

异种合金惯性摩擦焊的研究现状

刘莹莹¹, 李洁洁¹, 田万涛¹, 吴方林², 谭千辉³

(1. 西安建筑科技大学, 西安 710055; 2. 铁科院工程咨询有限公司, 北京 100081; 3. 山西风雷钻具有限公司, 山西 侯马 043013)

摘要: 文中针对钢与其他合金、铝合金与其他合金、钛合金与其他合金、高温合金与其他合金的惯性摩擦焊的研究现状进行了阐述。主要对惯性摩擦焊的工艺参数选取、端面设计、焊前预热、焊后热处理等研究内容进行了综述。并对异种合金惯性摩擦焊存在的问题进行了分析总结。结果表明, 采用合理选择工艺参数、设计不同形状的端面、添加中间过渡层、焊前预热处理、焊后热处理等方法获得强度与母材相当、焊接质量较好的接头。建议在后续的研究中, 结合数值模拟对异种合金惯性摩擦焊的工艺参数及端面设计进行优化, 对接头的元素分布及新形成的种类与数量进行调控, 对焊接界面金属的流动行为进行深入研究, 以获得具有综合性能较好的异种合金惯性摩擦焊接头。

关键词: 异种合金; 惯性摩擦焊; 焊接接头; 组织; 性能

中图分类号: TG453

0 前言

随着航空航天等科学技术的发展, 对新材料、新工艺等方面提出了更为苛刻的要求。采用异种合金构件可以充分发挥两种材料各自的性能优势且成本较低, 因此在航空航天、汽车制造等行业中得到了广泛应用。目前, 异种金属的焊接方法主要有熔焊和固相焊, 其中惯性摩擦焊(Inertia friction welding, IFW)是固相焊接的一种, 与熔焊相比可有效避免由于金属熔化和凝固所产生的组织偏析、气孔及裂纹等缺陷, 适合焊接性能差异较大的异种材料^[1], 在汽车、石油化工、船舶、航空航天等领域具有广泛的应用前景, 尤其在航空发动机压气机转子及涡轮等发热部件的制造中具有独特的优势^[2]。

目前, 对钢、铝合金、钛合金、高温合金等同质材料惯性摩擦焊接头的组织性能研究较多, 但对异种合金惯性摩擦焊的研究相对较少。文中对钢、铝合金、钛合金、高温合金等异种合金之间的惯性摩擦焊接头的组织性能等方面进行了综述, 提出了异种合金惯性摩擦焊存在的主要问题及后续研究工作的重点, 并对其发

展前景进行了展望。

1 钢与其他合金

钢具有强度高、塑性好等优点, 常用于桥梁、建筑等方面等领域。目前采用异种钢、钢/铜合金等制成的异种合金结构件常用于核电设备、轨道交通和航空航天等领域。

1.1 异种钢

吴玮等人^[3]对 304 不锈钢与 42CrMo 钢进行了惯性摩擦焊, 焊接过程如图 1 所示^[3], 可以看出焊缝无明显气孔、裂纹等缺陷, 焊接界面呈圆弧状, 飞边左右对称, 且 42CrMo 侧飞边较 304 不锈钢侧大; 焊接界面发生了元素扩散, 有少量碳化物生成; 焊缝组织为细小的等轴晶粒, 其强度和硬度均高于母材, 且抗拉强度最大为 687.55 MPa, 均在 304 不锈钢母材处发生韧性断裂。

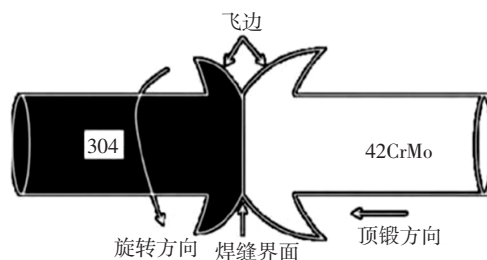


图 1 304 不锈钢/42CrMo 钢惯性摩擦焊焊接过程

在惯性摩擦焊接时旋转速度决定了焊接的能量输入, 决定了接头的成形好坏。秦国梁等人^[4]在 45 钢/

收稿日期: 2020-12-13

基金项目: 陕西省重点研发计划(国际合作项目)(2020KW-033); 陕西省教育厅产业化项目(20JC024); 大学本科生科研训练计划项目(SSRT)。

doi: 10.12073/j.hj.20201213001

37CrMnMo 的惯性摩擦焊研究中,指出旋转速度为 520 r/min 和 560 r/min 时,接头成形较好,飞边呈圆弧状卷曲且分布均匀;利用分层能量估计法,推导出最佳旋转速度为 548 r/min。Xu 等人^[5]指出 1045 碳钢/30CrMnSiNi2A 惯性摩擦焊接接头的拉伸强度和断后伸长率随着旋转速度的增加呈先增后降趋势:当旋转速度为 2 200 r/min 时,接头强度和塑性较高,这是因为热输入较高导致焊接界面发生了板条马氏体、贝氏体、超细铁素体和渗碳体的相变,使得焊缝的强度和韧性得到提高;而当旋转速度为 1 000 r/min 时,在焊缝处发生断裂,这主要与热输入较低及焊接界面存在夹杂物等有关。

