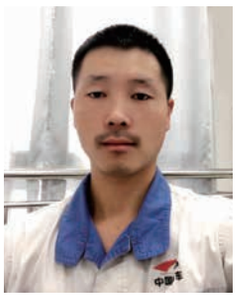


铝合金车体侧墙搅拌摩擦焊工业化生产应用研究

付宁宁　戴忠晨

【摘要】主要针对铝合金车体侧墙大部件搅拌摩擦焊工业化生产开展研究，通过柔性化工装设计，可满足不同车型整体大侧墙搅拌摩擦焊焊接，同时通过工艺优化，使得焊接速度达到2 000mm/min，焊缝接头强度达到母材的88%，侧墙整体轮廓度≤1mm，极大地提高了生产效率，降低了焊接缺陷，并提高了车体的整体美观度。

关键词：车体侧墙；搅拌摩擦焊；焊接参数

搅拌摩擦焊技术（FSW）是1991年由英国焊接研究所（TWI）发明的一种新型固相连接技术，与传统熔化焊相比，搅拌摩擦焊接头部位不存在金属熔化，可以有效避免熔焊过程中形成的气孔、裂纹等焊接缺陷；同时因FSW具有自动化、智能化优势，故在轨道交通铝合金车体制造中得到了越来越广泛的应用。本文主要针对铝合金车体侧墙大部件搅拌摩擦焊工业化生产开展研究，通过工艺优化，使得侧墙搅拌摩擦焊满足工业化生产需求。

1. 侧墙结构及工装介绍

侧墙为铝合金B型鼓形侧墙结构（见图1），主要由侧墙边梁和侧墙小单元组成鼓形整体式侧墙结构，其中侧墙小单元由4块侧墙板组成。接头形式采用对搭接结构，焊缝设计熔深要求4mm。

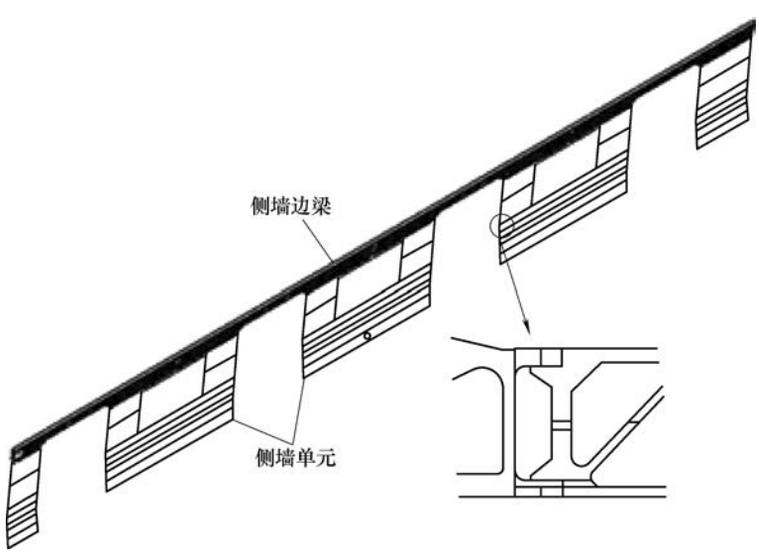


图1　侧墙结构

侧墙搅拌摩擦焊工装采用柔性化设计，可同时满足铝合金A、B型鼓形及T形侧墙结构（见图2），侧推及压紧均采用自动化液压装置，极大地节省了型材装配时间。工装包含4条焊缝支撑纵梁，分别对应侧墙4条焊缝，其中1、4焊缝支撑纵梁下部设有液压装置，可自动切换工装正反装，既节约了制造成本又可快速进行工装切换，工装自动化程度较高。

