

BT20 钛合金电弧超声 TIG 焊接头疲劳性能分析

北京航空制造工程研究所(100024) 赵海涛 周荣林

摘要 针对 BT20 钛合金开展了电弧超声 TIG 焊和常规 TIG 焊试验以及接头疲劳性能测试,对比分析了两种焊接方法接头的疲劳性能和断口形貌。结果表明:在高加载应力条件下,电弧超声 TIG 焊接头与常规 TIG 焊接头的疲劳寿命基本相同;在低加载应力条件下,电弧超声 TIG 焊接头比常规 TIG 焊接头疲劳寿命明显增加,疲劳强度(2×10^6 循环周次)提高 19%;从断口形貌分析可以看出,电弧超声 TIG 焊接头组织比常规 TIG 焊接头在一定程度上得到了改善。

关键词: 电弧超声 BT20 钛合金 疲劳强度

中图分类号: TG405

0 序 言

钛合金焊接结构在航空、航天、航海、石油化工等领域具有广阔的应用前景,然而钛合金焊接存在焊接晶粒组织粗大问题,影响结构的使用性能(尤其是疲劳性能),成为钛合金焊接结构可靠应用的关键。试验表明:电弧超声焊接技术能够显著细化钛合金焊接晶粒组织,改善焊接接头性能^[1]。

电弧超声焊接技术是近年来出现的一种新的焊接技术方法,该技术利用电弧的变阻载特性,通过高频激励电弧使之产生超声,实现了将“电弧不仅仅作为产热机构,同时作为超声发射机构”的构想,原理见图 1。超声能量通过电弧导入焊接熔池,加剧熔池流体的流动和搅拌,从而改善焊接接头组织和力学性能^[2]。文中对通过电弧超声 TIG 焊和常规 TIG 焊的 BT20 钛合金焊接接头进行疲劳性能测试和断口观察,分析了电弧

超声技术对于钛合金焊接接头疲劳性能的作用效果。

1 焊接试验

焊接试验采用的材料为 BT20 钛合金,规格为 2.0 mm×400 mm×130 mm 平板,焊丝采用 $\phi 1.2$ mm 的 BT1-00 焊丝。电弧超声 TIG 焊工艺过程与常规 TIG 焊工艺相同,其相同焊接参数见表 1。电弧超声激励参数:激励电压 U 为 70 V;频率 $f=80$ kHz。

表 1 钛合金 TIG 焊接参数

焊接电流 I/A	电弧电压 U/V	焊接速度 $v/(m \cdot h^{-1})$	送丝速度 $v_1/(m \cdot h^{-1})$
120	10.5	12.5	27

焊后对焊接试件进行消除应力退火处理。按照 HB5386—87 对焊接接头进行 X 射线探伤,结果表明,常规 TIG 焊接头和电弧超声 TIG 焊接头的焊缝质量均符合航空一级焊缝标准。

按照 HB5287—96 制备疲劳试件(焊缝留余高)(如图 2)。在 100 kN 高频疲劳试验机上进行疲劳试

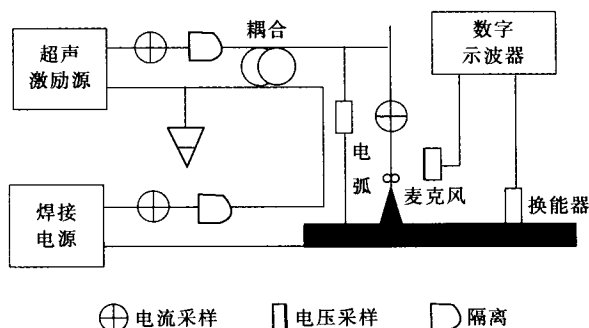


图 1 电弧超声工作原理图

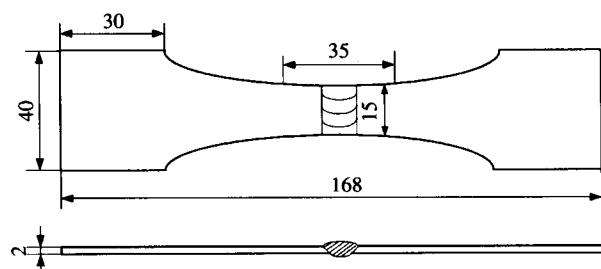


图 2 疲劳试件几何形状及尺寸

验。试验机静载精度满量程为 $\pm 0.2\%$, 动载振幅波动度满量程为 $\pm 2\%$, 试验频率为 71 Hz, 载荷类型为拉伸载荷, 应力比 $R=0$ 。

