

# 搅拌摩擦焊在列车制造中的 优势分析及应用现状

Preponderance Analysis and Application Status of Friction Stir  
Welding in Train Manufacturing

北京航空制造工程研究所中国搅拌摩擦焊中心 赵明书 董春林 栾国红 李光  
南车青岛四方机车车辆股份有限公司 孟立春



赵明书

硕士研究生,毕业于北京工业大学,主要从事列车铝合金及航空铝合金搅拌摩擦焊接工艺及机理研究。

列车轻量化可以提高列车的运行速度、增加运输重量、减少能源消耗、减少大气污染。根据车辆LCA寿命周期评估的估算,如果减轻车体10%的重量,则运行能耗降低6%,CO<sub>2</sub>排放量减少6%。铝合金的应用是实现轨道列车轻量化的重要途径之一。用于车体铝合金材料的焊接技术主要包括保护焊(Tungsten Inert Gas Arc Welding, TIG)、

在中国,自2002年搅拌摩擦焊技术引入以来,设备制造能力和科研技术水平不断发展。目前,搅拌摩擦焊接技术已经在国内的航空、航天、舰船和电子工业领域得以应用。

MIG金属极惰性气体保护焊(Metal Inert Gas Welding, MIG)以及埋弧焊等方法。目前,国内的铝合金车体焊接以MIG焊为主。但该方法容易产生裂纹、气孔、夹渣、未焊透等缺陷,并且焊接质量在很大程度上依赖于工人的技术水平。

FSW的出现为铝合金材料的连接提供了新的解决方案。在搅拌摩擦焊接过程中,高速旋转的搅拌头和被焊材料之间产生的摩擦热使材料热塑化,热塑化的材料在搅拌头的机械锻造作用下,实现了工件之间的固相连接。由于材料没有熔化,不仅可以从根本上避免气孔、裂纹、夹杂等缺陷的产生,并且较小的热输入也大大地降低了材料的焊接变形,因此搅拌摩擦焊特别适用于铝合金长直焊缝的焊接,被众多列车制造企业用于列车长大型材的焊接中。

## FSW与MIG焊接接头性能对比

国内外对FSW和MIG焊接接头的强度、硬度、疲劳性能等进行了对比研究,结果显示,FSW焊接接头具有更优异的接头性能,其屈服强度和抗拉强度均高于MIG焊,焊缝硬度更接近母材,焊缝软化区宽度减小,同一应力水平下的疲劳循环次数显著增加,且疲劳寿命的分散性明显降低。

英国铁路安全与标准委员会、天使列车公司和英国HSBC铁道公司曾请英国焊接研究所(TWI)对FSW和MIG焊在铁路工业中的适用性进行评估。TWI针对6082-T6和6005-T6铝合金的研究结果表明,2种材料的FSW焊接接头抗拉强度较MIG焊高约10%,屈服强

度较 MIG 焊接头高约 20%，而接头延伸率和断面收缩率与 MIG 焊基本相同<sup>[2]</sup>。显微硬度的结果显示，对于 6082-T6 铝合金，FSW 焊接头相比 MIG 焊接头硬度提高 21.7%，接头软化区宽度降低 42.6%。对于 6005-T6 铝合金，FSW 与 MIG 焊软化区硬度相近，但 FSW 比 MIG 焊软化区宽度降低 50%<sup>[2]</sup>。

G. C. Sih 等人<sup>[3]</sup>针对 6082-T6 铝合金和 6061-T6 铝合金的 FSW 与 MIG 焊的疲劳性能对比研究结果表明，在相同的应力载荷条件下，FSW 接头循环次数要比 MIG 焊平均高近 10 倍，并且 FSW 的疲劳寿命分散性明显小于 MIG 焊。Daisuke Otsuka 等人<sup>[4]</sup>关于 A6N01S-T5 铝合金疲劳性能的研究结果显示，循环次数为  $N=10^7$  次时，FSW 的疲劳强度比 MIG 高 50%。可见，采用搅拌摩擦焊获得的焊接接头具有更加令人满意的疲劳性能。

### FSW 与 MIG 经济效益对比

采用 FSW 技术生产列车，可以显著降低成本，提高经济效益。2001 年庞巴迪车辆公司公布 FSW 和 MIG 经济效益对比分析<sup>[5]</sup>。分析的对象是 400 件 20m 长的列车底架，每个底架包括 12 条纵向焊缝，8 条对接焊缝，4 条角焊缝，焊缝总长 96km。底架采用 MIG 焊接时，从材料到货到焊件完成包括 17 个步骤。而 FSW 焊接相对于 MIG 焊，不需要进行电动钢刷打磨、溶剂擦拭、焊接设备定位、正面焊接后卸取焊件和吊起翻转焊件等步骤，使焊接工艺得到简化。

