# 轨道交通车体中铝合金材料的应用及其焊接技术研究

任亮

(长沙市美宇电器有限公司 湖南 长沙 410000)

摘要:铝合金材料具有质量轻、强度高、耐腐蚀等优点,而且其焊接工艺的不断改进,使其成为轨道交通材料领域的佼佼者,深受铁路运输部门和广大旅客的喜爱。在铝合金车体的焊接中存在着许多缺陷,如裂纹、气孔、接头等强性、易氧化等问题。裂纹是最为危险的缺陷,不仅危害极大,而且往往难以察觉,如微小裂纹、内部裂纹等。因此要针对铝合金材料的实际特点进行分析,采取高效的焊接技术,减少铝合金车体缺陷。

关键词: 轨道交通车体; 铝合金材料; 应用; 焊接技术

#### 0 引言

铝合金质量轻,耐腐蚀,外观平整度好,比强度高,易于制造复杂曲面,因而引起了广泛的关注。目前,我国铁路正在发展高速客车、地铁客车、轻轨客车和高速载重货车,轻量化是铁路提速的首要条件,可以减轻铁路的负荷,减少车辆运行时的阻力,降低能源消耗。在铝合金焊接过程中,应综合考虑焊接方法的先进程度、效率和造价等因素,并通过对现有焊接方法的不断完善,改善焊接接头的整体性能。

## 1 轨道交通车体中铝合金材料的应用优点

#### 1.1 可以大大减轻车辆自重

铝合金材料在强度和刚性满足安全要求的情况下, 可以大幅降低车辆的自重。通常情况下,铝合金车辆的 自重要比钢制车辆轻 30% ~ 50%。无论是高铁还是双 层火车,实现提速的最好办法就是尽可能多地增加汽车 的铝含量。

#### 1.2 铝合金的耐火性和耐电弧性较强

尽管铝熔点(660℃)比的钢熔点(1530℃)要低得多,但是车体的耐火性和耐电弧性不仅取决于材料的熔点,还取决于材料的热传导。铝合金的导热性能优于钢材,其散热性能优于钢材。

# 1.3 抗腐蚀性能

铝合金在空气中容易会产生一种高密度的氧化膜, 从而使其在空气中具有良好的抗氧化性能。因此,铝合 金的防腐蚀能力优于钢材,尤其是对箱型结构和某些内 梁柱等难以涂装的部件,铝材表现出明显的优越性。对 铝合金进行化学着色、上漆、喷涂等处理,极大地改善 了铝材零部件的抗腐蚀性能,达到了良好的外观效果。

#### 1.4 便于加工、制造以及维修

随着大型中空、复杂断面铝材的开发和使用, 铝材

焊接工艺得到了发展,铝合金汽车生产技术也逐渐成熟。 铝合金部件容易替换,无需除锈,适用各种表面处理, 维修方便,而且可循环利用,大大简化了生产过程,而 且相比钢制车体节省了大量的生产时间。

## 1.5 性价比更高

铝的高价格导致了汽车生产成本的提高,但是铝合金可以大大减轻汽车的重量,不仅减少能源消耗,而且大幅度提高了车辆的运输能力,维护成本也非常低,故而性价比更高。

#### 2 铝合金材料用于轨道交通车体的策略

### 2.1 在车体结构方面的应用

铝合金车体在车体型材中占 70%,板料和铸锻件各占 3%。目前,世界上很多国家提高了轨道交通工具中铝合金零部件的占比。采用铝合金材料及大型挤压型材,为轨道交通车体结构的现代化、轻质化奠定了基础,同时也为今后的发展和利用提供了新的思路和动力。随着轨道交通车体的高速轻量化、施工与维护的简化,大量的大型单片、空心复合薄壁异形件得到了发展。当前,日本已研制出 6N01 合金,其挤压性能、焊接性能和耐腐蚀性能均优于 6005,可用于制造具有较大孔径的复合薄壁中空型材。西欧国家铝合金车体的挤压型材多为Al-Mg-Si6005A 挤压型材,这主要是由于 6005A 挤压型材具有较好的挤压性能、简化的制造过程和优于 Al-Zn-Mg7000 系列合金的应力腐蚀问题。5083 合金是目前应用最广泛的板材。

