

搅拌摩擦对接焊根部弱连接特征、成因及 液相溶解消除方法 *

张贵锋, 朱大恒, 程若亮, 刘 旭

(西安交通大学 金属材料强度国家重点实验室焊接与涂层研究所, 西安 710049)

摘 要: 搅拌摩擦对接焊根部弱连接缺陷 (kissing bond, KB) 源于针长短 (搅不到)、针尖细 (搅不动) 及无法横向加压机构 (加压难), 而且对压入深度的微幅波动敏感, 因此成为具有一定不确定性的难以根除的棘手缺陷。为了消除根部弱连接缺陷, 分析综述了 KB 的成因、特征与现有消除方法, 在搅拌摩擦钎焊的研究基础上, 提出了“根部钎焊辅助的搅拌摩擦对接焊”新方法, 即在根部下方与垫板之间预置能与母材发生共晶反应的钎料 (视需要在根部界面间预置钎料), 在形成液相后, 向上溶解位于针尖下方的薄层固态母材 (温度高、变形大), 实现根部去膜与根部混合, 达到消除 KB 缺陷的目的。该方法具有免除二次减薄、降低对焊接根部塑性流动苛求的优点。

关键词: 搅拌摩擦焊; 搅拌摩擦钎焊; 根部弱连接; 液相溶解; 缺陷

中图分类号: TG453.9

文献标识码: B

DOI: 10.19291/j.cnki.1001-3938.2020.11.004

Characteristics and Causes of Kissing Bond (KB) in Friction Stir Butt Welding and its Elimination Route by Liquid Dissolution at Root Part

ZHANG Guifeng, ZHU Daheng, CHENG Ruoliang, LIU Xu

(State Key Laboratory for Mechanical Behavior of Materials, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: Kissing bond (KB) at root part is an inevitable defect caused by shorter pin length than thickness of workpiece (resulting in the absence of direct stir by pin), fine pin tip (resulting in poor ability to stir), and the absence of horizontally applying pressure system. It is also sensitive to small fluctuation of plunge depth. As a result, it is difficult to eliminate robustly. Characteristics, causes, and elimination of kissing bond at root part in friction stir butt welding were reviewed. In order to eliminate KB, a novel process of root brazing (or soldering) assisted friction stir welding (RB-FSW or RS-FSW) was proposed by the present authors. In the new process of RB-FSW, a filler metal with the ability to dissolve base metal (e.g., by eutectic reaction) is preplaced between root and back plate, forming liquid phase, dissolving solid base metal at root part, and hence removing oxide film, mixing base metal at root part, and finally eliminating KB. The RB-FSW process has the advantages to avoid secondary thinning base metal and to reduce the degree required for plastic deformation at root part.

Key words: friction stir welding (FSW); friction stir brazing (FSB); kissing bond (KB); liquid dissolution; defect

* 基金项目: 陕西省科技成果转移与推广计划-吸纳成果转化项目“异种异型金属复合材料的搅拌摩擦钎焊制备新方法”(项目编号 2019CGXNG-026)。

0 前言

洁净化、致密化、合金化（适度）、一体化（原始界面消失并形成跨越原始界面的共同晶粒）是固相焊界面获得冶金结合的必要条件。英国焊接研究所 Thomas 于 1991 年发明的搅拌摩擦焊（friction stir welding, FSW），通过在母材对接面之间与母材表面分别引入同轴旋转的细针与粗肩，用搅拌针的搅拌（剪切与转移作用）引发塑性流动与混合、辅之以轴肩的摩擦加热软化作用、扭转与挤压的力学作用，综合利用前述搅拌针与轴肩的热-力联合作用，驱动搅拌区（包括部分轴肩影响区）产生热塑性流动与再结晶，满足上述去膜、致密化、一体化条件。FSW 的核心机制是通过足量的环向与竖向的热塑性流动实现去膜、致密化（致密回填针后瞬时空腔）与一体化（经由后退侧转移而来的流变金属与周边任一界面的焊合，特别是距离较远的前进侧热影响区界面的一体化重新焊合）。

塑性流动不良将导致以下缺陷：①前进侧底部易出现回填不饱满的空洞缺陷（advancing side at edge of nugget）、隧道、表面沟槽^[1-7]；②根部的“弱连接”（kissing bond）^[9-13]；③转移而来的回填金属与前进侧周边金属界面（简称为 SZ/(AS-TMAZ) 界面）虽勉强接触，但因压力方向不理想，致使 SZ/(AS-TMAZ) 界面重新焊合不良，成为另一个潜在的“弱连接”（但与根部 kissing bond 相比该界面并无氧化物）：低疲劳裂纹均在接头底部启裂，沿前进侧热机械影响区与焊核区的过渡区域扩展至断裂^[14]。这一重新焊合不良的弱界面在 FSW 与搅拌摩擦点焊（friction stir spot welding, FSSW）中均存在^[15]。

FSW 接头的缺陷除了上述塑性流动不到位（热输入不足的结果之一）引起的空洞、弱连接之外，还有热输入过大引起的缺陷（如晶粒粗化、粗糙表面）。为此，低热输入工具设计与低热输入工艺成为 FSW 新的研究分支^[16]。前者如张华等报道了对 6 mm 厚的 7050Al-T7451 合金进行静轴肩搅拌摩擦焊（stationary shoulder friction stir welding, SSFSW），所得接头抗拉强度为 487 MPa，达到了母材的 91%；断裂发生在热影响区，为微孔聚集型断裂^[17]。后者如许楠

等报道了多种新颖的低热输入工艺方法：外加液体 CO₂ 冷却^[18]、背面冷却^[19]、低转速配重载加压（large-load and low-speed friction stir processing, LL-FSP）^[20]等。

尽管 FSW 工艺在工具设计（螺纹针+内凹与带棱轴肩）与安装（倾斜）两方面颇具匠心采取了方方面面的技术方案来强化工具对塑性流动的驱动效果，辅之以合适的热输入，在能被搅拌针所直接搅拌的中上部厚度范围内，可以消除上述表面不连续或内部不致密性缺陷，但是仍难以根除不能被搅拌针所直接搅拌的根部薄层范围内（搅拌针尖端下方）出现根部弱连接的缺陷。本研究主要论述搅拌摩擦对接焊根部弱连接特征、成因及消除方法。

