

# 我国搅拌摩擦焊技术的研究现状 与热点分析

陈杰<sup>1</sup>, 张海伟<sup>2</sup>, 刘德佳<sup>2</sup>, 王小明<sup>2</sup>

(1.重庆市特种设备质量安全检测中心, 重庆 401121; 2.重庆大学 机械传动国家重点实验室, 重庆 400030)

**摘要:**从搅拌摩擦焊材料、工艺、焊接机理、有限元数值模拟、接头耐腐蚀性等方面分析了国内对搅拌摩擦焊研究取得的成果与现状, 并预测了未来几年国内搅拌摩擦焊研究的热点和重点。分析认为: 铝合金仍是未来几年搅拌摩擦焊的主要研究材料, 而镁合金、铜合金、不锈钢、碳钢以及异种金属的搅拌摩擦焊也将成为研究的热点。焊接工艺、有限元数值模拟以及接头性能和焊后加工处理也将成为搅拌摩擦焊研究的热点和重点。

**关键词:**搅拌摩擦焊; 焊接材料; 焊接工艺; 数值模拟; 复合焊接

**中图分类号:** TG453+.9

**文献标识码:** C

**文章编号:** 1001-2303(2011)10-0092-06

## Research progress and focus of friction stir welding in China

CHEN Jie<sup>1</sup>, ZHANG Hai-wei<sup>2</sup>, LIU De-jia<sup>2</sup>, WANG Xiao-ming<sup>2</sup>

(1.Chongqing Special Equipment Quality Safe Inspection Center, Chongqing 401121, China; 2.State Key Laboratory of Mechanical Transmission, Chongqing University, Chongqing 400030, China)

**Abstract:** In this paper, the domestic achievements made in 2010 were analyzed from the aspects of FSW materials, welding processes, welding mechanisms, finite element simulation, and the corrosion resistance of the joints. The domestic focuses and emphasis in friction stir welding research in the next few years were forecasted. Analysis showed that aluminum alloys will also be the main materials for FSW in the next few years, while magnesium alloys, copper alloys, stainless steels, carbon steels and some dissimilar metals will become hot research materials of FSW. And welding processes, finite element simulation, the properties of welding joints and the treatments of post welding will also be focuses in friction stir welding research.

**Key words:** frictions stir welding; welding materials; welding process; finite element simulation; hybrid welding

## 0 前言

搅拌摩擦焊技术经过十几年的发展已日趋完善, 并成功应用于航空、航天、汽车、造船和高速铁路列车等诸多结构制造领域。搅拌摩擦焊是固相焊接, 母材不熔化, 不会产生气孔和裂纹等缺陷, 具有广阔的应用前景<sup>[1-6]</sup>。在过去的2010年, 国内研究人员开展了大量的搅拌摩擦焊研究工作, 成果丰硕。本研究从搅拌摩擦焊材料、工艺、焊接机理、有限元数值模拟、接头耐腐蚀性等方面考虑, 分析了2010年国内搅拌摩擦焊的研究现状与热点。

## 1 材料的焊接性

### 1.1 铝合金材料

搅拌摩擦焊最先应用于铝合金的焊接, 铝合金是2010年国内研究搅拌摩擦焊涉及最多的被焊材料。秦国梁等人<sup>[1]</sup>针对2 mm厚6013-T4铝合金薄板进行了搅拌摩擦焊, 采用搅拌头旋转速度和焊接速度的比值 $\omega/v$ 表征搅拌摩擦焊的热输入, 研究焊接热输入对接头焊缝成形和力学性能的影响。研究表明在 $\omega/v=3$  r/mm时, 焊缝成形美观, 飞边毛刺少, 抗拉强度和屈服强度分别达到母材的83.3%和75.8%。王海艳等人<sup>[2]</sup>研究了6 mm厚的6061-T4铝合金板材搅拌摩擦焊对接, 认为搅拌头旋转速度为1 200 r/min, 工件进给速度为300 mm/min是最合适

收稿日期: 2011-03-22

作者简介: 陈杰(1966—), 男, 学士, 主要从事特种设备质量安全管理 and 科研工作。

的工艺参数。罗维等人<sup>[3]</sup>研究了22 mm厚的6061-T6铝合金板的搅拌摩擦焊,且在旋转速度为1000 r/min、焊接速度为120 mm/min时,其焊接接头 $\sigma_b=205$  MPa,为母材强度的66%。

