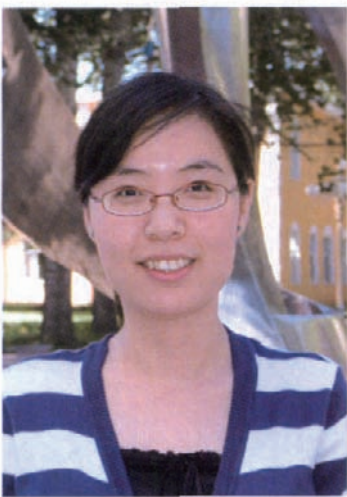


根部缺陷对 2024-T3 FSW 接头性能的影响

Effect of Root Flaw on the Property of 2024-T3 FSW Joint

北京航空制造工程研究所 张健 董春林 李光
中国搅拌摩擦焊中心
江苏科技大学 马志新



张健

硕士，2007年毕业于天津大学材料加工工程专业，现在北京航空制造工程研究所中国搅拌摩擦焊中心工作，主要从事搅拌摩擦焊工艺开发和材料焊接性能研究。

搅拌摩擦焊(Friction Stir Welding, FSW)作为一项固相连接技术，具有传统熔焊方法无可比拟的优点，尤其是在能够可靠连接传统熔焊方法很难焊接的 2000 和 7000 系列高强铝合金方面。铝合金 FSW 焊缝是在搅拌头的旋转、挤压和粉碎等热机械力作用下形成的组织致密的冶金连接，焊核区域是具有动态再

针对航空高强度铝合金 2024-T3，采用相同的焊接参数和搅拌头，在不同的压入量下得到带有不同程度根部缺陷的接头，以此来比较根部缺陷对接头性能的影响。

结晶特征的细化等轴晶粒结构，而且热机械影响区域组织具有明显剧烈塑性变形与流动特征。这些特点决定了在 FSW 焊缝区域很难产生传统熔焊中常见的热裂纹、气孔及夹渣等缺陷，但是当焊接工艺选择不合适时，在焊接过程中仍然会产生许多新的缺陷，其中根部缺陷是经常出现的一类。这是由搅拌摩擦焊焊接工艺特点所决定的，在焊接过程中搅拌针顶部与试件背部垫板之间留有一定的间隙，使得焊缝对接界面的根部没有得到充分搅拌，导致根部扩散不充分、未形成金属键连接，从而出现了一种“裂纹状”贴合性缺陷，这种根部缺陷不但会影响接头的静强度和弯曲性能，对疲劳性能也会产生较大影响。

本课题主要针对航空高强度铝合金 2024-T3，采用相同的焊接参数和搅拌头，在不同的压入量下得到

带有不同程度根部缺陷的接头，以此来比较根部缺陷对接头性能的影响。

试验过程

试验材料为厚 2.65mm 的 2024-T3 铝合金板材，试板尺寸为 400mm×100mm，化学成分和机械性能如表 1 所示。试验在自主研制的二维搅拌摩擦焊设备上完成。焊接形式为对接，焊前用砂纸对表面打磨并用酒精擦拭。搅拌头轴肩为内凹型，搅拌针顶部为普通圆台。焊接参数为：转速 500r/min，焊速 180mm/min。1[#]~4[#] 试样的压入量依次增加 0.1mm，分析根部缺陷对接头弯曲、静强度和疲劳性能的影响。

试验结果分析

- 1 压入量对 2024-T3 铝合金 FSW 根部缺陷的影响
1[#]~4[#] 为采用相同的焊接

表1 2024-T3铝合金化学成分及机械性能

化学成分 / %									机械性能		
Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Al	σ_b /MPa	$\sigma_{0.2}$ /MPa	δ / %
0.5	0.5	3.8 ~ 4.9	0.3 ~ 0.9	1.2 ~ 1.8	0.1	0.25	0.15	余	480	325	18

