

列车制造搅拌摩擦焊接技术和应用

Friction Stir Welding Technology and Application of Train Manufacturing

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

[摘要] 本文在简要介绍搅拌摩擦焊技术特点的基础上,对轻质铝合金列车制造中所采用材料的焊接性能及中空型材结构搅拌摩擦焊接头的设计特点进行了研究,并且对搅拌摩擦焊技术在中国列车制造中的典型应用和相关搅拌摩擦焊设备开发进行了介绍和总结。

关键词: 搅拌摩擦焊 接头力学性能 搅拌摩擦焊设备

[ABSTRACT] On the base of introduction of the essential features of friction stir welding(FSW) technology, the welding-ability of the aluminum materials and the design principles of the friction stir welding joint of the light-weight hollow extrusion train manufacturing are investigated in as well as some typical applications of the friction stir welding and developments of relevant equipments in Chinese train manufacturing industry are also summarized.

Keywords: Friction stir welding Mechanical property of FSW joint FSW equipment

搅拌摩擦焊技术彻底解决了铝合金焊接方法问题。这种焊接工艺技术最初主要用于解决铝合金等低熔点材料的焊接,但是经过 10 多年的发展,搅拌摩擦焊已经可以应用于铝合金、铜合金、镁合金、钛合金,甚至合金钢等金属材料。

与普通熔焊方法相比,较搅拌摩擦焊具有如下突出的优点: 固态焊接技术,焊接过程不存在焊接材料熔化;接头质量好、焊缝为细晶锻造组织结构,没有气孔、裂纹、夹渣等缺陷;焊接效率高,在 0.4~100mm 厚度范围内可以实现单道焊接成型;不受焊缝位置的限制,可实现多种接头形式的焊接;焊件中残余应力低,变形小,可以实现高精度焊接;接头强度高、疲劳性能好,冲击韧性优异;焊接成本低,不需要焊接过程消耗,不需要填丝和保护气;焊接操作简单、便于实现自动化焊接。

基于搅拌摩擦焊技术的诸多优越性,自 1991 年发明至今,在不到 10 年的时间里,搅拌摩擦焊已经在航天、航空、造船、列车、汽车、电力等多个工业制造领域得

到广泛应用。

在轨道交通行业,随着列车速度的不断提高以及轻量化发展要求,对列车车体结构和焊接接头强度及其安全性的要求也越来越高。尤其高速和超高速(500km/h)列车,用中空铝合金挤压型材和熔化焊(MIG)相结合的制造方式,虽然增加了结构集成和减轻了整车重量,但是熔化焊接头的强度低、冲击韧性差,成为制约高速轨道车辆安全性的主导因素。基于搅拌摩擦焊的接头强度和疲劳性能皆优于熔化焊接头,并且变形小,不需要焊后矫形,生产效率高,焊接速度可达 2000mm/min,节约成本,焊接过程不需要焊丝和保护气等优越性,所以目前在海外高速列车的制造领域,搅拌摩擦焊已成为轨道车辆车体制造主导焊接工艺技术。

1 列车铝合金材料搅拌摩擦焊性能

搅拌摩擦焊可以焊接所有热处理状态下的铝合金材料,并且不论是板材和型材,皆可以获得优异的固相焊接接头,在保持原始铝合金材料性能的同时,可以实现高质量的连接。下面分别介绍轨道列车常用铝合金材料的搅拌摩擦焊性能。

1.1 6061-T6 铝合金

6061-T6 铝合金是 Al-Mg-Si 系可热处理强化铝合金,其化学成分如表 1 所示。在高温下,6061-T6 铝合金具有良好的塑性,虽然强度不高,但具有优良的耐蚀性,没有晶间腐蚀倾向,焊接性能良好,常用于制造中等载荷零件、形状复杂的锻件和模锻件。

