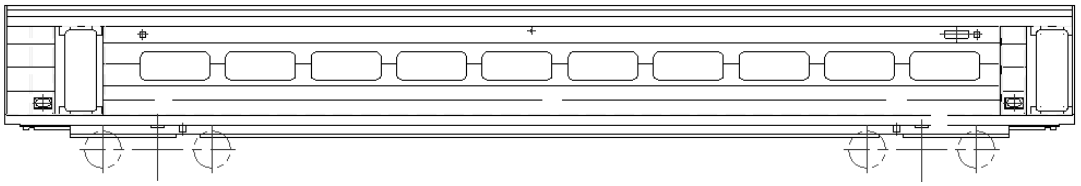
图 1-1　中空型材筒形铝合金车体

1.1.2　车体组成

高速列车车体主要由底架、顶棚、侧墙、端墙等大部件和车体附件等组成（头车还包括司机室头部结构）。各型高速车体根据其功能、附属设备等不同而在车体结构上不尽相同，但其主要的结构形式类似。其中，某类型高速列车头车车体和中间车车体如图 1-2 所示。



（a）头车车体



（b）中间车车体

图 1-2　高速列车车体

（1）底架：底架是车体的主要承载结构。底架主要由牵引梁、枕梁、缓冲梁、边梁、横梁和地板等组成。侧梁采用通长铝合金挤压型材拼焊而成。

（2）顶棚：顶棚是车体上部结构，是受电弓、高压电缆等车顶设备的安装基础。顶棚主

要采用大型薄壁中空挤压型材，头车和中间车顶棚结构相同但纵向长度不同。顶棚型材之间的焊接采用在车体长度方向连续焊接。

（3）侧墙：高速车体侧墙采用大型中空挤压型材，不设车内侧立柱，头车与中间车侧墙结构相同但纵向长度不同。型材之间的焊接为在车体长度方向上连续焊接的方式，顶棚和侧墙的连接采用车内侧、车外侧连续焊接结构。

（4）端墙：端墙根据车辆卫生间和洗脸间的布置主要分为两种结构形式，即分体式和整体式两种。在端部设有卫生间和洗脸间的车辆，其端墙是分体式结构，外板上设有用于搬运卫生间玻璃钢模块的开口，搬运完后，用螺栓安装由铝板和铝型材骨架焊接而成的闭塞板，并填充密封材料保持气密性。端部未设卫生间和洗脸间的车辆，其端墙是整体式结构，为铝板和铝型材骨架构成的焊接结构。

（5）司机室：头车车体前端为司机室头部结构，它以骨架外壳结构为基础。头部结构按车头断面形状变化将纵骨架形成环状，与横向骨架叉接组焊，骨架外焊接铝板。对需要更高强度的部位，采取增加板厚、缩小骨架间距、增加加强材等措施。整个头部结构焊接严格要求气密性，结构上适应配线、配管及内装需要。

（6）车体附件：主要有车下设备舱、前罩开闭装置和车头排障装置等。车下设备舱由侧盖板、盖板安装件和托座等组成；前罩开闭装置可通过自动控制实现开闭，在打开状态下可以露出车钩装置，完成车辆联挂；在头车车体的前端设置结构坚固的排障装置，该装置能在排障时撞飞障碍物，绝不允许卷入物品钻入转向架下。

1.1.3 高速列车车体用铝合金材料

高速车体用铝合金材料需具有强度高、焊接性好、挤压加工性能优、耐腐蚀性强等特性，主要采用了 5000 系、6000 系和 7000 系铝合金。

1. 5000 系列合金

5000 系列合金是非热处理合金 ,以形变强化来提高强度 ,以 H 及后加数字代表处理方法。该系铝合金适合于焊接结构，但挤压加工性较差，难以得到薄壁及中空型材。高速列车多用 5083 铝镁系合金用作端墙或司机室墙板。例如，CRH2 型车主要使用的 5000 系铝合金为 A5083P-O，而 CRH3、CRH5 型车主要使用 5083-H111 铝合金。

