CRH6型车铝合金车体双脉冲MIG焊接工艺研究

■ 丁志成，褚玉佳，张向均，陈刚辉，谭旺有

摘要：焊缝的工艺缺陷、焊缝外形不合理是造成接头应力集中主要原因，其中工艺不合理是主要原因之一。通过研究无脉冲、双脉冲焊接工艺对A5083P—O铝合金焊接接头疲劳性能的影响，结果表明，采用双脉冲焊接工艺制备的接头，其疲劳性能在同等条件下高于无脉冲工艺制备的接头，采用双脉冲焊接工艺制备的接头焊缝区域晶粒更加细小、Mg2Si相数量较少，熔合区附近的柱状晶晶粒的方向性更加明显，但是不同的焊接工艺并没有改变接头的断裂机理。

关键词：应力集中；无脉冲、双脉冲；A5083P—O、焊接接头；疲劳性能

1. 概述

CRH6型车铝合金车体焊接结构的疲劳寿命与接头的应力集中有着直接的关系，铝合金焊接过程中极易产生气孔、裂纹、夹杂、未焊透和咬边等缺陷，这些缺陷会造成局部的应力集中，其中裂纹和未焊透产生的应力集中最为严重；接头焊缝余高尺寸对焊脚位置的应力集中也会产生相应的影响。

不同的MIG焊方法对接头成形及内部组织会产生不同的影响，这些因素都会直接或间接的影响焊接结构的疲劳寿命。因此本文通过无脉冲与双脉冲MIG焊的对比试验，研究接头的疲劳性能。

2. 试验材料及方法

（1）试验材料　A5083P—O铝合金板材，化学成分如表1所示。试板规格300mm×150mm×4mm，坡口为V形，单侧坡口角度为35°，1mm钝边。所用焊接设备为福尼斯TPS5000全数字化MIG焊机，焊接材料选用法国AIR LIQUIDE公司的ϕ1.2 mm ER5356焊丝，化学成分如表1所示。选用99.999%Ar做保护气体，气流量为25L/min，单面焊双面成形。焊接参数如表2所示。

（2）试验测试　焊接完成后，对焊接件进行无损检测、金相组织、力学性能等测试。

3. 力学性能试验结果

（1）无脉冲MIG焊接工艺接头力学性能　表3为拉伸试验结果及计算所得的各性能指标。从表3可以看出，无脉冲MIG焊接头试样的抗拉强度平均值为277MPa，断后伸长率均＜12%，平均为11.6%。在焊接接头的拉伸试验过程中，所有拉伸试样的断裂部位都在焊接接头的焊缝区，说明焊缝区是整个铝合金焊接接头最薄弱的部位。

表4为无脉冲MIG焊接工艺铝合金焊接头的弯曲性能试验结果，表中MW1表示面弯试样，BW1表示背弯试样。表4中有一个背弯试样因气孔缺陷导致开裂。

表5为无脉冲MIG焊接工艺

表1　A5083P—O铝合金材料和焊丝化学成分（质量分数）　（%）

牌号	Mg	Si	Cu	Zn	Mn	Ti	Cr	Fe	Al
A5083	4.0~4.9	≤0.4	≤0.1	≤0.25	0.4~1.0	≤0.15	0.05~0.25	≤0.40	余量
ER5356	4.5~5.5	<0.25	<0.30	<0.10	0.05~0.2	0.06~0.2	0.05~0.20	<0.40	余量

表2　A5083P—O铝合金焊接参数

脉冲模式	电弧电压/V	焊接电流/A	焊接速度/mm·min^{-1}	相对湿度(%)	保护气流量/L·min^{-1}
双脉冲	17~18	115~117	670	49	25
无脉冲	17~18	115~117	670	49	25

铝合金焊接头的疲劳性能试验结果，根据表5中数据结合公式计算得出平均疲劳强度值为84.5MPa，断裂位置全部为焊缝区域。

（2）双脉冲MIG焊接工艺接头力学性能　表6为双脉冲MIG焊接工艺铝合金焊接接头拉伸试验结果及计算所得的各性能指标。从表6可以看出，双脉冲MIG焊接头试样的抗拉强度平均值为280.6MPa，平均为11.6%。在焊接接头的拉伸试验过程中，所有拉伸试样的断裂部位都在焊接接头的焊缝区，焊缝区是整个焊接接头最薄弱的部位。

