

搅拌摩擦焊技术应用与研究

袁凯峰

桂林航天工业学院, 广西桂林 541004

摘要 在搅拌摩擦焊技术发展的 10 余年间,从最初的铝合金焊接发展到多种金属轻合金和非金属材料的焊接,因其固相连接的技术优势得以迅速推广。文中对搅拌摩擦焊技术研究的成果与主要研究方向予以阐述,总结了焊接材料、搅拌头结构与材料、金相组织结构与力学性能、运动学和动力学模拟,以及焊接工艺与设备研究现状与应用前景。对于焊接材料研究,已经涉及具有高温流动塑性的金属和非金属材料;各类焊接材料与搅拌头结构及焊接工艺参数的工艺数值优化也在不断规范;金相组织结构与力学性能的研究则为焊接机制研究及搅拌摩擦焊的推广应用提供理论依据;运动学和动力学模拟作为焊接工艺参数优化手段得以广泛使用;搅拌摩擦焊设备的研制国内已经起步,并由单一的固定式搅拌摩擦焊机向多种类型、智能虚拟化方向发展,为搅拌摩擦焊的推广奠定基础。随着搅拌摩擦焊技术研究和应用的深入,对连接技术的发展产生巨大的冲击和推动,特别是航天航空领域的应用,必将带动搅拌摩擦焊技术在国民经济各行业装备制造过程中的迅速发展,具有非常光明的应用前景。

关键词 搅拌摩擦焊;搅拌头;金相组织;焊接工艺

中图分类号 TG453

文献标识码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2012.20.013

Friction Stir Welding Technology

YUAN Kaifeng

GuiLin University of Aerospace Technology, Guilin 541004, Guangxi Zhuang Autonomous Region, China

Abstract The dissertation aims to research the application status and prospect of friction stir welding technology in the theoretical aspects as well as the reality. This paper also focuses on the previous studies, background knowledge and academic theories development related to this area, its application and the difference of understanding it, from the viewpoint of previous researchers. It shows up some resistance and difficulties in analysis, designing and employing friction stir welding technology in the fields of its practical application. The researcher conducts quantitative research methods and observation in the experiments. The study is also based on the designing of the model which could show the application status and prospect of friction stir welding technology and definitely indicates the theories and formula. Clear data from the previous studies and the process of experiments will be applied to show the conclusion clearly. Moreover, some significant data and hypothesis which the researcher adopted from the background knowledge and academic reading will be analyzed by using methods for example reliability test, experiment test. The friction stir welding is also used for the welding of a variety of light metal alloys and non-metallic materials. The welding materials, the structure of weld joints, the mechanical properties of friction stir welds, the welding procedures and the welding tools are discussed.

Keywords friction stir welding; mixing head; microstructure; welding procedure

0 前言

目前,搅拌摩擦焊技术以其在铝镁合金焊接连接技术上的优势,使得人们愈发重视搅拌摩擦焊技术的研究与应用,并得以迅速推广,使搅拌摩擦焊技术在短短的十余年即在国内外得到广泛应用,并在焊接技术领域占有重要地位。搅拌摩擦焊技术早期主要用于铝合金的固相连接,随着钛合

金、镁合金等高强轻质合金工业应用的日益增多,特别是在航天航空领域的广泛应用,人们对搅拌摩擦焊在其他焊接材料上的应用研究也日益深入。搅拌摩擦焊技术拥有的诸多优点,使搅拌摩擦焊技术成为自激光焊接问世以来最引人注目瞩目的焊接方法,它的出现使铝合金等有色金属的连接技术发生重大变革^[1-2]。在航天器低温容器焊接、大型轻合金

收稿日期:2012-06-05;修回日期:2012-07-10

作者简介:袁凯峰(中国科协所属全国学会个人会员登记号:E151825865M),副教授,研究方向为现代制造技术,电子信箱:ykfk@guat.edu.cn

结构件焊接、航空器蒙皮焊接、铝挤压件的焊接、船体和加强件的焊接、高速列车铝制件焊接等方面,FSW 已显现较大的技术优势^[3]。到目前为止,搅拌摩擦焊已被证明除可实现铝合金材料、铝基复合材料的焊接外,其他具有高温流动塑性的轻金属合金及非金属材料亦适合应用搅拌摩擦焊技术。随着搅拌摩擦焊技术的发展,人们对搅拌摩擦焊技术的相关研究越来越多,研究的领域越来越广。研究的广度已涉及搅拌摩擦焊的方方面面,除了对焊接机制、焊接性能研究较多外,对焊接材料、焊接设备、焊接工艺的研究也越来越深入。焊接设备、搅拌头结构和材料、运动参数、焊接材料、焊缝金相组织结构和强度、焊接机制数值仿真等方面都成为研究的对象。随着搅拌摩擦焊技术在航空航天、交通运输、船舶制造、工业装备制造等领域的进一步应用,搅拌摩擦焊技术将得到更快的发展。