2. 搅拌头及焊接参数选取

侧墙搅拌摩擦焊采用水冷搅拌头，搅拌针长4.8mm，轴肩直径20mm，如图3所示。为了保证焊缝质量，分别选取不同的焊接参数进行试验，其结果如附表所示。

由附表可以看出，随着焊接速度和旋转速度的提高，焊缝抗拉强度先增大后减小，当焊接

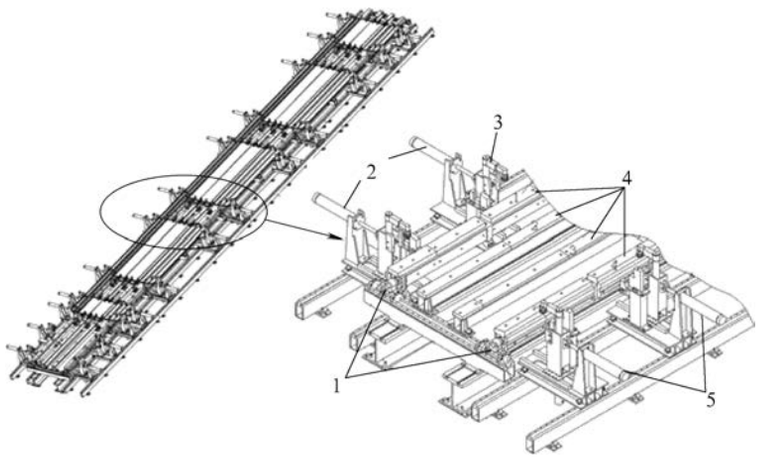


图2　侧墙搅拌摩擦焊柔性化工装

1.工装切换液压装置 2、5.侧推液压装置 3.压紧装置 4.焊缝支撑纵梁

图3　水冷搅拌头

不同焊接参数下焊缝的抗拉强度

序号	焊接速度/mm·min^{-1}	旋转速度/r·min^{-1}	焊接压力/kN	抗拉强度/MPa
1	1 500	1 700	17	205
2	1 800	1 800	18	226
3	2 000	1 800	18	256
4	2 500	2 000	20	190

速度为2 000mm/min，旋转速度为1 800r/min时，焊缝抗拉强度为最高值256MPa，达到母材的88%。

选取不同焊接参数下的焊缝接头，用砂纸打磨后放在氢氧化钠溶液中进行腐蚀，其截面形貌如图4所示。

由图4可以看出，1#、2#、3#试样焊缝内部成形良好，没有隧道形缺陷，而4#试样则在内部产生了隧道形缺陷。这是由于在焊接过程中，转速过低或焊速过高时热量不足，导致材料的流动性不足，在焊缝中形成隧道缺陷。

通过试验对比，最终确定焊接参数为：焊接速度2 000mm，旋转速度1 800r/min，焊接压力18kN。

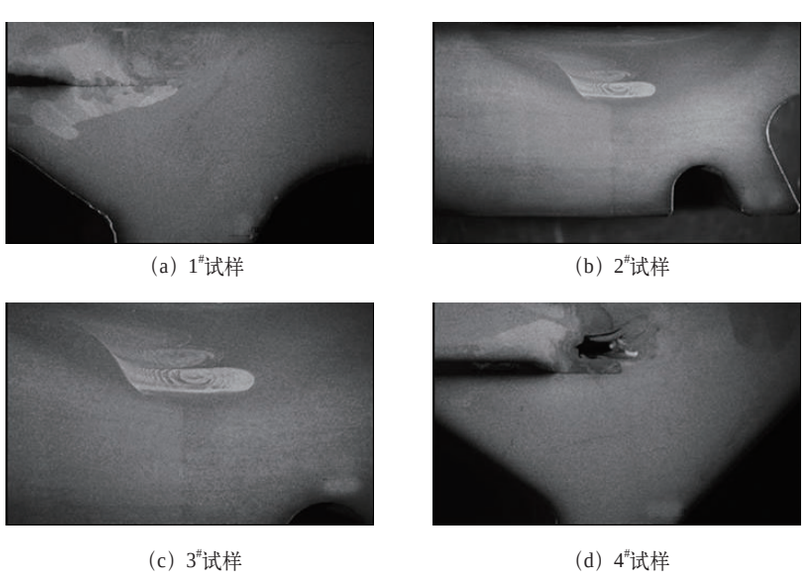
3. 整体大侧墙搅拌摩擦焊焊接

焊接参数选定后，将侧墙工装调至正装状态，利用天车将侧墙边梁及侧墙板吊运至工装上，并打开侧推及压紧装置，对侧墙型材进行刚性固定。设定好参数后，对侧墙正装进行搅拌摩擦焊焊接，正装焊接完成后，通过液压装置快速将工装切换为反装，并进行反装的焊接，如图5所示。

焊后对焊缝进行PT探伤及超声相控阵检测，均未发现隧道形等焊接缺陷，满足ISO25239标准及工艺要求。松开侧推及压紧装置，自由状态下用样板测量侧墙轮廓度，测量结果均≤1mm，大大提高了侧墙的整体美观度（见图6）。