2 试验结果与讨论

2.1 疲劳试验数据分析

常规 TIG 焊和电弧超声 TIG 焊试件的疲劳试验原始数据见表 2 和表 3。从表 2 和表 3 中可以看出, 两种

表 2 电弧超声 TIG 焊试件疲劳试验结果

试件编号	疲劳寿命 N ($\times 10^6$ /周)	断裂位置	应力范围 $\Delta\sigma$ /MPa
1	0.241	熔合线处	320
2	0.289	熔合线处	270
3	2.714	未断	290
4	0.032	熔合线处	400
5	0.342	熔合线处	330
6	0.75	熔合线处	250
7	0.089	熔合线处	350
8	0.545	母材	360
9	1.752	熔合线处	300
10	1.138	母材	280

表 3 TIG 焊对接接头疲劳试验结果

试件编号	疲劳寿命 N ($\times 10^6$ /周)	断裂位置	应力范围 $\Delta\sigma$ /MPa
1	0.091	熔合线处	300
2	1.802	母材	270
3	0.031	母材	400
4	0.057	熔合线处	350
5	0.321	熔合线处	290
6	0.056	熔合线处	360
7	0.637	母材	270
8	0.684	母材	320
9	0.343	熔合线处	230
10	3.561	未断	220

焊接方法的疲劳试件主要断裂于焊缝熔合线区域(断裂于母材的试件不在统计范围内)。这主要是由于熔合线区为焊缝向母材的过渡区域, 该区域存在组织和几何形状的突变, 在加载条件下易产生应力集中, 同时该区域也易于产生焊接缺陷(如气孔等), 而应力集中和焊接缺陷都是导致焊接接头疲劳性能降低的主要因素。

对比疲劳试验结果(表 2 和表 3), 分别拟合出常规 TIG 焊与电弧超声 TIG 焊试件存活率为 50% 的相应 $S-N$ 曲线, 如图 3 所示。从图中可以看出, 在高应力

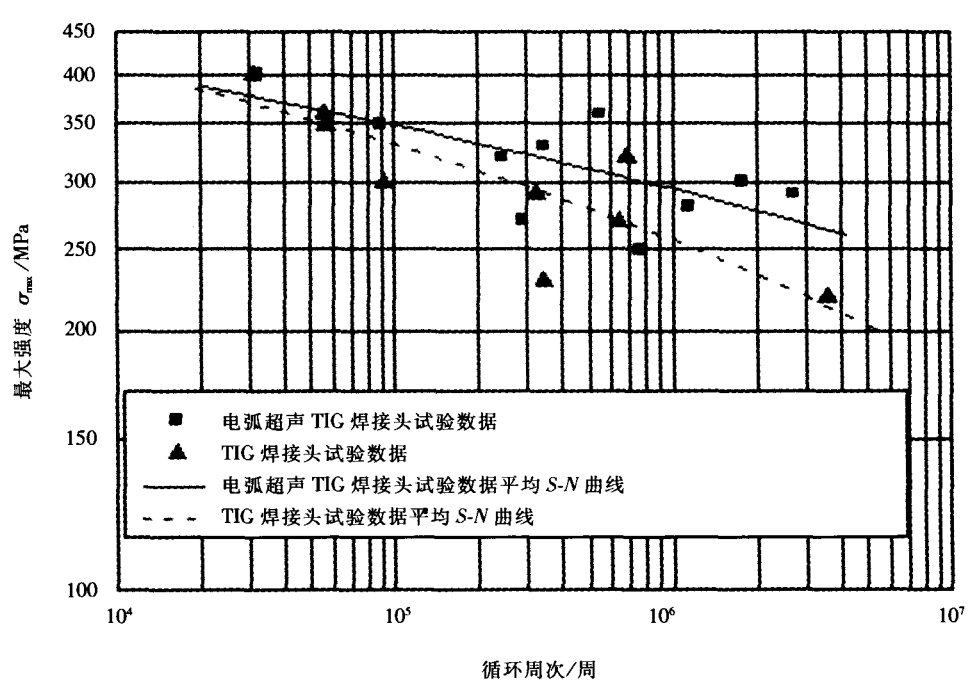


图 3 电弧超声 TIG 焊和常规 TIG 焊 $S-N$ 曲线

加载(350~400 MPa)条件下,两种焊接方法的疲劳寿命基本相同(约在 10^4 的数量级范围内);当加载应力降低时,电弧超声 TIG 焊试件的疲劳寿命高于相同应力水平下常规 TIG 焊试件的疲劳寿命,而且随着加载应力降低,两者的疲劳寿命差距逐渐加大;在循环周次为 2×10^6 的条件下,电弧超声 TIG 焊试件的疲劳强度(278 MPa)比常规 TIG 焊试件的疲劳强度(233 MPa)提高了19%。由图3也可以看出两种焊接方法的疲劳试验数据的分散性都比较大。