2. 6000 系列合金

6000 系列合金是热处理合金 ,以热处理强化来提高强度 ,以 T 及后加数字代表处理方法。该系铝合金挤压加工性、加压淬火性均比较优良，能制造出形状复杂的大型薄壁型材，且耐腐蚀性、焊接性较好。如 6005 或 6N01 铝镁硅合金多做成中空挤压型材，用作车体地板、侧墙、车顶主构件。例如，CRH2 型车主要使用 A6N01S-T5 挤压中空薄壁型材，CRH3、CRH5 型车则主要使用 6005A-T6 铝合金型材。

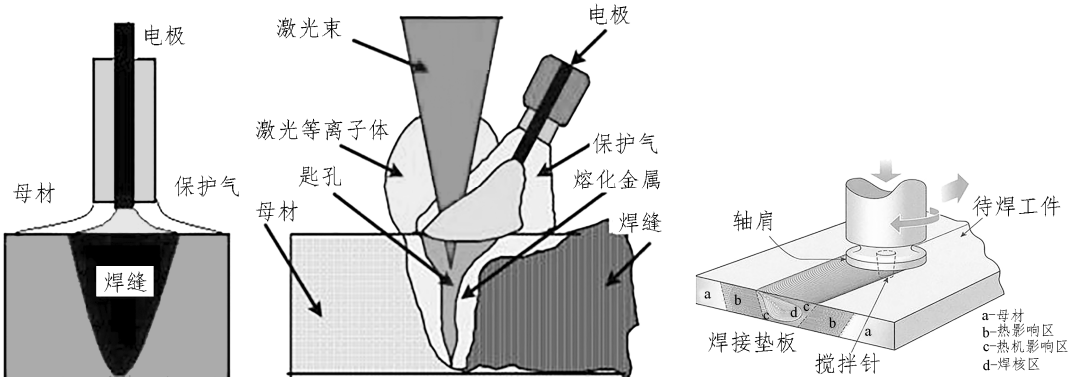
3. 7000 系列合金

7000 系列合金是高强铝合金 ,以热处理强化来提高强度 ,以 T 及后加数字代表处理方法。该系铝合金强度高，可焊性好，并且具有自然时效强化性能，通过常温时效处理，焊接部分的强度能够恢复到接近于母材的强度 ,耐腐蚀性和耐应力腐蚀性能较好 ,但不如 5000 和 6000 系列铝合金。7005 或 7N01 铝锌镁合金可用其挤压型和板材制作底架。例如，CRH2 型车主要使用 A7N01 铝合金作为底架和底架补板材料。

1.2 高速列车焊接技术特点

1.2.1 高速列车焊接方法的新进展

铝合金焊接与钢焊接方法工艺与装备差别很大，几种焊接方法的示意图如图 1-3 所示。



（a）MIG 焊接　　（b）激光-MIG 复合焊接　　（c）搅拌摩擦焊接

图 1-3　高速列车焊接方法的示意图

高速列车铝合金常用焊接方法主要有以电弧为能源的氩弧焊、以电弧和激光为能源的激光 MIG 焊和以金属间摩擦产生的热为能源的搅拌摩擦焊。前两种为熔化焊，后一种属固相压力焊。搅拌摩擦焊是以摩擦所产生的热使端面达到塑性状态，不用焊接材料，在压力下产生塑性变形再结晶完成焊接。现在车体焊接搅拌摩擦焊正在逐步取代 MIG 焊，但搅拌摩擦焊投资大，原有设备难以利用，特别是对一些复杂构件使用较难，如用激光复合焊可利用现有设备搭载，更容易用机器人实现复杂结构焊接。

1.2.2　高速列车铝合金焊接过程分析

焊接过程是利用不同热源对母材以及填充焊接材料加热到熔化（或塑性）状态，凝固结晶（或加压塑性变形再结晶）形成焊缝，相邻区域经历不同温度加热和不同速度冷却形成热影响区。由于加热区热变形，受冷区拘束而产生自平衡的内应力和相应的变形，这种变形和应力随温度场的变化而动态变化，由于高温区会产生低温区拘束而产生压缩塑性变形，冷却时先塑性变形区会产生拉伸塑性变形。由于塑性变形的积累使自平衡应力重发布，因此冷却后产生焊接残余应力和变形（见图 1-4）。