1.2 钢/铜合金

Wang 等人^[6-9]在 35CrMnSi/T3Cu 惯性径向摩擦焊的研究中指出,在焊接界面处发生了 Fe 和 Cu 元素的扩散且产生了少量的 FeCu₄ 和 Cu₉Si 金属间化合物。当飞轮旋转速度为 3 000 r/min 时,焊接界面形成了明显的波浪状“咬合”,金属间化合物的含量降低,接头性能良好。Mumin 等人^[10]提出 AISI 304/Cu 惯性摩擦焊接接头的抗拉强度随摩擦时间和摩擦压力的增加而增加;当摩擦时间为 8.5 s,压力为 75 MPa 时,接头的性能最佳。Kurt 等人^[11]研究了压力和时间对 AISI 1010/ASTMB 22 铝青铜惯性摩擦焊的影响,结果表明接头硬度随着压力的增大不断增大,而随顶锻压力、时间的增加不断降低;焊接过程中,在铜侧发生了塑性变形,这主要与铝青铜的屈服强度低和热传导率高有关。

2 铝合金与其他合金的连接

铝及铝合金具有质量轻、强度高特点,主要应用于航空、航天、电工、电子技术等领域。随着科学技术和工业经济的快速发展,对铝合金/不锈钢、异种铝合金之间、铝合金/镁合金等异种合金连接件的需求日益增多,尤其在航空航天、汽车、冶金等工业领域中具有广泛的应用前景。

2.1 铝合金/不锈钢

在铝合金/不锈钢惯性摩擦焊时,焊接界面均发生了元素扩散,产生了少量的以 FeAl, FeAl₃, Fe₂Al₅ 为主的金属间化合物^[12-17],而焊接工艺参数的选取、端面的设计等均影响了焊接接头金属间化合物的生成。Taban 等人^[13-15]分别对 6061-T6/AISI 1018 钢、2A14/0Cr18Ni9Ti 铝合金进行了惯性摩擦焊,通过优化焊接参数,可有效控制金属间化合物层的厚度,得到强度与

铝母材相当、质量较好的接头。王世路^[15]还指出旋转速度为 1 100 r/min,摩擦压力为 180 MPa 时,接头强度可以达到铝合金母材的 75%,为 321.5 MPa。范如源等人^[16]通过添加中间过渡层的方法,实现了 F6 铝合金和 HR-2 抗氢钢的有效连接,并且指出金属间化合物的厚度在高旋转速度和短时间时可得到有效控制。Ashfaq 等人^[17]对 AISI304 不锈钢端面进行无锥度、外锥度和内锥度的设计如图 2 所示^[17]。结果表明,当采用外锥度为 15°时,AA6061 铝合金的烧损量最低,接头强度最高,这是因为该端面增加了两种材料的接触面积,使得铝合金可以更好地流动,有助于焊接界面中杂质和金属间化合物等有害物质更好地被挤出,从而改善了接头的性能,得到了质量优良的接头。

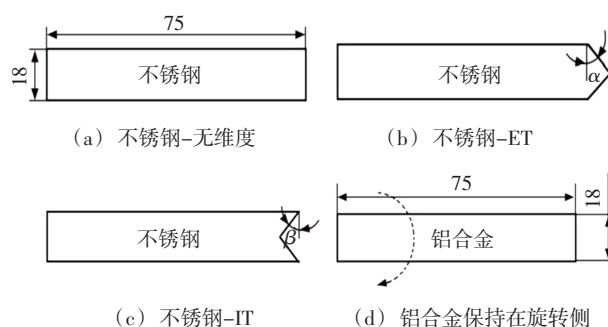


图 2 基材棒设计示意图

2.2 铝合金与其他合金

吴玮等人^[18]研究了焊接参数对 7A04/6061 异种铝合金惯性摩擦焊的影响。结果表明,当摩擦旋转速度 3 100 r/min,顶锻旋转速度 2 000 r/min,摩擦压力 2 MPa,顶锻压力 2.5 MPa 时,接头组织为细小的等轴晶,其焊缝的硬度最高,抗拉强度与 6061 母材相当。Lu 等人^[19]研究了旋转速度对 7005/5083 异种铝合金惯性摩擦焊接接头强度的影响,指出接头抗拉强度随旋转速度的增加而增加,当旋转速度为 3 000 r/min 时,强度可达 5083 铝合金母材的 88%。Kimura 等人^[20-21]研究了 7A04/AZ31 镁合金的惯性摩擦焊,均观察到焊接界面产生了少量的以 Mg₁₇Al₁₂ 和 Mg₂Al₃ 为主的金属间化合物。文献^[21]以锌合金为中间层,实现了铝和镁合金的有效结合,金属间化合物层的厚度随摩擦压力的增加而减少,而抗拉强度不断增大,且在摩擦压力为 124 MPa 时最大,为 96 MPa。

