

铝/钢异种材料火焰钎焊接头力学性能和显微组织研究

陈建斌　彭迟　程东海　陈益平　胡德安　向盼

【摘要】本文采用Zn—Al钎料和Al—Si—Cu钎料对LF6铝合金和Q235钢进行了火焰钎焊，通过改变工件离焰心的距离获得不同参数下钎焊接头，并对接头进行测试。结果表明，采用锌基钎料和铝硅铜钎料都可以得到单面焊双面成形的高效钎焊接头，锌基钎料时接头抗拉强度可达133.6MPa。

1. 概述

在当今世界，汽车是温室气体的排放大户，车身及构件的轻量化结构设计是实现汽车行业节能减排的主要途径之一。但是，钢/铝异种金属的焊接作为汽车轻量化结构设计中的一项关键问题始终没有得到有效的解决。

由于铝与钢的物理性能相差很大，很难实现铝与钢的直接可靠焊接。目前铝/钢焊接的主要方法有摩擦焊、爆炸焊、扩散焊、钎焊、熔焊、电弧焊激光焊及磁脉冲焊等。这些焊接方法都存在一些局限性和不足。火焰钎焊与其他焊接方法相比，极少受操作上的限制，故一般适用于品种多且形状复杂的产品，通常应用于大批量的生产中。由于火焰钎焊的设备价格低廉，而且使用方便，可以保证获得较高的钎焊质量；可钎焊形状不规则的产品；钎焊接头平整光滑，外形美观；可随时观察到钎焊过程中的不良状态，及时控制，避免产生过多的不良品；钎料输送实现自动控制，保证了钎料填充的均匀

铁锈等杂物并打磨出坡口（一般选用V形坡口）。补焊时按原参数进行焊接。

（5）无损检测　大径管道（厚度>60mm）采取分层焊接分层探伤的方法，尤其是在管直径较小，不能进行双面焊的情况下，在封底焊结束焊到20mm左右时出现的焊接缺陷应在返修后及时进行射线检测，排除缺陷。下面的焊道可焊至一定厚度再分层拍片。采取分层焊接分层探伤适用于厚壁管道的焊接，这样大大地提高了焊缝的返修合格率。

（6）预热　对需要进行预热的焊口，一般中小径管采用氧乙炔焰；大径管采用远红外电脑控温仪进行预热。焊条电弧焊进行补焊时，即便是不需要进行焊前预热的焊口也应适当使用氧气火焰进行预热，因为补焊时只是焊缝的一部分，管子温度低易产生新的焊接缺陷。

（7）返修　应将补焊处打磨成与原焊缝的余高及宽度相一致，并圆滑过渡到母材，防止脱节。外观检查合格后，按规定要求进行无损探伤。

（8）焊后热处理　采用与原焊缝相同的焊接热处理工艺对补焊部位进行热处理，一般采用远红外电脑控温仪进行。焊后经外观检查合格后进行无损探伤。

5. 结语

经过采取上述返修措施，提高了电站锅炉焊口返修的合格率，避免了焊缝因多次挖补使焊接接头应力的加剧，焊缝组织粗大，产生热影响区冷裂纹、延迟裂纹，保证了电站锅炉整体的焊接质量。

作者简介：李莉等，宁夏电力建设工程公司。

MW 20150305

性和稳定性；钎焊温度的大小及钎焊时间均可自由设定等优点，从而研究铝钢的火焰钎焊对铝钢异种材料连接有较大的实际应用意义与高效生产。

2. 试验材料及方法

试验选用1mm厚的LF6铝合金以及1mm的Q235钢板材作为火焰钎焊的焊接材料，其各自的化学成分如表1、表2所示。并采用HL402铝硅铜钎料和HL505锌铝钎料为焊接钎料，其化学成分及部分性能分别如表3、表4所示。

采用气焊设备进行焊接试验，燃烧气体为乙炔，并采用还原焰。母材加工成100mm×20mm，采用对接接头。对焊接试样进行拉剪强度测试及金相组织分析。

3. 试验结果及分析

（1）锌基钎料力学性能及显微组织分析　第一，锌基钎料试样的力学性能分析。

由图1可知，在焊接范围内，工件距焰心4mm左右时所获得的接头强度最高，且在焊接范围内，未必焊接热量越大其强度越高。由图知在距焰心5mm下降至距焰心4mm时，试样对应的拉伸强度呈上升趋势，即在该焊接范围内，距焰心>4mm时，随着距焰心距离的减小，试样的拉伸强度增大，这主要是因为热量增大而使元素扩散充分；在距焰心4mm下降至距焰心3mm时，试样对应的拉伸强度呈下降趋势，即随着距焰心距离的增大，试样的拉伸强度越高，主要是由热量相对较大，使铝、铁元素在焊缝中相互扩散和反应，生成一系列金属间化合物而使力学性能的一部分下降。在距焰心为4mm时，所得试样的拉伸强度达到最大值，在该试验参数时试验的拉伸强度为133.6MPa。