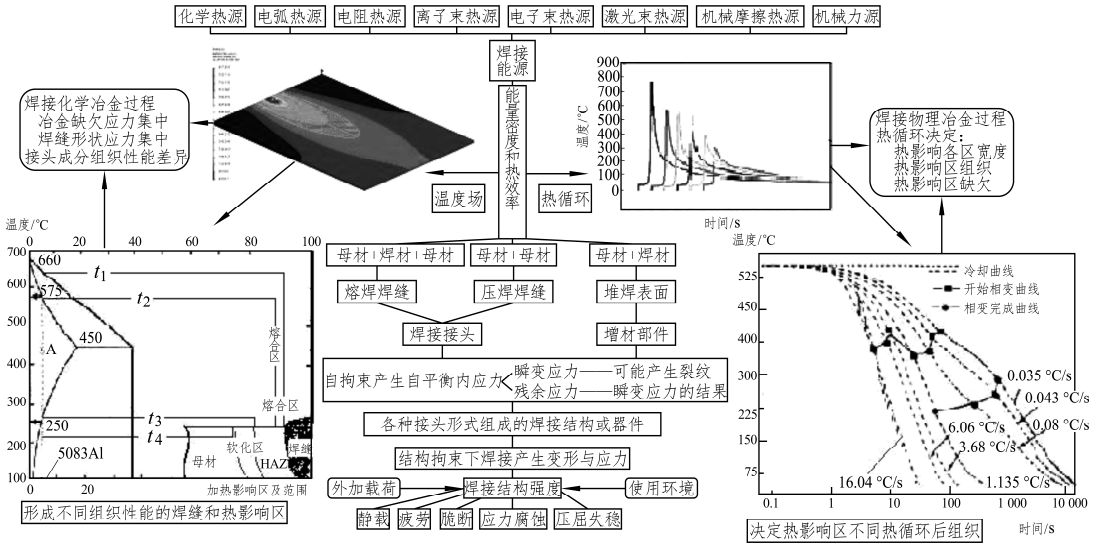


图 1-4　高速列车铝合金焊接过程分析

1.3　高速列车铝合金焊接接头和结构特点

1.3.1　高速车体大部件焊接结构

组成高速列车车体的主要大部件如底架、顶棚、侧墙、端墙等均为焊接结构。不同大部件之间的主要焊接接头形式不尽相同，顶棚、侧墙和地板由于结构比较单一，接头形式主要为对接接头（插对接接头）；端墙结构相对复杂，接头形式主要为对接接头、角接接头和搭接接头；底架由于结构最为复杂，其焊接结构中的接头形式也最全，有对接接头、搭接接头、角接接头和 T 形接头。