1 Kissing bond (KB) 的主要特征及其对性能危害的复杂性

图 1 为典型 kissing bond (KB) 的微观形貌^[19]，其主要特征可概括如下：①位置、深度与组成。位于“针下根部微区”，属根部缺陷（root flaws），深约小于 0.5~1 mm；由原始氧化膜形成的残留物组成（虽有挤压但流动距离不足导致）；当 Mg 含量高、热输入大时会贯穿整个板厚，此时称为 S 曲线（zigzag line 或 Lazy S），实质仍是接合线上氧化膜的残留物（joint line remnant, JLR）^[1]。②低倍显微特征：呈弯曲线状缺陷特征，原始装配间隙消失，已达到机械接触（已达 Kissing 状态），少数部位产生了不连续的结合，但多数范围氧化膜仍残留于界面，因此属于“弱连接”（weak-bonding）^[10]或部分连接（partial bonding at the root flaw interface）^[21]。

Kissing bond 研究始于 2001 年，日本日立制作所的冈村久宣最早开始关注 FSW 界面氧化膜行为^[22-23]。据其报道，对 4 mm 厚的 6N01 合金（Al-0.8Mg-0.6Si）的搅拌区用 10%NaOH 水溶液腐蚀后，当“圈间间距（mm/r）”（revolutional pitch: joining speed/tool rotational speed, i.e. the transition distance of the rotation tool per revolution）大于某临界值，在搅拌区将出现由颗粒状夹杂物（尺寸为 0.01~0.2 μm；成分由 Al、Mg、Si 构成的复杂氧化物）构成的曲线，冈村称此夹

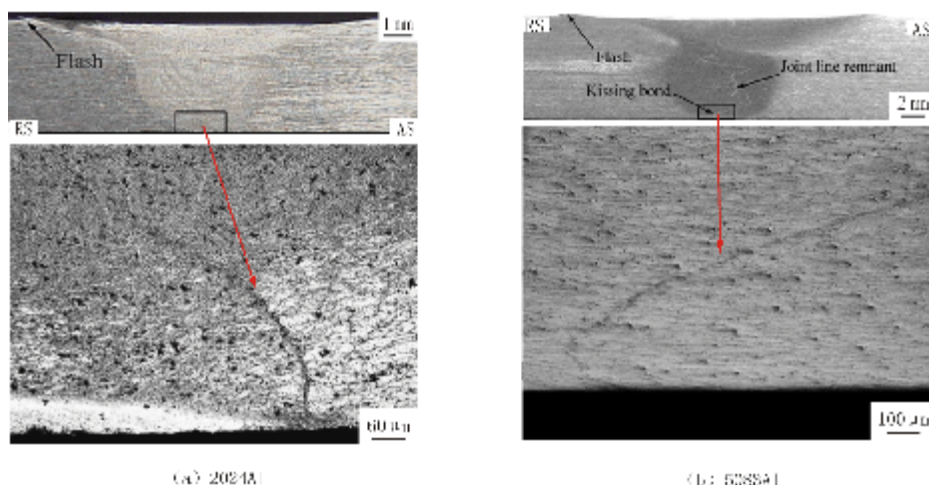


图1 根部弱连接缺陷与贯穿板厚的S曲线的位置与形貌^[19]

杂物曲线为“弯曲接合线 (zigzag bond line)”。但该弯曲接合线对接头抗拉强度与疲劳强度并无显著影响,原因在于抗拉测试与疲劳测试中,接头断裂于热影响区。

此后, Dickerson (剑桥大学, 2003 年)^[24]、Oosterkamp (挪威, 2004 年)^[24]、Sato (佐藤裕, 日本东北大学, 2004 年, 2005 年)^[25-26]陆续报道了其研究结果。剑桥大学 Dickerson 于 2003 年在文献 [21] 中最早使用了“kissing bond (bonded but with poor strength)”的提法, 并指出这是最易出现的缺陷。挪威 Oosterkamp 于 2004 年在“Welding Journal”刊文也采用了 kissing bond 的提法, 并对 kissing bond 的表述与成因进行了进一步细化, 主要从变形角度指出 kissing bond 虽然接触很近, 但“变形”产生的接触程度不足以建立原子间结合 (atomic bond)^[24]。Sato 采用 5052-O 获得与冈村相似的试验结果^[25], TEM 观察结果表明, 曲线形成的带状区域 (zigzag band region) 宽 1 μm; 其上分布的颗粒为非晶 Al₂O₃, 粒径不超过 100 nm, 多数分布于晶界位置; 而且 Sato 还证明了即使是强度低、塑性好的 1050 纯 Al, 经腐蚀后在根部也会出现 KB^[26]反映了 KB 的难根除性。

自 2006 年以后, 由天津大学杨新岐、西安建筑科技大学王快社等^[9-10]带头的我国学者研究 KB 的文献逐渐增多, 偏重于从疲劳性能角度论证其不利影响。

纵观国内外关于 KB 缺陷的研究, 可以归纳

出几点规律: ①所研究的母材均是含 Mg 的铝合金母材, 可见根部弱接合对 Mg 元素较为敏感。换言之, 对“高镁高强”铝合金母材 (航空用 7 系与 LNG 航海用 5 系的 w(Mg)=2%~5%), 制约 FSW 应用的瓶颈问题已不是针后回填所需流动不足导致的空洞缺陷, 而是氧化膜碎屑难以分散的棘手缺陷; ②KB 源于母材对接面原始氧化膜, 因针下根部的搅拌与变形不足, 大量氧化膜成微粒状残留形成了弱连接, 有时在氧化膜残留微粒旁有微孔^[26-30], 应是由原始界面装配间隙未能被闭合而产生的疏松缺陷; ③可有条件地消失 (低 Mg 铝合金材质、薄板、高压与大热输入), 但对规范参数敏感, 如李继忠报道了对针长或压入深度 (决定针尖端距离底面位置) 零点几毫米的波动也会导致出现^[11], 因此 KB 属于最容易出现^[21]、不可能排除的缺陷^[24], 致使疲劳性能测试时常出现奇异点, 应引起重视^[31-32]; ④规范的影响, KB 长度随热输入 (ω^2/v) 反比例变化 (AA5083-H112 母材)^[33], 有时出现反常规范调控结果 (6802、7N01)^[30,34], 例如采用高的热输入虽然有利于机械破碎氧化膜, 但弱连接反而容易出现, 抵消了机械去膜能力的提升, 导致规范参数窗口变窄, 稳定性变差, 成为高热输入下难以根除的缺陷; ⑤由于研究角度与重点不同, 对性能的影响分歧较大, 早期认为对性能影响不大, 特别是与弧焊接头相比, 由于 FSW 接头细化的锻造组织特点即使疲劳性能也占有优势, 但近年来趋于重视证明并解决其不利影响。