袁毅^[22]研究了旋转速度和压力对 7A04/T2 紫铜环的影响,结果表明,当旋转速度为 4 100 r/min,顶锻旋转速度为 2 000 r/min,顶锻压力和摩擦压力分别为

8.0 MPa 和 4.0 MPa 时,焊接界面产生塑性变形层、动态再结晶、元素扩散互溶,实现了冶金结合,形成了质量稳定的接头。Lee 等人^[23]指出 Al/Cu 惯性摩擦焊接头金属间化合物的厚度随退火时间和温度的增加而增加,而抗拉强度不断减小;当参数选择合适时,金属间化合物的厚度得到了较好地控制,接头的质量得到改善。

3 钛合金与其他合金的连接

钛及钛合金具有强度高、耐蚀性能优异、焊接性好等优点,主要应用于船舶、航空航天、核能、石油化工等领域。目前,异种钛合金、钛合金/低碳钢、钛合金/镁合金等结构件被广泛应用于船舶、载人深潜、化工、海洋工程、航空航天等领域。

3.1 异种钛合金

王钦伟等人^[24]研究了 TC4/TC11 惯性摩擦焊接头组织性能。结果表明,在焊接过程中,焊缝组织发生了明显细化,出现亚晶粒和一定量的再结晶晶粒,而热影响区组织其母材相似,但晶粒尺寸略大于母材。贺建超等人^[25]研究了焊态和热处理对 TC17/Ti600 钛合金惯性摩擦焊接接头组织的影响如图 3 所示,结果表明在焊态下,TC17 侧晶界及 α 相发生扭曲变形,且 β 晶粒发生动态再结晶形成了细小的等轴晶,而热处理后组织为细小的层片状 α 相;Ti600 侧发生了再结晶形成细小的由片层状 α 相和 β 亚稳态相组成的等轴晶粒,经热处理后组织为针状 α 相,且 α 相长大;接头的硬度最高且强度与 Ti600 母材相当。

