标准地铁顶盖搅拌摩擦焊工艺研究

黄海旭，李莎，王富奇
中车株洲电力机车有限公司　湖南株洲　412001

摘要：近年来，中车株洲电力机车有限公司大部分地铁采用标准地铁车体平台。标准地铁顶盖采用通长挤压圆弧铝合金型材结构，该种结构较适合应用搅拌摩擦焊工艺。搅拌摩擦焊焊接效率高、接头强度高。为推广应用标准地铁顶盖搅拌摩擦焊工艺，参考前期侧墙及长地板搅拌摩擦焊工艺开展工艺研究及验证。通过开展型材设计、工装设计、工艺设计、焊接参数验证及工程化样件制作等，确保标准地铁顶盖搅拌摩擦焊的力学性能、内部缺陷及产品轮廓度等满足相关设计及质量要求。

关键词：标准地铁；顶盖；铝型材；搅拌摩擦焊

Research on friction stir welding process for roof of the standard metro train

HUANG Haixu, LI Sha, WANG Fuqi
CRRC Zhuzhou Electric Locomotive Co., Ltd., Zhuzhou 412001, Hunan, China

Abstract: In recent years, CRRC Zhuzhou Electric Locomotive Co., Ltd. uses a standard metro car body platform for most metro train applications. The standard metro roof uses a continuous extruded curved aluminum alloy profile structure, which is more suitable for application of friction stir welding technology. Friction stir welding has a high welding efficiency and high joint strength. In order to promote the application of friction stir welding technology in standard metro roof, process research and verification will be carried out based on the previous stir welding technology for side walls and long floors. By conducting research on the design of the profile, the design of the fixture, the process design, the verification of welding parameters, and the fabrication of engineering prototype samples, the mechanical properties, internal defects, and profile accuracy of the standard metro roof friction stir welding process were ensured to meet relevant design and quality requirements.

Keywords: the standard metro train; roof; aluminum profile; friction stir welding

1　序言

2018年12月，中国中车开展了系列化中国标准地铁列车研制，构建了模块化、标准化、系列化及谱系化中国标准地铁列车车体结构。地铁车辆的标准化给列车制造商、运营商及部件系统供应商等各方带来极大便利。我公司近年来大部分车体都采用了标准地铁列车车体结构。

搅拌摩擦焊（Friction Stir Welding，FSW）作为一种新型焊接方法，具有接头性能好、焊接变形小，以及绿色环保等优点。系列化中国标准A/B型铝合金地铁顶盖均采用了通长挤压圆弧型材结构[1]，铝合金型材选用6005A-T6牌号，前期采用自动MIG焊（熔化极惰性气体保护焊）工艺，该种通长型材焊接较适合使用搅拌摩擦焊进行代替。本文

通过开展标准地铁顶盖搅拌摩擦焊工艺研究，以实现产品验证及工程化应用，扩大搅拌摩擦焊应用范围，提高产品质量。

2 顶盖焊接工艺分析

目前，铝合金车体MIG自动焊接存在焊接效率低、强度下降过大、焊接环境要求高、运行成本高，以及环境污染等问题[2]。搅拌摩擦焊是一项固相连接技术，其依靠高速旋转的搅拌头与两焊件接触产生摩擦热，使接缝处金属形成塑性软化区，旋转的搅拌头周围塑性软化金属受到搅拌挤压，并随搅拌针的旋转沿焊缝前进方向后退方流动，塑性金属待搅拌针离开后冷却形成焊缝，实现了固相连接[3-5]。搅拌摩擦焊具有焊接效率高、焊接变形小、打磨量小、焊接质量高、焊接作业清洁及能耗低等优点。因此，我公司全力推广搅拌摩擦焊工艺的应用。

铝合金搅拌摩擦焊主要分为单轴肩和双轴肩两种形式。单轴肩搅拌摩擦焊技术应用较为成熟，我公司前期已在侧墙板、地板焊接上批量应用，4mm厚接头焊接速度达到1800mm/min。双轴肩搅拌摩擦焊作为一种新型的搅拌摩擦焊接方式，是对传统单轴肩搅拌摩擦焊接技术的一种补充。由于其独特的结构，具有上下两个轴肩共用一个搅拌针，每个轴肩分别与试件的两个表面接触，从根本上避免了未焊透缺陷[6]，下面轴肩代替了背部的刚性支撑垫板，有利于产品型材的轻量化设计。