4. 结语

（1）侧墙搅拌摩擦焊工装



（a）1#试样　（b）2#试样　（c）3#试样　（d）4#试样

图4　不同焊接参数下的焊缝接头截面形貌

(下转第22页)

性。当硅锰含量较低时，得到粗大的先共析铁素体；硅锰含量较高时得到侧板条铁素体，二者均使韧性降低。

在高强钢焊接中，单纯采用Mn和Si来提高强度，势必导致焊缝韧性降低，尤其是Si含量较高时，Si将增加先共析铁素体的含量，使焊缝韧性下降。在埋弧焊中，由于热输入较大，焊缝金属冷却速度较慢，难以避免产生粗大的先共析铁素体和侧板条铁素体，因此必需通过合金化的方式，在提高强度的同时，保证焊缝韧性。本试验采用的是C-Mn-Ni-Cr-Mo多元合金系统，随着合金总量的提高，淬硬性增强，奥氏体向铁素体的转变被推迟，焊缝组织为中温转变组织，细小粒状贝氏体和少量的先共析铁素体。这种低碳粒状贝氏体组织之所以具有高的低温冲击韧性是由其显微组织决定的，在粒状贝氏体形成过程中，从过冷奥氏体析出的铁素体最初是板条状，而且板条状铁素体具有较高的位错密度，因此与铁素体珠光体钢相比，粒状贝氏体钢有更细的铁素体板条和更高的位错密度，是细晶强化和位错强化这两种强化方式综合作用的结果。细小的铁素体板条具有更小的有效晶粒尺寸，能有效地阻止裂纹扩展。在增加钢强度的同时并未明显地降低钢的韧性和塑性。

（2）焊剂组成对熔敷金属扩散氢的影响　该5Y690级焊材研制选用氟碱型渣系，焊剂碱度控制在BIIW3.0。对于高强钢来讲，焊缝中的扩散氢含量、含氧量是决定焊缝低温韧性的关键。为了保证高强钢的低温韧性，焊剂必须选择高碱度渣系，以保证焊丝的合金过渡、焊缝的含氧量等。一般高碱度焊剂的扩散氢含量比较高，这主要是由于焊接电弧区域内含氧量低，而氢的活度比较大，从而使焊缝的扩散氢含量较高。以前解决高碱度焊材扩散氢含量高的问题，主要是通过减少原材料的结晶水含量及提高烘干温度，保证焊接材料的含水量在较低的水平。但只从这方面入手，很难解决目前超高强度钢对焊缝扩散氢含量的要求。为此，通过加入一种特殊的材料，保证高碱度焊剂的扩散氢含量在H5以下，从而保证了高强钢焊缝的低温韧性。

3. 结语

（1）通过合理的合金系统设计具有理想的焊缝组织，在满足高强度的同时得到了很好的低温韧性。

（2）提高焊剂的碱度，使焊缝更加纯净，且具有较高的韧性。

（3）通过对焊剂成分研究，有效地控制了高碱度焊剂的扩散氢含量，使之达到低氢的要求，并且获得了较好韧性。

（4）焊丝焊剂组合为BHM—4M+XUN—123焊材能够满足海工高强钢焊接要求，符合5Y690级别各项技术参数，在屈服强度690MPa钢板焊接中得到了很好地应用，产品满足船规5Y690的要求。

作者简介：李开添等，昆山中冶宝钢焊接材料有限公司。

MW 20160726

（上接第19页）

（a）正装焊接

（b）反装焊接

图5　整体大侧墙搅拌摩擦焊焊接

采用柔性化设计，可同时满足铝合金A、B型鼓形及T形侧墙结构，侧推、压紧及工装切换装置均采用自动化液压装置，工装自动化程度高。

（2）侧墙搅拌摩擦焊工艺优化，当焊接速度为2 000mm，旋转速度为1 800r/min，焊接压力为18kN时，可以得到满足ISO25239及工艺要求的焊接接头，焊缝抗拉强度为256MPa，达到母材的88%，满足工业化生产需求。

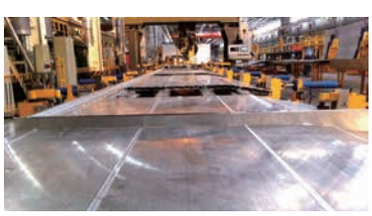


图6　侧墙轮廓度测量

（3）采用整体大侧墙搅拌摩擦焊焊接工艺，侧墙整体轮廓度≤1mm，大大提高了侧墙整体美观度。

作者简介：付宁宁等，中车南京浦镇车辆有限公司。

MW 20160723