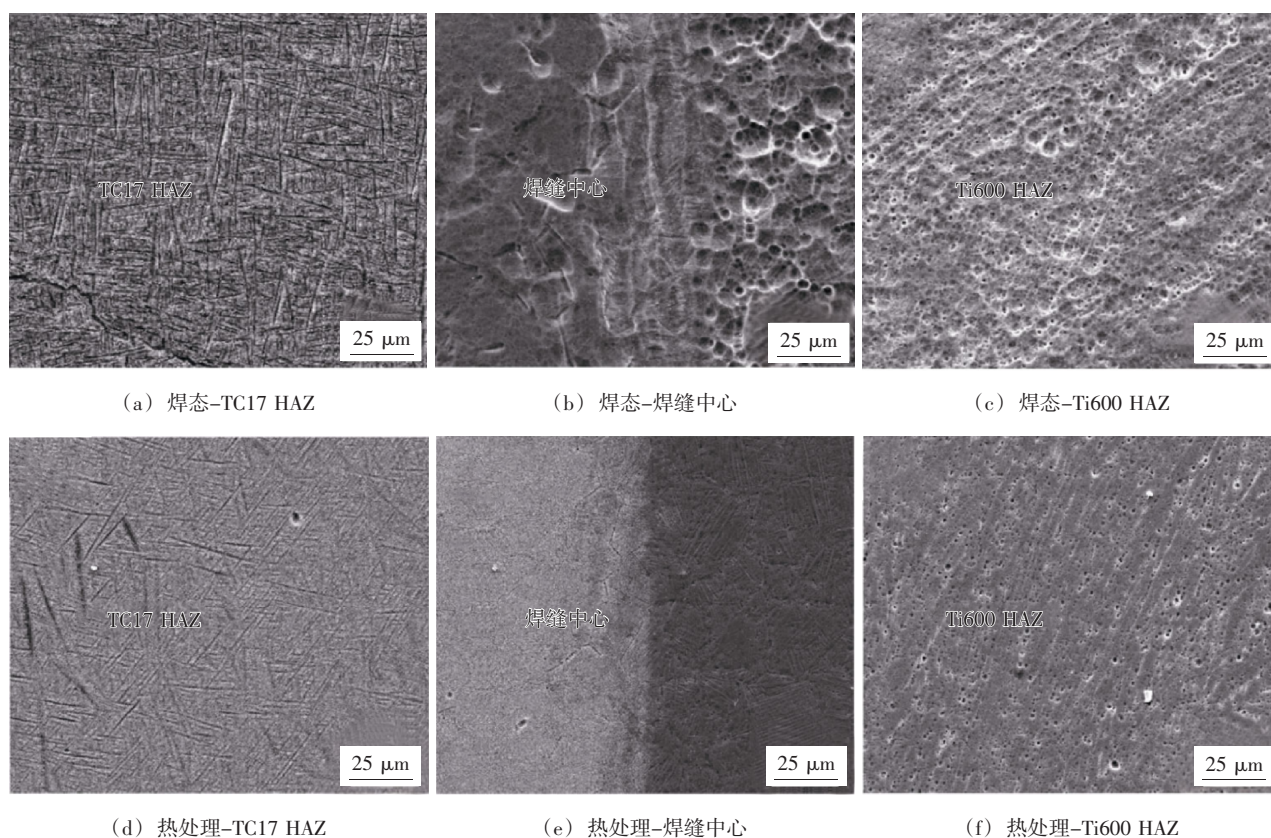


图3 焊态/热处理后 Ti600/TC17 钛合金惯性摩擦焊接头显微组织

赵张龙等人^[26]通过惯性摩擦焊与等温变形相结合的方法制备出 IMI834/Ti6246 双钛合金缩比盘。结果表明,经惯性摩擦焊后焊缝组织细小,但两侧热影响区组织粗大,这是因为双合金缩比盘内部存在缺陷,导致其热影响区组织粗大;而通过等温变形处理后可有效消除焊后缺陷,明显改变两侧热影响区的组织,得到的焊缝组织更加细小且均匀。

3.2 钛合金/钢

Li 等人^[27]研究了热处理对 TC4/316L 不锈钢惯性摩擦焊接接头组织性能的影响。TC4 钛合金侧发生了足够变形,界面为凸形,且产生了较大的飞边,而 316L 不锈钢侧为凹形,这主要是因为 TC4 钛合金中心位置的温度较低,而在边缘位置的温度较高,形成了凸形界面,而 316L 不锈钢刚好相反;焊缝的硬度高于母材;焊

态下接头的拉伸强度仅为 117 MPa, 而通过热处理后接头强度达到 419 MPa。然而, 由于金属内部存在的缺陷在机加工后变成表面裂纹, 从而引起了应力集中, 降低了试样的强度, 即使通过焊后热处理强度仍相对较弱, 且在界面处产生 TiC , $Cr_{23}C_6$, $FeTi$, Fe_2Ti 等脆性相, 接头发生脆性沿晶断裂。

Kimura 等人^[28]研究了焊接工艺参数对低碳钢/Ti-6Al-4V 惯性摩擦焊接接头的连接情况, 得知采用较高的锻造压力可实现焊接界面的完全连接, 较高的摩擦压力和适当的摩擦时间可以防止金属化合物层的产生。Kumar 等人^[29-30]均采用中间过渡层的方法, 研究了 TC4/304L 不锈钢惯性摩擦焊工艺。文献[29]以纯铜为中间层可以明显改善钛/钢接头的脆性, 拉伸强度最大可达 370 MPa。文献[30]通过对 304L 不锈钢表面电镀一层纯 Ni 层, 从而提高接头的拉伸强度, 但会在焊接界面产生 TiNi 低脆性相, 导致接头在钛/镍界面发生脆性断裂, 所以需要更进一步地探索和研究。

3.3 钛合金与其他合金

文恒玉等人^[31-32]研究了摩擦压力对 ZK60 镁合金/纯钛惯性摩擦焊接接头的的影响, 得知在焊接过程中焊接界面发生了 Mg, Zr 和 Zn 元素的迁移, 形成了一层薄的 $TiZn_{16}$, $Mg_{0.9}Zn_{0.03}$ 和 $MgZn_2$ 等金属间化合物反应层, 对焊接界面有一定的影响; 随摩擦压力的增加, 接头的硬度呈先增后降趋势, 但均高于母材, 而抗拉强度不断增大, 且在摩擦压力为 60 MPa 时达到最大, 为镁合金母材的 58%。当焊接参数选取合适时, 可有效降低其金属化合物的厚度, 从而改善接头的性能。傅莉等人^[33]研究了外加电磁场对 TC4/LD10 铝合金惯性摩擦焊接接头组织性能的影响, 结果表明外加电磁场促进了焊接界面的元素的扩散, 提高了接头的拉伸强度。

4 高温合金与其他合金的连接

高温合金是制造航空发动机、燃气轮机的关键材料, 主要以镍基高温合金为主, 广泛应用于航空、航天、动力和石油化工等行业中。为满足复杂的工况条件和节约成本的要求, 常采用焊接技术将镍基高温合金与其它金属(合金钢、新型高温合金等)连接起来, 用于制造高推比航空发动机涡轮盘等热端部件。

