

# 铝合金搅拌摩擦焊在汽车生产中的应用分析

雷朱坦

(荆州学院 湖北 荆州 434000)

**摘要:** 在汽车领域,新能源汽车发展迅速,而汽车轻量化成为全面提升新能源汽车续航里程的有效方式。在此背景下,轻质材料的选用成为必然,应用最普遍的就是铝合金材料。这对车身结构的焊接提出了挑战——以往针对钢结构车身实施的激光焊、电阻焊等方式,虽然工艺成熟,具有成本低、高效率的特点,却并不符合轻质材料的焊接要求。特别是对于一些铝合金材料,传统焊接方式的适用性非常差,很容易产生气孔、裂纹、变形等一系列问题。因此,就有必要开发一种全新的焊接工艺来适用当前汽车领域铝合金车身结构的焊接要求。在此背景下,搅拌摩擦焊随之出现,这是一种适用于铝合金材料的有效焊接工艺,在轻质材料焊接上具备天然优势和良好综合成本。为此,本文对铝合金搅拌摩擦焊在汽车领域中的应用进行探究,讨论了汽车领域中铝合金搅拌摩擦焊的优势特点,分析了铝合金搅拌摩擦焊的工艺内容,最后对这一焊接技术的应用实践进行论述。

**关键词:** 新能源汽车; 铝合金; 搅拌摩擦焊; 焊接工艺

## 0 引言

通常传统的电弧焊工艺也适用于铝合金材料焊接,但由于铝合金材料本身的特殊性,焊接过程中需要细细打磨以防止氧化,所以操作过程既费时又费力。此外,由于热循环的作用,焊接接头的显微组织发生显著变化,因此很容易直接降低焊接头本身的力学性能。

铝合金本身具有重量较轻、耐腐蚀性好、受件容易成型的诸多优点。新型硬铝、超硬铝类铝合金材料的出现,使铝合金材料的硬度性能不断提升,由此广泛地应用到航空航天领域、高速轨道交通领域、高速船舶航行领域、汽车交通领域等。不过,铝合金材料本身具有较高的热膨胀系数,因此很容易引发材料的变形。如果焊缝遭受氧化,则须采用惰性气体来进行保护。这样,在实际的焊接过程中,将会产生气孔、裂纹、软化和弱化强度值等诸多问题。为更好地应对以上方面的问题,搅拌摩擦焊这一全新的焊接方式开始被广泛地应用于铝合金材料的焊接工作当中。

搅拌摩擦焊(FSW)最早由英国焊接研究所(The Welding Institute)研发推出,被归类为固相连接技术的范围。搅拌摩擦焊的出现,最初是为了能够应对航天领域当中轻质金属材料的焊接头性能不足问题,现逐渐应用到汽车领域当中。本文就此对汽车领域中铝合金搅拌摩擦焊的应用展开论述。

## 1 铝合金搅拌摩擦焊的特性

搅拌摩擦焊主要借助搅拌摩擦焊技术中搅拌头和被焊工件间的接触形成摩擦热能,由此来逐步地软化受件焊缝处的金属结构,在焊接搅拌头四周的软化金属很容易受到搅拌挤压的影响,并且将紧跟搅拌针旋转,沿着前后方向缓慢流动,呈现出塑性的金属待焊接搅拌针撤离后,最终形成焊缝,这就是固相焊接的效果。搅拌摩擦焊的搅拌针制成圆柱形或其他形状,以延长待焊接的接头,类似于传统的电弧焊(图1)。