1 适应搅拌摩擦焊的焊接材料

自英国焊接研究所(TWI)于1991年发明了搅拌摩擦焊(Friction Stir Welding,FSW)这种新型固相连接方法以来,因其具有焊接变形小、焊缝金属力学性能好、操作简便、搅拌头自身消耗小、焊接设备结构简单易于实现自动焊接等技术优点^[4],被广泛用于低熔点合金的固态连接,特别是铝合金的联接技术上。目前,搅拌摩擦焊已可实现铝合金和铝基复合材料的焊接。随着搅拌摩擦焊技术的发展,人们不断探索适合应用搅拌摩擦焊的其他材料,除了对铝合金的搅拌摩擦焊技术研究不断深入之外,钛合金、镁合金、铜合金的搅拌摩擦焊技术应用也日趋成熟。就搅拌摩擦焊焊接机制来讲,凡具有良好高温流动塑性的金属和非金属材料均可采用搅拌摩擦焊技术进行固相连接。随着搅拌摩擦焊设备和工具材料的技术进步,各类钢材的搅拌摩擦焊技术应用亦在研究之列。

目前,应用搅拌摩擦焊FSW成功连接的材料有全系列Al合金,Mg合金与高熔点Ti合金的焊接连接已有应用,此外铜合金、铅锌合金、不锈钢,低碳钢等同种或异种材料的焊接研究亦在不断深入^[5]。Rommevaux等^[6]进行了铝合金-Ag的FSW焊接研究,Johnson^[7]对多种镁合金同种和异种材料之间进行了搅拌摩擦焊焊接试验,证明可以应用搅拌摩擦焊连接镁合金。TWI于1997年11月报道了FSW成功焊接3mm厚的低碳钢,EWI(Edison Welding Institute)于1998年5月报道了成功连接6mm软钢,并报道12mm厚12%Cr不锈钢的FSW焊接^[8]。但由于碳钢焊接对搅拌头的结构强度及其高温硬度要求较高,受搅拌头材料限制目前实际应用并不多。但随着焊接工具材料研究的进展,FSW将可用于更多材料的连接。

2 搅拌头结构与材料研究

搅拌头在搅拌摩擦焊技术应用中起着重要作用,对于不同材料与厚度的板材焊接,其对应的搅拌头材料、搅拌头结构亦有不同。目前,随着搅拌摩擦焊技术应用的不断拓展和深入,对搅拌头的材料和结构的研究日益深入,搅拌头材料

及结构的合理选用已成为影响焊接质量的重要因素。但至今尚未见针对不同材料确定的系列化、规范化和标准化的搅拌头材料和结构参数。因此,对搅拌摩擦焊搅拌头材料研究、搅拌头结构参数及优化研究成为搅拌摩擦焊技术应用的重要研究方向。

2.1 搅拌头材料

在搅拌摩擦焊发展的初期,人们就已经感知到搅拌头结构形式对焊缝质量影响的重要性,搅拌摩擦焊时,使材料达到塑性流动温度的热量主要来自于搅拌头焊针与工件的摩擦。因此,对搅拌头材料要求有较好的红硬性、耐磨性、较好的刚度以保证结构稳定性。针对不同的焊接材料,相应的搅拌头材料也不一样。搅拌摩擦焊技术应用初期,主要进行低熔点金属及其合金的焊接,常用的搅拌头材料主要有中碳钢、高碳钢、1Cr18Ni9Ti等工具钢等。随着搅拌摩擦焊可焊材料的增加,特别是一些高熔点合金的焊接,要求有较高性能的搅拌头材料出现。目前,铁基、镍基、钴基等高温合金GH69、GH150、GH302、GH706、GH747等材料已有应用,一些新型搅拌头材料的研究不断深入,已有利用组合立方氮化硼、金属基烧结材料等制备搅拌头的研究^[9]。随着搅拌摩擦焊技术的发展,对搅拌头材料的研究愈发显得重要,新型复合材料的不断出现,使得搅拌头材料的选择日益广泛,高强度、高耐磨性的高效全适应的搅拌头材料研究将成为搅拌头研究的重要方向。