参数和搅拌头,压入量逐次增加0.1mm进行FSW焊接得到的接头,其横截面形貌如图1所示,其中右图为相应的根部对接界面处放大

进行。通过背弯试验可得出下列结论:带有根部缺陷的接头在进行背弯试验时沿焊缝中心的未焊透缺陷起裂,如图2(a)所示,且纹路整齐,

最小可达 80° ,背弯裂纹出现在焊缝后退侧的热影响区。

3 根部缺陷对接头静强度的影响

根部缺陷除影响接头的弯曲性能外,对拉伸性能也有不利的影响。从表2可看出,随着下压量的增加,2024-T3铝合金FSW接头的抗拉强度、屈服强度和延伸率均呈逐渐增加的趋势。 $1^\#$ 焊缝由于压入量不足,焊缝底部有明显未焊透缺陷存在,抗拉强度只有352.7MPa,不足母材强度的74%,当压入量增加0.1mm和0.2mm时,抗拉强度均大幅度提高,随着压入量继续增加,接头性能变化不大。 $4^\#$ 无根部缺陷的接头静强度最高,抗拉强度为415.7MPa,可达母材强度的86.6%,较 $1^\#$ 接头强度提高了13%。

在对接头进行静强度拉伸测试时发现,接头断裂位置和形貌基本分为2种:一种断裂于焊缝中心,断口呈楔形;另一种断裂于热机影响区附近,断口呈 45° 斜断。带有根部缺陷的试样通常以第一种形式断裂。对拉伸断口进行扫描电镜观察(见图3),可看到断口有明显的分层现象,靠近下表面的A区颜色较亮,断口整齐,且韧窝很少,具有脆性断裂特征,该区就是根部未焊透区,是拉