近年来的研究陆续证明了 KB 对性能的不利影响主要集中在以下几个方面：①严重恶化 FSW 接头高应力水平区疲劳寿命与疲劳强度：KB 的存在使 Al5083 与 Al2024 接头的疲劳寿命比健全接头对应低 20~40 倍与 30~80 倍^[49]；与母材相比，接头疲劳强度在高应力低寿命区域 ($N < 10^5$) 比母材明显低，在低应力高寿命区 ($N > 10^6$) 其疲劳强度差异显著减小并有相等的趋势^[35]，尤其是在高应力范围，在相同应力范围水平下 ($\Delta\sigma$ 为 160 MPa 和 136 MPa) 存在“弱连接”缺陷的 FSW 接头疲劳寿命仅为母材 (10 mm 厚 6082-T6) 的 3.8%~7.0%^[36]；与 MIG 接头相比，在高应力区 FSW 疲劳强度低于 MIG 焊接接头、而在低应力区高于 MIG 焊接接头，大部分 FSW 试样疲劳裂纹起始于焊缝根部的“弱连接”缺陷^[36]；甚至当应力大至 SZ (搅拌区) 的屈服强度时，第一个周期就从 KB 处完全开裂^[37]；可见，KB 对高应力疲劳与应变疲劳有较大的风险。②对背弯性能影响显著：虽然对抗拉载荷无影响 (原因在于有软化区、搅拌区的细晶强化两方面)，但对变形相对集中的背弯性能有不利影响，从根部起裂^[30]。③对焊后热处理：虽然对焊态性能没有不利影响，但可热处理铝合金在焊后热处理时沿 KB 出现微裂纹^[38-39]。这意味着一旦 KB 出现，不能用焊后热处理对已发生软化的高强铝合金重新恢复硬度与强度，因此当对可热处理强化的 2 系、6 系、7 系若拟通过焊后热处理恢复硬度与强度时，首要的前提是须预防 KB。

KB 对 FSW 接头性能影响较为复杂，缺乏定论，其原因与原始母材强化机理与供货状态、不同区域组织演变、组织与硬度分布的不均匀性密切相关。如 TMAZ 与 HAZ 的软化 (主因)；SZ (搅拌区) 的细化、软化 (热处理合金伴随析出相的溶解与粗化)、硬化的综合结果；还与性能指标类别、测试方式与范围、应力水平等条件有关。

2 Kissing bond (KB) 的成因与影响因素

全面分析 KB 的成因与影响因素共分为以下 7 项，其中工具因素 (搅拌针较短导致直接“搅不到”；针尖较细导致间接“搅不动”) 与成分因

素 (含 Mg 量高) 为主因，现详述如下。

2.1 针长须小于板厚为首要主因

简言之，长针会将轴肩“架空”，影响轴肩端面对母材表面摩擦、挤压、扭转三种热-力作用的可靠性。综合分析针长略小于板厚的核心原因如下：①为了保证轴肩端面与母材表面的“稳定接触摩擦加热”，还需有一定的“压入深度”以确保即使有床身振动等因素干扰也能使轴肩端面/母材表面稳定接触与稳定摩擦。②为了确保“轴肩对针后热塑性母材的可靠挤压”：一方面消除回填不饱满的空洞缺陷；另一方面还要实现由挤压、流动带来的热塑性母材与周边材料的重新焊接，包括与原前进侧边缘固态母材的重新焊接、与已沉积金属的焊合等。③为了减小针尖的磨损与断针 (垫板对针的弯矩作用会折断细针)。

2.2 针尖直径细 ($\leq$ 轴肩直径) 降低了根部微区扭转破膜效果

针尖头部对“针下根部微区 (厚约 0.5 mm)”的力学作用可分为两类：一是挤压，二是扭转。针下挤压力较为微弱的原因有两方面：一是由于搅拌头与母材均被刚性固定，二是“针下根部微区”的厚度本身非常薄 (0.5~1 mm)、温度低，故其沿厚度方向的膨胀量非常有限，因此由弹性膨胀力形成的挤压力数值很小。加之竖向挤压力只有足够大，即达到产生横向流动效果时才能实现根部微区的闭合接触与混合，而横向流动因垫板的静摩擦阻力大也很难实现。因此，针下根部间隙的闭合与混合难以靠针头的“挤压”作用来实现，而应靠针头的“扭转”作用。

但是搅拌针头部的直径 D_p 较细，下述两种原因削弱了其扭转破膜效果：一是随着针尖的直径变细，对针下母材的力偶矩变小，不利于强化每一圈扭转形成的环向弹塑性变形程度，导致“间接搅拌搅不动”，这是针下机械破膜不足的根本原因；二是从可能的累积流动效果看，随着针尖的直径变细，位于根部焊道的任一微元，其所承受的旋转针尖的累计扭转次数 N_p (从进入针下到脱离针下的总摩擦圈数) 也将减少。

作者提出并推导的表征针尖扭转机械破膜能力的指标之一——针下根部微区任一微元从进入到脱离针下所承受的总摩擦圈数 N_p 的计算公式为

$$N_p = (D_p/v)N \quad (1)$$

式中： N_p ——焊道根部上任一微元从进入针下到脱离针下的总摩擦圈数， p 代表针；

D_p ——为搅拌针的直径，mm；

v ——焊接速度，mm/min；

D_p/v ——焊道根部上任一微元承受针尖扭转的时间，min；

N ——转速，r/min。

对于根部焊道而言，粗的针尖有利于增加对针下母材的单圈扭矩，增大针下母材所承受的总摩擦圈数 N_p ，分散氧化膜范围更广。但搅拌针直径过粗易导致回填针后瞬时空腔所需塑性流动距离变大（针后由后退侧到前进侧的距离变大），进而导致在前进侧的下部易出现回填不饱满的空洞或隧道型缺陷。因此，为兼顾破膜、防止断针与空洞缺陷，搅拌针常被设计成尾部粗（防断针）、端头细（防回填空洞）的台锥状，尖端直径通常在 5 mm 左右。细的针尖头虽然有利于避免搅拌区回填不满的空洞缺陷，但由此带来对“针下根部微区”的扭矩小、任一位置累计摩擦圈数 N_p 少，均不利于 KB 的消除。