李奇等人<sup>[4]</sup>对7系列的铝合金开展了搅拌摩擦焊试验,研究表明3 mm厚的7A52铝合金薄板的搅拌摩擦焊接头抗拉强度可以达到母材的70%。丁成钢<sup>[5]</sup>研究了6.3 mm厚的7050铝合金板搅拌摩擦焊焊接接头的性能,认为接头的冲击韧性优于母材,且焊核区、热影响区的断口中有较多韧窝,呈典型的韧性断裂。汪洪峰<sup>[6]</sup>对10 mm厚的7022铝合金厚板进行了搅拌摩擦焊接试验,发现搅拌头转速为400 r/min,焊接速度为100 mm/min时,焊接接头的抗拉强度、屈服强度均比母材高,冲击韧性也比母材高。金玉花等人<sup>[7]</sup>将5 mm厚7050铝合金搅拌摩擦焊接头在490 °C固溶处理1 h,研究接头焊核区组织的热稳定性,结果表明,焊核区的热稳定性与焊接参数有关,当转速为600 r/min时,焊速为40、50 mm/min,接头焊核区部分晶粒出现异常长大,热机械影响区与焊核区的交界面和焊核区根部是组织不稳定的源头。

对2系列和3系列铝合金以及硬铝的搅拌摩擦焊的研究也不少。王春炎<sup>[8]</sup>研究了8 mm厚2219-T87铝合金搅拌摩擦焊接头性能,发现接头室温拉伸强度可以达到母材的70%以上,且断裂方式为韧性断裂。束彪等人在焊接厚5 mm的2195铝锂合金薄板时发现,焊速 $v=140$  mm/min,转速 $\omega=1000$  r/min时,焊接接头强度可以达到母材的73%<sup>[9]</sup>。夏罗生<sup>[10]</sup>认为对于2519铝合金厚板,搅拌头旋转速度与焊接速度的比值在11.3~15.3时,焊缝显现出良好的力学性能。李建涛<sup>[11]</sup>和徐效东<sup>[12]</sup>分别对铝合金3系列的3A21和3003进行搅拌摩擦焊接研究,发现当搅拌头的旋转速度为1120 r/min,焊接速度为50 mm/min时,3003铝合金焊缝成形良好。刘鹤平<sup>[13]</sup>研究了LY12铝合金的搅拌摩擦焊接头组织和性能,研究表明搅拌头旋转速度与焊接速度比值为5时,焊接线能量适当,接头无缺陷,焊核区为细小均匀的等轴晶,因此接头强度最高,达427 MPa。陈继强等人<sup>[14]</sup>研究了微量钪对Al-Zn-Mg-Zr热轧板搅拌摩擦焊接头组织与性能的影响,发现微量钪使Al-Zn-Mg-Zr合金母材的抗拉强度和屈服强度分别提高22 MPa和42 MPa,使焊接接头的抗拉强度和屈服强度分别提高19 MPa和33 MPa,其主要原因是细晶强化和

Al<sub>3</sub>(Sc,Zr)粒子的析出强化。

## 1.2 异种材料

王东等人<sup>[15]</sup>研究了6 mm厚6061-T651铝合金和AZ31镁合金搅拌摩擦焊接界面处Mg/Al反应及接头力学性能,发现在焊接界面处存在Mg<sub>17</sub>Al<sub>12</sub>相的生成和由于共晶相熔化和随后冷却所形成的孔洞。在搅拌针置中、向镁合金侧偏置2 mm两种情况下,接头中少量的Al搅入到镁合金侧形成金属间化合物Mg<sub>17</sub>Al<sub>12</sub>,而在搅拌针向铝合金侧偏置2 mm时,是少量的Mg搅入到铝合金中也形成金属间化合物Mg<sub>17</sub>Al<sub>12</sub>。并且由于焊核区仅有少量的Mg<sub>17</sub>Al<sub>12</sub>生成,其硬度变化并不显著。焊接界面处生成的金属间化合物和孔洞使得接头的拉伸性能显著降低。