4.1 K418 镍基高温合金/合金钢

目前, 对 K418 镍基高温合金与 42CrMo 合金钢

的惯性摩擦焊的相关研究表明, 均可得到强度与母材相当、质量良好的焊接接头^[34-38]。其中, 杜随更等人^[34]在焊接界面处 C 元素从 K418 侧向 42CrMo 侧发生偏移且与其他元素结合形成碳化物, 从而降低了接头的性能, 可通过改善界面的温度来控制碳化物的生成。陈大军等人^[35]在二级压力作用下, 缩短了焊接时间, 元素扩散受到限制、碳化物减少, 得到的接头强度均大于 750 MPa, 接头性能良好。丁煜瀚等人^[36-37]指出由于初始动能的增加, 界面温度升高, C 元素从 42CrMo 向 K418 侧扩散, 实现了良好的冶金结合和机械咬合, 抗拉强度呈先增后降的趋势; 当初始飞轮动能为 50.6 kJ 时, 抗拉强度为 42CrMo 母材的 88%。

Luo 等人^[38]在惯性摩擦焊接过程中通入电流(CIFW), 提高了界面结合强度, 导致抗拉强度由 388 MPa 提高到 549 MPa, 这是由于摩擦热和电阻热的相互作用, 缩短了焊接时间, 增大了接头内元素扩散区的宽度, 促进了元素扩散, 实现了 K418 与 42CrMo 之间的局部咬合、机械互锁和扩散连接的结合, 形成了波浪形的界面结构, 且飞边形状也有所变化, 由“袜子筒形”飞边转变为“蝴蝶翼形”飞边如图 4 所示。但是, 通入电流的惯性摩擦焊不能保证产品的生产效率, 不适合大批量生产。

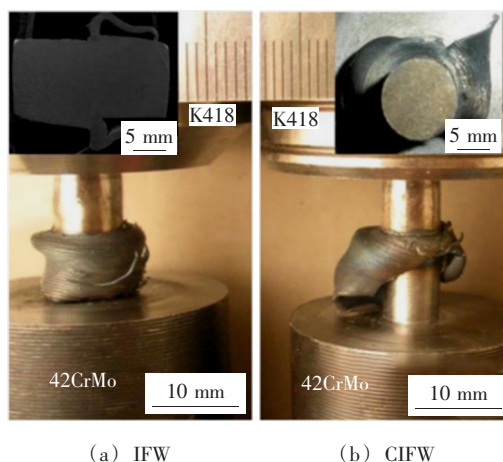


图 4 K418-42CrMo 异种金属摩擦焊接头的组织及外观形貌

李石贤等人^[39-40]为了阻碍接头边缘热塑性材料向外溢出, 对其焊接界面进行了约束设计, 研究了不同界面约束对其接头组织性能的影响。李石贤^[39]指出, 接头的显微硬度、抗拉强度及焊接界面元素扩散的宽度, 均随着界面约束的增加呈先增后降的趋势。支飞博^[40]设计了平面和台阶两种类型的约束如图 5 所示,

同时建立了热、力多物理场耦合的惯性摩擦焊接模型模拟了焊接过程。结果表明,在相同焊接工艺参数下,随界面约束的增加,焊接界面变得复杂,使得两种材料的结合面积增加,元素扩散数量增多,实现了良好的冶金结合,从而提高了接头的强度;显微硬度值整体呈上升趋势,其中台阶约束的效果更加明显。

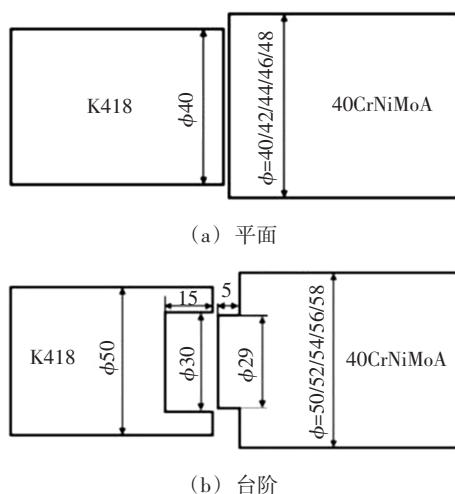


图5 约束方案示意图

4.2 异种高温合金

张春波等人^[41-44]分别研究了GH4169/FGH96镍基粉末高温合金惯性摩擦焊。指出, GH4169和FGH96这两种金属相互嵌入、交错,界面呈曲面状分布;无论采用哪一种焊接工艺参数,得到的焊缝组织均为细小的等轴晶粒,接头硬度呈“W形”分布,抗拉强度随着压力或旋转速度的增大不断增大,最大可达母材的80%。

张传臣等人^[45-46]的研究表明, K447A/GH4169惯性摩擦焊时,在GH4169一侧产生了飞边;经热处理后,焊缝组织为细小的 γ' 和 γ' 相,其抗拉强度与K447A母材相当。Daus等人^[47]研究了RR1000/IN718异种材料惯性摩擦焊接接头裂纹扩展性能的影响。结果表明,裂纹由RR1000扩展至IN718,且在RR1000侧近焊缝区的扩展速率较快,这与晶界氧化物有关。Huang等人^[48]在IN718/720Li的惯性摩擦焊接接头中未发现微孔和微裂纹等缺陷,且在720Li侧具有更宽的热影响区和更高的硬度,这主要与合金中 γ' 增强相以及热处理后析出的 γ' 相含量增多有关,而IN718侧由于 γ' 相粗化导致其硬度降低如图6所示。