图 1-5 所示为顶棚结构型材及内外侧典型焊接接头，焊接接头形式全部为自带垫板的对接接头（插接接头，图中圆圈部分），主要由机器人自动焊接完成。

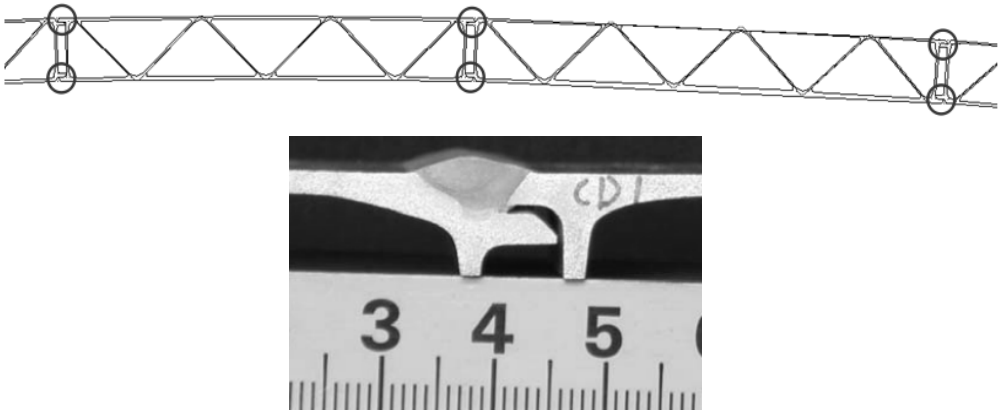


图 1-5　顶棚结构型材及其典型焊接接头形式

图 1-6 为侧墙结构型材及典型焊接接头，与顶棚结构相似，只是型材壁厚有所差别。焊接接头形式也为自带垫板的对接接头（图中圆圈部分），主要由机器人自动焊接完成。

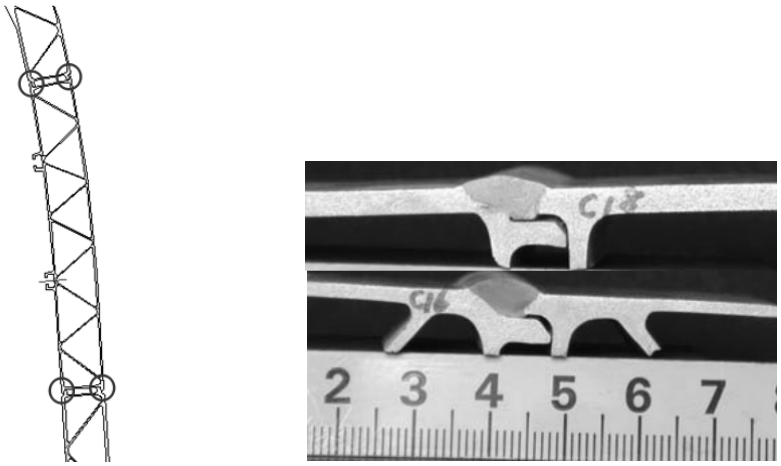
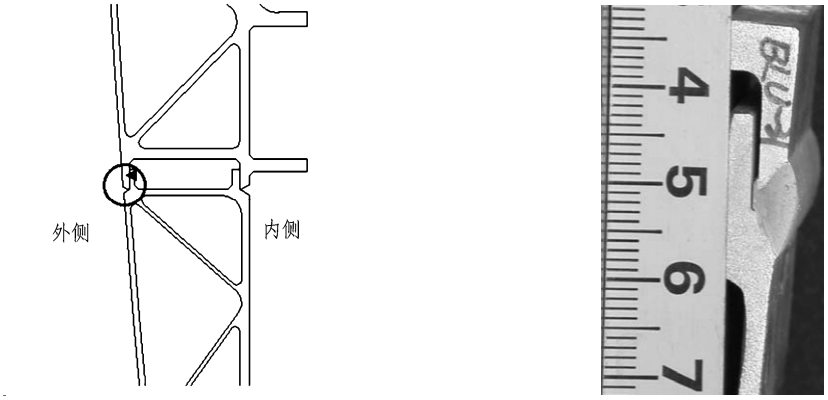
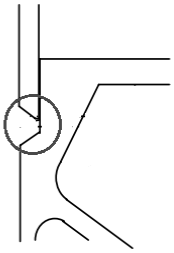


图 1-6　侧墙结构型材及其典型焊接接头形式

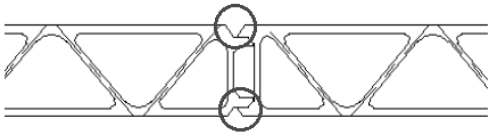
图 1-7 为底架典型部位结构型材及其典型焊接接头。由于底架结构相对于侧墙、顶棚和端墙来讲，结构最为复杂，焊接接头数量众多，存在大量的角接接头、对接接头、搭接接头和少量的 T 形接头。