贺地求<sup>[16]</sup>研究了厚度为25 mm的T2紫铜厚板单道搅拌摩擦焊对接试验,分析接头发现,在旋转速度为960 r/min、焊接速度为70 mm/min时,搅拌摩擦焊焊接接头的抗拉强度可达186.6 MPa,搅拌摩擦焊接头的电阻率与母材基本相当。同时还对厚度为30 mm和50 mm厚的T2紫铜进行了搅拌摩擦焊试验,发现30 mm厚的T2紫铜板单道焊焊后平均抗拉强度为177.2 MPa,达到母材的81.7%,断后平均伸长率为25.4%。焊缝横切面显微硬度分布波动较大,最低值位于前进侧热影响区底部,此处为焊缝薄弱环节<sup>[17]</sup>。孙慧等人<sup>[18]</sup>对Zr<sub>44</sub>Ti<sub>11</sub>Ni<sub>10</sub>Cu<sub>10</sub>Be<sub>25</sub>块体金属玻璃与紫铜进行搅拌摩擦焊接,发现当旋转速度为600 r/min、摩擦头直径2 mm、焊接速度40 mm/min、轴肩直径12 mm、压入量0.1 mm时,能够成功实现焊接,且焊缝处试样仍保持非晶状态。

从上述搅拌摩擦焊被焊材料的文献分析可以看出,铝合金是搅拌摩擦焊的主要研究材料,6系列和7系列等高强铝合金是研究的热点,且研究的板厚从薄板到厚板,大多是研究搅拌摩擦焊工艺对接头强度的影响,并以搅拌头旋转速度和焊接速度的比值来表征搅拌摩擦焊的热输入,研究其对接头焊缝成形和力学性能的影响。在2010年异种金属的搅拌摩擦焊在国内开展较少,但非铝材料的搅拌摩擦焊开展了一些尝试并取得一定的成果,特别是紫铜的搅拌摩擦焊接板材厚度已到达30 mm。而高强铝合金、镁合金、铜合金以及不锈钢和普通碳钢的搅拌摩擦焊在今后几年必定成为研究的热点。

## 2 焊接工艺

研究搅拌头形状对接头组织性能的影响也是

2010 年的研究热点。如张忠科等人<sup>[19]</sup>分别选用不同形状的搅拌头进行搅拌摩擦焊接,研究搅拌头形状对搅拌头受力和温度的影响。采用三维测力系统和红外测温装置对搅拌头下压力和温度进行同步动态测量,得出搅拌头形状的影响规律。结果表明,凹陷型轴肩受力明显高于平台型轴肩,锥形搅拌针受力大于柱形搅拌针;凹陷型轴肩产热优于平台型轴肩,锥形搅拌针产热优于柱形搅拌针。凹陷型轴肩比平台型轴肩更有利于金属流动,焊缝区过渡平滑,锥形搅拌针比柱形搅拌针焊缝区平滑且前进侧和返回侧更对称。王晓东等人<sup>[20]</sup>研究搅拌针表面螺纹头数与轴肩下压量对金属轴向迁移的影响发现,由于受到螺纹表面挤压力和螺纹表面与金属间摩擦力的共同驱动,螺纹内的塑性金属在搅拌针轴向产生迁移。增加搅拌针表面螺纹头数和增大焊缝所受轴向的挤压力均能增加焊缝塑性金属的轴向迁移量,其宏观表现为呈洋葱瓣花纹状的焊核横截面积增大。李宝华<sup>[21]</sup>研究搅拌头形状对搅拌摩擦焊接头中洋葱环形貌的影响认为:搅拌针表面为左旋螺纹时,洋葱环中心出现在焊缝的中下部,搅拌针表面为右旋螺纹时,洋葱环中心出现在焊缝的上部;洋葱环花纹是由搅拌针附近的塑性金属在搅拌针表面螺纹的驱动下沿厚度方向迁移,并在搅拌针端部或根部形成挤压区所造成的。赵旭东<sup>[22]</sup>研究了搅拌头在铜合金搅拌摩擦焊接中的磨损机理,发现搅拌头的磨损归结为粘结磨损、氧化磨损、扩散磨损、脆性剥落和脆断。