Tiley等人^[49-52]研究了Mar-M247/LHSR的惯性摩擦焊, Tiley等人^[49]指出由于LSHR合金中细小的 γ' 和 γ' 沉淀物的再次沉淀导致焊缝附近LSHR侧硬度较高。

Senkov等人^[50]指出界面的热输入能量对试样烧损量、焊接时间、焊缝界面附近温度分布和焊缝质量具有重要影响,当能量为 79 MJ/m^2 时,可以实现LSHR和Mar-M247合金良好的冶金结合;还阐明了惯性摩擦焊接效率随轴向压缩力、焊接总能量和飞轮转动惯量的减小而降低^[51]。并对Mar-M247合金进行局部预热处理,焊接界面的塑性流动和自清洁能力得到提高,两侧形成较大的飞边,焊缝质量得到提高^[52]。

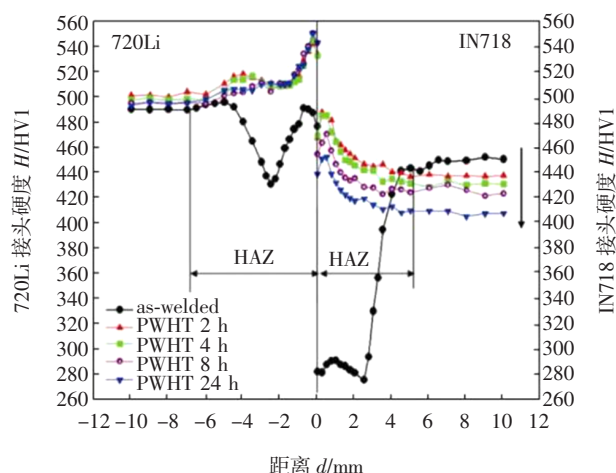


图6 720Li/IN718的IFW接头硬度分布

5 结束语

在异种金属惯性摩擦焊的研究方面,目前可采用合理选择工艺参数、设计不同形状的端面、添加中间过渡层、焊前预热处理、焊后热处理等方法获得强度与母材相当、焊接质量较好的接头。然而,关于异种合金惯性摩擦焊的工艺参数优化、端面优化设计、焊接界面金属的流动行为、焊接界面金属间化合物的控制等方面研究还相对较少。因此,在后续的研究中,需结合数值模拟,对异种合金惯性摩擦焊的工艺参数及端面设计进行优化,对接头的元素分布及新相形成的种类与数量进行调控,对焊接界面金属的流动行为进行深入研究,以获得具有综合性能较好的异种合金惯性摩擦焊接头,从而为异种合金构件在船舶、核电设备、轨道交通、化学化工、海洋工程、航空航天等领域的应用提供理论基础和技术指导。

参考文献

- [1] 李亚江, 吴娜. 先进焊接技术在航空航天领域中的应用[J]. 航空制造技术, 2010(9): 43-47.
- [2] Jeong H S, Cho J R, Oh J S, et al. Inertia friction welding

