

铝合金搅拌摩擦焊抗拉强度和硬度的研究

Focus Hope Industries, Inc. 里奇·米勒
中国核二三建设有限公司 张岩译

【摘要】 本文研究了搅拌摩擦焊工艺对铝合金材料抗拉强度和硬度的影响，试验结果表明，搅拌摩擦焊接头的抗拉强度和硬度随着距离焊缝中心线距离增大而增强。

1. 搅拌摩擦焊原理

搅拌摩擦焊是采用一种或多种方法把金属工件加热到塑性变形的温度而达到连接的目的，这时候工件虽然仍是固体形态，但很容易变形，其焊接示意如图1所示。由于整个过程是发生在合金的固相线温度以下，所以有效地避免了出现有害的微观结构，以及一些液态熔焊常见的缺陷。

由于材料在加热搅拌过程中伴随着不同的加热和机械反应过程，所以在材料接头的横截面上就会呈现不同的宏观结构。图2是搅拌摩擦焊（FSW）横截面的宏观结构区域，搅拌区是由搅拌头直接搅拌材料而形成的塑性焊接区。搅拌区典型的梯形几何形貌和高度基本上与搅拌工具的直径与母材的厚度相关。

搅拌区两侧的热力影响区（TMAZ）的形状大致平行于搅拌区，但比搅拌区宽，它涵盖了搅拌区部分材料的粘弹性错位以及母材区域在热冶金转变过程部分。搅拌摩擦焊接头的第三区域是热影响区，它涵盖了搅拌摩擦焊过程中热

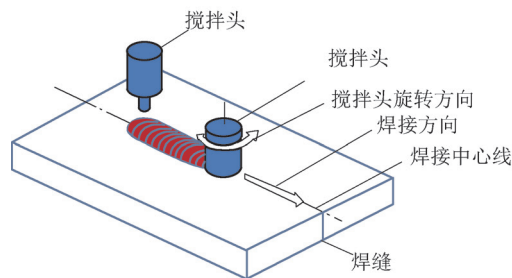


图1 搅拌摩擦焊原理示意

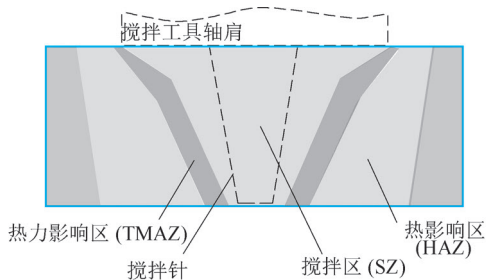


图2 搅拌摩擦焊(FSW)横截面宏观结构区域关于搅拌工具影响几何形貌的示意

源传导而引起的冶金变换区域。虽然搅拌区与热力影响区的宏观差异很容易区分开，但是热力影响区与热影响区的差异就没那么明显，而热影响区与母材区域的差异更难区别，它需要通过微观晶体学分析才能区分开，这超出了本文的研究范围。

因为搅拌工具是沿着导线轴旋转的，所以位于中心线纵轴两

侧的材料变形和所受到的影响都不一样，这样就导致了微观结构的差异，通常是不对称的一个横截面。图3是俯瞰搅拌头顺时针旋转从左到右焊接的图片，从图中可以看出，轴线上方的最大周向矢量的切线方向与搅拌头前进方向相同，为前进方向；相反，在中心线下方的周向切线方向即是搅拌头的后退侧。

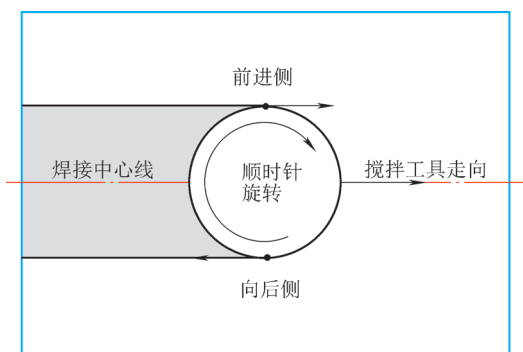


图3 前进和后退侧位置的加热搅拌过程

2. 材料试样的制备

所有搅拌摩擦焊用搅拌针和肩部都是由硬度为54Rc的H13钢制成，而GG1型搅拌摩擦焊设备由福克斯霍普工业底特律基地的制造技术公司生产的，所有预焊接材料棒切割成 $2.5\text{mm} \times 5\text{mm}$ ，并去毛刺，在装入焊接夹具前用酒精彻底清理干净。本文研究的2139-T8、5083-H131 和 6061-T6 铝合金材料的化学成分如表1所示。