在搅拌摩擦焊的实际操作中,当搅拌针旋转平移时,铝合金对接板之间对接面上的氧化物被破坏,在搅拌头后部形成致密的接头,由此氧化物将分散在接

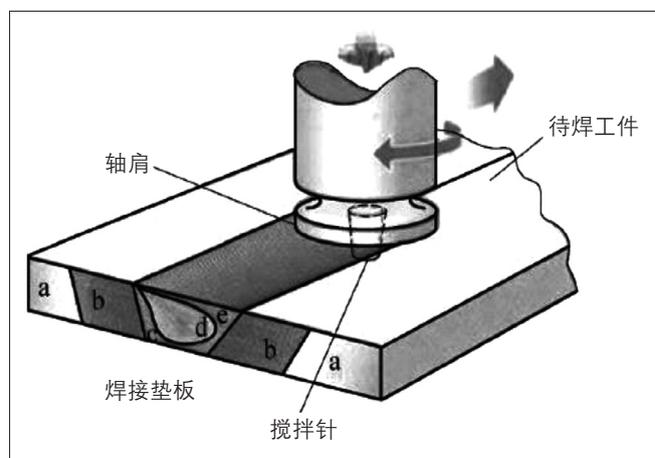


图1 搅拌摩擦焊工艺原理图

头中。

搅拌摩擦焊这一焊接工艺的本质在于保证焊缝材料体积维持原样。整个焊接过程中,焊接接头的温度要求应当低于铝合金的熔点(660℃)。

## 2 汽车领域铝合金搅拌摩擦焊的力学性能

### 2.1 力学性能测试材料

测试材料是一块规格为200mm×100mm×4mm的铝合金板。焊接设备为型号FSW的搅拌摩擦焊机。搅拌轴头部的直径为1.6cm,搅拌针的直径为0.4cm,长度为0.38cm。焊接轴压入受焊铝材表面的深度为0.01cm。用金属丝切割搅拌摩擦焊接(FSW)试样后,从焊接截面中心线向两侧每隔0.1cm测试一次微小硬度。所用显微硬度计为HV型,载荷值为1N,载荷时间需控制在15s以内。拉伸试验主要是从受件焊缝的垂直方向实施切割取得,并于WDW-10型号机上进行,拉伸速度为0.02cm/s,载荷控制为10kN。

### 2.2 力学性能测试

#### 2.2.1 硬度值测试

图2显示了搅拌摩擦焊接接头的硬度值参数分布情况。通常铝合金的焊前硬度值大概在103HV,其接头硬度直接呈现出W型直观分布,由此焊核很容易产生相应的软化效果。并且,其两侧位置的热影响区硬度要明显高于焊核,但又明显低于受件焊接加工前的硬度值,一般离焊核较远部位的硬度则与焊前硬度相近。

#### 2.2.2 拉伸性能测试

铝合金板及其搅拌摩擦焊接接头拉伸试件的相应力学性能参数见表。搅拌摩擦焊的强度低于母材的强度,抗压强度是铝合金板材的79%,抗拉强度是铝合金板材的67%。由此可知,搅拌摩擦焊缝的整体强度能够

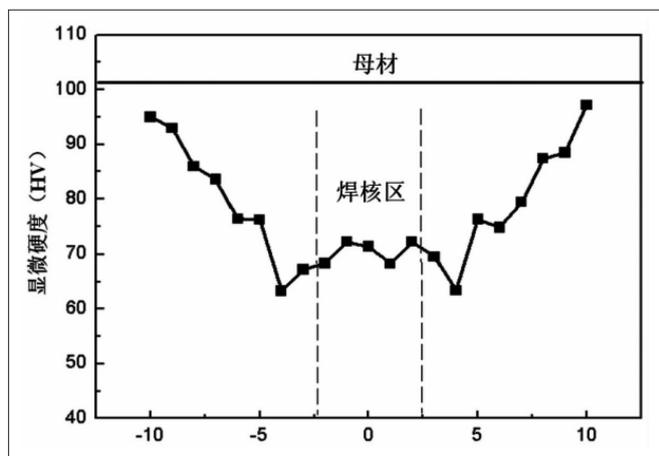


图2 搅拌摩擦焊接接头显微硬度分布图

表 铝合金样品拉伸力学性能参数

测试材料	$\sigma_{0.2}/\text{MPa}$	$\sigma_b/\text{MPa}$	$\Delta$ (%)
铝合金板材	320	266	13
焊缝	245	173	15