- process analysis and mechanical properties evaluation of large rotor shaft in marine turbo charger [J]. *International Journal of Precision Engineering & Manufacturing*, 2010, 11 (1): 83 – 88.
- [3] 吴玮, 邓发. 304 不锈钢与 42CrMo 钢惯性摩擦焊工艺 [J]. *重庆理工大学学报*, 2017, 31(12): 72 – 77.
- [4] 秦国梁, 梁永亮, 周军, 等. 初始旋转速度对惯性径向摩擦焊接头成形的影响 [J]. *焊接学报*, 2015, 36(2): 19 – 22.
- [5] Xu X X, You G Q, Ding Y H, et al. Microstructure and mechanical properties of inertia friction welded joints between high-strength low-alloy steel and medium carbon steel [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2020, 286: 116811.
- [6] Wang Y, Luo J, Wang X M, et al. Interfacial characterization of T3 copper/35CrMnSi steel dissimilar metal joints by inertia radial friction welding [J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2013, 68 (5 – 8): 1479 – 1490.
- [7] 罗键, 赵国际, 王向杰, 等. 飞轮旋转速度对 35CrMnSi/T3 惯性径向摩擦焊接特性的影响 [J]. *重庆大学学报*, 2010, 33(9): 24 – 28.
- [8] 罗键, 孙玉, 刘德佳, 等. 小尺寸 T3/35CrMnSi 钢异种材料惯性径向摩擦焊接头的特性 [J]. *中国有色金属学报*, 2010, 20(7): 1309 – 1315.
- [9] Luo J, Zhao G J, Wang X M, et al. Numerical simulation for temperature changes of 35CrMnSi/T3 dissimilar metals joint in radial friction welding [J]. *Advanced Science Letters*, 2011, 4(8 – 10): 2812 – 2816.
- [10] Mumin S, Ender C, Cenk M. Characterization of properties in friction welded stainless steel and copper materials [J]. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2013, 22 (3): 840 – 847.
- [11] Kurt A, Uygur I, Paylasan U. Effect of friction welding parameter on mechanical and microstructural properties of dissimilar AISI1010-ASTMB22 joints [J]. *Welding Journal*, 2011, 90(5): 102 – 106.
- [12] Liu Y, Zhao H Y, Peng Y, et al. Mechanical properties of the inertia friction welded aluminum/stainless steel joint [J]. *Welding in the World*, 2019, 63 (6): 1601 – 1611.
- [13] Taban E, Gould J E, Lippold J C. Characterization of 6061-T6 aluminum alloy to AISI 1018 steel interfaces during joining and thermo-mechanical conditioning [J]. *Materials Science and Engineering A*, 2010, 527 (7 – 8): 1704 – 1708.
- [14] Taban E, Gould J E, Lippold J. Dissimilar friction welding of 6061-T6 aluminum AISI 1018 steel: properties and microstructural characterization [J]. *Materials & Design*, 2010, 31(5): 2305 – 2311.
- [15] 王世路. 铝/钢异种金属惯性摩擦焊接头组织与性能 [D]. 山东: 山东大学硕士学位论文, 2020.
- [16] 范如源, 狄欧, 陈新旭. L6 铝合金与 HR-2 抗氢钢摩擦焊接工艺研究 [C]. 南京: 第 15 届全国特种加工学术会议论文集(下), 2013: 402 – 407.
- [17] Ashfaq M, Sajja N, Rafi H K, et al. Improving strength of stainless steel/aluminum alloy friction welds by modifying faying surface design [J]. *Journal of Materials Engineering & Performance*, 2013, 22(2): 376 – 383.
- [18] 吴玮, 王志堂, 徐晓菱. 异种铝合金惯性摩擦焊组织性能研究 [C]. 兰州: 第二十次全国焊接学术会议, 2015.
- [19] Lu D S, You G Q, Luo J C, et al. Effects of rotational speed on microstructure and mechanical properties of inertia friction-welded 7005-5083 aluminum alloy joints [J]. *Journal of Materials Science*, 2020, 55(26): 12338 – 12352.
- [20] Kimura M, Fuji A, Shibata S. Joint properties of friction welded joint between pure magnesium and pure aluminium with post-weld heat treatment [J]. *Materials & Design*, 2015, 85: 169 – 179.
- [21] Guo W, You G, Yuan G, et al. Microstructure and mechanical properties of dissimilar inertia friction welding of 7A04 aluminum alloy to AZ31 magnesium alloy [J]. *Journal of Alloys & Compounds*, 2017, 695: 3267 – 3277.
- [22] 袁毅. 异种金属材料 7A04 铝-T2 紫铜惯性径向摩擦焊接工艺及机理研究 [D]. 重庆: 重庆大学硕士学位论文, 2015.
- [23] Lee W B, Bang K S, Jung S B. Effects of inter metallic compound on the electrical and mechanical properties of friction welded Cu/Al bimetallic joints during annealing [J]. *Journal of Alloys & Compounds*, 2005, 390(1 – 2): 212 – 219.
- [24] 王钦伟. 钛合金惯性摩擦焊质量超声检测研究 [D]. 重庆: 重庆理工大学硕士学位论文, 2020.
- [25] 贺建超, 张田仓, 何胜春. Ti600/TC17 钛合金惯性摩擦焊接头组织与力学性能研究 [J]. *机械工程学报*, 2017, 53(22): 95 – 100.
- [26] 赵张龙, 宋旭阳, 曹澜川, 等. 等温变形对惯性摩擦焊 IMI834/Ti6246 双钛合金组织与性能的影响 [J]. *稀有金属材料与工程*, 2020, 49(7): 2388 – 2392.
- [27] Li P, Dong H, Xia Y, et al. Inhomogeneous interface structure and mechanical properties of rotary friction welded TC4 titanium alloy/316L stainless steel joints [J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2018, 33: 54 – 63.
- [28] Kimura M, Kusaka M, Kaizu K, et al. Joining phenomena