试验设计的搅拌摩擦焊的工艺参数以获得最大屈服强度的参数为标准，如表2所示。

采用表1的工艺参数，焊接制作 $2.5\text{mm} \times 10\text{mm} \times 20\text{mm}$ 一系列的试样，并对试样表面进行研磨抛光，底部表面也要抛光，以

避免任何可能影响测试结果的可能性。最后把焊缝的起始和结束部分去除，然后采用X射线对所有焊接试样进行焊缝质量检测，检测结果表明，焊缝无空隙缺陷。

3. 宏观和微观分析

图4为三种材料的搅拌摩擦焊焊缝接头的宏观截面结构，从图中可以看出，搅拌区、热力影响区和热影响区之间的界限还是比较清晰的。对于三种材料，搅拌区和热力影响区的界限清晰可见，而热力影响区和热影响区的界限就没有那么清晰，但是2139和6061铝合金的界限还是能够清晰可见。然而，虽然5083铝合金试样的搅拌区到热力影响区的转变明显，但是在前进侧，热力影

响区到热影响区的转变的宏观形貌却比较模糊。

对3种试样的焊缝接头横截面进行微观硬度检测，检测结果如图5所示。由图5可见，摩擦焊工艺软化了母材的硬度而搅拌区的硬度却在径向方向增加，每个搅拌区和热力影响区的最低硬度分别为44Rc和40Rc，分别比6061、2139和5083铝合金母材的硬度降低17%。

值得注意的是，对三种材料的搅拌摩擦焊焊缝的热力影响区的微观硬度对比发现，6061铝合金热力影响区显示出明显的V形，虽然形状相似，但AA2139

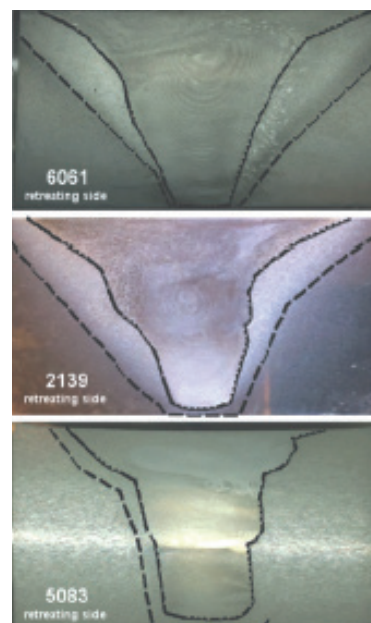


图4 搅拌摩擦焊接头横截面微观结构

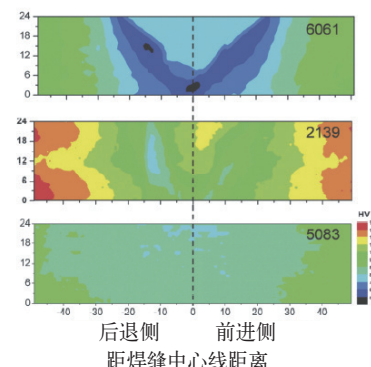


图5 搅拌摩擦焊接头横截面的微观硬度

表1 铝合金材料的化学成分（质量分数）（%）

	Ag	Cr	Cu	Fe	Mg	Mn	Si	Ti	Zn	Other	Al
AA2139	0.32	0.00	4.69	0.10	0.42	0.30	0.07	0.10	0.04	≤0.15	其余
AA5083	0.00	0.08	0.01	0.16	4.80	0.90	0.06	0.01	0.01	≤0.15	其余
AA6061	0.00	0.04~0.35	0.15~0.4	0.70	0.8~1.2	0.15	0.4~0.8	0.15	0.25	≤0.15	其余

表2 最佳搅拌摩擦焊参数

	搅拌针轴肩直径/mm	转速/r·min ⁻¹	前进速度/mm·min ⁻¹	轴向力/kN	搅拌头倾斜角(°)	搅拌头冷却
AA6061	50.8	450	150	45	2	否
AA5083	40.0	300	25	33	3	是
AA2139	40.0	250	40	43	3	是