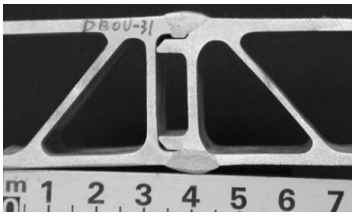


（a）底架边梁结构型材及其典型焊接接头形式

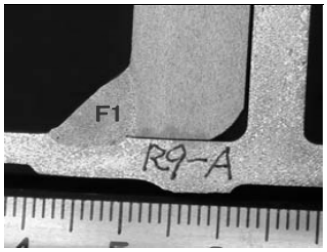


（b）底架边梁与侧墙连接结构典型焊接接头形式

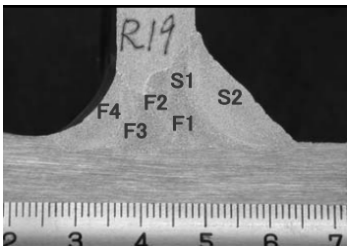




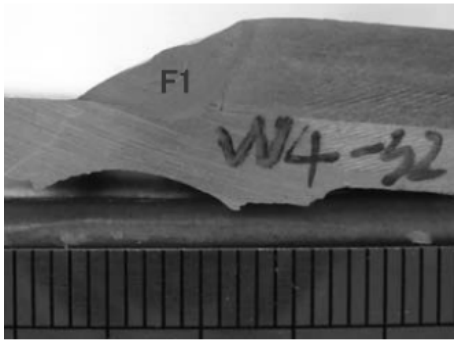
（c）地板结构型材及其典型焊接接头形式



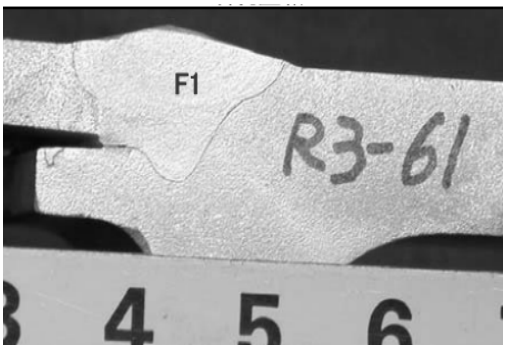
角接接头



T 形接头



搭接接头



对接（插对接）接头

（d）端部底架典型焊接接头

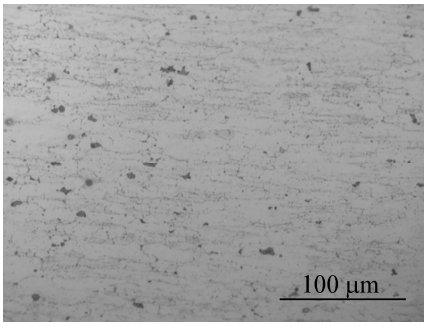
图 1-7　底架焊接构件典型焊接接头

1.3.2　高速车体焊接接头的主要特点

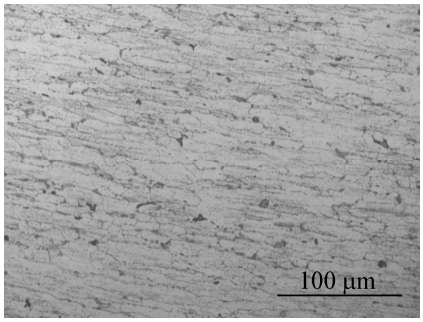
高速列车采用全焊铝合金结构，决定焊接结构安全可靠性的关键部位是焊接接头。由焊接过程分析得出，焊接接头的几个主要特点是焊接接头的成分组织的不均匀性、力学性能的不均匀性，焊接残余应力和变形，焊接接头的应力集中。