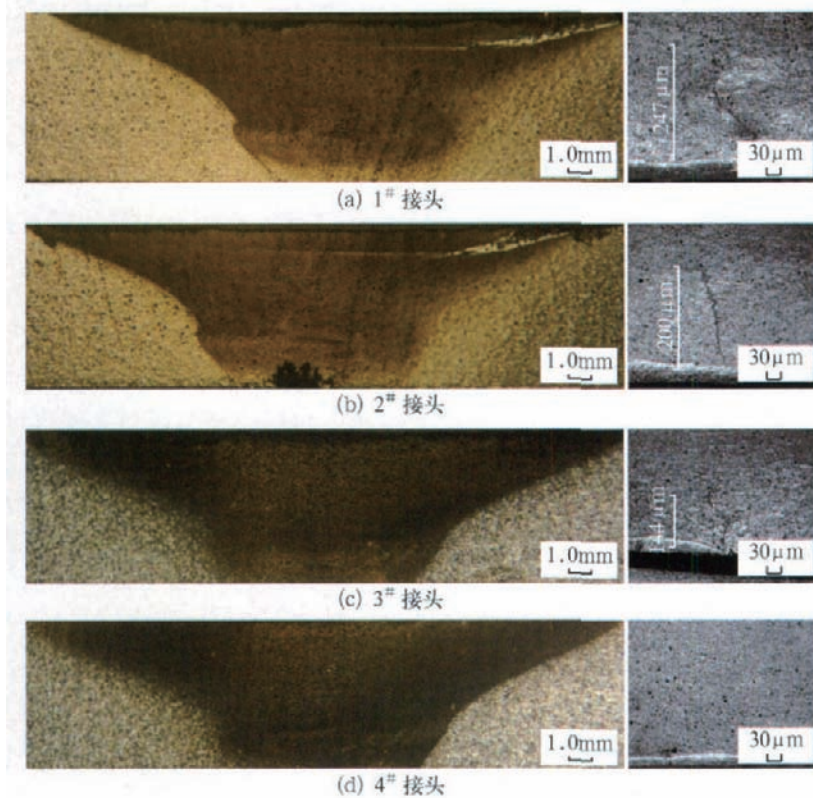


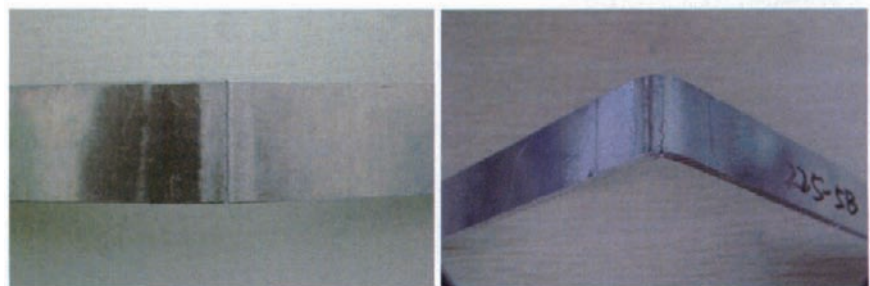
图1 接头横截面宏观形貌(左)及根部微观形貌(右)

200倍的微观照片。从照片中可看出, $1^\#$ 焊缝底部明显有一层母材金属没有卷入到焊缝中,这层金属的接合处没有形成连接,有一条长度约为 $247\mu\text{m}$ 的裂纹。随着压入量的增加,裂纹长度随之变小,且接头的焊核位置也随之下移。当压入量增加0.3mm时,根部裂纹消失。

2 根部缺陷对接头弯曲性能的影响

利用三点弯曲试验考察带有不同程度根部缺陷和无根部缺陷接头的背弯性能。测试按国家标准GB2653-89焊接接头弯曲测试方法

导致焊缝的背弯角很小,最大不超过 30° 。没有根部缺陷的 $4^\#$ 接头弯曲性能明显优于其他3个接头,弯曲角



(a) 有根部缺陷接头

(b) 无根部缺陷接头

图2 弯曲性能测试中裂纹位置

表2 不同压入量得到的接头静强度性能

编号	试样厚度 /mm	屈服强度 /MPa	抗拉强度 /MPa	伸长率 /%	强度系数 /%
1	2.44	314.4	352.7	3.35	73.5
2	2.38	317.1	380.3	3.81	79.2
3	2.37	330.5	412.0	5.08	85.8
4	2.26	332.7	415.72	5.37	86.6

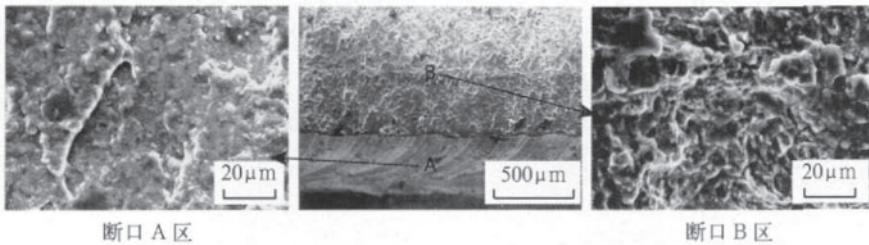


图3 楔形断口宏观(中)及各区微观形貌扫描照片

伸时的起裂区。靠近上表面的B区颜色较暗,粗糙不平,可以看到比较明显的大小不等的圆形或椭圆形的杯状凹坑群,而且在凹坑群的底部有沉淀强化相存在。在拉伸过程中,伴随着塑性变形的加剧,在颈缩中心部位,裂纹开始形核,成为多个显微孔洞,并在空间3个方向上均匀长大,最终形成圆形或椭圆形的韧窝。这表明该区域的塑性较好,在拉伸时变形很大,对强度贡献较大。该形式的断口由于A区的存在,会大大降低接头的拉伸强度。

第二种断裂形式通常发生在焊透控制较好,没有根部缺陷的试样中。对其断口进行扫描电镜观察,可看到断面组织均匀一致,有大量的韧窝和撕裂棱,因此接头的静强度和延伸率较带有根部缺陷的接头高。