国内外研究人员尤其是轨道交通车体制造从业者对铝合金双轴肩搅拌摩擦焊的焊接工艺进行了深入研究。但是，根据目前研究现状，针对4mm厚6系铝合金双轴肩搅拌摩擦焊的焊接速度为400～700mm/min[7]，其焊接速度远低于单轴肩搅拌摩擦焊。另外，根据张颖川等[8]对6061-T6 铝合金中空薄壁型材双轴肩搅拌摩擦焊工具设计与工艺分析，由于双轴肩搅拌摩擦焊过程中，受到上下两个轴肩及搅拌针的作用力，相较于常规搅拌摩擦焊接头受力较大，需要通过垫板、挡板、定位块及压板等组成的工装对待焊型材进行装夹和固定，防止在焊接过程中待焊型材分离，保证焊接质量，其工装的压紧或侧顶相较传统单轴肩搅拌摩擦焊要求更高。以上问题，我公司在开展双轴肩搅拌摩擦焊工艺开发中得到了印证。同时，根据刘赣华等[9]对单轴肩、双轴肩搅拌摩擦焊焊接接头性能对比与研究表明，双轴肩焊缝热输入高于单轴肩焊缝，故双轴肩焊缝的晶粒生长过快导致其晶粒粗大，进而使整体力学性能下降，双轴肩焊缝接头仅达到单轴肩接头强度的84%。

经过对单轴肩、双轴肩搅拌摩擦焊工艺对比，考虑搭配标准地铁圆弧顶盖长度达21m，其对焊接效率要求较高，且现有工装难以满足双轴肩搅拌摩擦焊压紧或侧顶需求，因此标准地铁顶盖仍选用单轴肩搅拌摩擦焊研制。

3 顶盖型材设计

在标准地铁顶盖MIG焊焊接接头及型材基础上，更改为单轴肩搅拌摩擦焊工艺（见图1），型材材质为6005-T6铝合金，其中A/B型标准地铁顶盖中间型材、中心型材通用，因A/B型标准地铁车体宽度不同，所以A/B型边型材宽度也不同。焊接接头形式为自带垫板的对接接头，型材上下面板厚度均为4.4mm，焊缝轴肩接触区域的型材均设0.4mm凸台（见图2），凸台宽度14mm，凸台用于搅拌摩擦焊金属的填充。同时，设计要求装配及焊接时型材接缝处对接间隙≤0.5mm、接缝处错边≤0.3mm、上下搭接间隙之和≤0.4mm[10]。

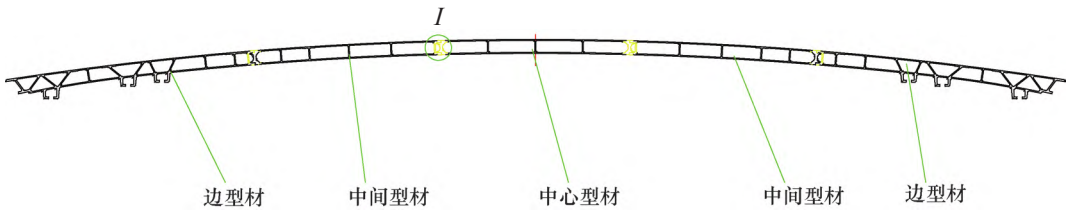

图1 顶盖型材截面

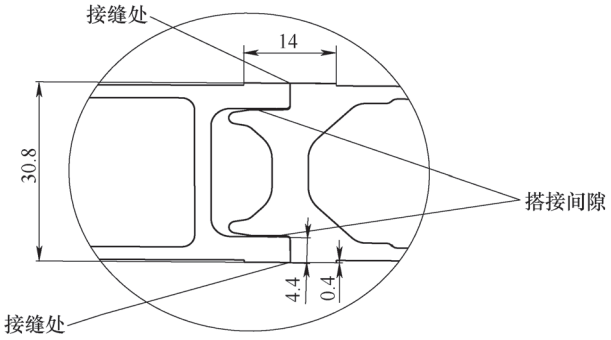

图2　图1中I处型材焊接接头形式

4　顶盖搅拌摩擦焊工艺方案

4.1　工装方案

为满足圆弧型顶盖的搅拌摩擦焊生产，工装方案主要需满足以下功能及要求。

1）因为搅拌摩擦焊为压力焊，焊接过程中需持续施加压力，所以在顶盖4条焊接接头位置底部需设置垫板或托板支撑。同时需兼顾边型材支撑，共设计6个支撑工装，且支撑工装设计需适应顶盖截面轮廓，保证圆弧顶盖的轮廓度。