李宝华<sup>[23]</sup>研究了单位线能量对搅拌摩擦焊接头形貌的影响,研究表明在焊接压力一定下,焊核随着线能量的增大而先增大后减小。邢丽<sup>[24-25]</sup>等人研究焊接参数对铝合金 FSW 焊缝 S 曲线形成的影响,并分析了焊缝中 S 曲线对搅拌摩擦焊接头拉伸性能的影响。研究发现,焊缝中 S 曲线是原始界面与其周边金属一起位移、变形的结果;S 曲线的形状取决于焊缝上部金属的旋转运动、搅拌针与原焊接面之间的相互作用以及焊缝底部金属朝远离焊缝中心线的方向和板材上方移动的综合作用。对于圆锥光面搅拌针,当焊接速度一定时,增大搅拌头的旋转速度或当搅拌头旋转速度一定时,降低焊接速度,S 曲线在焊缝厚度方向的贯穿区域减小并最终消失。焊缝中的 S 线对接头的拉伸性能有影响,含有 S 线的试样沿焊缝上的 S 线断裂,断面呈 S 状;焊缝中无 S 线的试样在焊核中断裂,断面呈 45°,焊

缝中的 S 线使接头的强度下降。

李杰等人<sup>[26]</sup>研究了激光喷丸对 7075 铝合金搅拌摩擦焊接头的影响,发现经激光喷丸处理的搅拌摩擦焊接头的表面粗糙度远小于常规喷丸处理的接头表面,而对接头显微硬度的影响差异不大。激光喷丸可改变接头的残余应力分布,是提高搅拌摩擦焊接头抗疲劳性的有效方法。张新华<sup>[27]</sup>采用超声喷丸强化搅拌摩擦焊接接头性能,发现超声喷丸技术能提高铝合金母材及搅拌摩擦焊接接头的疲劳性能。

从上述文献可以发现,在搅拌摩擦焊工艺方面,研究的热点聚集于搅拌头形状对接头组织性能的影响、焊缝 S 曲线形成对接头性能的影响以及通过各种方法对搅拌摩擦焊接头进行后处理提高其力学性能。研究搅拌头形状对接头组织性能的影响和采用适当方法提高接头性能具有重要的意义,不仅是 2010 年的研究热点,还将是今后几年的研究重点。

### 3 焊接机理

王希靖等人<sup>[28]</sup>检测分析了 LF2 和 LY12 铝合金板搅拌摩擦焊接过程中工艺参数对摩擦头前进阻力的影响规律:焊接同种材料时,前进阻力随焊接速度、压入量、材料厚度的增加而增大,随旋转频率的增加,先增大后减小;焊接材料不同时,高硬度材料的前进阻力大于低硬度材料;焊接过程中摩擦头前进阻力大小与前侧变形金属体积和温度大小有关,前侧变形金属体积越大,温度越低,前进阻力越大。鄢东洋<sup>[29]</sup>通过设计一系列搅拌摩擦焊接试验,详细测量和分析了焊接温度场分布、搅拌头机械载荷、残余应力和残余变形。分析发现搅拌摩擦焊温度测量结果的准确性取决于采样频率和热电偶的定位方法。薄板的焊接变形具有马鞍形和反马鞍形两种形态,且变形程度受到薄板尺寸、旋转频率和焊接速度的影响。张小帆<sup>[30]</sup>研究了未焊透时缺陷深度对 LY12 铝合金搅拌摩擦焊焊缝电导率的影响。结果表明,焊缝中部电导率较高,母材电导率较低,存在过渡区,且当未焊透深度较小时,其焊缝中心电导率相对无缺陷时变化不大。当未焊透深度较大时,其焊缝中心电导率值急剧下降,且未焊透深度越大,电导率值越低。金玉花<sup>[31]</sup>分析了铝合金 7050 搅拌摩擦焊后各区微观结构演变,发现热影响区位错开始滑移,热-力影响区位错发生交滑移或攀移,

位错密度降低,焊核区晶内有少量位错。刘鹏等人<sup>[32]</sup>采用搅拌摩擦焊方法制备的非晶增强铝基复合材料,发现非晶增强体与基体 5A06 铝合金经过搅拌摩擦加工过程充分的搅拌作用,获得了层状混合组织结构。复合材料中存在大量的 90~400 nm 纳米级组织,主要由  $-\alpha$  Al 与  $-\alpha$  Al 非晶组织构成。