1. 焊接接头的成分组织的不均匀性

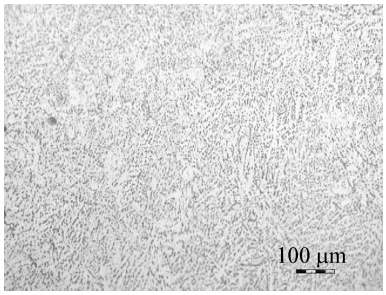
高速列车铝合金主要采用 5000 系列、6000 系列、7000 系列，而焊接材料仅有 5356、5187 等材料，因此焊接完成后，焊缝的组织成分与热影响区、母材的成分组织就有较大差异，如图 1-8 所示。



（a）热影响区



（b）母材



（c）焊缝

图 1-8　高速列车用 A7N01 铝合金接头各区微观组织

由图 1-8 可以看出，A7N01 铝合金焊接接头各区域组织明显不同，不同的微观组织造成了焊接接头在成分分布、晶粒度、缺陷形成上的不同，同时也极大地影响了焊接接头的力学性能以及服役行为。

2. 焊接接头的力学性能的不均匀性及服役行为的差异性

对两种高速列车铝合金焊接接头的强度、塑性和韧性分布采用微型剪切试验的方法进行试验研究，结果如图 1-9 所示。由图可看出两种高速列车铝合金焊接接头的强度、塑性和韧性分布的不均匀性。

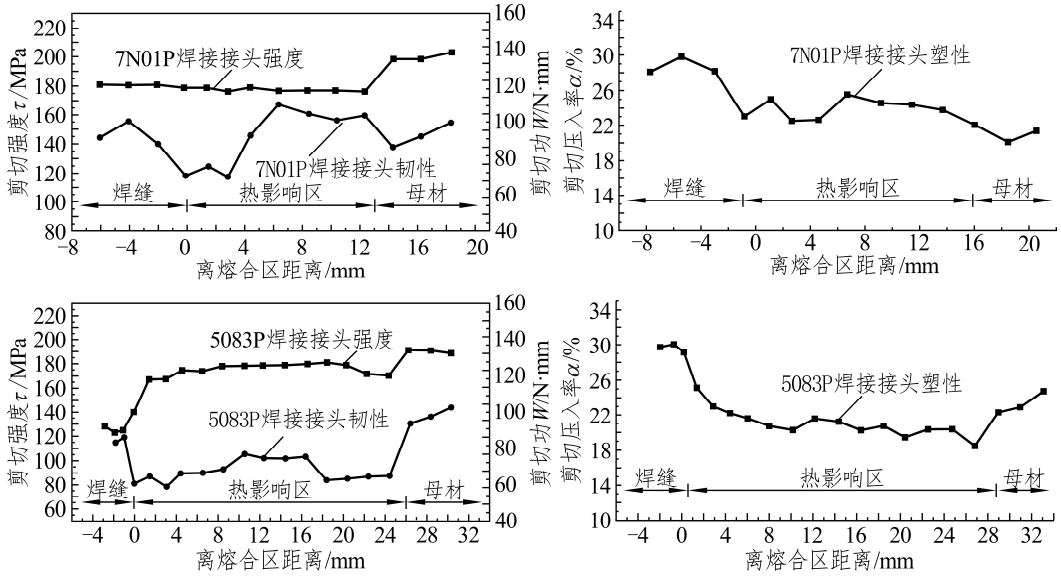
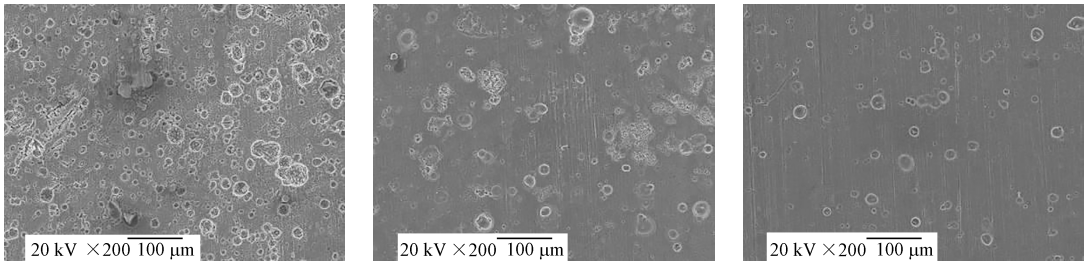