对试样背面的热影响区的测量可得到距焰心5mm时热影响区长度为1.7cm；距焰心4mm时为2.1cm；距焰心3mm时为2.5cm。

综合上述的分析可以得出：在材料具有焊接性前提下，焊接热影响区的宽度随着热输入的增大而变大，但在一定范围内，随着热输入的增大，火焰钎焊试样的拉伸强度逐渐增加，但是当火焰温度达到某个临界值时，火焰钎焊试样拉伸强度也达到最大值并且随着温度的增加而下降。

第二，锌基钎料焊接试样接头的组织分析：图2为工件距焰心5mm时焊接所得接头截面的显微组织形貌。由图可见，火焰钎焊接头主要由铝母材、钢母材及钎焊缝组成。暗黑色部分为铝母材侧，浅色部分为钢母材侧，钢和铝之间的区域是填充钎料，钎焊缝又可分上下两部分（图中的左侧和中间两部分），可以从图中清楚的看出靠左侧的钎焊缝上部组织和中间的钎焊缝下部的组织明显不同，焊缝上部有大量的白色网格状物质均匀分布，而在焊缝下部主要为颜色介于铝和钢的浅灰色组织。在钎焊缝的上部由于距离母材较远，母材元素较难扩散至此，因此主要是由Zn和Al元素组成，其组织也和钎料较为接近。由Zn-Al相图可知其中

表1　LF6铝合金化学成分（质量分数）　（%）

	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti
LF6	0.40	0.40	0.10	0.5～0.8	5.8～6.8	0.20	0.02~0.10

表2　Q235钢板化学成分（质量分数）　（%）

	C	Si	Mn	P	S	Fe
Q235	0.11～0.22	≤0.30	0.30～0.65	≤0.050	≤0.045	余量

表3　HL402铝硅铜钎料的化学成分及性能

	化学成分（质量分数，%）				熔化温度/℃	钎焊温度/℃
	Al	Si	Cu	Sn		
Hl402	余量	9.3~10.7	3.3~4.7	<0.2	521~585	0.20

表4　HL505锌铝钎料的化学成分及性能

	化学成分（质量分数，%）		熔化温度/℃
	Zn	Al	
HL505	72.5	27.5	430~500

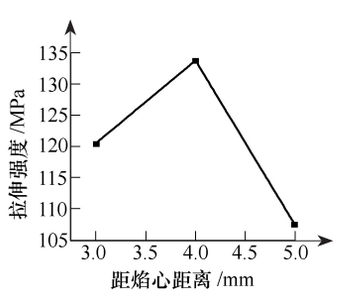


图1　距焰心长度与拉伸强度的关系

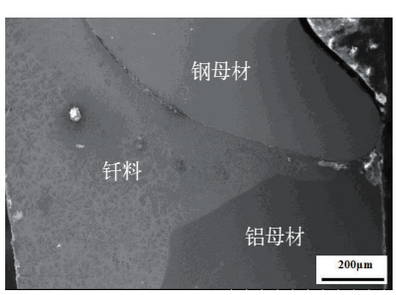


图2　距焰心5mm焊缝中心显微组织

的白色物质为富锌固溶体，灰黑色物质为富铝相物质。而在焊缝的下部由于钎料较少，且钎焊时元素扩散较为充分，使得在此区域其组织较为复杂，主要由Zn、Al和Fe元素组成，由于Fe和Al元素在加热条件下会反应生成一系列脆性的金属间化合物而导致接头强度的下降。

如图可知，在靠近钢侧的连接界面轮廓较铝侧的界面清晰，主要是由于钢的熔点高，钎焊时几乎不反应，而铝的熔点较低，且和钎料的成分较为接近，易于钎料互溶反应。在铝一侧为铝合金熔核边缘为胞状晶结构，是由于在熔核凝固前夕，液态熔核边缘前沿的许多晶粒处于半溶化状态，不同取向的晶粒之间彼此被液态的钎料润湿，同时钎料也向母材中润湿扩散。在接头开始凝固后，熔核液态边缘的温度开始降低，并最先处于过冷状态，处于半熔融状态的晶粒，由于表面能量低而作为异质晶核进行非均匀成核，晶核不断地长大为枝晶。由于熔核边缘半熔化的金属与熔核区的液态金属的化学成分相近、晶格类型相同，所以此过渡区的晶粒总是联生生长，并且保持着同一晶轴。