4 根部缺陷对疲劳性能的影响

因为材料中局部微缺陷或非均质性是影响疲劳裂纹萌生和聚合的重要因素,因此根部缺陷常常是疲

劳裂纹的起始源,对接头的疲劳性能有致命的影响。天津大学杨新岐教授在研究4mm的2024-T3 FSW接头疲劳性能时发现,带有根部缺陷的FSW接头疲劳寿命是无缺陷的FSW接头寿命的1%~3%,在 2×10^6 循环周期时,疲劳特征值从120.6MPa降到54.7MPa。

为消除根部缺陷对接头疲劳性能的影响,将2.65mm的2024-T3 FSW接头下表面加工掉0.5mm。通过对比发现,在 $N \leq 10^6$ 寿命区间范围内FSW接头的疲劳性能明显优于母材(见图4)。接头试样断口分别位于焊缝处、远离焊缝的母材处、焊缝热机影响区焊缝一侧以及

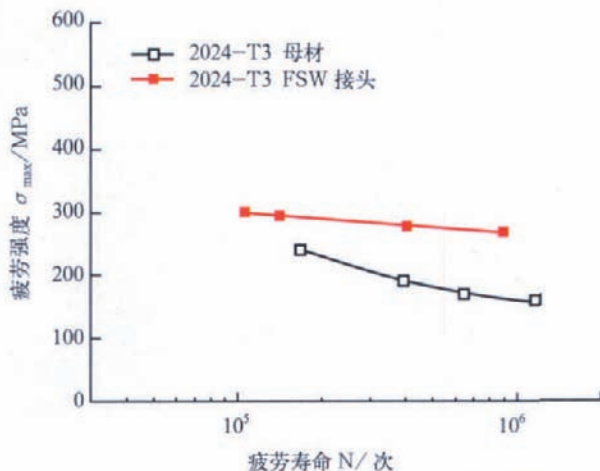


图4 2024-T3母材及接头疲劳性能的S-N拟合曲线

焊缝热机影响区母材一侧。对其断口进行扫描电镜观察可以发现,断口位于焊缝内部接头的裂纹萌生于距表面一定距离的焊缝内部区域,并以“环形”方式向四周扩展,最终在晶粒得到明显细化的焊缝区产生断裂;断在母材的裂纹位于晶粒较大的母材区,萌生位置主要在靠近表面的区域,且在萌生后以“扇形”方式向母材内部扩展;断口位于焊缝热机影响区且靠近焊缝边缘区域接头的裂纹表现出混合形式的萌生位置及扩展方式,萌生位置既有近表面区又有内部区域,而扩展方式既有“扇形”又有“环形”,并且出现了2种扩展方式相互干涉的情况;断口位于焊缝边缘母材一侧的疲劳裂纹没有穿过具有细小晶粒的焊缝区域,裂纹萌生位置及扩展方式与断在母材的断口相似,即裂纹萌生于近表面区域,并以“扇形”方式扩展。

可见,消除根部缺陷后疲劳裂纹萌生于焊缝内部或母材的表面区域,大大提高了接头的疲劳性能。

结论

(1) 随压入量增加,根部裂纹长度减小。当搅拌针长度与压入量匹配时,根部裂纹可消失。

(2) 根部缺陷对接头弯曲、拉伸和疲劳性能均会产生不利影响,可导致2.65mm的2024-T3 FSW接头背弯角小于 30° ,抗拉强度降低13%左右。

(3) 带有根部缺陷的接头拉伸断裂位置一般位于焊缝中心,呈楔形断裂,有明显的分层现象;无根部缺陷的接头拉伸断口呈 45° 斜断,断口组织均匀一致。

(4) 将2.65mm的2024-T3 FSW接头背部加工掉0.5mm,去除根部缺陷后,在 $N \leq 10^6$ 循环周期内,接头疲劳性能优于母材。

(责编 玉龙)