工序的简化不仅使生产效率得到提高，还是降低成本的直接原因，庞巴迪车辆公司从能源消耗、材料损耗、运输需求量和环境损害等几方面对 FSW 焊接过程进行了精细的计算分析，得出的结论是，在 400 件列车底架焊接中，相对于 MIG 焊，

FSW 可以节电 25000kW/h，节约氩气 18240m<sup>3</sup>，节省塑料 448kg 和清洗剂 335kg，减少运输量 59860kg·km，此外 FSW 焊接噪音低于 85dB，不产生粉尘、烟尘，也不需要除尘装置，使工作环境得到显著改善。

上述庞巴迪公司的计算中只反映了采用 FSW 可直接节约的成本，还有一些间接产生的效益没有被统计。例如，由于 FSW 工艺变形特别小（日本车辆制造的结果表明 FSW 的焊接变形是 MIG 焊接变形的 1/10<sup>[6]</sup>），不需要后续的矫直和补焊所产生的效益，以及无需除尘装置所节约的硬件投入和持续的能源动力消耗等所产生的效益。

搅拌摩擦焊技术可以改善焊接接头使用性能，提高经济效益，因此这项技术一经问世便受到广泛关注，在航空、航天、列车、舰船等多个领域得到应用。例如，美国波音公司将 FSW 用于制造运载火箭 Delta 系列的助推器芯级贮箱。采用搅拌摩擦焊后，焊接接头强度提高 30% 以上，制造周期缩短了大约 80%。空客公司采用搅拌摩擦焊技术制造 A340-600 型大型客机翼肋，可以实现 5% 的减重，而且制造成本降低了 21%。在轨道列车行业，国外许多列车生产企业已经实现了搅拌摩擦焊技术的规模化工程应用。伴随轨道列车行业日新月异的发展和竞争的日益激烈，国内许多列车生产企业开始大胆探索、尝试新技术，并希望更多地了解搅拌摩擦焊在国外轨道列车中的应用情况。

### FSW 在国外轨道列车中的应用情况

在国外的轨道列车制造行业中，搅拌摩擦焊已有 13 年的生产经验，发展速度非常快，从当初只焊接地板、顶板、侧墙板，发展到几乎可以焊接车体所有焊缝，包括出入口门框、侧墙与底架结合焊接。搅拌摩擦焊

设备也从最初的小型固定式设备发展成大型多焊接机头的龙门式工作站<sup>[7]</sup>。

国际知名的列车生产企业都在采用搅拌摩擦焊技术生产多种型号的轨道列车，这包括世界三大跨国列车企业庞巴迪、阿尔斯通和西门子，以及日本日立、川崎重工、住友轻金属工业、日本车辆制造等众多老牌的列车制造企业。

#### 1 FSW 在日本的应用情况

日本在高速列车的设计、制造、运行方面都处于世界领先地位，是世界上第一个实现列车高速化运行的国家。作为最早意识到 FSW 技术经济价值的列车生产商之一，日本日立公司 1995 年引进 FSW 技术，开始基础研究，1998 年开始应用 FSW 技术进行列车的批量生产。自 1998 年 10 月至 2004 年 9 月，日立公司采用 FSW 技术生产的 33 种列车车型中焊接单壳车辆 136 辆，焊接双壳车辆 657 辆，对接焊缝总长 314793m，搭接焊缝总长 22770m，焊接位置涉及侧墙、车顶和最终组装<sup>[8]</sup>。

日立为适应搅拌摩擦焊技术，车辆的设计、结构和组装方式都进行了改进。例如，2000 年日立公司发明了“双层壁板单面焊接”的接头形式，并用于 EMU 20000 系列市郊火车的侧墙和顶板的生产中，焊接时将车辆墙板平置操作台上，使墙板外表面与操作平台接触，首先进行外层板的焊接，然后将内层板的连接板盖住已结合的焊缝并完成焊接。虽然相对于“双层壁板双面焊接”，焊缝数量由 2 条增至 3 条，但因为使平滑的焊缝底部位于墙板的外表面，省去了精加工的步骤，并且焊接过程中不需要翻转，显著降低了成本、提高了生产效率<sup>[8-10]</sup>。

2001 年开始，日立将 FSW 应用在竖直方向的出入口门框的焊接中。出入口门框开口面积大，应力集中也大。为增加强度，往往用较厚的材

料焊接成框架构件,由于与侧墙之间存在厚度差,采用MAG焊难以实现均匀的焊接热量分布。出入口门框是车体中精度要求特别严格的部位,过去在焊后矫直中需要花很长时间,为提高墙体精度和作业效率,开发了FSW焊接装置,实现了出入口门框与侧墙间不等厚材料的高精度焊接。