图3和图4分别为距焰心3mm和4mm的焊缝中心显微组织照片，由图可知，距焰心3mm和4mm焊缝中均存在网状或条状的白色物质，且距离焰心越近网状物质越少，而上图中的颜色较深的为富铝相固溶体，该物质出现几乎和富铝相固溶体相反。经初步推断该物质为富锌相固溶体，距焰心越近的接头其组织中该物质含量越少，主要是由于Zn的熔沸点很低但蒸汽压较高，从而温度越高锌的蒸发损耗越严重。由以上两图可见，焊缝区为树枝晶组织，结合Al-Zn二元合金相图和金属材料金相图谱可知，其组织构成为枝晶富铝固溶体(Al)和枝间分布的富锌固溶体(Zn)，并且在枝间析出了细小白色相。富铝固溶体呈深灰色，富铝固溶体中高含量的锌得益于锌在铝中的高固溶度，两种固溶体中都存在一定含量的氧，并且氧含量的增加会导致焊缝组织中出现少量的黑色富氧相。

第三，距离焰心4mm铝／钢锌基钎料焊接试样接头的能谱分析：图5为铝钢钎焊接头的扫描电镜化学成分线扫描图，表5为图中各点的点扫描结果。由图可知，从接头的铝侧经钎焊缝到钢侧，Fe元素从铝侧和近铝侧焊缝几乎为零的含量到靠近钢侧钎焊缝的少量再到钢母材大量，为递增的趋势；而Al元素的变化趋势则与Fe元素大致相反，只是在钎焊缝中Al元素的含量变化没有Fe的明显，主要是由于钢的熔点高，扩散较难且钎料中也含有Al元素，从而使得Al元素较Fe元素在焊缝中分布较为均匀。b1、b2、b3分别为在铝侧、钎焊缝和钢侧的扫描电镜扫描点。从表中的b1、b2、b3点的扫描结果可以看出，靠近焊缝底部的界面金属化合物区域主要是Fe元素和Al元素组成，这主要是由于Zn元素熔点低且蒸汽压较大，在焊接时大量挥发所致。b1点的Al和Fe元素含量分别为97.6At.%、2.40At.%，可知此处的组织主要为a-Al组织和少量固溶Fe的富铝

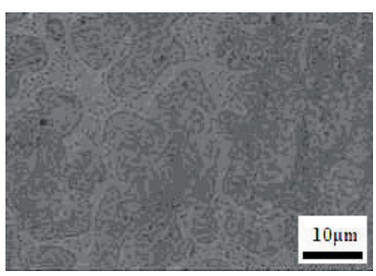


图3 距焰心4mm焊缝中心显微组织照片

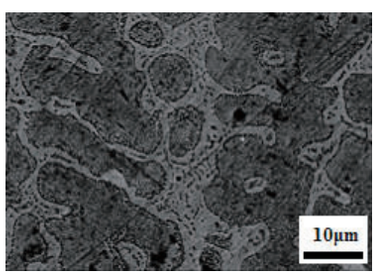


图4 距焰心3mm焊缝中心显微组织照片

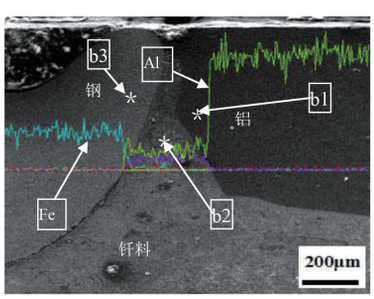


图5 锌基钎料焊接试样扫描电镜线扫描宏观图

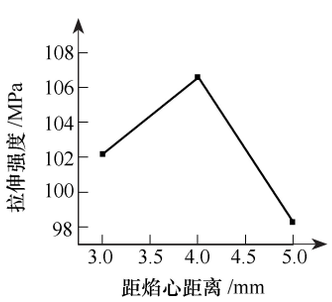


图6 距焰心距离与拉伸强度关系

表5 图5中各点的化学成分EDS分析结果

扫面点	Al		Fe	
	质量分数（%）	原子分数（%）	质量分数（%）	原子分数（%）
b1	95.4	97.6	4.60	2.40
b2	55.15	73.11	44.85	26.89
b3	2.92	5.24	97.08	94.76

相固溶体。b2点的Al元素的含量为73.11At.%，Fe元素的含量为26.89At.%，由Al-Fe相图分析可知，此处很可能为金属间化合物Fe2Al5。b3点的Al和Fe元素含量分别为5.24At.%、94.76At.%，可知在钢一侧的Al的含量要少于铝侧Fe元素的含量，这与以上的分析一致。