材料得热力影响区关于水平中心线不对称的位置位于最柔软材料搅拌摩擦焊接头横截面的后退一侧。然而, AA5083材料的搅拌区和热力影响区也不是典型的V形。其他研究人员已经发现了AA5059材料的搅拌摩擦焊类似的微观硬度结果, 没有表现出明显V形的很大原因可能来源于5XXX系列铝合金没有热处理的影响。

从宏观上看, 过渡区和显微硬度的数据是相同的。由图5可知, 两个热处理合金的宏观表面和显微硬度信息是相对一致的, 尽管意想不到的是缺乏完整的相关性。然而, 5083合金的宏观区域和显微硬度信息却显示不出一联系。而由另一个实验室做出的另一个5083合金的宏观表面数据也基本证明了这个观点。

4. 屈服强度试验

为了比较不同区域的拉伸性能的一致性, 从搅拌区、热影响区受拉一侧、热影响区受压一侧的焊接区域提取试样进行纵向拉伸试验, 如图6所示。首先从这些区域的材料试块提取美国材料试验学会标准规定的直径为0.25in (1in=2.54mm) 的拉伸试验样本做准备, 然后对这些材料

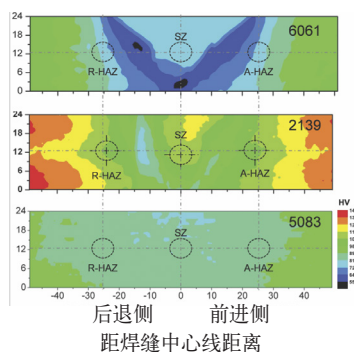


图6 纵向中心线位置拉伸试样的提取位置

进行表征, 美国的西南研究院(圣安东尼奥, 德克萨斯州)用伺服液压设备在三个搅拌区、三个母材, 以及每个铝合金材料的受拉一侧和受压一侧的热影响区进行过室温拉伸的测试, 测试速率为0.0014in/s, 这个数据与名义上的应变速率0.001/s一致。

测试结果如表3所示。对于这三种合金, 搅拌区和热影响区材料与各自没有焊接的母材相比强度很弱, 各自合金的受拉一侧与受压一侧热影响区材料相比, 表明2139和5083合金硬度几乎相近; 然而, AA6061的数据显示, 受压一侧热影响区材料比受拉一侧热影响区百分比大了近9%~10%。

搅拌摩擦焊过程总是减弱材料的性能, 以及使材料的延展性

受到影响。与受温和搅拌过程的母材相比, 2139和5083合金热影响区材料强度百分比减少, 但是值得注意的是, 6061合金热影响区材料比母材延展性更好。然而, 每种材料在在搅拌区的延展性明显不同。同时, 2139在搅拌区材料的伸长率结果比其母材高了79%, 断面收缩率比其母材小了13%, 表现了其更易发生脆性断裂。根据这样的数据, 我们确定了后续的试验。

搅拌区域材料的断口与热影响区和母材相比, 明显光滑, 而热影响区和母材材料断口粗糙。6061合金相对于母材, 搅拌区较小的伸长率的结果表明在搅拌过程中合金伸长率减少。然而, 5083合金受搅拌过程的影响, 表现明显不同, 比母材搅拌区的延

表3 相对于母材的拉伸测试结果

材料	AA2139—T8			
区域	搅拌区	受拉一侧热影响区	受压一侧热影响区	母材
屈服强度/MPa	227	239	235	432
抗拉强度/MPa	387	362	359	465
断面收缩率 (%)	39.9	48	46.9	45.6
伸长率 (%)	25.1	16.5	16.4	14.0
材料	AA5083—H131			
区域	搅拌区	受拉一侧热影响区	受压一侧热影响区	母材
屈服强度/MPa	157	165	164	273
抗拉强度/MPa	319	332	333	362
断面收缩率 (%)	51.3	25.8	24.6	23.3
伸长率 (%)	30.1	19.3	18.9	11.1
材料	AA6061—T6			
区域	搅拌区	受拉一侧热影响区	受压一侧热影响区	母材
屈服强度/MPa	140	160	174	382
抗拉强度/MPa	246	218	231	403
断面收缩率 (%)	17.7	64.2	63.6	50.6
伸长率 (%)	12.7	15.2	17.0	14.6