图 1-9　两种高速列车铝合金焊接接头的强度、塑性和韧性分布

图 1-10 反映了 A7N01 铝合金焊接接头经过 28 天盐雾腐蚀试验后各区域微观形貌。焊缝相邻蚀坑进一步交错连接成片，表面积大大增加，焊缝区基本被蚀坑全面覆盖，同时发现有些蚀坑底部光滑，而有些蚀坑底部还有空洞和沟槽，这是蚀坑往试样内部腐蚀发展的结果。热影响区也有部分蚀坑连接成大蚀坑，但密集程度不如焊缝区，母材蚀坑变大，局部区域蚀坑比较密集。因此在进行焊接结构防护设计时，应该考虑不同的部位采用不同的设计理念及方法。



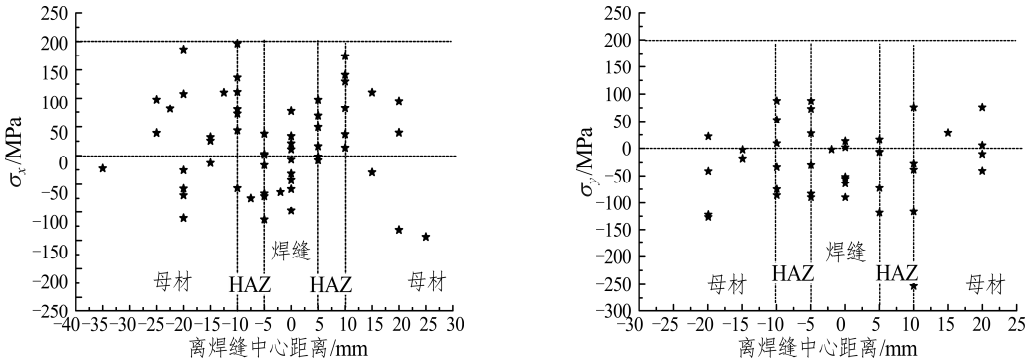
（a）焊缝　　（b）热影响区　　（c）母材

图 1-10　A7N01 铝合金焊接接头经过 28 天盐雾腐蚀试验后各区域微观形貌

3. 焊接残余应力及变形

焊接热源由于是局部非均匀热源，这就造成了热源附近金属温度很高，而远离热源的金属温度则较低，产生了不均匀的温度场，不均匀的温度场是产生焊接残余应力及应变的根本原因。具体过程为：在焊接加热过程中，焊缝金属熔化，而熔化区金属温度很高，受热膨胀过程中，被离焊缝较远的冷态金属的拘束，产生不均匀的压应力和压缩应变，当压应力超过材料的屈服极限时，便产生压缩塑性应变。在冷却过程中，已经发生压缩塑性变形的，靠近焊缝两侧区域的材料收缩，同样受到周围金属的制约产生拉伸，部分抵消加热过程中的压缩变形。同时，焊缝金属凝固收缩也受到周围金属的限制，产生拉应力和拉伸变形，冷却阶段的塑性拉伸应变往往不足以抵消加热阶段产生塑性挤压变形，因此焊件中就会有压缩塑性应变保留下来。这样，在焊接接头区域就产生了收缩的不均匀应变，其大小和分布就决定了最终的残余应力和变形。