表7为双脉冲MIG焊接工艺铝合金焊接头的弯曲性能试验结果，表中MW2表示面弯试样，BW2表示背弯试样。从表7中可以发现A5083P—O铝合金MIG焊接头的弯曲性能非常良好，试验区域未出现开裂，也未发现气孔、夹渣、未熔合、未焊透及裂纹等影响焊接接头弯曲性能的缺陷。

表8为无脉冲MIG焊接工艺铝合金焊接头的疲劳性能试验结果，根据表8中数据结合公式计算得出平均疲劳强度值为88MPa，断裂位置全部在焊缝区域。

4. 结果分析

（1）微观组织　结合Al-Mg相图分析焊缝组成主要是α-Al固溶体和其上分布的β-Al_3Mg_2相和Mg_2Si相，Al_3Mg_2和Mg_2Si弥散相是前期熔池结晶凝固过程中固溶到Al基体中Mg和Si，在随后的冷却过程中在基体中析出形成，其中Al_3Mg_2数量相对较多、Mg_2Si数量相对较少。β-Al_3Mg_2是脆性化合物，会严重降低铝合金的力学性能和抗腐蚀性。通过

表3　无脉冲MIG焊接工艺铝合金焊接接头拉伸试验结果

试样编号	抗拉强度/MPa	抗拉强度平均值/MPa	断后伸长率（%）	断后伸长率平均值（%）	断裂部位
5P1-1	274	277	11.5	11.6	焊缝
5P1-2	272		11.9		焊缝
5P1-3	285		11.4		焊缝

表4　无脉冲MIG焊接工艺铝合金焊接接头弯曲试验结果

试样编号	弯曲形式	是否开裂	是否有缺陷	弯曲性能
MW1-1	面弯	未开裂	无缺陷	良好
MW1-2	面弯	未开裂	无缺陷	良好
MW1-3	面弯	未开裂	无缺陷	良好
BW1-1	背弯	未开裂	无缺陷	良好
BW1-2	背弯	未开裂	无缺陷	良好
BW1-3	背弯	开裂	气孔缺陷	差

表5　无脉冲MIG焊接工艺平滑试样升降法试验数据

试样编号	应力水平/MPa	循环次数	断裂部位
5P1-1	80	10000000	未断
5P1-2	84	10000000	未断
5P1-3	88	3633000	焊缝
5P1-4	84	10000000	未断
5P1-5	88	953000	焊缝
5P1-6	84	10000000	未断
5P1-7	88	10000000	焊缝
5P1-8	84	7687900	未断
5P1-9	88	342300	焊缝
5P1-10	84	10000000	焊缝
5P1-11	80	10000000	未断
5P1-12	84	6896760	焊缝
5P1-13	80	738647	未断
5P1-14	84	10000000	未断
5P1-15	88	681726	焊缝

表6　双脉冲MIG焊接工艺铝合金焊接接头拉伸试验结果

试样编号	抗拉强度/MPa	抗拉强度平均值/MPa	断后伸长率（%）	断后伸长率平均值（%）	断裂部位
5P2-1	285	280.6	11.3	11.6	焊缝
5P2-2	280		11.7		焊缝
5P2-3	277		11.8		焊缝

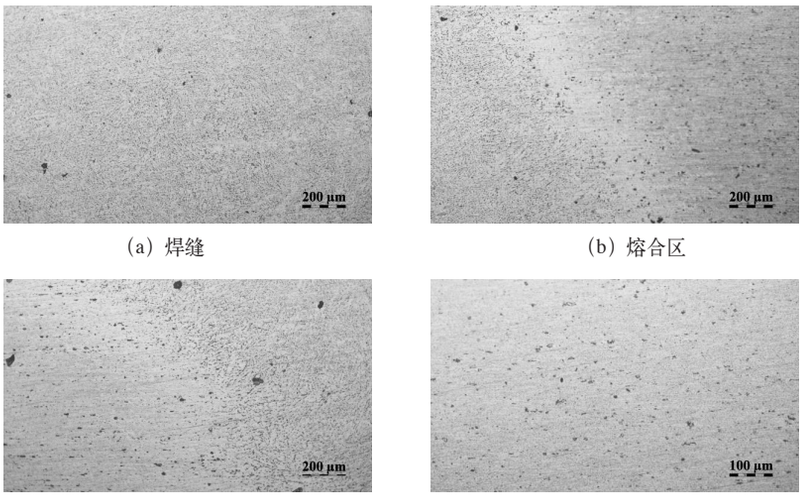
表7　双脉冲MIG焊接工艺铝合金焊接接头弯曲试验结果

试样编号	弯曲形式	是否开裂	是否有缺陷	弯曲性能
MW2-1	面弯	未开裂	无缺陷	良好
MW2-2	面弯	未开裂	无缺陷	良好
MW2-3	面弯	未开裂	无缺陷	良好
BW2-1	背弯	未开裂	无缺陷	良好
BW2-2	背弯	未开裂	无缺陷	良好
BW2-3	背弯	未开裂	无缺陷	良好