满足铝合金结构力学性能的要求。

### 2.3 汽车领域铝合金搅拌摩擦焊力学性能优势

铝合金材料因其优异的可塑性和加工性,被全面应用于车身结构和发动机零件制造当中。在汽车结构中,搅拌摩擦焊的使用非常广泛。汽车制造作为大型制造业,需要生产高质量、大型化的零部件。使用搅拌摩擦焊焊接汽车零部件的接头时,可以超过一般焊接技术的标准。由于搅拌摩擦焊的焊接接头目标范围缩小,汽车铝合金板在汽车焊接过程中不易发生变形。工作期间,可以在绿色清洁的环境中一次完成大型焊接工作。因此,在焊接汽车用铝合金板的过程中,操作人员无须考虑烟雾污染和辐射问题,其在汽车设计中起着非常显著的作用。

由铝合金制成的搅拌摩擦焊接件具有优良的抗拉强度和成型性,使汽车制造和加工变得非常容易,并保持了零件的尺寸稳定性。它还提供了车辆中不同材料之间的连接,并可以降低车辆结构的整体质量。制造成本方面,只需购入搅拌摩擦焊设备,便可以制造各种品牌和类型,有效降低汽车零部件和汽车的制造成本。在使用搅拌摩擦焊的过程中,通过消除对额外辅助工具的需求,可以降低使用工具的成本。搅拌摩擦焊可以保证汽车产品研发速度、生产效率及汽车产品质量。

## 3 汽车领域中应用铝合金搅拌摩擦焊的实践思路

随着新能源汽车领域的持续深入发展,对于材料轻量化的需求随之增加,铝合金等轻质化材料由此成为必然选择。铝合金本身具备的物化性能相比以往传统的结构呈现出显著的差异,由此就对其连接工艺提出了更高的要求。当前,搅拌摩擦焊在新能源汽车领域的应用具体体现在汽车电力系统、车身结构焊接、轮毂结构焊接几个方面。

### 3.1 新能源汽车电力系统中的应用实践

新能源汽车电力系统在结构上主要涵盖电池组件、电机部件和电控设施,这些都属于现代新能源汽车的启动核心。出于新能源汽车轻量化的追求,铝合金被广泛应用于电力系统的结构部件,由此也成为搅拌摩擦焊技术运用的主要场景。

在电池组件当中,搅拌摩擦焊技术的应用主要表现在焊接底板、框架拼焊等。其中在底板拼焊方面,可有效避免焊缝变形的双面焊运用比较广泛,这种焊接方式的单面焊缝的深度达到3~4mm即可符合焊接接头的强度需求。但是,通常因为较大的焊接量,导致选用拼焊的底板宽度明显较大,同时因为底板属于电池组件的轴承位置,因此对其平整度提出更高的要求,很难在此基础上做好对焊接变形的有效控制。

目前,有效处理受件焊缝变形的的方法表现为以下几种。

(1) 提升单块受件的宽度,尽可能地降低焊缝的数量,由此来有效控制变形情况的产生。当前比较常见的底板材料,其宽度值一般在200~500mm的范围,因此可以适当地添加型材宽度来控制好底板的变形状态。不过一般由于型材本身具有较大的宽度,因此型材本身挤压难度将随之增大,相应模具挤压的成本由此持续攀升,最终形成的综合成本由此增加。

(2) 优化现有焊接工艺。针对焊接工具可以选择水冷及防变形来进行有效控制,其中就涵盖了焊接工具控制,这样能够极大地避免焊缝变形。同时,焊接序列的调整也需要充分结合有限元分析的方式来全面预测各项焊接序列的残余变形状况,在此基础上提出相应的针对性优化方案。