## 4 数值模拟

鄢东洋等人<sup>[33]</sup>建立了较为完善的搅拌摩擦焊接热力耦合数值模拟模型,对生热过程、材料模型、夹具约束以及搅拌头机械载荷作用都进行了分析和探讨,采用被焊材料的剪切极限作为生热驱动力,考虑被焊材料的力学性能随温度和温度历史发生变化,建立夹具和试板之间的接触关系,并在力学分析模型中将搅拌头机械载荷简化考虑,模拟结果与实验结果较为吻合。杨卫平<sup>[34]</sup>通过建立带孔搅拌摩擦焊接板的有限元数值计算模型,采用最大周向拉应力准则,分析了结构参数如孔位置、焊接区宽度和厚度对裂纹扩展路径的影响。分析发现孔位置对裂纹扩展路径有很大影响,孔离焊接区越远,其影响越小;焊接区厚度对裂纹扩展路径影响也很大,并用实验验证了其模拟结果。李文亚等人认为质量放大因子是显式有限元计算过程中的一个重要因素,通过研究质量放大因子对搅拌摩擦焊接插入过程温度场的影响,优化了搅拌摩擦焊接过程温度场的三维显式有限元计算方法。发现当质量因子为 106 时能获得比较合理的温度场,而计算所需时间明显减少。周明智<sup>[36]</sup>建立了基于固体力学的刚粘塑性热力耦合有限元方程,并采用网格局部加密自适应跟随技术对 FSW 过程进行数值模拟,获得了焊接过程的温度、应力、应变分布特征及金属流动规律,预测焊接过程中所产生的缺陷,表明热塑性变形机制是焊接接头形成的主要机制。吴佩君<sup>[37]</sup>根据相变热传导的等效热容法有限元理论,采用移动热源循环加载,对 2A70 铝合金搅拌摩擦焊接过程的温度场进行了瞬态求解,为模拟铝合金搅拌摩擦焊接过程中微观组织的演化过程奠定了理论基础和前提条件。

刘金合<sup>[38]</sup>通过自己建立的数学模型,利用 ANSYS 软件对 14 mm 厚 2219 铝合金搅拌摩擦焊接过程中的温度场进行数值模拟,发现搅拌头插入阶段焊缝的温度变化与焊接速度无关,开始阶段升温速率最大,焊接稳定阶段,沿板厚度方向呈现上宽下窄、上高下低的温度梯度分布趋势。两个阶段都是旋转

频率越高,焊缝的峰值温度越高,与实验结果吻合。孙涛等人<sup>[39]</sup>也采用 ANSYS 根据古典摩擦理论建立了合适的热源模型,对 4 mm 薄板 7075 铝合金搅拌摩擦焊过程中的温度场和应力应变场进行热机耦合数值分析,考虑了搅拌头的机械载荷和压板的压力作用,有一定的借鉴意义。

从有关搅拌摩擦焊的数值模拟的文献可以看出,2010 年国内研究者开展了不少搅拌摩擦焊数值模拟的研究,特别是对搅拌摩擦焊过程中的温度场、应力、应变分布特征以及金属流动规律进行的比较深入。而且搅拌摩擦焊数值模拟分析一大特征就是自己建立一个合适的数学模型,采用数值模拟的方法来分析其研究对象,最后验证自己的数学模型是否合理。搅拌摩擦数值模拟所采用的软件也多种多样,有 ANSYS、ABAQUS、COMSOL、FLUENT 等,主要集中于温度场和应力应变的模拟。

## 5 腐蚀性能

在 2010 年,国内对搅拌摩擦焊研究的另一大热点就是接头腐蚀性能的研究。李奇等人<sup>[40]</sup>研究了 7A52 铝合金搅拌摩擦焊焊缝的电化学局部腐蚀行为,发现焊缝的电化学局部腐蚀过程与母材相似,均为  $Mg_2Si$  优先阳极溶解,产生自身的点蚀坑,随着腐蚀的进行, $Mg_2Si$  周围的基体被腐蚀。付瑞东等人<sup>[41]</sup>采用酸性连续盐雾试验研究 2024 铝合金搅拌摩擦焊焊缝表面的腐蚀行为,研究发现搅拌摩擦焊焊缝区耐蚀性因包铝层遭到破坏而呈现下降趋势,腐蚀程度因焊缝表面残留的纯铝而呈现不均匀性。腐蚀首先从局部点蚀开始,最终演变为剥落腐蚀。沈长斌<sup>[42]</sup>通过研究 8 mm 厚铝合金 6082 搅拌摩擦焊焊缝的组织形貌及其电化学性能发现,焊缝的腐蚀电压比两种母材高,腐蚀电流比两种母材小。栾国红等人<sup>[43]</sup>采用中性连续盐雾试验研究 7075 铝合金搅拌摩擦焊接头焊缝表面的腐蚀行为,发现焊缝区的晶粒和第二相粒子得到明显细化,在焊缝表面的第二相粒子分布不均匀;搅拌摩擦焊焊缝区耐蚀性比包铝的母材低。王快社等人<sup>[44]</sup>通过测定 H65 铜合金搅拌摩擦焊接头和焊条电弧焊接头在 3.5%NaCl 溶液中的开路电位和极化曲线,研究其电化学腐蚀性能,结果表明,搅拌摩擦焊接头的抗腐蚀性能优于焊条电弧焊接头。