2.2 搅拌头结构

搅拌摩擦焊时,热量主要来自于搅拌头与工件的摩擦。搅拌头的结构形式对焊缝的性能影响十分明显。同时,搅拌头的结构形式与尺寸也限制着其所能焊接的材料与最大板厚。目前,搅拌头的结构研究,主要在其形状、强度与工艺参数、焊接材料、焊接接头质量之间的关系^[9]。即研究在保证焊针强度基础上,通过一定样本量的实验验证,对于某种焊接材料,采用何种搅拌头结构与尺寸,选用何种焊接工艺参数,可以获得较好的焊接接头质量;搅拌焊针直径与工件厚度的有效配置,搅拌头尺寸参数与焊缝质量的关系等等。目前,有学者利用仿真技术模拟搅拌头实际工况,以确定焊接区的金属塑性流场特性与搅拌头结构、工艺参数之间的关系^[10],搅拌头形状对焊缝金属流动性的影响^[11]。搅拌摩擦焊因其工艺的特殊性,对于不同的焊接材料,焊接质量与搅拌头结构、尺寸、运动参数有着比较大的因果关系。目前搅拌焊头的形状主要有圆柱形、圆锥形、螺旋形、凹槽/螺纹式搅拌头、可伸缩式搅拌头。但目前搅拌头规范性不够,系列化、标准化的新型搅拌头设计将有助于搅拌摩擦焊技术的推广应用。

3 搅拌摩擦焊焊缝的金相组织结构与力学性能

搅拌摩擦焊焊缝力学性能的优劣是判断焊接质量的重要标准之一,焊接接头焊缝必须有接近母材的力学性能及化学性能,才能保证材料连接的可靠性,从而保证构件或机械设备(装备)的可靠性,因此才能保证此种焊接技术的应用推

广。搅拌摩擦焊技术目前主要应用于框架类板材构件的连接,包括航空航天、船舶制造、交通运输、装备制造、轻金属技术应用等领域。对搅拌摩擦焊连接的构件,主要验证焊接接头的抗拉强度、抗弯强度、屈服强度、动态应力下的疲劳强度,同时要对焊缝的抗腐蚀能力、延展性、应力的生成与消除等方面进行技术评判^[12]。而焊缝力学性能的优劣与焊缝金相组织结构有着密不可分的关系,焊接接头金相组织结构则是焊接机制研究的重要方向,力学性能与金相组织结构又与焊接时的搅拌头结构和运动参数相关,因此,对FSW技术的研究具有较强的系统性。目前FSW研究的重点主要集中于焊接接头的力学性能,接头的结构形式,适用于不同材料的焊接工具和工艺。对焊接接头的金相组织结构研究,特别是对焊接过程的流动机制及金相组织变化的研究还有待深入。

3.1 接头的金相组织与微观形态

对于不同的焊接材料,特别是各类适合应用FSW技术的有色和轻金属合金材料,焊接接头的微观金相组织结构各不相同,其性能也有显著差别。但从宏观来讲,通过多年众多学者的研究,搅拌摩擦焊接头主要划分为焊核区、热机械影响区、热影响区和母材区4个区域已形成共识。通过采用不同工艺参数焊接时,对上述4个区域金相组织结构对比分析,特别是对焊核区、热机械影响区的金相组织研究,与力学性能的相互印证,可验证材料的可焊性能,并可据此选择确定焊接工艺参数的优化。目前,对铝合金的金相组织研究较多,也取得较多的研究成果。例如,有学者对6061-T6Al进行焊接接头金相组织结构研究,母材为粗晶结构且位错密度很高,而在焊核区,晶粒明显趋于细化,但晶格位错密度紊乱,有些部位位错密度很低,有些则出现高位错密度^[13]。对7075-T6Al板的研究,发现焊核区晶粒为低微米级动态再结晶组织,位错密度低于母材。在热机械影响区则发生晶粒变形状态,焊核区周围分布呈流线状拉长的晶粒^[14]。金相组织结构与接头力学性能密切相关,目前主要研究手段是利用透射电镜观察金相组织结构,或对样件进行传统显微观察,并通过大量实验验证金相组织结构与力学性能之间的内在关系。目前除了对铝合金有较多研究之外,对铜合金、钛合金、镁合金及碳钢的接头金相组织研究也越来越深入,已成为FSW技术研究的主要方向。