（2）铝硅铜钎料力学性能及显微组织分析　第一，铝硅铜钎料试样的力学性能分析：如图6距焰心距离与拉伸强度的对应关系可知：铝硅铜钎料与锌铝钎料类似，在距焰心5mm下降至距焰心4mm时，试样对应的拉伸强度逐渐上升；在距焰心为4mm时，试样的拉伸强度达到最大；从4mm下降至距焰心3mm时，试样对应的拉伸强度逐渐下降。在距焰心为4mm时，试样的拉伸强度达到最大，其强度为106.6MPa。并测得在距焰心5mm时工件的热影响区宽度为1.6cm，距焰心4mm时宽度为2.0cm，距焰心3mm时其宽度为2.3cm。这与Zn-Al钎料接头相似，即焊接热影响区只与焊接的热输入有关，同时为影响接头强度最主要的焊接参数。

第二，距离焰心4mm铝／钢锌基钎料焊接试样接头界面的组织和能谱分析：图7为铝钢钎焊接头的扫描电镜化学成分线扫描图，表6为图中各点的点扫描结果。由图可知从钎焊接头的铝侧到钢侧，Fe元素的含量为递增的趋势；而Al元素含量的变化趋势则变化不太大，主要是由于钎料为铝硅铜钎料其本身含有大量的Al元素，从而使得Al元素较Fe元素在焊缝中分布较为均匀，而Fe元素则主要靠加热时的元素扩散进行。从图中可知，在钢侧界面较铝侧界面要平滑和清晰，主要是由于铝的熔点低且钎料同为铝基更易与铝母材反应。b4、b5、b6分别为在铝侧、钎焊缝和钢侧的扫描电镜扫描点，从表6的扫描结果可以看出，b6点主要为Fe元素其含量为94.94At.%，Al元素含量为5.06At.%，其主要通过界面从钎料中扩散到钢中。b4点的Fe元素含量为2.80At.%，Al元素含量为97.2At.%，各元素的扩散和锌基钎料的接头类似，b5点的Al元素的含量为72.2At.%，Fe元素的含量为27.8At.%，由Al-Fe相图分析可知，在该处所形成的金属间化合物可能为Fe_2Al_5和锌基钎料类似。

4. 结语

(1)通过合理设置工艺，在采用锌基钎料和铝硅铜钎料时都可以得到较为理想的单面焊双面成形的焊接接头。两种钎料都在距焰心4mm时得到最高的抗拉强度接头试样，锌基钎料的接头抗拉强度可达133.6MPa，略高于铝硅铜钎料时接头106.6MPa的抗拉强度。

（2）锌基和铝基钎料焊接试样的钎焊缝形貌类似，即钢侧有清晰平直的界面，而铝侧的连接界面较为模糊，锌基钎料的焊缝显微组织中均存在网状的白色的富锌相固溶体和颜色较深的块状为富铝相固溶体，且距离焰心越近网状物质越少，铝基钎料中主要为富铝相固溶体。

（3）锌基和铝基钎料钎焊接头的元素分布类似即Fe元素的含量为渐变的趋势；而Al元素含量的变化趋势则不太大，且在接头处均生成了Fe-Al金属间化合物，该化合物均为Fe_2Al_5。

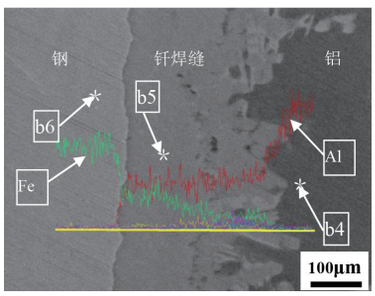


图7　铝基钎料焊接试样扫描电镜线扫描宏观图

表6　图6中各点的化学成分EDS分析结果

扫描点	Al		Fe	
	质量分数（%）	原子分数（%）	质量分数（%）	原子分数（%）
b4	94.7	97.2	5.30	2.80
b5	52.8	72.2	47.2	27.8
b6	2.51	5.06	97.49	94.94

参考文献：

[1]龙江启，兰凤崇，陈吉清. 车身轻量化与钢/铝一体化结构新技术的研究进展[J]. 机械工程学报. 2008，44，(6)：27-35.

[2]敖炳秋. 轻量化汽车材料技术的最新动态[J]. 汽车工艺与材料. 2002 (8)： 1-2.

[3]杨丽群. 铝合金/不锈钢TIG熔钎焊接头性能分析[D]. 大连理工大学，2011.

作者简介：陈建斌等，南昌航空大学航空制造与工程学院。

MW 20150405