2）需设置侧向定位及顶紧装置将型材夹紧，保证搅拌摩擦焊过程中型材接缝处间隙≤0.5mm，同时A/B型圆弧顶盖切换时通过更换尼龙块实现快速换型。

3）为保证型材与支撑工装贴合及保证型材接缝处对接间隙≤0.5mm、上下搭接间隙之和≤0.4mm，焊接过程中需设置压臂将型材压紧，压臂设计成折叠式，以适应不同宽度位置焊缝两侧型材压紧。

顶盖搅拌摩擦焊正反装工装如图3、图4所示。由图3、图4可知，正反工装结构类似。

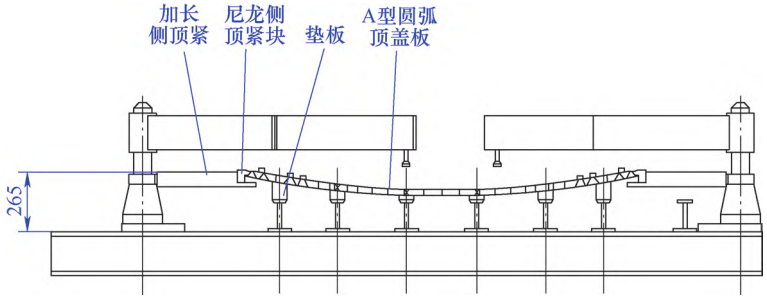

图3　顶盖搅拌摩擦焊工装反装示意

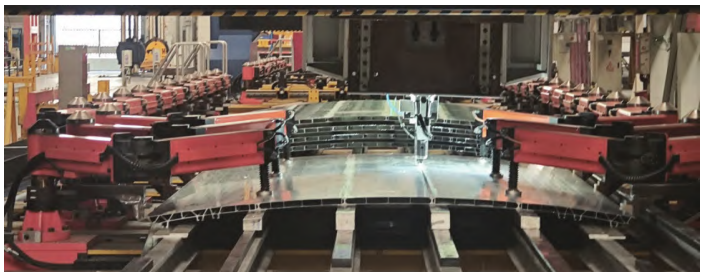

图4　顶盖搅拌摩擦焊工装正装实物

4.2　工艺流程

1）先反面装配及焊接，再焊接正面焊缝。因顶盖为弧形，所以两侧工装顶紧时造成挤压型材往弦高方向变形或导致型材接缝处错边。先反装，因型材下部有垫板支撑，可避免此情况。正装时，由于反面焊缝已连接，焊接时不会出现错边及对接间隙超差，故仅需对侧顶紧进行限位防止顶盖拱起。

2）焊接时，先焊接中间2条焊缝，压臂压在相邻2处焊缝支撑工装型材上方。焊接两侧焊缝时，因中间型材已焊接为整体，压臂分别压在边型材外侧支撑及间隔1条焊缝型材处，可减少压臂行程需求。

5　焊接参数验证

5.1　验证方案

为验证标准地铁圆弧顶盖搅拌摩擦焊焊接参数，参考前期焊接参数对圆弧顶盖正反焊接样件进行验证[10]。搅拌摩擦焊基本焊接参数包括：搅拌头结构类型、焊接倾角、主轴旋转速度、焊接速度

及下压力[11]。其中，焊接倾角在设备安装时进行设置，主轴旋转速度、焊接速度、下压力均通过设备参数设置。本次验证所采用的搅拌头材质为碳素工具钢，轴肩直径为15mm，搅拌针长5.0mm，焊接倾角2.5°，验证时其余焊接参数见表1。

表1　顶盖搅拌摩擦焊焊接参数

下压力/t	转速/（r/min）	焊接速度/（mm/min）
1.4	2800、2900、3000、3100	1800
1.5	2800、2900、3000、3100	1700、1800、1900、2000
1.6	2800、2900、3000、3100	1800