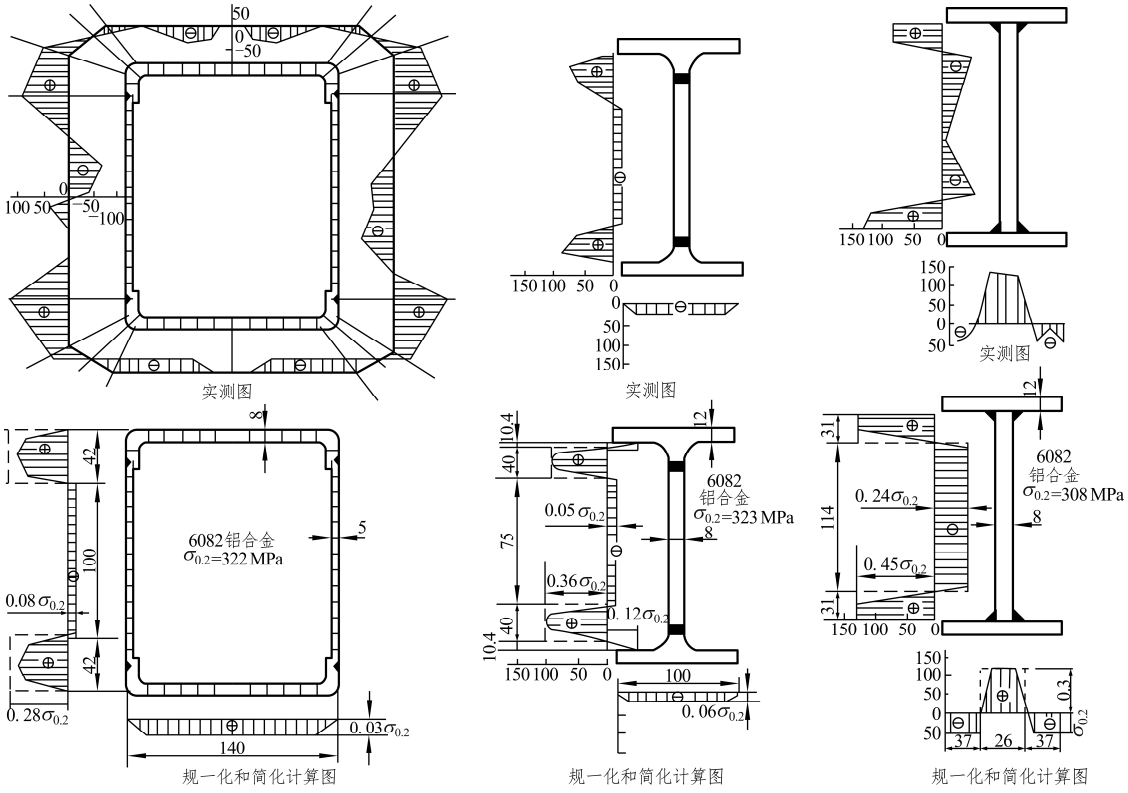
由图 1-11 可见，侧墙内侧焊缝焊接接头纵向残余应力分布的规律，纵向应力值分布点主要集中在 $\sigma_x > 0$ MPa 的区域，焊接接头处主要以拉应力为主。在焊缝中心与两侧焊趾间拉应力与压应力分布比较均匀，范围在 - 125 MPa 至 110 MPa。焊接接头热影响区靠近母材处的应力值较大，主要为拉应力。母材处纵向残余应力值分布比较离散。而对于侧墙内侧焊缝焊接接头横向残余应力分布的规律，横向应力值沿 $\sigma_x = 0$ MPa 轴线两侧均匀分布，且应力值较小，在 - 150 MPa 至 100 MPa 之间，均在材料的屈服强度之下。



（a）一位侧墙内侧焊缝纵向应力分布状况　　（b） 一位侧墙内侧焊缝横向应力分布状况

图 1-11　某列车侧墙焊接残余应力的分布情况

对于大型结构，还要考虑结构的外拘束，常用铝合金结构焊接残余应力测试结果，如图 1-12 所示。在作分析时常以该区应力峰值为参考作简化计算。



（a）焊接箱形构件　　（b）对接工形构件　　（c）角焊工形构件

图 1-12　铝合金焊接结构的残余应力分布规律

4. 焊接接头的应力集中

由于高速列车的大型结构过于复杂，因此，高速列车铝合金焊接结构存在对接、搭接、搭对接、角接、十字接头、塞焊等多种复杂多样的接头形式。因此，铝合金焊接接头的应力集中不可避免。由于应力集中程度的差别，不可避免地造成焊接结构的力学性能以及服役行为的差异。