## 6 复合焊接

搅拌摩擦焊接与其他焊接工艺相结合形成搅

拌摩擦复合焊接技术的研究方兴未艾,主要包括激光-搅拌摩擦焊接技术、电弧(TIG/MAG/MIG/PAW)-搅拌摩擦焊接技术和超声-搅拌摩擦焊接技术等,这些搅拌摩擦复合焊接技术对于解决目前搅拌摩擦焊接存在的问题起到了积极的作用。近年来,罗键等人<sup>[49]</sup>提出了基于内生电阻热-搅拌摩擦热复合的载流-搅拌摩擦复合焊接(RFSW)新技术,对于解决高熔点金属搅拌摩擦焊接的难题提供了新的思路和方法,对于快速高效的低熔点金属搅拌摩擦焊接也具有改善和促进作用,能够解决FSW焊接高熔点金属所面临的一些挑战。

## 7 结论

从文献可看出,开展的搅拌摩擦焊研究主要集中在铝合金的搅拌摩擦焊,而异种金属和非铝材料的研究相对较少。在搅拌摩擦焊工艺方面,研究热点主要集中于搅拌头形状对接头组织性能的影响,以及通过各种方法对搅拌摩擦焊接头进行后处理提高其力学性能。对搅拌摩擦焊机理的研究相对较少,且开展的搅拌摩擦焊机理研究集中于搅拌头前进阻力以及焊后各区微观结构演变过程等。数值模拟方面研究相对较多,也较为深入,主要集中于自建数学模型,然后模拟求解搅拌摩擦焊接头温度场和应力应变场。2010年出现一个热点就是对搅拌摩擦焊接头耐腐蚀性能的研究,研究对象主要是铝合金接头,这与铝合金搅拌摩擦焊工艺的成熟与其应用领域的扩大有关。

通过分析国内搅拌摩擦焊的研究现状,不难看出未来几年搅拌摩擦焊研究的发展趋势。显然铝合金还将是搅拌摩擦焊的主要被焊材料,而对于镁合金、铜合金、不锈钢、碳钢以及异种金属的搅拌摩擦焊将在未来几年成为热点材料。不同材料的搅拌摩擦焊焊接工艺、有限元数值模拟以及焊后接头性能和接头焊后加工处理也将是研究的热点和重点,而国内的搅拌摩擦焊机理性研究也需要加强。