表1 6061-T6铝合金的化学成分 w/%

Mg	Si	Fe	Cu	Mn	Cr	Ti	Al
1.06	0.53	0.38	0.33	0.043	0.17	0.033	其余

搅拌摩擦焊工具的轴肩直径为 15mm,搅拌针直径 3.5mm,长度 5.75mm,带有螺纹结构。采用优选的焊接参数进行搅拌摩擦焊,旋转速度 1400r/min,焊接速度 400mm/min,焊接倾角为 2.5°。焊前对接口表面进行机械打磨清理,并用酒精溶液擦拭去除油污。6061-T6 铝合金搅拌摩擦焊接头成形良好,图 1 所示为典型的焊缝

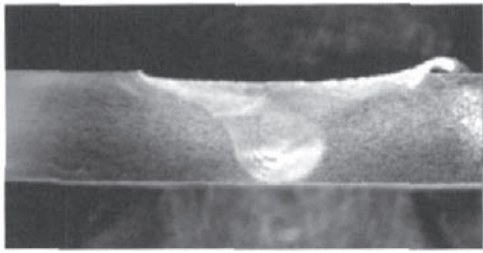


图1 6061-T6铝合金搅拌摩擦焊接头横截面宏观形貌

Fig.1 Cross-section macro-photograph of Al6061-T6 FSW joint

横截面宏观形貌,对焊缝进行X光检测未发现缺陷。

图2分别为焊缝接头不同部位金相组织照片。图2(a)为母材原始组织,为典型的轧制形态,晶粒尺寸较大,且大小不均匀,形状不规则。图2(b)为焊核区,与母材相比,焊核区的组织发生了显著变化,晶粒形状变成等轴状,晶粒得到显著细化。图2(c)是紧邻焊核区的热机影响区的组织。可以看出,热机影响区晶粒发生明显的塑性变形。热机械影响区靠近搅拌头边缘外侧,该区搅拌头的搅拌作用不充分,不能使呈轧制状的母材组织完全破碎,而是在搅拌头旋转力和进给力的双重作用下发生热剪切,相对于母材发生较大的晶粒变形。但是该区域温度较焊核区低,没有达到再结晶温度,所以不能发生类似焊核区的再结晶过程,高度塑性变形的晶粒形态被保留下来。图2(d)是热影响区组织。热影响区未受到搅拌头的机械搅拌作用,其晶粒形态未发生改变。

6061-T6铝合金搅拌摩擦焊接头抗拉强度会受到时效的影响。6061-T6铝合金接头的抗拉强度为215MPa,仅为母材的67%。随着时间的延长,接头抗拉

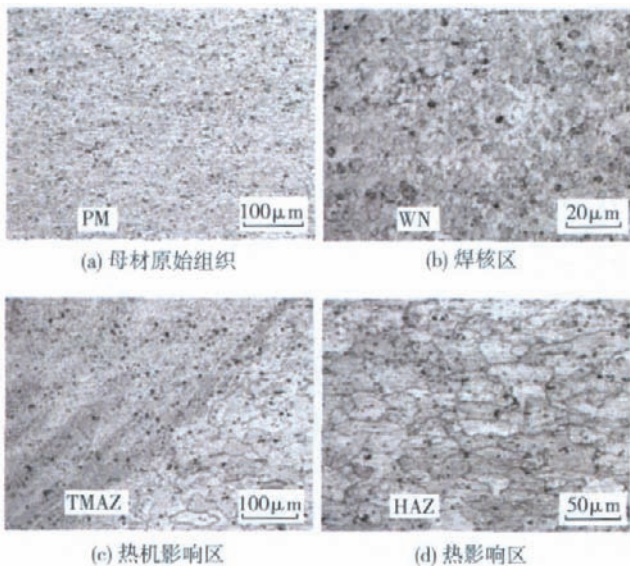


图2 6061-T6铝合金搅拌摩擦焊接头不同位置金相图

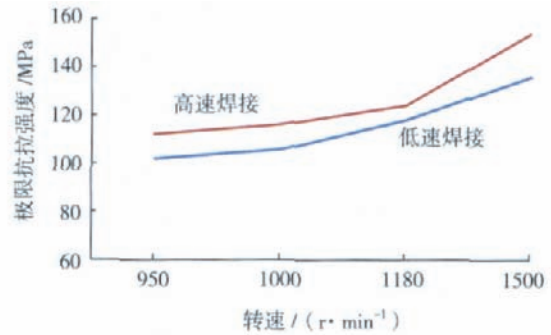
Fig.2 Metallurgical photographs of different locations of Al6061-T6 FSW joint