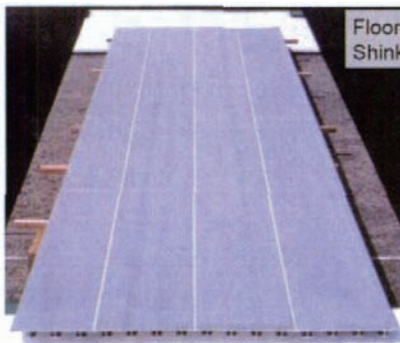
日本川崎重工在Fastech 360Z



日本新干线列车

广和应用。FSW技术在列车制造中有两种应用形式,一种形式是自己购买FSW设备进行生产,另一种形式是直接购买已经完成FSW焊接的型材。

丹麦铝合金冲压生产商Sapa和Hydro Marine铝业是欧洲最早进行搅拌摩擦焊技术的2家企业。应用初期,他们将搅拌摩擦焊用于轨道



采用搅拌摩擦焊制造的列车内部地板

列车生产中,采用搅拌摩擦点焊(FSSW)焊接列车顶部面板的加强筋<sup>[4]</sup>,并对FSW技术给予很高评价,特别提出搅拌摩擦焊的低能量输入改善了车皮的平面度及美观性。日本住友轻金属公司采用搅拌摩擦焊进行铝合金挤压型材的拼焊<sup>[4]</sup>,其成品用于日本新干线车辆的制造中,时速可达285km/h。

日本车辆制造将搅拌摩擦焊<sup>[4]</sup>技术用于高速列车的制造中,用于车体的中空挤压结构侧墙以及地板的焊接,接头形式分别为厚度3.5mm和4mm厚的对接形式<sup>[11]</sup>。

## 2 FSW在欧洲的应用情况

FSW技术在德国、英国、法国、丹麦、瑞典、奥地利等国家已得到推

列车单层车顶板的焊接中。Sapa将FSW技术用于轨道列车板材生产中已经超过10年,现在Sapa每天FSW焊接生产效率接近1000m,每年超过300km。现在Sapa已具备1台16m长的ESAB SuperStir搅拌摩擦焊接设备,用于大厚板的拼焊,焊缝长度可达14.5m,板材宽幅为3m。这台设备有3个搅拌头,既可以进行双面焊,也可以在同一面上从板材中心向两侧同时进行焊接,使工作效率大幅提高<sup>[11]</sup>。

从1997年开始,德国Alstom LHB购买采用FSW生产的铝合金车顶板用于哥本哈根市郊火车的生产当中;2001年开始,在慕尼黑市郊火车上使用FSW技术生产的

铝合金壁板,2002年开始在该系列列车中使用FSW生产的地板。此外,Alstom LHB已经成功地完成23mm厚铝合金板的搅拌摩擦焊试验,这意味轨道列车底架结构中的MIG焊接可以被FSW所取代<sup>[11]</sup>。

位于英国中部的庞巴迪公司经过3年对搅拌摩擦焊技术的评定后,在生产Electrostar系列的列车中采用FSW技术<sup>[11]</sup>。伦敦地铁已向庞巴迪预定了376辆采用FSW焊接的列车,用于维多利亚线路的升级,采用FSW焊接的车体壁板外表面,喷涂后具有非常出色的表面光洁度。预计在未来10年,将有超过2000辆列车采用FSW技术的地铁订单<sup>[12]</sup>。

## 结束语

搅拌摩擦焊技术正应用于世界各地的铝合金地铁、通勤列车、新干线、高速列车的生产作业当中,其应用部位包括底架、顶板、壁板、裙板、地板、出入口门框以及壁板与底架的结合。FSW在国外列车中13年的成功应用经验向人们证明其应用价值,也向国内的列车制造商展示了FSW技术广阔的应用前景。

在中国,自2002年搅拌摩擦焊技术引入以来,设备制造能力和科研技术水平不断发展。目前,搅拌摩擦焊技术已经在国内的航空、航天、舰船和电子工业领域得以应用。国内列车领域应用搅拌摩擦焊技术是必然趋势,目前已有多家列车生产企业意识到搅拌摩擦焊技术的优势,先后启动搅拌摩擦焊的技术研究及工程化应用的论证工作。国内应根据铝合金车体的特点,尽快开发适用于FSW焊接的铝合金型材,争取早日实现铝合金列车车体的搅拌摩擦焊接的工业化生产。



Electrostar系列列车内部的搅拌摩擦焊焊缝



列车铝合金型材的搅拌摩擦焊焊接过程

本文有参考文献12篇,因篇幅所限,未能一一列出,读者如有需要,请向本刊编辑部索取。(责编 金卯)