### 2.2 用于车体部件的应用

适用于铝合金的转向架部件有车架、轴箱、齿轮箱、 弹簧支座等。其他部件包括铝基复合材料制动盘、铝合 金轮心复合车轮、电磁制动用的部件、磁悬浮汽车用的 超导体氦气液化制冷机用的换热器,以及车内的各种设 备,如室内装饰板、门窗、座椅、水箱、各种管道等整 体的质量都很高。

# 3 轨道交通车体中铝合金材料焊接技术

# 3.1 铝合金的焊接裂纹类型

铝合金的焊接裂纹一般是热裂纹,其成因是:在凝固时材料的性能、形态和收缩变形都会随着温度的下降而发生变化,金属收缩会被周边金属的阻挡,在晶界则会受到拉应力的影响。热裂纹分为结晶开裂和液化开裂两种。结晶裂纹主要有纵向裂纹、横向裂纹、弧坑裂纹、显微裂纹和焊根裂纹。液化裂纹主要有热影响区焊趾裂纹、层状裂纹和熔合线周围显微裂纹。

## 3.2 铝合金焊接裂纹形成的原因和机制

焊接过程中的熔池结晶分为三个阶段。

第一个阶段为液固阶段,从高温下冷却开始结晶, 仅有少量的晶核。随着温度的下降、冷却时间的增加, 结晶的体积不断增大,同时也产生了新的结晶,但在此 过程中液相的体积总是很大,而且相邻的颗粒没有接触, 不会影响到尚未凝固的液态铝合金的自由流动,就算有 张应力也会及时地填充流淌的铝合金液体,所以不太可 能出现裂缝。

第二个阶段是固液阶段。随着熔池的进一步结晶,熔池中的固相会越来越多,而之前的晶核也会越来越大,当温度下降到一定程度的时候,这些合金就会开始互相碰撞,而这种情况下,铝合金的流动会被阻止,也就意味着熔池的结晶会变成液体。在此条件下,液态铝合金中的少量金属会使其发生剧烈的变形,而液体中残留的液相却不会轻易地流动,在张力的作用下形成的细小裂缝是不可能被填满的。所以,这一阶段称为"脆性温度区"。

第三个阶段是完全固化阶段, 当熔池中的金属完全固化后, 在受拉应力作用下, 其强度和塑性都会有所提高, 而这个阶段出现裂缝的几率也比较低。结果表明, 在脆性温度以上或以下, 焊接接头对结晶开裂的抗剪强度和开裂趋势都比较弱。通常, 当含有少量杂质的金属(如母材和焊料)时由于脆性温度范围较窄, 在该区域内的拉伸应力作用时间较短, 导致整体应变量较小, 从而降低了焊接过程中的开裂趋势。当焊条中杂质较多时脆性温度范围较宽,且在此区域内的拉伸应力持续时间较长,容易发生裂缝。

## 3.3 铝合金焊接裂纹的防治

焊接裂纹产生的原因主要有 3 个: 脆化温度范围、该区域中合金的韧性和脆化温度范围内的变形速率。一般认为, 脆性温度范围和该范围内的韧性是导致焊缝热开裂的冶金因子, 而在脆性温度区域中金属的变形速率是车体因素。在焊接工艺中材料的冶金和车体性能的综合影响主要体现在两个方面, 一是加强连接, 二是削弱