强度逐渐提高,自然时效第15天后提高到224MPa,达到母材的70%。自然时效第30天后,接头抗拉强度提高到230MPa,达到母材的72%。随着自然时效时间的延长,抗拉强度不断增长,但是增长速度逐渐减缓。30天时已基本达到稳定状态。而人工时效可使接头抗拉强度提高到270MPa,达到了母材强度的84%。

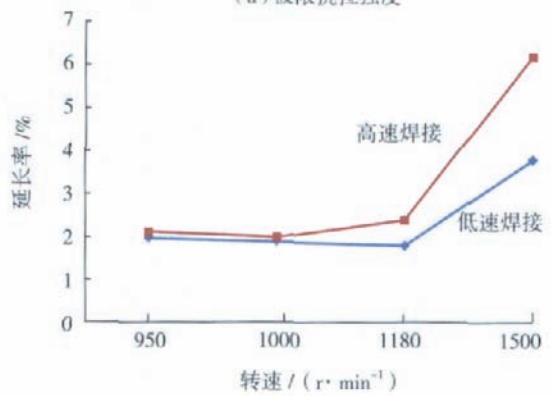
1.2 6063-T5 铝合金

6063-T5铝合金属于可热处理强化铝合金,主要强化相是 Mg_2Si 和 $AlSiFe$ 。退火状态下,6063铝合金挤压型材的抗拉强度为100~120MPa;淬火及自然时效处理后,可提高到180~200MPa。

板材厚度为8mm,采用平板对接。焊接选用带螺纹的搅拌头,搅拌针长度为7.6mm,轴肩直径为24mm。焊前将焊接接头部分进行表面去除氧化皮和油污清洗处理。图3所示为不同焊接参数下搅拌摩擦焊接头的性能。从性能测试结果显示6063-T5搅拌摩擦焊接头强度系数可以达到母材的90%以上。



(a) 极限抗拉强度



(b) 延长率

图3 不同焊接参数下6063-T5铝合金搅拌摩擦焊接头力学性能

Fig.3 Mechanical property of Al6063-T5 FSW joint with various parameters

1.3 6N01-T5 铝合金

6N01-T5铝合金为日系挤压型材常用的铝合金,相当于国内6061铝合金。这种铝合金在列车及轨道交通制造领域较常用。6N01-T5铝合金搅拌摩擦焊接头与MIG熔化焊接头的拉伸强度对比如图4所示,疲劳性

能对比如图 5 所示。

从图 4 和图 5 可以看出,搅拌摩擦焊的常规力学性能比熔化焊提高 10%~20%,疲劳性能可以提高 30% 以上,甚至可以接近母材性能。6N01-T5 铝合金搅拌摩擦焊接头拉伸强度和疲劳性能皆优于熔化焊接头。综合力学性能数据说明利用搅拌摩擦焊代替 MIG 熔化焊进行轨道车辆结构零件的制造,不存在技术问题。