热处理使β相熔入基体，使铝合金呈过饱和状态，以获得固溶强化效果，塑性也得到显著增加。Mg_2Si相为黑色点状物，在焊缝冷却过程中呈小颗粒状弥散性分布在基体中。由于焊缝各部分冷却速度不一，靠近母材的焊缝两边为垂直于熔合线的细长晶粒，焊缝中部为等轴晶。

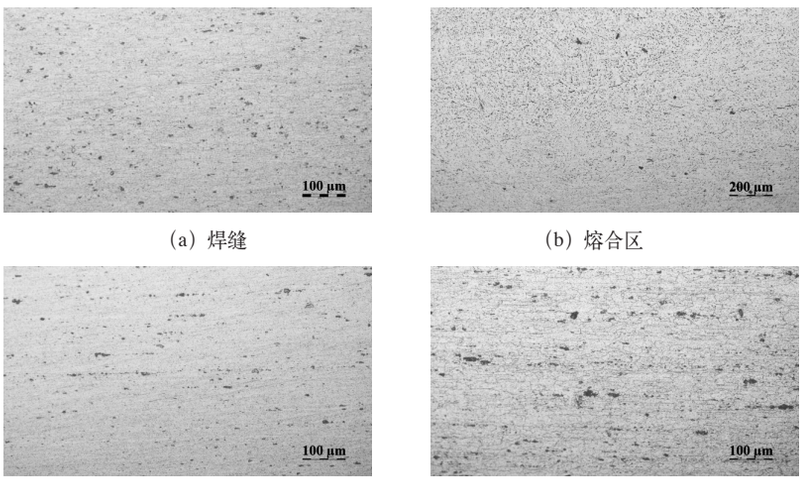
图1、图2为A5083P—O铝合金MIG焊接头的焊缝、熔合区、热影响区以及母材的金相组织。通过观察焊缝区域金相图可知，双脉冲焊缝晶粒比无脉冲晶粒细小，双脉冲焊缝Mg_2Si相数量也比无脉冲焊缝少，这种变化是由于双脉冲焊接时使用脉冲调制，周期性变化的脉冲群对熔池产生搅拌作用的结果。熔合区附近的晶粒为方向性明显的柱状晶组织，对接头性能有很大影响。属于焊缝的薄弱区域，拉伸断裂常发生于该区域。通过对比观察可知，双脉冲熔合区相比无脉冲熔合区晶粒细小，方向性比较明显。在无脉冲和双脉冲方法下热影响区组织无明显差别。焊缝组织的差别主要体现在晶粒尺寸上，双脉冲焊缝晶粒得到细化，这有助于改善接头的力学性能，降低裂纹敏感性。

（2）疲劳断口SEM形貌分析　图3为无脉冲MIG对接接头疲劳断口SEM形貌，断裂于焊缝区。其中图3a为较低倍的断口形貌，包括了疲劳源区和扩展区，图3b为疲劳源区的放大图。整体比较平齐，无冰糖状的结晶颗粒，以疲劳源区为中心存在大量的放射状射线，这是由于裂纹从萌生点开始，在扩展中相遇，裂纹前沿因阻力不同而发生扩展方