连接。在冷却过程中如果在焊接过程中形成了一个强度 连接,在一定的刚度约束下,可以发生变形,而焊缝和 近缝区的金属则可以抵抗外部约束和内部的残余应力, 从而降低了裂纹的发生。在此条件下焊缝的裂纹敏感性 更高。焊缝的裂纹敏感度取决于变形能力、应变、变形 抗力与外部应力的比较。但是, 在不同的温度阶段, 不 同的晶间强度和晶粒强度的增加情况不同, 变形在晶粒 和晶粒内的情况分布不同, 应变引起的扩散行为不同, 应力集中的情况和引起的脆性的原因不同,因此,不同 的焊接接头的弱点和弱化的程度也不同。针对铝合金在 焊接过程中出现的热裂现象,从冶金、工艺等方面对其 进行改善,从而减少焊接过程中出现的热裂纹。在冶金 因素上,为避免在焊接过程中出现晶间热裂纹,可以采 用对焊缝的合金体系进行调节,或者在焊料中加入一种 改进剂。从抗裂性的观点来看,调节焊接体系的重点是 控制适当的可熔共晶和减小晶化温度范围。

铝合金是典型的共晶型合金,其最大开裂趋势与"最大"凝固温度范围一致,极少量的易熔共晶会增加凝固开裂的趋势,因此,为了达到"愈合"效果,通常采用的方法是将主要合金的含量大于最大裂纹倾向。添加 Ti、Zr、V、B 等元素作为变质剂,可以使合金的塑性和韧性得到改善,从而有效地预防焊接热开裂。这些微细难熔质点在液态金属凝固过程中会变成不能自发凝结的结晶,因此能起到细化结晶的作用。在工艺因素上,可以通过以下措施来降低铝合金裂纹的发生:

- (1) 合理的焊接参数,控制焊丝的能量。通过对焊 丝能量的控制,使金属不会出现过热现象,从而提高其 高温韧性。但要确保焊缝的质量,焊缝的能量也不能太 小。
- (2) 对预热及夹层温度进行控制。室温低于5℃时必须进行预热,以补偿焊料输入热量,避免因未熔而产生裂纹。根据相关规定,分层温度不能太高,否则会出现过热,导致晶粒变粗。
- (3)减少刚性约束。在焊接过程中人为地施加了太大的约束以抑制焊接变形,导致焊接过程中的收缩要求不能得到满足,导致拉伸应力增大,从而增大裂纹的发生。
- (4)选用热能集中的热源。可以使焊接速度更快, 加热时间更短,变形更小,从而降低内部应力。
- (5) 加强操作水平。焊缝的中断或终止部位通常是 焊点最多的部位,焊点填充后,将焊枪向后的一部分收 回,在熄弧后再进行焊接。
  - (6) 控制焊接次序与点固次序。减少变形。
  - (7) 使用电弧板消除焊缝中的裂缝等缺陷。
  - (8) 合理选择焊接材料,焊条应具有良好的抗裂性;
  - (9) 焊前清洗、焊基材和焊料表面有氧化层、油脂等,

- 65 -

焊缝后容易成为裂纹的源头。

## (10) 控制焊接设备质量。

所选用的焊机在起弧时能产生较大的电流,使其在 正常的焊接后保持正常的电流,从而有效地避免了焊接 初期因温度不足造成的熔化问题,从而在一定程度上避 免了开裂。防止或减少硫、磷等有害元素的含量,采用 低碳电极进行焊接。

为了改善一次结晶,在焊缝中添加细化晶粒的元素 如钛、铝、锆、硼、稀土金属铈,因为细化晶粒可以提高焊缝的抗裂纹能力。通过对焊接工艺参数的控制,使焊缝的变形系数得到合理的改善,例如多层多道焊可以防止偏析。

使用碱性焊条和焊剂,因为碱性焊条具有良好的脱硫、磷效果和良好的抗热开裂性能,所以一般使用碱性焊条作为焊条。选用合适的断弧方式,例如:埋弧焊采用断弧板,焊条采用断弧焊或填充弧坑等措施,以避免出现热裂纹。