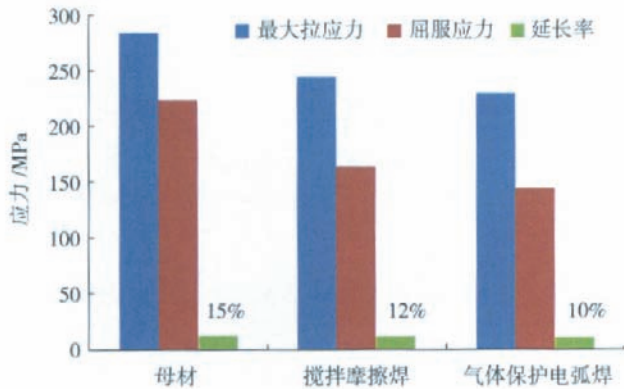


图4 6N01-T5铝合金搅拌摩擦焊接头力学性能对比

Fig.4 Comparison on mechanical property of Al6N01-T5 FSW joint

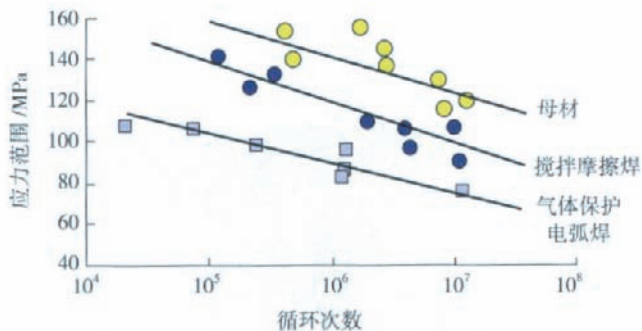


图5 6N01-T5铝合金搅拌摩擦焊接头疲劳性能对比

Fig.5 Comparison on fatigue property of Al6N01-T5 FSW joint

1.4 7N01-T4/T5 铝合金

7N01 铝合金为具有中等强度的 Al-Zn-Mg 系合金,经过 T4/T5 处理(自然时效强化)后可以增加材料强度。凭借良好成形性能和焊接性,7N01 铝合金被广泛用于轨道列车领域。材料厚度为 15mm,焊接参数为转速 500r/min,焊速 200mm/min。图 6 为 7N01-T5 和 7N01-T4 不同热处理状态铝合金搅拌摩擦焊接头焊缝金相组织图。

针对 T4 状态,7N01 铝合金搅拌摩擦焊接头拉伸性能 0.3 为 347MPa,绝对拉伸强度可以达到 391MPa,为母材强度的 92%。T5 状态的 7N01 铝合金搅拌摩擦焊接头 0.2 为 306MPa,绝对拉伸强度可以达到 439MPa,为母材强度的 82%。延伸

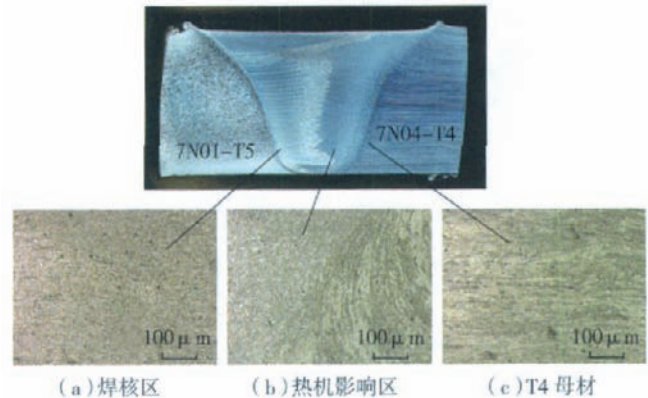


图6 7N01-T5/T4铝合金搅拌摩擦焊接头焊缝金相组织图

Fig.6 Metallurgical photographs of Al7N01-T5/T4 FSW joint

率可以达到母材的 30%~45%。针对搅拌摩擦焊接头不同部位进行夏比冲击韧性试验,试验结果表明搅拌摩擦焊接头各方向冲击韧性值均优于母材,是母材的 150%~250% 左右;但是搅拌摩擦焊接头冲击韧性值存在一定的方向性:平行焊缝方向是垂直焊缝方向韧性值的 110%~120% 左右。搅拌摩擦焊接头不同位置冲击韧性值存在差异:后退侧 > 焊缝中心 > 前进侧。后退侧是焊缝中心 120%,是前进侧的 150% 左右。

针对如图 7 所示的厚度 15mm 的 7N01-T5/T4 接头进行接头的硬度分布测试,测试位置分上、中、下 3 个位置。测试结果如图所示。以焊缝中心为界,焊缝两侧接头材料的硬度不同;后退侧的 7N01-T4 比前进侧 7N01-T5 硬度高 10% 左右;焊缝区硬度分布均匀,硬度值基本与相邻母材接近;但是在前进侧焊缝上中下区域硬度基本相同,在后退侧,焊缝上下区域硬度略高于中间区域硬度。