2.3 根部摩擦加热温度低、流动抗力大、垫板静摩擦力大

无论针尖头对“针下根部微区”的轴向挤压还是扭转，最终都需借助垂直跨越对接面的“横向流动”来消除根部间隙、实现破膜与紧密接触。但横向流动在根部极为困难：一是根部加热温度低，流动抗力较大；二是强拘束情况下，垫板对根部母材的静摩擦力大，“约束”了针尖扭转与挤压引起“针下根部微区”跨越对接面的横向流动效果，从而影响了根部界面破膜与最终混合。

造成根部温度低的原因有两方面：首先是针尖头的摩擦产热不足（暂不考虑变形热与距离根部微区较远的其他摩擦热源）；其次是冷态宽厚垫板散热较强。根据摩擦热量计算公式^[40]，摩擦表面受轴肩直接摩擦的产热计算公式为

$$Q = (4/3)\pi^2\mu PNR_s^3 \quad (2)$$

根部受针尖头端直接摩擦的产热计算公式为

$$Q = (4/3)\pi^2\mu PNR_p^3 \quad (3)$$

式中： Q ——发热量；

μ ——摩擦系数；

P ——压力；

N ——转速；

R_s ——轴肩半径；

R_p ——搅拌针半径。

摩擦产热 Q 正比于直径的立方，按一般工况中针的直径约为轴肩直径 1/3 来计算，则由针尖头直接产生的对“针下根部微区”的摩擦热量仅为轴肩摩擦热量的 1/27，远小于轴肩对上表面的摩擦热。这样，细针端头的扭矩小、累积摩擦总圈数少、温度低（摩擦产热仅为轴肩的 1/27）、垫板的静摩擦阻力大，上述诸因素共同导致“针下根部横向流动”困难，影响了基于环向流动的破膜与混合。

2.4 现有 FSW 焊机存在无法直接施加横向压力的“天生不足”

现行 FSW 设备有两种，一种是定位置式，搅拌头位置刚性固定，其优点是简易经济（无加压系统）、表面成形起伏小；缺点是难以形成足够直接的轴向压力与间接的横向压力，根部间隙处的塑性流动不足，易引起焊接质量波动，KB 更易残留。另一种是恒压式，搅拌头位置是按恒压闭环反馈自动调整的，根部能得到充足的竖向锻压力，有利于消除搅拌区的空洞缺陷；根部间隙闭合与混合会相对较好。虽然沿垂直于对接面方向直接加压对界面密合效果最为显著，但两种 FSW 焊机均无可直接沿垂直对接面方向加压的“横向加压”系统，原因可能在于工件的刚性固定会严重抵消横向加压的效果。

因此，FSW 对接面根部的紧密接触不能像传统对焊那样垂直于对接界面施加横向压力（焊接过程中）与横向顶锻（焊接结束瞬间）来实现，压力对界面的紧密接触化的贡献只能靠“轴向加压及其产生的跨越界面的横向流动效果”来实现；另外靠扭转产生的环向变形去膜。但在“针下根部微区”，无论“挤压流动去膜”（轴向挤压→横向流动）还是“扭转流动去膜”均很困难（见本文 2.2 节分析， D_p 、 N_p 小所致），在此主要分析前者。

2.5 轴肩对根部母材的扭转驱动效果较弱

如上所述，轴肩将通过两种方式驱动根部母材塑性流动：一是扭转，二是挤压。轴肩的扭转作用在去膜中起首要作用，但易沿厚度梯度衰

减。轴肩倾斜后能产生轴向分压力，优点是能有效传递至根部，不受板厚及沿板厚温度梯度分布的影响，但轴肩的竖向挤压力本身非常有限。

2.6 母材方面的影响（成分、尺寸、表面状态）

首先，Mg 的存在使氧化膜疏松，且比 Al 活泼而更易被氧化，因此，含 Mg 量高的铝合金的氧化膜较厚。不难理解，航空工业用的超硬铝（7 系）、硬铝（2 系）；航海 LNG 船用 5083（5083 也用于空分制氧行业的低温压力容器等）以及航海用 6 系都是 KB 的“重灾区”。

其次，随板厚的增加，轴肩对根部的热-力作用均减弱。轴肩挤压的作用对象为整个板厚，轴肩对根部的挤压力与上部相同，不会被衰减（挤压载荷在沿板厚方向任一水平截面上的总值相同，但挤压变形沿板厚分布不同）。但轴肩对根部的扭转作用因上部母材的弹塑性变形而衰减较为显著。

再次，大型结构件焊道越长，待焊面因热传导的积累，界面温度会不断升高，氧化膜将随之增厚，破膜所需塑性流动距离越大，客观上增大了塑性流动去膜的困难度。所以，含 Mg 铝合金中厚板的长焊道末端，更能体现 KB 的存在与危害。若对接面粗糙度过大、装配间隙过大，导致闭合间隙与破除氧化膜所需流动变形程度变大，KB 易于出现。因此，长焊道须要求更严。

2.7 对规范参数（尤其是压入深度、倾角）的敏感性与矛盾性

FSW 的“摩擦”主要指轴肩/工件表面之间的摩擦，具有摩擦产热与驱动表层流动的效果，“搅拌”主要指针的旋转对其周边材料施加塑性变形的的方式与效果。在以针为核心的搅拌过程中，以“剪切”为主的针前搅拌较易实现（只要不断针即可），但以“回填-沉积-焊合”为主的针后塑性流动较为困难，原因在于针后瞬时空腔导致针的后半部分表面与针后流动母材的密切接触不良，需借助轴肩的挤、推、扭以及针上螺纹的摩擦牵引（前提是针的后表面与针后母材能接触上）等复杂的综合作用，通过顺序递进式流动才能实现，对工具直径、规范（如转速、倾角、压入深度）的配合有较高要求，否则将引起回填不致密、弱连接内界面等缺陷。