注：1t＝9.8kN。

由于搅拌摩擦焊起始段金属流动不稳定，焊缝结束段会留下针孔，因此焊后将首尾端加工去除50mm。按GB/T 26955—2011《金属材料焊缝破坏性试验　焊缝宏观和微观检验》规定进行焊缝断面取样宏观检测，观察焊缝内部有无孔穴（隧道）、未焊透及弯钩等缺陷；按ISO 4136：2022《金属材料焊缝破坏性试验-横向拉伸实验方法》进行拉伸试验；按ISO 5173：2023《金属材料焊缝破坏性试验-弯曲实验方法》规定，取弯曲直径D＝32mm、角度180°进行弯曲试验。为提高检测的准确性，每组参数及每个试验均取7个样件。

5.2　验证结果及分析

标准地铁顶盖搅拌摩擦焊接头结构与已批量应用的长地板、侧墙板类似，因此工艺验证参数也应用了长地板生产工艺参数（仅进行了微调），因此其焊接工艺未有较大区别。型材结构设计时焊缝接头处设置0.4mm凸台，凸台处材料填充了装配间隙并抵消了倾角造成的压入量（约0.3mm）。因此，所有焊接的样件外观无表面沟槽，压深无异常（见图5），先焊接一面后反面焊缝间隙满足要求，焊缝断面宏观检测焊缝深度符合要求，且未发现焊缝缺陷（见图6），所有样件的弯曲试验结果完好。

对样件的抗拉强度进行收集分析，当下压力1.5t、转速2900r/min、焊接速度1800mm/min时，样件平均抗拉强度最高为257MPa；当下压力1.6t、转速3000r/min、焊接速度1800mm/min时，样件平均抗拉强度最低为199MPa。所有工艺参数样件的接头抗拉强度，均满足ISO 25239-5：2020《搅拌摩擦焊-铝合金-第五部分：质量检验要求》要求，即接头强度应达到母材标准抗拉强度（272MPa）的70%以上（190MPa）。其中，母材强度经检测平均为299.6MPa，最优参数样件的抗拉强度为257MPa，达到母材强度的85.78%。

图5　顶盖搅拌摩擦焊焊缝外观

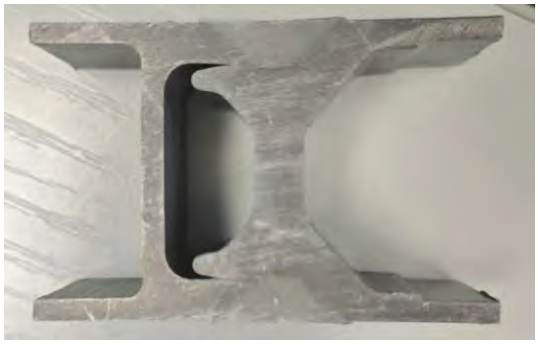

图6　顶盖搅拌摩擦焊焊缝宏观形貌

5.3　工程化样件生产及检测

目前，我公司采用MIG焊工艺生产通长圆弧顶盖，其型材连接处为坡口70°、4V形焊接接头。在自动焊前，采用边拼接边段焊（人工焊）方式，段焊间距1000mm，确保拼接后达到自动焊装配要求；MIG自动焊采用单层单道焊接，焊接速度为1.1m/min；为了控制顶盖轮廓度，自动焊前需对顶盖型材夹紧并设置反变形，顶盖通长焊缝分成4段跳焊，焊后对轮廓度超差处进行调校。

为保证顶盖搅拌摩擦工艺顺利批量应用及对比MIG工艺优劣，应用上述最高抗拉强度样件的焊接参数（下压力1.5t、转速2900r/min、焊接速度1800mm/min）生产一件约22m长顶盖样件，其长度及轮廓与MIG焊实际产品相同。顶盖搅拌摩擦焊样件生产时，使用工装对型材进行夹紧，无需段焊装配，每条焊缝单道一次性焊接，无需跳焊。

1）外观检测。焊后对样件进行检测，其焊缝外观质量无异常，并对其正反所有焊缝的首尾端、中间部分焊缝剖开后进行熔深检测，熔深均＞4.5mm，满足设计要求。

2）轮廓度检测。未进行调整前轮廓度在4mm

以内，且一致性较好，而MIG焊顶盖轮廓度未调整前达到9mm，搅拌摩擦焊顶盖轮廓度优于MIG焊。后续可通过在正面工装设置反变形等措施，轮廓度质量将进一步提高。

3）重量对比分析。搅拌摩擦焊为压力焊接，为确保焊接时型材接头的内部支撑不塌陷变形，型材接头需设计支撑筋结构且其厚度大于弧焊接头，因此在产品整体外形尺寸不变的前提下，搅拌摩擦焊顶盖型材米重（每米的重量）大于弧焊顶盖型材。搅拌摩擦焊焊接时不需填充焊丝且焊缝与型材平齐，而弧焊时需填充焊丝且焊缝一般凸出型材，因此从焊缝填充方面又可减少二者的米重差异。根据对搅拌摩擦焊样件与弧焊产品称重对比，搅拌摩擦焊样件比弧焊大0.3%，区别较小。