2 列车型材结构搅拌摩擦焊接头设计

现代高速列车的车体已经形成以铝合金中空型材结构和搅拌摩擦焊接相结合的设计和制造主线。传统

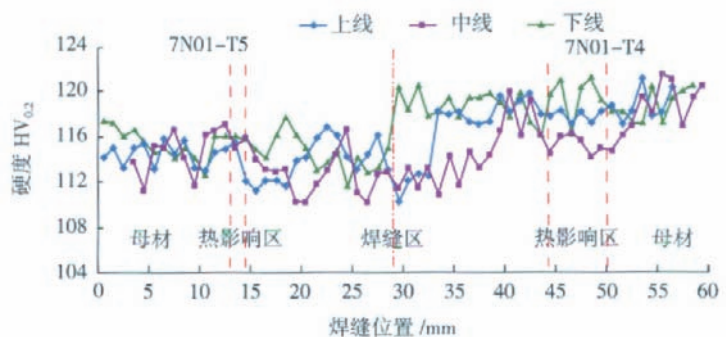


图7 7N01-T5/T4铝合金搅拌摩擦焊接头焊缝硬度分布

Fig.7 Hardness distribution of Al7N01-T5/T4 FSW joint

的列车车体铝合金型材结构的焊接为熔化极氩弧焊 (MIG) 为主,如图 8 (a) 所示,熔化焊接头设计要考虑材料熔化后焊缝的成型,所以接头下部会有成型垫板类结构设计,另外考虑到焊接深度有限,所以接头必须设计一定的坡口,便于熔化添丝焊接。但是搅拌摩擦焊过程没有材料的熔化,并且焊缝的厚度由搅拌摩擦焊工具的长度决定,所以接头设计不需要开坡口,另外考虑到焊接过程较大的焊接锻压力,所以焊缝的底部必须设计有效的刚性支撑,如图 8 (b) 所示。

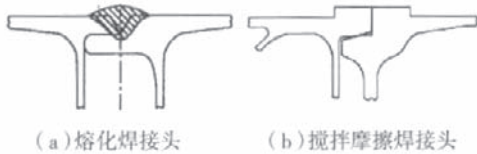


图8 列车结构搅拌摩擦焊接头与熔化焊接头设计对比
Fig.8 Joint design comparison between FSW and MIG of train structure

图 9 所示为目前高速列车车体常用的铝合金中空型材双面熔化焊结构和搅拌摩擦焊的结构对比。一个显著的特点是,搅拌摩擦焊接头的中间部位必须有刚性支撑结构设计,另外要适合于结构的补强和焊接工艺性,可以设计成 D 型和 V 型对接接头。如图 9 (b)、(c) 所示。

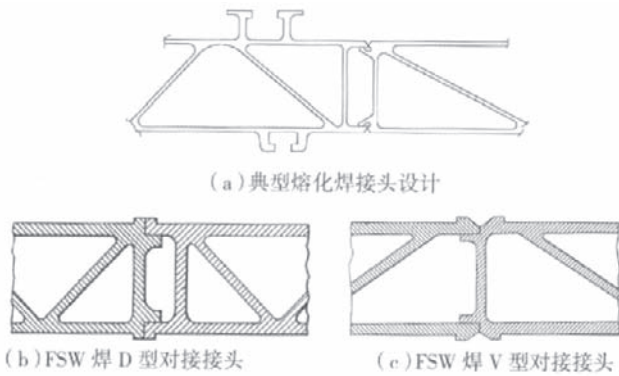


图9 列车结构搅拌摩擦焊接头和熔化焊接头设计
Fig.9 Different designs of FSW and MIG joint of train structure