- and tensile strength of friction welded joint between Ti-6Al-4V titanium alloy and low carbon steel[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2016, 24: 203 – 211.
- [29] Kumar R, Balasubramanian M. Characterization of friction welded titanium alloy and stainless steel with a novel inter-layer geometry[J]. *Surface Review and Letters*, 2017, 24(5): 15 – 18.
- [30] Cheepu M, Ashfaq M, Muthupandi V. A new approach for using interlayer and analysis of the friction welding of titanium to stainless steel[J]. *Transactions of the Indian Institute of Metals*, 2017, 70(10): 2591 – 2600.
- [31] 文恒玉. 镁钛异种材料惯性摩擦焊接头组织及性能[D]. 重庆:重庆大学硕士学位论文, 2019.
- [32] Wen H Y, You G Q, Ding Y H, et al. Effect of friction pressure on ZK60/Ti joints formed by inertia friction welding[J]. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2019, 28(12): 7702 – 7709.
- [33] 傅莉, 杜随更, 白建红. TC4 钛合金与 LD10 铝合金感性摩擦焊接头的组织与性能[J]. *中国有色金属学报*, 2007, 17(2): 54 – 58.
- [34] 杜随更, 傅莉, 王晋伟, 等. K418 高温合金与 42CrMo 钢异种金属摩擦焊接头碳化物带形成机制[J]. *中国有色金属学报*, 2003, 13(2): 323 – 327.
- [35] 陈大军, 徐晓菱, 徐元泽, 等. K418 涡轮盘与 42CrMo 轴异种材料惯性摩擦焊研究[J]. *焊接*, 2008(6): 58 – 60.
- [36] 丁煜瀚. K418 镍基合金涡轮盘与 42CrMo 轴惯性摩擦焊研究[D]. 重庆:重庆大学硕士学位论文, 2019.
- [37] Ding Y H, You G Q, Wen H Y, et al. Microstructure and mechanical properties of inertia friction welded joints between alloy steel 42CrMo and cast Ni-based superalloy K418[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2019, 803: 176 – 184.
- [38] Luo J, Li L, Dong Y, et al. A new current hybrid inertia friction welding for nickel-based superalloy K418 alloy steel 42CrMo dissimilar metals[J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2014, 70: 1673 – 1681.
- [39] 李石贤. 界面约束条件下涡轮增压器转子轴向摩擦焊接质量研究[D]. 重庆:重庆大学硕士学位论文, 2017.
- [40] 支飞博. 异种金属惯性摩擦焊接界面约束与接头质量的关系研究[D]. 重庆:重庆大学硕士学位论文, 2015.
- [41] 张春波, 周军, 张露, 等. GH4169 合金与 FGH96 合金惯性摩擦焊接头组织和力学性能[J]. *焊接学报*, 2019, 40(6): 40 – 45.
- [42] 王彬, 黄继华, 张田仓, 等. FGH96/GH4169 高温合金惯性摩擦焊接头组织与力学性能[J]. *热加工工艺*, 2017, 46(21): 47 – 49.
- [43] 王彬, 黄继华, 张田仓, 等. 压力对 FGH96/GH4169 高温合金惯性摩擦焊接头性能的影响[J]. *焊接学报*, 2018, 39(4): 41 – 44.
- [44] 王彬, 黄继华, 张田仓, 等. 转速对 FGH96/GH4169 高温合金惯性摩擦焊接头组织与力学性能的影响[J]. *焊接*, 2018(9): 57 – 60.
- [45] 张传臣, 赵春玲, 张田仓, 等. K447A + GH4169 惯性摩擦焊工艺试验研究[J]. *材料导报*, 2018, 32(8): 2783 – 2786.
- [46] 张传臣, 张田仓, 赵春玲. K447A + GH4169 惯性摩擦焊接头组织与高温力学性能[J]. *焊接学报*, 2019, 40(10): 137 – 141.
- [47] Daus F, Li H Y, Baxter G, et al. Mechanical and microstructural assessments of RR1000 to IN718 inertia welds-effects of welding parameters[J]. *Material Science and Technology*, 2007, 23(12): 1424 – 1432.
- [48] Huang Z W, Li H Y, Preuss M, et al. Inertia friction welding dissimilar nickel-based superalloys alloy 720Li to IN718[J]. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2007, 38(7): 1608 – 1620.
- [49] Tiley J S, Mahaffey D W, Alam T, et al. Strengthening mechanisms in an inertia friction welded nickel-base superalloy[J]. *Materials Science & Engineering A*, 2016, 662(4): 26 – 35.
- [50] Senkov O N, Mahaffey D W, Semiatin S L, et al. Effect of process parameters on process efficiency and inertia friction welding behavior of the superalloys LSHR and Mar-M247[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2017, 250: 156 – 168.
- [51] Mahaffey D W, Senkov O N, Shivpuri R, et al. Effect of process variables on the inertia friction welding of superalloys LSHR and Mar-M247[J]. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2016, 47(8): 3981 – 4000.
- [52] Senkov O N, Mahaffey D W, Semiatin S L. Effect of pre-heating on the inertia friction welding of the dissimilar superalloys Mar-M247 and LSHR[J]. *Metallurgical & Materials Transactions A*, 2016, 47(12): 6121 – 6137.

第一作者简介: 刘莹莹, 1977 年出生, 博士, 副教授; 主要从事异种合金连接工艺及界面强化机理、钛合金塑性加工新工艺新技术、有色金属材料加工过程检测与质量控制等方面的研究工作; 已发表论文 50 余篇。

(编辑: 曲畅)