4）生产耗材对比。顶盖搅拌摩擦焊与MIG焊相比，其生产中无需焊丝、焊接保护气体、导电嘴等耗材，仅消耗搅拌头。顶盖MIG焊和搅拌摩擦焊耗材成本对比见表2。由表2可知，顶盖搅拌摩擦焊焊接耗材成本降低约74%。

表2　顶盖MIG焊和搅拌摩擦焊单节车耗材成本对比（元）

项目	MIG焊	搅拌摩擦焊
焊丝	约480 （单节车消耗约8kg）	无
保护气体	约525	无
工具	13（导电嘴）	约264 （搅拌头寿命1500m）
总成本	1018	264

6　结束语

1）经验证，标准地铁顶盖搅拌摩擦焊焊接参数为焊接速度1800mm/min、转速2900r/min、焊接压力1.5t时，其抗拉强度最高，达到257MPa。

2）顶盖搅拌摩擦焊焊接速度达1800mm/min，较目前MIG焊焊接速度（1100mm/min）提升60%。

3）标准地铁顶盖搅拌摩擦焊焊接接头性能优异，其抗拉强度可达母材的85.78%。焊接熔深、拉伸性能、弯曲性能均满足设计要求，焊后外观、轮廓度均优于MIG焊工艺。

4）标准地铁顶盖搅拌摩擦焊样件实际重量与弧焊产品重量区别较小。

5）搅拌摩擦焊焊接时无烟尘、弧光，噪声较小，有利于改善车间环境。

综上可知，标准地铁顶盖搅拌摩擦焊从效率、质量、成本及作业环境等方面对比均优于MIG焊，各项质量指标均满足设计要求，在设备产能满足的情况下可推广应用。

参考文献：

[1] 苏柯，刘永强，王怀东，等. 标准地铁列车车体技术条件研究[J]. 铁道技术监督，2022（1）：16-20.

[2] 王炎金，王俊玖. 铝合金车体自动焊接技术发展趋势[J]. 金属加工（热加工），2010（14）：37-40.

[3] DONG P，LI H M，SUN D Q，et al. Effects of welding speed on the microstructure and hardness in friction stir welding joints of 6005A-T6 aluminum alloy[J]. Materials and Design，2013（45）：524-531.

[4] LIU H J，HOU J C，GUO H. Effect of welding speed on microstructure and mechanical properties of self-reacting friction stir welded 6061-T6 aluminum alloy[J]. Materials and Design，2013（50）：872-878.

[5] HILGERT J，SCHMIDT H N B，DOS SANTOS J F，et al. Thermal models for bobbin tool friction stir welding[J]. Journal of Materials Processing Technology，2010，211（2）：197-204.

[6] 陈宁凯，王威威，付宁宁，等. 铝合金车体双轴肩搅拌摩擦焊接头组织及力学性能研究[J]. 金属加工（热加工），2022（8）：34-37.

[7] 谢宇，李兴帅，付炳欣. 轨道交通铝合金车体双轴肩搅拌摩擦焊研究现状与展望[J]. 机车车辆工艺，2023（6）：18-20.

[8] 张颖川，马国栋，代鹏，等. 6061-T6 铝合金中空薄壁型材双轴肩搅拌摩擦焊工具设计与工艺分析[J]. 焊接学报，2022，43（6）：88-95.

[9] 刘赣华，李可. 单、双轴肩搅拌摩擦焊焊接接头性能对比与研究[J]. 科技创新与应用，2020（10）：96-97.

[10] 姚杞，黄海旭，李莎. 城轨车辆铝合金地板高速搅拌摩擦焊工艺研究[J]. 金属加工（热加工），2022（12）：29-31.

[11] 朱向东，刘力琼，蒲宏佐. 铝合金搅拌摩擦焊工艺研究及在城轨车辆上的应用[J]. 机车车辆工艺，2011（5）：1-5.

MW 20241109