针对搅拌摩擦焊特点,一般情况下列车中空型材壁板搅拌摩擦焊需要双面焊接完成。首先要完成零件单面的焊接,清理焊缝,然后翻转整个壁板零件,再进行另一面的焊接。但因大型壁板零件的翻转可能引起结构变形和生产效率的降低,所以,利用中间盖板设计,可以在增加一条焊缝的条件下,不需要零件翻转就可以实现中空型材壁板零件的搅拌摩擦焊,如图 10 所示。

3 搅拌摩擦焊设备

适合于列车结构产品的搅拌摩擦焊设备较多,大多

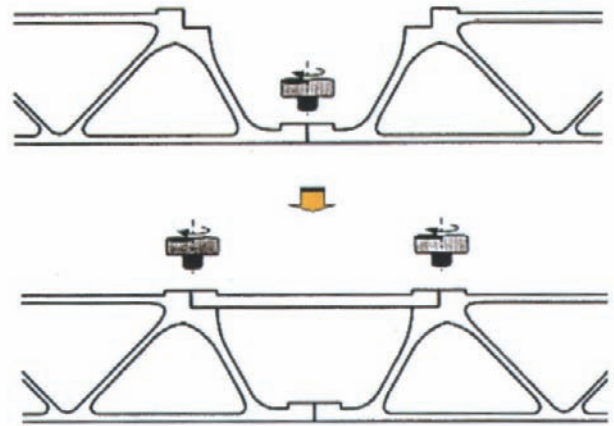


图10 列车中空型材结构单面多道搅拌摩擦焊
Fig.10 Single side multi-weld FSW of hollow extrusion train structure

数设备的功能是依靠结构的尺寸和形状来决定的。下面主要介绍 2 种常用的列车结构产品的搅拌摩擦焊设备,静龙门式搅拌摩擦焊设备和动龙门式搅拌摩擦焊设备。

3.1 静龙门式搅拌摩擦焊设备

静龙门式搅拌摩擦焊设备(如图 11 所示)主要应用于列车短小零部件的焊接,例如:驱动箱体、窗体框架、端盖和侧墙等小尺寸产品,零件的有效焊接长度不大于 3m,宽度一般不超过 2.5m。



图11 中国首台列车铝合金型材结构产品搅拌摩擦焊设备
Fig.11 Friction stir welding equipment for first train extrusion production in China

3.2 动龙门式搅拌摩擦焊设备

动龙门式搅拌摩擦焊设备(见图 12),主体结构包括:基座床身、工作台、动立柱、横梁、主轴头等部件。作为龙门式搅拌摩擦焊设备的一种,区别于其他龙门式焊接设备的主要特征在于:焊接立柱和龙门机头等部件装配成为一体,沿着床身两侧的导轨运动,该类型搅拌摩 (下转第 92 页)

CATIA 三维造型系统中装配模型的文件格式为 .CATProduct, 零件模型的文件格式为 .CATPart。为了能够在装配型架的装配模型中对每个定位件建立 OTP, 操作之前需要首先确定该定位件, 然后才能进行设置。本课题采用 Microsoft Visual Basic 语言建立了 OTP 设置界面。该系统还提供了定位件 OTP 的空间三维坐标点的输出功能。

调试完成后, 将程序生成 .exe 可执行文件, 通过 CATIA.SystemService.ExecuteBackgroundProcessus 可以添加一个宏按钮到 CATIA 系统, 方便以后在 CATIA 界面上直接调用。定位件 OTP 数字化设计系统的操作过程如图 3 所示。OTP 创建结果如图 4 所示。

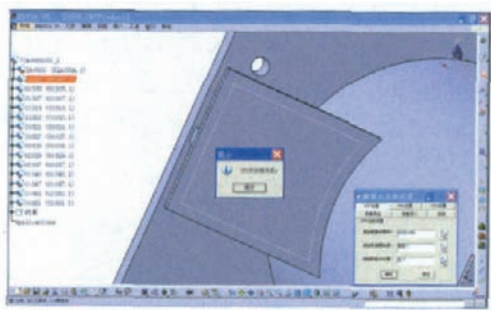


图4 OTP创建图
Fig.4 Creating of OTP

需要说明的是, 由于采用了“离散化”方法, 本系统计算得到的 OTP 一般与理论位置存在极小的误差。虽然这种误差可以通过增加等分点数来减小, 但这样会增加计算时间, 而且当等分点数目超过一定数值时, 计算精度的提高已经没有太大的意义。对于一般尺寸大小的定位元件, 等分点的数目可以取定为 200~600 之间。