## 参考文献:

- [1] 秦国梁,张坤,张文斌,等.6013-T4 铝合金薄板搅拌摩擦焊热输入对焊缝成形及组织性能的影响[J].焊接学报,2010,31(11):5-8.
- [2] 王海艳,戚文军,农登.6061 铝合金搅拌摩擦焊接头组织与性能研究[J].稀有金属,2010,34(5):638-642.
- [3] 罗维,贺地求,邬红光,等.22 mm 6061-T6 铝合金板的搅拌摩擦焊接[J].热加工工艺,2010,39(15):130-132.
- [4] 李奇,赵军军,张平,等.7A52 铝合金便携式搅拌摩擦焊接头的组织与性能分析[J].装甲兵工程学院学报,2010,24(4):73-76.
- [5] 丁成钢,周海,胡飞.7050 铝合金搅拌摩擦焊焊接头的组织与冲击韧性[J].机械工程材料,2010,34(9):27-30.
- [6] 汪洪峰,左敦稳,王珉.厚板 7022 铝合金搅拌摩擦焊接实验研究[J].功能材料,2010,41(11):2029-2033.
- [7] 金玉花,王希靖,李常锋,等.7050 铝合金搅拌摩擦焊接头的热稳定性[J].兰州理工大学学报,2010,36(2):18-20.
- [8] 王春炎,曲文卿,姚君山.2219-T87 铝合金搅拌摩擦焊接头组织与力学性能[J].焊接学报,2010,31(10):77-84.
- [9] 束彪,国旭明,张春旭.2195 铝锂合金搅拌摩擦焊接头组织及性能[J].航空材料学报,2010,30(4):12-15.
- [10] 夏罗生,朱树红.2519 铝合金搅拌摩擦焊工艺研究[J].热加工工艺,2010,39(11):144-146.
- [11] 李建涛,李湘宁,丁成钢.3A21 铝合金搅拌摩擦焊接头力学性能研究[J].热加工工艺,2010,39(15):144-146.
- [12] 徐效东,杨新岐,吴铁,等.铝合金搅拌摩擦焊搭接接头工艺及组织性能研究[J].热加工工艺,2010,39(15):151-155.
- [13] 刘鸽平,杨成刚,柯黎明.LY12 铝合金搅拌摩擦焊接头组织和性能研究[J].热加工工艺,2010,39(15):139-144.
- [14] 陈继强,尹志民,何振波.微量钎对 Al-Zn-Mg-Zr 热轧板搅拌摩擦焊接头组织与性能的影响[J].中国有色金属学报,2010,20(10):1183-1188.
- [15] 王东,刘杰,肖伯律,等.铝合金/镁合金搅拌摩擦焊接界面处 Mg/Al 反应及接头力学性能[J].金属学报,2010,46(5):189-194.
- [16] 贺地求,易昕,李再华,等.紫铜厚板的搅拌摩擦焊接[J].焊接学报,2010,31(4):73-76.
- [17] 贺地求,邬红光,罗维.大厚度紫铜搅拌摩擦焊接[J].北京科技大学学报,2010,32(10):1302-1305.
- [18] 孙慧,袁子洲,乔宇,等.Zr<sub>44</sub>Ti<sub>11</sub>Ni<sub>10</sub>Cu<sub>10</sub>Be<sub>25</sub>块体金属玻璃与紫铜的搅拌摩擦焊接[J].甘肃科技,2010,26(15):44-45.
- [19] 张忠科,王希靖.搅拌头形状对搅拌头受力和温度的影响[J].兰州理工大学学报,2010,36(4):17-20.
- [20] 王晓东,柯黎明,邢丽,等.搅拌针表面螺纹头数与轴肩下压量对金属轴向迁移的影响[J].中国有色金属学报,2010,20(1):100-105.
- [21] 李宝华,唐众民,鄢江武,等.搅拌头形状对搅拌摩擦焊接头中洋葱环环貌的影响[J].热加工工艺,2010,39(19):155-162.
- [22] 赵旭东,傅应霞.在铜合金搅拌摩擦焊过程中搅拌头磨损机理研究[J].热加工工艺,2010,39(11):170-172.
- [23] 李宝华,唐众民,鄢江武,等.单位线能量对搅拌摩擦焊接头形貌的影响[J].兵器材料科学与工程,2010,33(4):35-38.
- [24] 邢丽,陈爱华,刘鸽平,等.焊接参数对 LY12 铝合金 FSW