（a）焊缝　（b）熔合区　（c）热影响区　（d）母材

图1　双脉冲MIG焊接接头金相组织



（a）焊缝　（b）熔合区　（c）热影响区　（d）母材

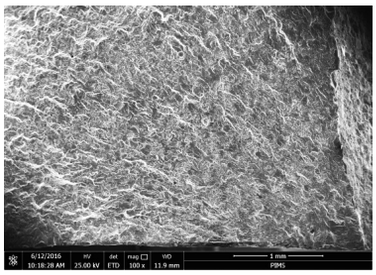
图2　无脉冲MIG焊接接头金相组织

表8　A5083P—O余高试样升降法试验数据

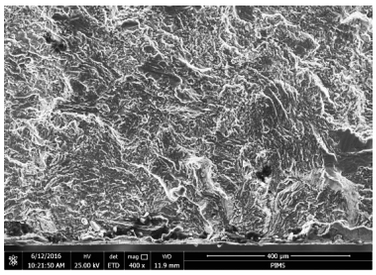
试样编号	应力水平/MPa	循环次数	断裂部位
5P2-1	80	10000000	未断
5P2-2	84	10000000	未断
5P2-3	88	10000000	未断
5P2-4	92	1234234	焊缝
5P2-5	88	10000000	未断
5P2-6	92	6085536	焊缝
5P2-7	88	10000000	未断
5P2-8	92	596773	焊缝
5P2-9	88	10000000	未断
5P2-10	92	1335342	焊缝
5P2-11	88	329836	焊缝
5P2-12	84	10000000	未断
5P2-13	88	10000000	未断
5P2-14	92	336157	焊缝
5P2-15	88	4040550	焊缝

向上的偏离，此后裂纹开始在各自平面上继续扩展，从而形成大量放射线。疲劳源区位于试样近表面，疲劳源并不明显。图3c为疲劳扩展区域的SEM形貌，可以发现存在不同族簇的疲劳辉纹。这些族簇辉纹的法线不平行，取向比较复杂，也就是在局部区域疲劳裂纹的扩展方向不同。这是由于在疲劳裂纹扩展的过程当中，晶粒取向的变化会导致疲劳辉纹法线方向发生一定的变化，甚至会引起疲劳辉纹形貌的改变。图3d为断口的拉断瞬断区，可以很明显发现为韧窝断口，则瞬断区域主要为韧性断裂。

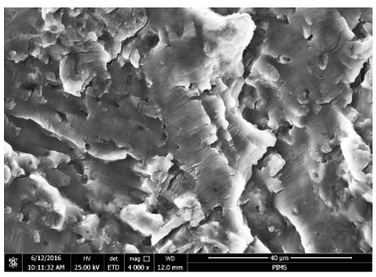
图4为双脉冲MIG对接接头疲劳断口SEM形貌，断裂于熔合线。图4a为试样较低倍断口形貌，包括了疲劳源区和扩展区，图4b为疲劳源区的放大，未见明显特征的疲劳源，但可以发现明显的冰糖状的结晶颗粒组织，晶粒尺寸较大，为典型的脆性断裂。这是由于焊接接头熔合区是由基体金属和焊丝形成的一种交混合金，靠近焊缝一侧为沿散热方向以联生结晶形式形成的柱状晶组织，而靠近基体一侧则为等轴晶组织，且晶粒较为粗大，同时由于偏析等原因，晶界处有强化相析出，削弱了两种组织的结合能力，从而成为较为薄弱的区域。图4c和图4d为扩展区的疲劳辉纹，不同族簇的辉纹法线方向不一样，说明在局部区域疲劳裂纹的扩展方向不同。图4e和图4f为拉断瞬断区的断口形貌，为典型的韧窝断口，但局部区域放大后（见图4f）发现断口韧窝尺寸大小不一，有大至几十微米的也有小至几个微米的，说明局部区域的韧性不一样。