(3) 采用冲压式铝合金板材来代替型材实施焊接处理,并在此基础上取缔底板拼焊工艺技术。这是当前部分机柜普遍采取的设计方式,能够极大地提高底板的施工平整度。

### 3.2 汽车车身焊接应用实践

车身连接处的搅拌摩擦焊主要是搅拌摩擦点焊技术(FSSW)的应用,由于车身结构的复杂性,难以牢固地支撑焊缝。搅拌摩擦点焊是在“线性”搅拌摩擦焊的基础上所衍生的全新摩擦焊技术。搅拌摩擦点焊主要是借助搅拌头高速旋转搅拌所形成的环形搅拌区和材料再结晶所形成。搅拌探头通过自身的高度旋转、挤压和破碎这一系列的机械力作用,最终形成致密结构。该结构提供了具有优异机械性能的搅拌摩擦点焊接头。与传统的铝合金电阻点焊的方式相比较,搅拌摩擦点焊技术明显具备更长的寿命和更高的结合强度,具有节约和环保的明显优势。搅拌摩擦点焊可以实现异种材料的有效焊接,在汽车结构焊接方面具备良好的发展空间。

如今对于汽车车身点焊技术的应用,主要表现为两个方向。一是匙孔搅拌摩擦点焊技术。这一技术源于日本汽车领域,焊接的流程非常简单,焊接后的链接率相对较高。不过,锁孔的存在,直接降低了焊接探头的对接面积,乃至对焊接探头的力学性能及外观造成直接影响。二是回填搅拌摩擦点焊技术。这一技术强化了焊接探头内搅拌针和轴套间的协同性,能够有效地避免锁孔留下的问题。在操作流程上,主要是进行摩擦预热,通过搅拌针旋转预热焊缝;其次是轴套旋转焊接,能够由此拉出搅拌针所挤压的焊接材料;最后是压平形成新焊点,一旦搅拌器与轴套本身回压平面,则焊点将随之磨平,搅拌器取下后即可完成焊接,最终完成整个焊接的全过程。

### 3.3 汽车轮毂焊接应用实践

汽车轮毂焊接属于搅拌摩擦焊在汽车行业的另一个应用场景。传统铝合金汽车轮毂的制造工艺是集成低压铸造或锻造。传统铸造工艺本身具有显著的成本优势,但所制造的产品在性能方面稍显不足。要想据此锻造出性能俱佳的汽车轮毂产品,就需要配备工艺相对复杂的、成本投入更大的方式来实现。搅拌摩擦焊本身可充分结合多种工艺的优势特点,这样具有更加全面的成本优势。铝合金搅拌摩擦焊主要针对车轮进行旋压加工。通过这种加工方式,能够依托标准化的技术手段来制造出符合标准要求的轮毂,从而有效地控制相应成本。轮毂的制造本身是采取定制的方式来实现,但相比整体铸件,模具成本和产品质量控制显著提高,促使不同的工艺应用满足多样化需求,对车身材料性能提出更为严格的要求,这样能够更好地实现汽车轻量化生产。

## 4 结语

综上所述,铝合金搅拌摩擦焊因其本身工艺技术及性能优势,在如今汽车领域当中获得广泛的运用。当前,在汽车领域中的应用实践主要表现在新能源汽车电力系统、新能源汽车车身焊接应用、新能源汽车轮毂的搅拌摩擦焊接几个方面,这些技术在日本、德国等国家的应用取得了显著的成效,并由此形成全新的匙孔搅拌摩擦点焊技术、回填式搅拌摩擦点焊技术。结合科技发展趋势来看,技术的进步与更新不会停滞,搅拌摩擦焊技术也将随之不断更新升级,一些技术层面的缺陷问题也将由此获得有效解决,并且充分达成降本增效、可持续发展的目标。未来,铝合金搅拌摩擦焊技术在汽车领域将向着更为高效、更为特效以及

智能化的方向发展。

**基金项目:** 湖北省教育厅科学技术研究计划指导性项目(B2021429); 荆州学院科学研究基金项目(2021KY05)。

#### 参考文献:

- [1] 吴耀宏. 汽车铝合金板材搅拌摩擦焊工艺研究[J]. 时代汽车, 2020(12):123-124.
- [2] 邵明皓, 张健, 王渭平, 等. AA2219-T87 铝合金双轴肩搅拌摩擦焊的腐蚀行为(英文)[J]. 稀有金属材料与工程, 2022, 51(05):1620-1626.