展性高出两倍以上。

5. 结语

本文微观分析表明, 搅拌摩擦焊过程显著影响热影响区和热力影响区, 并且2139、5083和6061铝合金搅拌区材料比母材焊接接头性能分别高了40%、17%、44%。但是热处理后的2139和6061合金在热力影响区, 以及没有热处理的5083合金的搅拌区硬度有所降低。硬度降低了12%~31%, 与材料在拉伸方面降低3倍有关。

同样, 本文也研究了屈服强度和抗拉强度, 与搅拌接头、受拉热力影响区和受压热力影响区的试样相比, 没有明显的变化。但是, 2139合金搅拌摩擦焊接头的横向显微硬度数据显示了热力影响区的受拉一侧和受压一侧的强度不同, 这不是受拉伸试验影响, 而是可能因为强度-韧性之间的相关性所造成的。

另外, 每个材料接头的显微硬度和宏观表面之间都存在一定的联系, 这看起来是与搅拌区、材料形变场影响区、热影响区都有关系。但是, 直接比较这些不同结构的信息, 我们发现宏观表面不一样的样本对材料的硬度和强度影响不大, 这取决于合金种类。研究发现, 没有进行热处理的5083铝合金宏观结构和显微硬度没有明显的不同, 而相反的, 两个热处理的2139和6061合金存在结构和硬度区别, 他们两者之间的联系却很深。

由于材料的硬度与材料的来源, 以及采样的区域是有很大的关系的, 而且在不同地方提取的试样, 它的宏观结构也会不同。研

究结果表明, 宏观结构并不能代表材料硬度的水平。搅拌摩擦过程同样对每种合金材料的硬度和热影响区也都有很大影响, 与母材相比硬度降低了12%~31%。此外, 宏观结构不同的接头区域之间的差异同样也并不一定代表着材料强度的差异。每种合金材料的搅拌区与热影响区材料并不表现为强度差异, 每个区域相对各自的母材也同样被削弱了。通常来说, 所有搅拌区和热影响区材料在抗拉强度方面表现的要小39%~63%。

这项研究的结果的数据表明, 在搅拌摩擦焊接过程中材料的延展性与宏观的结构是可区分的。每个不同材料区域的测试结果表明, 宏观结构和延展性之间差异是可区分的。

参考文献:

- [1] Thomas, W. M., Nicholas, E. D., Needham, J. C., Murch, M. G., Templesmith, P., and Dawes, C. J. 1995. Friction Welding. U.S. Patent 5,460,317, filed August 1, 1994, issued October 24, 1995.
- [2] Ding, R. J., NASA. 2011. Thermal Stir Welding Apparatus. U.S. Patent 7,980,449, filed February 28, 2003, issued July 19, 2011.
- [3] Tweedy, B. M., Abergast, W., and Allen, C. 2005. Friction stir welding of ferrous alloys using induction preheating. Friction Stir Welding and Processing III, The Minerals, Metals & Materials Society, eds. K. V. Jata, M. W. Mahoney, R. S. Mishra, and T. J. Lienert, Wiley.
- [4] Dannemann, K. A., Chocron, S., Nicholls, A. E., and Wagar, D. L. 2012. Mechanical Characterization of Friction Stir Welded Aluminum 5059-H131 (Weld and Heat Affected Zone) for Determination of Johnson-Cook Constitutive Constants. SwRI Report 18.12544/026, Southwest Research Institute.
- [5] Dannemann, K. A., Chocron, S., Nicholls, A. E., and Scott, N. L. 2012. Mechanical Characterization of Friction Stir Welded Aluminum 5083-H131 for Determination of Johnson-Cook Constitutive Constants. SwRI Report 18.16816.01, Southwest Research Institute.
- [6] Dannemann, K. A., Chocron, S., Nicholls, A. E., and Scott, N. L. 2012. Mechanical Characterization of Friction Stir Welded Aluminum 6061-T6 for Determination of Johnson-Cook Constitutive Constants. SwRI Report 18.16816.02, Southwest Research Institute.
- [7] Dannemann, K. A., Chocron, S., Nicholls, A. E., and Scott, N. L. 2012. Mechanical Characterization of Friction Stir Welded Aluminum 2139-T8 for Determination of Johnson-Cook Constitutive Constants. SwRI Report 18.16816.03, Southwest Research Institute.

(本文由美国焊接学会提供)

MW 20160525