在主轴转速、焊速、压入深度、倾角四项参

数中，空洞缺陷对前两者敏感，因为前两者决定热输入（由机器决定，波动率相对较小，随机误差小）；KB 对后两者敏感，因为后两者决定针尖端面与母材底面间实际距离分布。压入深度可增大参数窗口范围^[6]，有利于产生微幅横向流动，强化流动金属与前进侧剪切面间的重新焊合，尤其在轴肩小、热输入偏小的工况^[4]，从而使工艺过程更加稳定。但 KB 对压入深度最为敏感，一是由于它直接决定针尖距离底面的实际高度；二是由于其取值范围本身很小（ $\leq 0.5 \text{ mm}$ ），易受焊机刚度、床身振动、操作者研判的干扰；三是由于每次焊接前须重新进行预定操作，随机误差较大。

倾角使轴肩与搅拌针兼具摩擦加热、挤压、驱动多向流动（环向+竖向）三项综合作用。与无倾角情况相比，倾角的存在有以下优点：①增大了轴肩平移时沿轴向的挤压力分量^[4]；②使轴肩与搅拌针（光面或螺纹）的部分后沿原本水平旋转的线速度转变为斜向下的线速度（见图 2），可产生向下的塑性流动分量，促进挤压与向下流动，改善对针后金属的驱动效果，优化针后塑化材料的塑性流动方向（上述两项效果有利于消除底部空洞）；③摩擦接触面积不易受接触不良的干扰，较为稳定，避免忽大忽小，保证了摩擦与挤压的稳定性；④避免肩前飞边；⑤避免表面减薄后边缘处板厚的突变及其引发的应力集中。

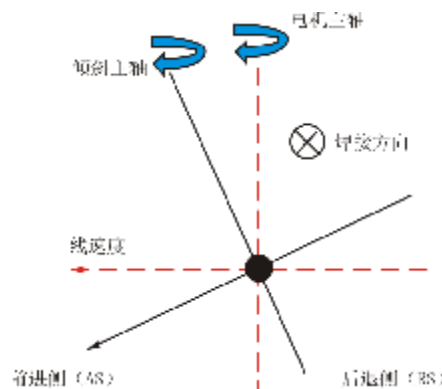


图 2 电机主轴倾斜后工具后沿部分线速度方向变化（由水平变为斜向下）示意图

但倾角造成针尖端面各处与母材底面实际距离呈现不等分布（出现分布场），增大了针尖前沿到母材底面的实际瞬时距离，削弱了针尖整体

对针下母材的扭转效果。但倾角一旦设定好,主要取决于焊机的精度与刚度,随机误差小。

热输入增大(增大转速或减小焊速)虽有利于降低流动抗力、增大扭转圈数、强化流动效果,但界面氧化膜亦随之增厚,破膜所需塑性流动距离越大。在含 Mg 铝合金的钎焊与扩散焊研究中,曾有文献报道,随着表面 Mg 的氧化,内部的 Mg 原子会向表面迁移,使氧化膜不断快速增厚。针对“搅拌区空洞缺陷”与“根部 KB 缺陷”的矛盾,研究与技术人员往往首先关注的是用大热输入消除“搅拌区空洞缺陷”,但 Mg 含量高,氧化膜疏松且易增厚,出现了无法兼顾同时消除空洞与 KB 的矛盾。因此,在含 Mg 合金的 FSW 中,出现高热输入条件所得接头性能反而不如低热输入接头性能^[30]。

可见,针长较短、针尖较细(影响产热、力偶矩、摩擦总圈数 N_p)、压力的方向与大小均不理想(缺乏直接的水平加压装置)、距离轴肩扭转所及区域远等因素导致横向流动困难;而微幅扭转也只是使母材统一按针的方向流动,不能相向扭转;多因素导致在搅拌区外的“针下根部微区”,无论“挤压流动去膜”还是“扭转流动去膜”均很难消除根部的“弱连接”。而 Mg 的存在使氧化膜疏松增厚,要求更大的流变程度才能破除,因此“高镁高强”铝合金对 KB 缺陷更敏感。

3 根部弱连接 (KB) 消除方法

迄今已报道的消除 KB 的方案除了调整参数进行补焊外,有针对性地消除 KB 方法主要

有以下几种。

3.1 反面补焊工艺

马宗义与任淑荣^[43,41]提出了在正面焊完后,再在反面追加一道补焊工艺。该方法能简易、可靠地消除 KB 缺陷。但存在工件的拆装等辅助工序费时、且背面摩擦引起二次减薄的问题。

3.2 采用双轴肩 FSW (bobbin tool FSW, BT-FSW)

双轴肩虽能消除根部 KB^[44],但弊端也较多:①始末端材料流失严重^[45-46];②工具不能倾斜施加挤压力,中心有微孔;③双面减薄,上、下表面均有减薄;④SZ/(AS-TMAZ)边界有微孔,软化范围宽,规范窗口窄^[47]。若非中空结构件,该方法的优点并不突出。

3.3 斜穿透针+带盲孔静止下肩

最近哈尔滨工业大学刘会杰^[48-49]提出了如图 3 所示的“静轴肩支撑搅拌针倾斜穿透 (Penetrating FSW, PFSW)”新方法。该方法由于针尖穿透板厚,深入板下静肩的盲孔中,所以全部板厚范围均能被针直接搅拌,消除了根部搅拌不足的问题。同时,在背面成形方面,未采用固定式垫板,而用上述带有中心盲孔的、以滑动摩擦的方式随搅拌针前行的静轴肩。静轴肩有利于克服传统双肩 FSW 易断针、双面减薄的问题,也有利于降低热输入。对 5 mm 厚 2219-T6 母材,相比传统 FSW,该方法 (PFSW) 采用 6 mm 长的针,不仅消除了根部弱连接,而且强度与延伸率分别由 337 MPa 和 6.6% 提高至 354 MPa 和 7.5%,根部也获得了等轴细晶。但由于静肩与母材底面的滑动摩擦也会引起少量板材的减薄,因此另需设置轨道。