2.2 疲劳断口分析

在常规的 TIG 焊和电弧超声 TIG 焊试件的接头宏观断口上都发现了气孔,如图4b所示,这说明电弧超声抑制焊接气孔产生的效果有限,有待于更进一步的研究。通过对接头宏观断口的分析发现,两种焊接方法焊接试件的宏观断口形貌基本相似,即:断面的疲劳源主要位于焊缝近表面区域的缺陷和焊缝内部气孔处,如图4所示,而且部分接头断面具有多个疲劳源;断面的起伏区域(瞬断区)较大,其面积几乎占整个断面面积的一半,而疲劳裂纹扩展区域则相对较小;整个断面主要以解理为主,同时局部起伏区域也具有少量

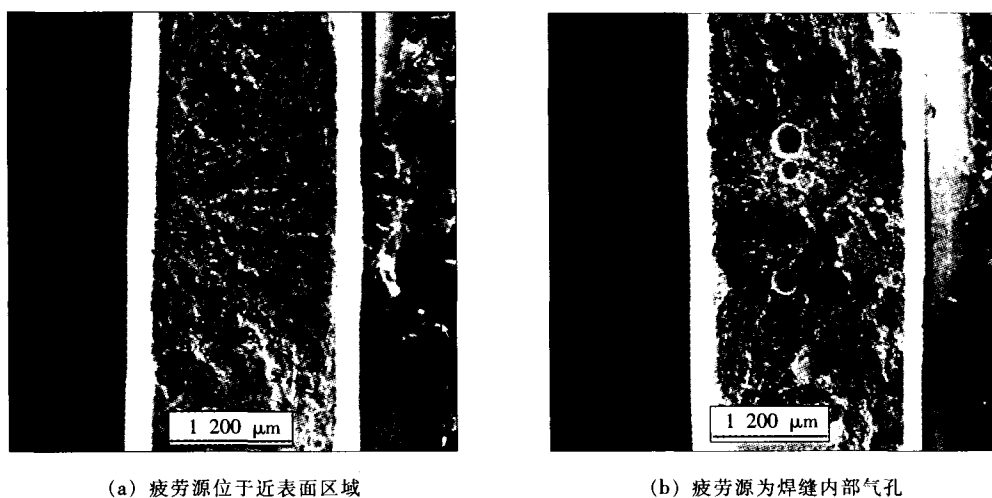


图4 焊接接头疲劳断口宏观形貌照片

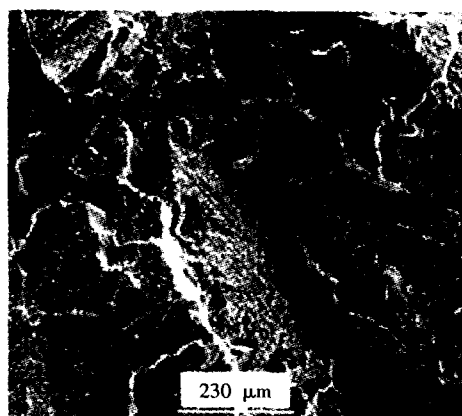
的韧窝组织。

图5a和5b为瞬断区的解理形貌。从图中可以看出该区域的解理较深,解理面主要为穿过原始 β 晶粒的断面。解理面上的平行条纹并非是解理台阶,而是沿片状 α 集束中的 α/β 界面撕裂而形成的平行的条状的韧窝特征组织^[3]。穿晶断面的形状特征在一定程度上能够反映断裂区域的组织特征,可以看出,电弧超声 TIG 焊接头断裂区的穿晶断面尺寸与常规 TIG 焊接头相比明显减小。图5c和图5d为疲劳裂纹扩展区的韧窝形貌。图5c为常规 TIG 焊接头断口的韧窝照片,可以看出韧窝少且浅,与解理区混合分布,附近有较多的二次裂纹,说明该区域的塑性较差;图5d为电弧超声 TIG 焊接头断口的韧窝照片,可以看出韧窝粗浅但均匀分布,在撕裂脊附近有大量的空穴,很明显该区域的塑性与常规 TIG 焊接头相比得到改善。

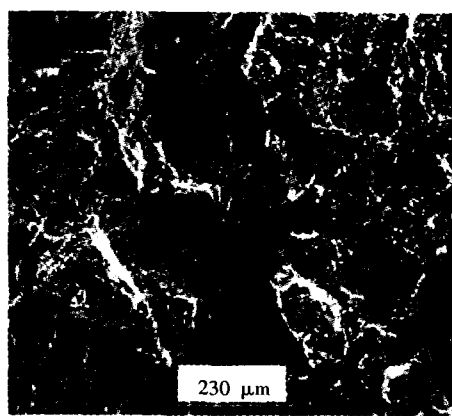
特别值得一提的是,常规 TIG 焊接头断口的不同区域可以看到明显的枝晶破坏的痕迹(见图6),说明