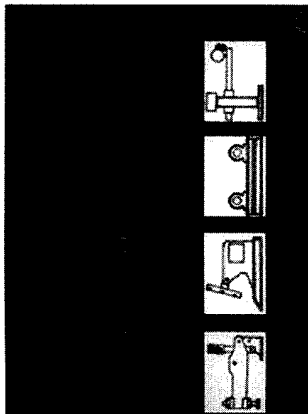
- 焊缝 S 曲线形成的影响[J].焊接学报,2010,31(5):9-12.
- [25] 刘耀,邢丽,杨成刚,等.LF6 铝合金搅拌摩擦焊焊缝中 S 曲线对接头拉伸性能的影响[J].热加工工艺,2010,39(7):139-141.
- [26] 李杰.激光喷丸对 7075 铝合金搅拌摩擦焊接头的影响[J].宇航材料工艺,2010(1):60-63.
- [27] 张新华,曾元松,王东坡.超声喷丸强化搅拌摩擦焊接头性能[J].航空制造技术,2010(1):87-90.
- [28] 王希靖,张忠科,韩道彬,等.搅拌摩擦焊中摩擦头前进阻力的检测及分析[J].焊接学报,2010,31(4):1-4.
- [29] 鄢东洋,史清宇,吴爱萍,等.搅拌摩擦焊接过程的试验测量及分析[J].焊接学报,2010,31(2):67-71.
- [30] 张小帆,邢丽,杨成刚,等.未焊透缺陷深度对 LY12 铝合金搅拌摩擦焊焊缝电导率的影响[J].材料工程,2010(2):13-16.
- [31] 金玉花,王希靖,李常锋,等.铝合金 7050 搅拌摩擦焊接头微观结构演化[J].热加工工艺,2010,39(15):122-124.
- [32] 刘鹏,史清宇,霍玉双.采用搅拌摩擦焊方法制备的非晶增强铝基复合材料的微观组织分析[J].焊接学报,2010,31(11):53-56.
- [33] 鄢东洋,史清宇,吴爱萍,等.搅拌摩擦焊接的热力耦合分析模型[J].机械工程学报,2010,46(16):106-112.
- [34] 杨卫平,马玉娥,邓勇.带孔搅拌摩擦焊接整体壁板的复合裂纹扩展路径研究[J].航空工程进展,2010,1(2):116-119.
- [35] 李文亚,余敏,李京龙.质量放大因子对搅拌摩擦焊接插入过程的影响[J].焊接学报,2010,31(2):1-4.
- [36] 周明智,雷党刚,梁宁,等.搅拌摩擦焊三维粘塑性热-力耦合有限元数值模拟[J].焊接学报,2010,31(2):5-9.
- [37] 吴佩君,王玉,高大路.2A70 铝合金搅拌摩擦焊接过程有限元分析[J].热加工工艺,2010,39(11):153-157.
- [38] 徐韦锋,刘金合,朱宏强.2219 铝合金厚板搅拌摩擦焊接温度场数值模拟[J].焊接学报,2010,31(2):63-67.
- [39] 孙涛,王玉,高大路,等.薄板 7075 铝合金搅拌摩擦焊三维有限元数值模拟[J].热加工工艺,2010,39(3):158-161.
- [40] 李奇,赵军军,马琳.7A52 铝合金搅拌摩擦焊焊缝的电化学局部腐蚀行为[J].中国表面工程,2010,23(5):78-81.
- [41] 付瑞东,何森,栾国红.酸性盐雾下 2024 铝合金搅拌摩擦焊接头的腐蚀行为[J].中国腐蚀与防护学报,2010,30(5):396-402.
- [42] 沈长斌,王忠志,权高峰.6082 铝合金搅拌摩擦焊接头组织及腐蚀性能研究[J].腐蚀科学与防护技术,2010,20(5):400-402.
- [43] 栾国红,付瑞东,董春林,等.中性盐雾下 7075 铝合金搅拌摩擦焊焊缝的腐蚀行为[J].中国腐蚀与防护学报,2010,30(3):236-240.
- [44] 王快社,王文,张小龙,等.搅拌摩擦焊与手工电弧焊接头电化学腐蚀性能研究[J].稀有金属材料与工程,2010,39(4):747-749.
- [45] Luo J, Wang X J, Wang J X. New technological methods and designs of stir head in resistance friction stir welding[J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2009, 14(7): 650-655.
- [46] Uday MB, Fauzi MNA, Zuhailawati H, et al. Advances in friction welding process: a review[J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2010, 15(7): 534-558.

## 好书推荐, 欲购从速!

《焊接工装夹具及变位机械图册》

书号: 237

定价: 38 元



本图册由焊接工装夹具、焊接变位机械、焊接机器人及其与焊件变位机械的组合应用、装焊吊具及装焊辅具等 253 个图例组成。多数图例是以结构图的形式给出,有的还指出了设计要点,给出了计算公式或参考文献。对于以选用为主的装备,例如焊接机器人,则配合图例主要介绍其原理、特点、性能以及选用时的注意事项等。为了使读者在设计非标工装时对一些装备的细部结构能有所借鉴,对一些复杂的图例,在给出总装图的同时还给出了部位图以至零件图,有的还画出了传动简图,并作了较详细的文字说明。本图册主要供广大焊接工程技术人员在设计或选用焊接工艺装备时使用,也可作为大专院校师生焊接工装设计的参考教材。1991 年该书一经出版便受到广大焊接人士的极大欢迎,2006 年该书第三次印刷仍被焊接设计者视为经典。