3 结束语

数字化装配技术采用数字量传递装配信息, 进行飞机装配工装制造协调。这不仅提高了飞机装配精度, 也对装配工装设计提出了更高的要求。以前的定位件 OTP 设置方法只是工装设计人员根据直觉经验, 在 CAD 模型上直接建立点的位置。从根本上说, 这只是实现了“无纸化设计”, 远没有达到“智能化设计”的要求。

如何在装配型架的预装配模型中, 自动地对每个定位件设置合理的 OTP 空间位置三维坐标, 已经成为飞机装配工装设计中迫切需要解决的难题。本课题提出的“偏置定位件轮廓——离散化偏置轮廓——遍历计算比较”的方法, 综合利用了 CATIA 造型功能和 VB 程序的计算功能, 实现了定位件 OTP 数字化设计系统的建立, 为解决工程实践中 OTP 的自动设置问题, 提供了一种思路和方法。

参考文献

- [1] 王巍, 黄宇, 庄建平. 激光跟踪仪在飞机装配工装制造中的应用. 航空制造技术, 2004(12):81-84.
- [2] 韩维, 冯美蓉, 宋群. 装配工装全数字化设计制造技术在 ARJ21 机头装配中的应用. 航空制造技术, 2007(12):54-56.
- [3] 胡挺, 吴立军. CATIA 二次开发技术基础. 北京: 电子工业出版社, 2006.
- [4] Dassault Systemes. V5 Automation, 2001.

(责编 泰山)

(上接第 86 页)

擦焊设备主要用于有效焊接长度尺寸大于 6000mm 的零件的纵缝焊接。

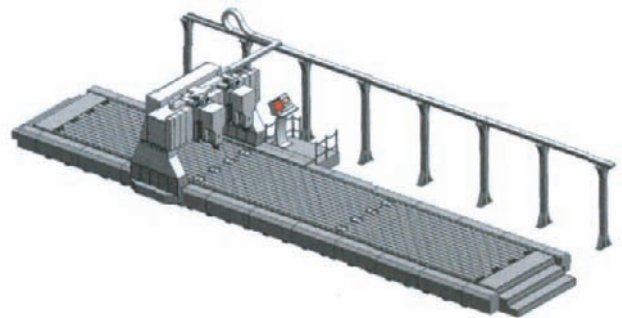


图12 焊接长度为80m的大型数控双机头动龙门式搅拌摩擦焊设备

Fig.12 80m long double head moving gantry friction stir welding machine

动龙门式搅拌摩擦焊设备一般用于飞机、舰船和列车车体的大型壁板类零件的焊接, 但是如果零件的宽度尺寸较大, 就要求动龙门的立柱间的龙门跨距增大, 当中间宽度大于 2500mm 时, 焊接设备的龙门两侧需要采用两电机同步驱动, 才能保证焊接过程运动平稳和顺利进行。

4 结束语

搅拌摩擦焊技术在中国已经发展近 10 年时间, 从原理、核心工艺技术、焊接工具和设备技术等已经得到突破和掌握, 并且正在进入工程化后期和工业化阶段。目前通过中国搅拌摩擦焊中心的对该技术推广, 已经在国内航天导弹和运载火箭、航空新一代战斗机和运输机、新型导弹快艇和舰船、电子散热器和热沉器等行业产品中得到成功应用。相对于其他行业, 高速列车的发展会对搅拌摩擦焊技术在中国轨道车辆行业起到需求牵引和推动作用, 同时, 搅拌摩擦焊技术的应用也会提升中国高速列车的性能和质量。

(责编 侧卫)