接头中形成了粗大的枝晶组织。在电弧超声 TIG 焊接头断口中却很难找到枝晶破坏的痕迹,这是由于电弧超声对熔池的搅拌作用破坏了熔池中枝晶的生长,从而消除了焊缝中的枝晶组织^[1]。

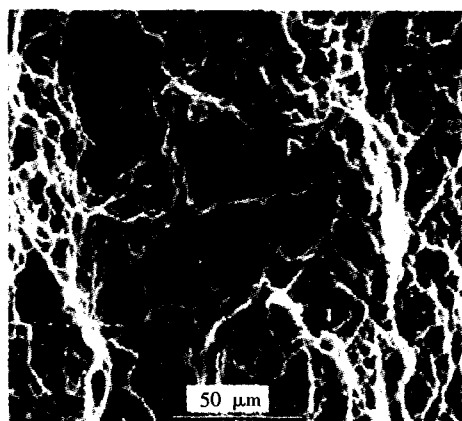
从前面的分析可以看出,电弧超声 TIG 焊接头的疲劳性能明显提高,断口特征也反映出了焊接区组织上的改善。原因是由于电弧超声技术能够明显细化钛合金焊缝晶粒,消除了粗大晶粒对接头疲劳性能的影响(钛合金焊接晶粒粗大是影响其接头疲劳性能的主要因素)。关于电弧超声细化焊缝晶粒的作用机理主要表现为:超声在焊接熔池内部传导,伴随着熔体有限振幅衰减形成的声压梯度所产生的扰动和其他作用(如:声空化效应等),这些因素都加剧了熔池熔体的流动,可以破坏正在生长的晶粒,打碎晶体,从而抑制晶粒长大,同时也增加形核率,达到了细化晶粒的目的^[1,2]。目前关于电弧超声对于熔池作用机理还需要深入的研究。



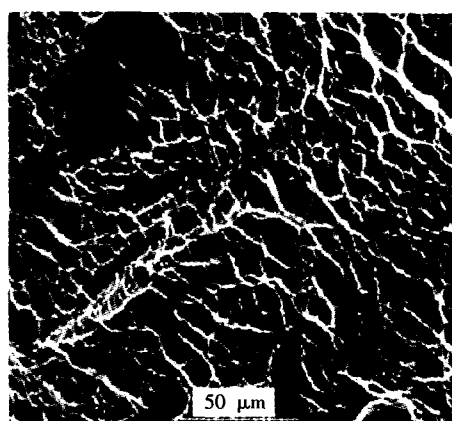
(a) 常规 TIG 焊接头解理区



(b) 电弧超声 TIG 焊接头解理区



(c) 常规 TIG 焊韧窝区



(d) 电弧超声 TIG 焊韧窝区

图 5 焊接接头疲劳断口微观形貌照片

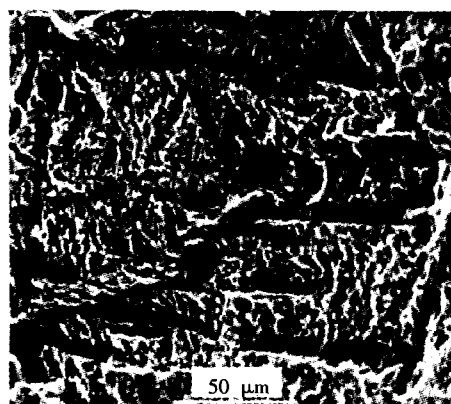


图 6 常规 TIG 焊接头断面枝晶区形貌照片

3 结 论

(1) 在高加载应力条件下,电弧超声 TIG 焊接头与常规 TIG 焊接头的疲劳寿命基本相同;在低加载应力条件下,电弧超声 TIG 焊接头的疲劳寿命与常规 TIG 焊接头相比明显提高,疲劳强度(在 2×10^6 循环周次

条件下)提高了 19%。

(2) 疲劳断口观察表明:电弧超声 TIG 焊接头与常规 TIG 焊接头的疲劳断口都表现为明显的脆性断裂特征;与常规 TIG 焊接头相比,电弧超声 TIG 焊接头的断口韧窝形态得到一定程度改善,接头断口没有发现枝晶破坏痕迹,这说明电弧超声 TIG 焊接头组织得到了改善。

参 考 文 献

- [1] 周荣林. TC4 钛合金电弧超声 TIG 焊[J]. 焊接学报, 2004, 25(6): 97-98.
- [2] 吴敏生. 电弧超声焊接技术[J]. 焊接学报, 2005, 26(6): 97-98.
- [3] 陶春虎. 航空用钛合金的失效及其预防[M]. 北京:国防工业出版社, 2002. 57-60.

作者简介: 赵海涛, 1976 年出生, 硕士, 工程师。主要从事钛合金、高温合金焊接工艺研究。