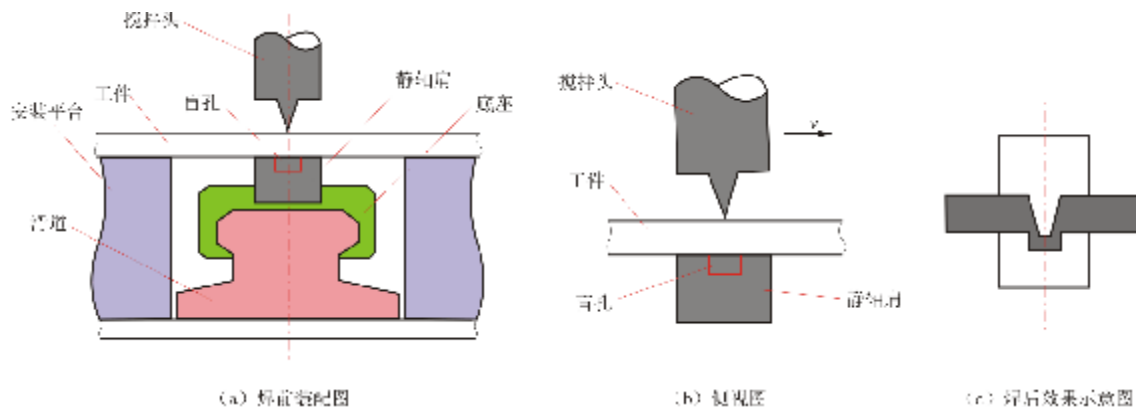


图 3 “静轴肩支撑搅拌针倾斜穿透”搅拌摩擦焊接新方法示意图^[48]

3.4 基于液相溶解代替塑性流动的“根部钎焊辅助的搅拌摩擦对接焊 (RB-FSW)”

本研究作者在前期搅拌摩擦搭接焊 (FSLW) 研究中率先提出向界面中引入钎料, 研发了无针搅拌摩擦钎焊 (FSB) 新工艺^[50-51], 以解决 FSLW 存在的下列问题: 焊道狭窄、搅拌区混合不良、搅拌区边缘有钩型缺陷、匙孔及针尖磨损、导入/导出板耗材成本高。FSB 中钎料的加入有利于共晶反应去膜, 拓展单道焊合宽度, 可用于 Al/Al、Al/异种金属搭接焊, 尤其在复合板与复合管制备方面有其应用潜力^[37,50,52]。对于搅拌摩擦对接焊 (FSBW) 中的难搅拌局部, 作者再次率先提出通过向 FSBW 中的关键局部——难搅拌局部 (或整体界面) 导入钎料, 用溶解母材的方法代替塑性流动, 以降低对塑性流动的苛求。

针对 KB 这一源于搅拌不足、位于底部的特殊缺陷, 作者提出一种“根部钎焊辅助的搅拌摩擦对接焊” (root brazing/soldering assisted friction stir butt welding, RB-FSW 或 RB-FSBW) 新方法^[45,53], 即在根部下方预置能与母材发生共晶反应或能显著溶解母材的钎料, 利用摩擦热 (主要靠轴肩) 激发钎料/根部母材间的共晶反应形成初期共晶液相, 再借助旋转针尖对针下固相的变形 (扭转与剪切) 与活化作用和对针下液相的间接搅拌作用 (反应区位于针尖之下的热影响区), 促进母材快速非平衡溶解, 实现去膜、润湿、合金化与混合, 由此消除根部微区弱连接缺陷, 以降低对根部塑性流动的苛求。同时维持在绝大多数厚度范围内 (搅拌区) 仍然为 FSW 锻造组织的优势。

图 4 是作者提出的“用液相溶解消除 KB

(以降低对根部塑性流动的苛求) 并同步形成背面加强高 (以弥补减薄与软化)”的方案示意图, 其优点归纳如下:

(1) 简单性与多样性。①无需变更焊具与工装, 仅需焊前在对接面下方与平垫板之间水平预置能显著溶解母材的钎料 (例如, 对 Al、Cu 母材, 均可预置 Zn 基钎料); ②既可用于焊接, 也可用于修复。

(2) 提高稳定性与安全性。①保证了连续生产的稳定性, 避免了 KB 对压入深度、长焊道针尖磨损与位置“微幅变化”的敏感性; ②同时消除 KB 尖端的应力集中与 KB 尾部的直通表面特征; ③允许焊后热处理 (PWHT) 恢复硬度 (有 KB 的 FSW 接头在 PWHT 中会出现微裂纹^[28-30])。

(3) 无二次减薄。背面无需任何旋转轴肩或滑动的轴肩, 可以避免背面二次减薄。

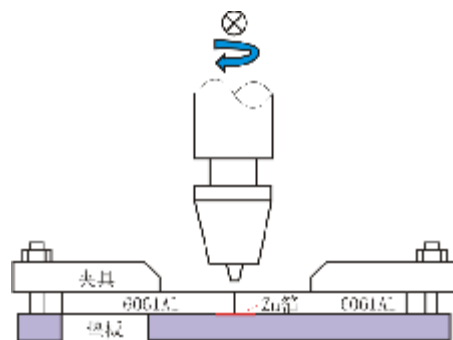
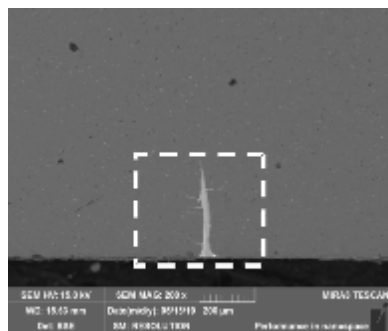
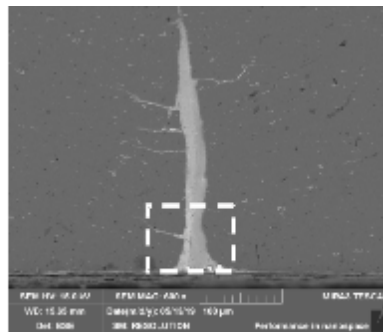


图 4 能消除 KB 的“根部钎焊辅助搅拌摩擦焊 (RB-FSW)”方法示意图^[45,53]

图 5 为利用根部预置 Zn 箔钎料消除 6061Al 板 KB 缺陷的试验验证结果 (背散射照片)。结果显示: ①界面致密; ②根部溶解填充深度约 0.2 mm; ③填充区 $w(\text{Al})$ 高达 70% 左右 (原为纯



(a) 250X



(b) 600X

图 5 利用根部预置 Zn 箔钎料消除 6061Al 板 KB 缺陷试验结果 (背散射照片)