[3] 王柏苍. 搅拌头转速对铝合金搅拌摩擦焊焊缝金属流动行为影响的研究[J]. 木工机床, 2022(01):8-11.

[4] 王涛, 王仁彻, 冯杏梅. 铝蜂窝板与5A05铝合金的搅拌摩擦焊工艺[J]. 焊接技术, 2022, 51(01):64-67.

[5] 巫飞彪, 周博俊. 搅拌摩擦焊在新能源汽车电池下壳体焊接工艺中的应用[J]. 机电工程技术, 2021, 50(11):231-235.

[6] 赵启洲, 唐强, 李斌, 等. 铝合金搅拌摩擦焊在汽车上的应用[J]. 科技创新与应用, 2021, 11(14):179-181.

(上接第25页)

使垃圾能够顺利自出口导入垃圾中;

(5) 通过仿真及试验分析发现, 该垃圾收集装置能在较短时间内实现垃圾的有效收集。

**基金项目:** 湖南省自然科学基金青年项目(2020JJ5395); 湖南省教育厅一般项目(19C1271)。

#### 参考文献:

- [1] 董芳, 朱小山, 王江新, 等. 气候变化耦合海洋污染的生态毒理学研究进展[J]. 科学通报, 2018, 63(Z1):521-534.
- [2] 孔凡宏, 沙媛媛, 李姗姗, 等. 西北太平洋区域海洋垃圾合作治理的模式选择[J]. 上海海洋大学学报, 2022, 31(1):201-211.
- [3] 朱永强, 张平霞. 海洋垃圾回收船设计[J]. 机械设计与制造, 2020(1):18-20.
- [4] 李文婧, 孙榕, 刁鹏飞, 等. 智能海洋垃圾桶[J]. 科学技术创新, 2021(17):179-180.
- [5] 赵尚飞, 李越, 李玲, 等. 一种新型的海洋塑料垃圾回收处理平台的设计[J]. 河南科技, 2021, 767(33):110-112.
- [6] 严泽腾, 刘新. 基于海浪助力的近岸漂浮垃圾收集

设备研究与设计[J]. 装饰, 2021(6):19.

[7] 高峰. 处理垃圾的新思路之二: 生态岛可以自给自足[J]. 中外能源, 2011, 16(10):74.

[8] “海洋吸尘器”——高密度聚乙烯垃圾桶将有效清理海洋垃圾[J]. 橡塑技术与装备, 2017, 43(16):52.

[9] 刘绍青. 首个浮动式海洋垃圾桶已在芬兰赫尔辛基海岸安装试用[J]. 航海, 2017(3):27.

[10] 李永业, 高远, 贾晓萌, 等. 导叶片式旋流器下游断面螺旋流流速特性[J]. 排灌机械工程学报, 2020, 38(8):807-813.

[11] 姜健, 史建邦, 屈霖云. 叶片式旋流发生器的设计与数值计算[J]. 机械设计与制造, 2008(6):48-49.

[12] 赵立新, 代佳鑫, 郭现臣. 叶片式水力旋流器操作参数优选[J]. 流体机械, 2013, 41(10):7-9+52.

[13] 陈红勋. 旋流泵叶轮内部旋转流场的测试[J]. 农业机械学报, 1996, 27(4):49-55.

[14] 张永威, 李启才, 何若全. 不同连接强度带悬臂梁段的钢框架结构滞回性能研究[J]. 振动与冲击, 2022, 41(4):209-216+261.

[15] 郝淑英, 杨涛, 周坤涛, 等. 基于Bessel和Meijer-G函数的楔形和锥形悬臂梁振动分析[J]. 振动与冲击, 2022, 41(4):253-261.