合理选择焊接规范,严格控制焊接工艺,采取预热、后加热、减缓冷却速率、适当增大焊缝形状系数、尽量使用小电流、多层多道焊来防止焊缝中心出现裂纹,采用浅熔深度、改进散热条件,使低熔点材料在焊缝中不会发生,合理的组装顺序可以减少焊接应力、减少残余应力、防止应力集中。

预防冷裂纹的方法有很多,常用的方法有:选择低氢碱焊条,以降低焊条中的氢气扩散;严格控制焊条、焊剂的保管、烘焙、使用制度,焊条、焊剂要按照要求干燥、使用,以防潮湿;保护气体控制其纯度,严格清理焊条、焊件油渍、锈蚀、水分,控制焊接温度,以降低氢的产生。在焊接过程中添加一定的合金元素,可以改善焊接过程中的塑性。根据材料等级、碳当量、构件厚度、焊接环境等因素,合理地确定了焊接工艺参数和线能。为了消除氢、消除内应力、硬化组织的回火,提高焊缝的韧性,采取适当的焊接工艺,采取分段退焊等措施,以减小焊缝的变形和应力。

#### 3.4 铝合金的焊接工艺前景

铝合金的焊接工艺要远高于钢材,任何不合理的部位的补焊都会给产品带来严重的质量隐患,应从工艺、焊缝的应力、变形、开发新的工艺、新的焊接设备、制订严格的焊接检验规范。除了传统的 MIG 焊之外,国外许多国家都在使用摩擦搅拌焊工艺。这种技术在国外

的铁路工业发展还不到 8 年,但它的发展速度却是突飞猛进,从最初的焊接地板、车顶、侧墙板,到现在已经能焊接车体的每一处焊缝,甚至是车体的焊接。搅拌摩擦焊机也由最初的小尺寸固定设备发展为具有多个焊头的龙门作业台。目前国内已有不少企业开始尝试采用搅拌式摩擦焊接技术,但由于其与 MIG 焊接工艺的设计槽口不相容,采用摩擦搅拌焊接工艺设计的沟槽也不能满足 MIG 焊接要求,采用 MIG 焊接工艺的沟槽也不能满足要求,限制了 MIG 焊接技术的应用。我国的大型铝型材等材料基础工业,由于其自身的侧弯公差,远不能适应摩擦搅拌焊接的要求,目前国内的铁路企业不敢冒险采用这种技术。但技术发展是不可避免的,摩擦搅拌焊接技术具有其特殊的工艺特性,在轨道交通领域有着广阔的应用前景。

## 4 结语

铝合金具有较低的密度,经过热处理后,其强度有很大提高,尤其适用于轻型钢结构。铝合金为平面立方晶体,其强度、韧性和延性均得到改善,但在低温下不会发生脆性转化。铝合金具有较好的工艺性能,适用于生产不同截面的铝材及不同形状的型材,必须要及时发现并解决其中存在的问题,采取措施提高其焊接质量,这样才能够避免缺陷的发生,从而提高车体制造质量。

#### 参考文献:

- [1] 杨智,祝方,田江云,等.有轨电车市政交叉路口道床板预制拼装施工技术[J].建筑机械,2021(1):77-79.
- [2] 汤鹏. 槽型轨磨耗焊补修复关键技术研究 [D]. 成都: 西南交通大学,2018.
- [3] 彭鹏. 槽型轨公铁两用焊轨车的研发 [J]. 现代城市轨道交通,2018(10):1-4.
- [4] 王莹莹,李力,宋宏图,等.槽型钢轨移动式闪光焊接工艺与施工组织研究[J].铁道建筑,2017(2):124-128.
- [5] 冯建龙.100%低地板车辆通过钢轨焊缝区轮轨垂向动力作用分析 [D]. 成都:西南交通大学,2016.

**作者简介:** 任亮(1987.11-), 女, 汉族, 湖南人, 本科, 工程师, 研究方向: 机械设计。