Zn, 可见溶解极为显著)。钎料可采用立插、平铺、预折等多种放置方式。该结果证明了作者提出的利用局部 (仅在根部预置能显著溶解母材的钎料) 液相溶解消除 KB、从而降低对根部塑性流动苛求思路的有效性 (待批专利^[53])。

4 结束语

针对比空洞更为棘手的由搅拌不足引起的根部弱连接, 作者提出将钎焊理论与技术应用到 FSW 中, 即仅仅在关键局部——搅拌困难局部预置钎料, 利用钎料与根部母材的共晶反应形成液相, 将难搅拌的固相转化为易流动、易搅拌的液相, 实现溶解母材、去膜与合金化, 从而改善弱驱动力情况下的难搅拌局部的流动混合效果, 降低对难搅拌局部塑性流动的苛求。对于根部 KB 缺陷, 提出了“根部钎焊辅的搅拌摩擦对接焊 (RB-FSBW)”新方法, 即在根部下方与垫板之间预置能与母材发生共晶反应的钎料 (视需要在根部界面间预置钎料), 在液相形成后, 向上溶解针下固态母材 (温度高、变形大), 实现去膜与混合, 消除 KB 缺陷。该方法首创向 FSBW 根部导入液相, 减小根部流动阻力, 改善其流动困难性, 同时保留绝大多数厚度范围仍为 FSW 锻造组织, 具有简易、无减薄的优点。

参考文献

- [1] THREADGILL P L, LEONARD A J, SHERCLIFF H R, et al. Friction stir welding of aluminium alloys [J]. *International Materials Reviews*, 2009, 54(2): 49-93.
- [2] 姬书得, 黄若飞, 吴宝生. 搅拌摩擦焊修复技术的研究现状[J]. *沈阳航空航天大学学报*, 2017, 34(5): 1-11.
- [3] 黄永宪, 陈磊, 谢聿铭, 等. 搅拌摩擦焊缝缺陷固相修复技术研究进展[J]. *辽宁石油化工大学学报*, 2019, 39(2): 90-95.
- [4] 周利, 韩柯, 刘朝磊, 等. 2219 铝合金搅拌摩擦焊接头缺陷补焊[J]. *航空材料学报*, 2016, 36(1): 26-32.
- [5] 刘会杰, 潘庆, 孔庆伟, 等. 搅拌摩擦焊焊接缺陷的研究[J]. *焊接*, 2007(2): 17-21.
- [6] 赵衍华, 林三宝, 吴林. 2014 铝合金搅拌摩擦焊接头缺陷分析[J]. *焊接*, 2005(7): 9-12.
- [7] 张忠科, 孙丙岩, 王希靖, 等. 铝合金搅拌摩擦焊焊接缺陷分析[J]. *热加工工艺*, 2006, 35(19): 13-15.
- [8] 孔凡校. 铝合金搅拌摩擦焊接缺陷分析及工艺优化[J]. *铸造技术*, 2014(9): 2118-2120.
- [9] ZHOU Caizhi, Yang Xinqi, Luan Guohong. Effect of oxide array on the fatigue property of friction stir welds [J]. *Scripta Materialia*, 2006, 54(8): 1515-1520.
- [10] 杨新岐, 秦红珊. 铝合金搅拌摩擦焊技术研究存在的问题及趋势[J]. *焊接*, 2009(7): 24-33.
- [11] 李继忠, 孙占国, 高崇. 根部未焊透对搅拌摩擦焊接接头力学性能的影响[J]. *电焊机*, 2014, 44(4): 18-22.
- [12] 米鹏, 王瑞杰, 杨庆鹤. 5083 铝合金带吻接 FSW 接头疲劳强度分析[J/OL]. *机械科学与技术*, (2020-04-16) [2020-04-20]. <https://kns.cnki.net/kns8/defaultresult/index>.
- [13] 张华, 林三宝, 吴林. AZ31 镁合金搅拌摩擦焊接头断裂机制[J]. *材料工程*, 2005(1): 34-36.
- [14] 王希靖, 张杰, 牛勇. 焊接速度对 7050-T7451 铝合金搅拌摩擦焊接头疲劳性能的影响[J]. *宇航材料工艺*, 2008(4): 66-69.
- [15] SHEN Z K, YANG X Q, ZHANG Z H, et al. Micro-structure and failure mechanisms of refill friction stir spot welded 7075-T6 aluminum alloy joints [J]. *Materials & Design*, 2013(44): 476-486.
- [16] 刘会杰, 李金全, 段卫军. 静止轴肩搅拌摩擦焊的研究进展[J]. *焊接学报*, 2012, 33(5): 108-112.
- [17] 张华, 赵常宇, 林三宝. 7050-T7451 铝合金静轴肩搅拌摩擦焊接头组织与性能研究[J]. *焊接*, 2018(9): 5-9.
- [18] XU N, UEJI R, MORISADA Y, et al. Modification of mechanical properties of friction stir welded Cu joint by additional liquid CO₂ cooling [J]. *Materials & Design*, 2014(56): 20-25.
- [19] XU N, SONG Q N, BAO Y F, et al. Twinning-induced mechanical properties' modification of CP-Ti by friction stir welding associated with simultaneous backward cooling [J]. *Science and Technology of Welding and Joining*, 2017, 22(7): 610-616.
- [20] XU N, SONG Q N, BAO Y F. Structure-properties' modification of 70/30 brass by large-load and low-speed friction stir processing [J]. *Materials science and Technology*, 2018, 34(14): 1768-1772.
- [21] DICKERSON T L, PRZYDATEK J. Fatigue of friction stir welds in aluminium alloys that contain root flaws [J]. *International Journal of Fatigue*, 2003, 25(12): 1399-1409.
- [22] 岡村久宣, 青田欣也, 坂本征彦, 等. アルミニウム合金摩擦攪拌接合部の酸化物の挙動及びその機械的特性に及ぼす影響[J]. *溶接学会論文集*, 2001, 19(3): 446-456.
- [23] OKAMURA H, AOTA K, SAKAMOTO M. Behaviour of oxides during friction stir welding of aluminium alloy and their effect on its mechanical properties[J]. *Welding International*, 2002, 16(4): 266-275.
- [24] OOSTERKAMP A, OOSTERKAMP L D, NORDEIDE A. Kissing bond phenomena in solid-state welds of aluminum alloys[J]. *Welding Journal*, 2004, 83(8): 225-231.