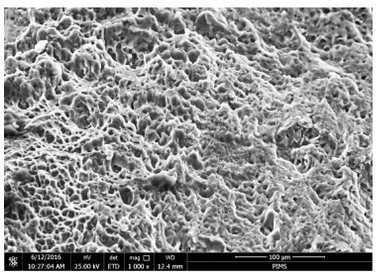
（a）疲劳源区



（b）疲劳源区放大

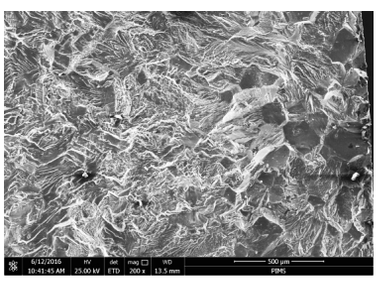


（c）扩展区（疲劳辉纹）

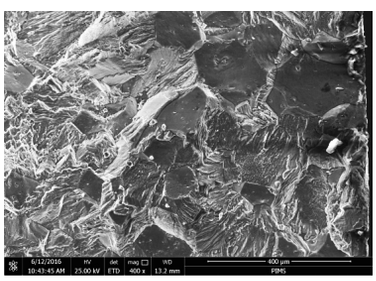


（d）瞬断区

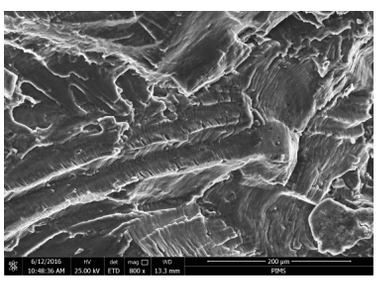
图3 无脉冲MIG对接接头疲劳断口SEM形貌



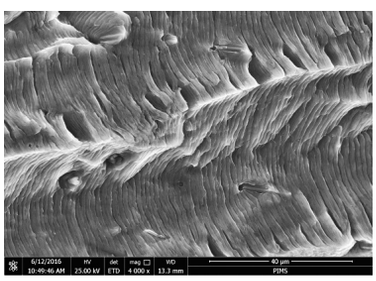
（a）疲劳源区



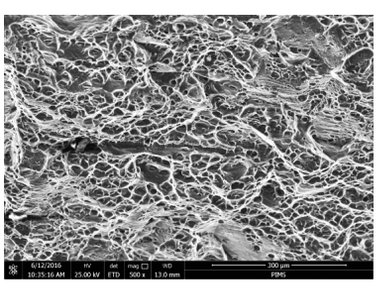
（b）疲劳源区



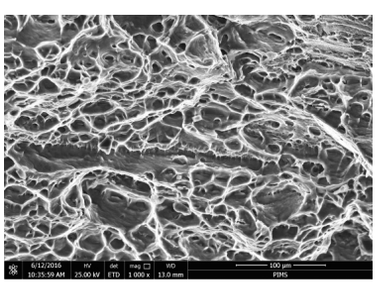
（c）扩展区（疲劳辉纹）



（d）扩展区（疲劳辉纹）



（e）瞬断区



（f）瞬断区

图4 双脉冲MIG对接接头疲劳断口SEM形貌

火焰切割的加强铁压弯后变形的原因分析及处理措施

■ 张海燕，朱家富

摘要：我公司采取火焰切割下料的U形加强铁在利用折弯设备压弯后出现了拱状的变形，无法直接应用于产品上。主要针对此U形加强铁的变形原因进行了分析，并就此种情况明确了处理的措施。

关键词：火焰切割；拱状变形；热应力

我公司生产的电力变压器油箱产品，为了保证其具有一定的使用强度，需要在油箱箱壁上焊接一定数量的加强铁。加强铁以U形居多，厚度8~25mm不等。图1为变压器油箱外形，箱壁外侧焊接有U形加强铁。

U形加强铁有剪板机剪切和数控火焰切割机切割两种下料方式，在加强铁的加工过程中发现采用数控火焰切割机下料的加强铁在折弯设备上压弯后出现了不同程度的拱状变形，而剪板机剪切下料的钢板未发现这种情况，造成火焰切割下料的加强铁无法直接在油箱箱壁上进行点装、焊接。下面就U形加强铁的变形情况、产生原因及如何处理进行详尽的介绍。



图1 焊有U形加强铁的变压器油箱

5. 结语

本试验分别采用无脉冲的铝合金焊接工艺和双脉冲铝合金焊接工艺，制备了A5083P—O铝合金对接接头，采用力学性能试验和金相组织研究不同焊接工艺对力学性能的影响，得出如下结论。

（1）根据试验数据可知采用双脉冲工艺拉伸力学性能相对于无脉冲工艺有轻微的提升，断后伸长率无明显变化；无脉冲试样弯曲试验中有一个试样因内部气孔缺陷而发生断裂，双脉冲工艺弯曲试样全部合格，说明脉冲对熔池的搅拌加快了气体的逸出，减小了焊缝内部气孔出现的概率。

（2）采用双脉冲焊接工艺制备的焊接接头，在同等条件下的平均疲劳强度值高于无脉冲焊接工艺制备的铝合金焊接接头。

（3）采用双脉冲工艺的接头焊缝区域晶粒更加细小、Mg_2Si相数量较少，熔合区附近的晶粒为方向性明显的柱状晶。这有助于改善接头的力学性能，降低裂纹敏感性。

（4）双脉冲与无脉冲工艺制备的对接接头疲劳断口形貌无明显区别，说明双脉冲工艺并未改变接头的断裂机理。

根据以上结论，可知采用双脉冲工艺进行CRH6型车铝合金车体的焊接可改善接头力学性能，提高车体疲劳寿命。

参考文献：

[1] 李学朝．铝合金材料组织及金相图谱[M]．北京：冶金工业出版社，2010.

作者简介：丁志成、褚玉佳、张向均、陈刚辉、谭旺有，中车广东轨道交通车辆有限公司。

MW 20171204