- [25] SATO Y S, YAMASHITA F, SUGIURA Y, et al. FIB-assisted TEM study of an oxide array in the root of a friction stir welded aluminium alloy[J]. Scripta Metallurgica, 2004, 50(3): 365-369.
- [26] SATO Y S, TAKAUCHI H, PARK S H C, et al. Characteristics of the kissing-bond in friction stir welded Al alloy 1050[J]. Materials science and Engineering: A, 2005, 405(1-2): 333-338.
- [27] LIU H J, CHEN Y C, FENG J C. Effect of zigzag line on the mechanical properties of friction stir welded joints of an Al-Cu alloy[J]. Scripta Materialia, 2006, 55(3): 231-234.
- [28] 邢丽, 陈爱华, 刘鸽平. 焊接参数对 LY12 铝合金 FSW 焊缝 S 曲线形成的影响[J]. 焊接学报, 2010, 31(5): 9-12.
- [29] 戴启雷, 王秀义, 侯振国, 等. 焊接速度对 AA6082 搅拌摩擦焊接头根部缺陷及性能的影响[J]. 焊接学报, 2015(8): 31-34, 118.
- [30] DAI Q L, WANG X Y, HOU Z G, et al. Microcavities accompanying a zigzag line in friction stir welded A6082-T6 alloy joint[J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2015, 20(1): 68-74.
- [31] 王快社, 王训宏, 沈洋. 搅拌摩擦焊接接头的静载力学行为和疲劳特性[J]. 稀有金属材料与工程, 2007, 36(9): 1588-1591.
- [32] 王快社, 张小龙, 王训宏. 搅拌摩擦与氢弧焊铝合金接头疲劳性能的比较[J]. 材料研究学报, 2009, 23(1): 73-76.
- [33] ZHOU N, SONG D, QI W, et al. Influence of the kissing bond on the mechanical properties and fracture behaviour of AA5083-H112 friction stir welds[J]. Materials science & Engineering A, 2018(719): 12-20.
- [34] ZHANG H, LUO S, XU W. Influence of welding speed on zigzag line feature and tensile property of a friction-stir-welded Al-Zn-Mg Aluminum Alloy[J]. Journal of Materials Engineering & Performance, 2019, 28(3): 1790-1800.
- [35] 杨新岐, 秦红珊. 铝合金搅拌摩擦焊接头的疲劳性能[J]. 中国科技论文在线, 2011, 6(2): 109-114.
- [36] 杨新岐, 吴铁, 张家龙, 等. 厚板铝合金 FSW 和 MIG 焊接接头疲劳性能[J]. 焊接学报, 2012, 33(5): 5-8.
- [37] JOLU T L, MORGENEYER T F, DENQUIN A. Fatigue lifetime and tearing resistance of AA2198 Al-Cu-Li alloy friction stir welds: Effect of defects[J]. International Journal of Fatigue, 2015(70): 463-472.
- [38] REN S R, MA Z Y, CHEN L Q. Effect of initial butt surface on tensile properties and fracture behavior of friction stir welded Al-Zn-Mg-Cu alloy [J]. Materials science & Engineering A, 2008, 479(1-2): 293-299.
- [39] 戴明亮, 胡志力, 万心勇, 等. S 线对搅拌摩擦焊热处理接头力学性能的影响[J]. 金属热处理, 2017, 42(7): 46-50.
- [40] 社团法人溶接学会. 摩擦搅拌接合[M]. 东京: 産報, 2006.
- [41] ZHANG G F, SU W, ZHANG J, et al. Visual observation of effect of tilting tool on forging action during FSW of aluminium sheet[J]. Science & Technology of Welding & Joining, 2013, 16(1): 87-91.
- [42] 张贵锋, 朱大恒, 邝吉涛. 搅拌摩擦钎焊及其在异种金属搭接焊与复合板制备中的应用[J]. 精密成形工程, 2020, 12(1): 20-29.
- [43] 任淑荣, 马宗义, 陈礼清, 等. 焊后热处理工艺和背部二次焊接对搅拌摩擦焊接 7075-T651 铝合金性能的影响[J]. 金属学报, 2007, 43(3): 225-230.
- [44] 周利, 刘朝磊, 王计, 等. 双轴肩搅拌摩擦焊技术研究现状[J]. 焊接, 2015(6): 20-24, 79.
- [45] 朱大恒. 利用工具与焊材消除搅拌摩擦焊根部缺陷的研究[D]. 西安: 西安交通大学, 2019.
- [46] 陈书锦, 曹福俊, 刘彬, 等. 6061 铝合金双轴肩搅拌摩擦焊接扭矩特征[J]. 焊接学报, 2016, 37(8): 50-54.
- [47] YANG C, NI D R, XUE P, et al. A comparative research on bobbin tool and conventional friction stir welding of Al-Mg-Si alloy plates[J]. Materials Characterization, 2018(145): 20-28.
- [48] LIU H, HU Y, WANG H, et al. Stationary shoulder supporting and tilting pin penetrating friction stir welding [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2018(255): 596-604.
- [49] HU Y, LIU H, LI S, et al. Improving mechanical properties of a joint through tilt probe penetrating friction stir welding[J]. Materials science and Engineering A, 2018, 731(25): 107-118.
- [50] 张贵锋, 苏伟, 韦中新. 搅拌摩擦钎焊制备铝/钢防腐双金属复合板新技术[J]. 焊管, 2010, 33(3): 18-24.
- [51] ZHANG G F, SU W, ZHANG J, et al. Friction stir brazing: a novel process for fabricating Al/Steel layered composite and for dissimilar joining of Al to steel[J]. Metallurgical & Materials Transactions A, 2011, 42(9): 2850-2861.
- [52] 凌星中. 冶金结合复合钢管研制和应用[J]. 焊管, 2006, 29(1): 42-46.
- [53] 张贵锋, 朱大恒, 杨小辉. 一种利用液相挤入消除搅拌摩擦焊根部缺陷的方法: 201910959358.X[P]. 2019-10-10.

作者简介: 张贵锋 (1965—), 博士, 教授, 主要从事熔焊、固相焊与钎焊方法教研工作。

收稿日期: 2020-04-25

编辑: 李超