3.2 接头的力学性能

对搅拌摩擦焊接头力学性能研究,根据焊接件应用领域及对焊接件力学性能要求不同研究的侧重点不同,但其研究的共性问题是针对不同的焊接材料,通过各种强度试验验证FSW焊件与其他焊接(联接)方法的比较优势,并建立不同焊材的焊接力学性能与微观金相组织之间的模型关系,以此进行焊接参数的优化。在力学性能的研究方向中,一是研究焊缝的连接强度,通过抗拉强度、屈服强度、抗疲劳强度等与母材的比较,获得焊接材料FSW的焊接性能及其可靠性评判;另一方面是通过对接缝的抗断裂能力或者抗裂纹扩展能力的分析,研究在动态应力状态下焊核区、热机械影响区、热影

响区及母材等区域的裂纹生长速率与微观金相组织结构之间的关系^[14],从而得出焊接接头的抗破坏能力及承载能力临界力学参数;第三,焊接构件容易在动态加载下失效,结合焊接接头的高应变速率行为研究和了解焊接构件的动态响应以确定构件的疲劳设计与评定规范。

4 搅拌摩擦焊焊接工艺研究

搅拌摩擦焊自诞生及广泛应用以来,除对其焊接机制深入研究以外,对其焊接工艺的研究一直在持续,焊接工艺的正确与否同样与焊接质量有直接的关系,搅拌摩擦焊作为一种固相连接技术,焊接时搅拌头的运动参数和动力学参数影响着焊接质量。为使焊接区域材料塑性流动更加顺畅和减少焊接阻力,人们对复合焊接技术的研究越来越深入,已有如激光辅助搅拌摩擦焊等多种复合焊接技术应用。此外,除同种材料的焊接研究,异种材料的搅拌摩擦焊技术研究也不断出现。

4.1 搅拌头运动参数及动力学参数

搅拌摩擦焊焊接机制主要通过搅拌头焊针与被焊材料的摩擦,使材料因摩擦热而产生塑性流动性。搅拌过程中适当的工作压力影响着摩擦热的产生效能和焊接质量,摩擦热产生的焊接区域升温要与搅拌头运动参数相匹配,焊接区温度要保证焊接材料达到最优塑性流动性以适合材料固相互融从而联接为一体^[15],因此,焊接工艺研究的首要得到搅拌头的动力学参数、运动参数、塑性流动临界温度三者关系的实验验证以建立焊接工艺规范。由于各类焊材的相异性,焊接时搅拌头转速、焊接速度、搅拌头下压力等运动及动力学参数对于相同板厚的材料也各不相同,因此,对于每一种适合搅拌摩擦焊的合金及金属材料都要进行大量实验研究,并建立搅拌头结构尺寸、搅拌头下压力、搅拌头转速、焊接速度对于不同材料的焊接工艺规范。

4.2 复合搅拌摩擦焊技术

为使焊接区域材料塑性流动更加顺畅和减少焊接阻力,人们对复合焊接技术的研究越来越深入,利用技术成熟的各种加热技术与搅拌摩擦焊相结合,以减少焊接阻力增加材料塑性流动性,提高焊接质量,形成了各类复合搅拌摩擦焊技术。特别对高熔点合金的焊接,复合搅拌摩擦焊技术更有其优势。已有应用的如激光辅助搅拌摩擦焊、火焰辅助搅拌摩擦焊、电弧辅助搅拌摩擦焊、载流(电阻加热)加热辅助搅拌摩擦焊(RFSW)^[16],超声波辅助搅拌摩擦焊接技术等。

4.3 异种材料焊接技术

随着搅拌摩擦焊技术研究和应用的深入,在同种同牌号材料连接技术研究的同时,学者也在探索异种材料的固相连接技术,利用搅拌摩擦焊进行异种材料焊接,包括同种但不同牌号的材料连接,也包括不同种类材料之间的焊接。目前较多研究的是不同系列铝合金、锻铝与铸铝的连接,此外,铝合金与镁合金、铝合金与铜合金、铝合金与钛合金等异种材料连接技术也有学者在研究^[17-18]。另外,金属材料与非金属材料

料的搅拌摩擦焊连接技术也取得一定成果,如金属玻璃与紫铜已成功利用搅拌摩擦焊进行连接^[9]。随着异种材料搅拌摩擦焊技术研究的不断深入,必将有更多的异种材料连接使用搅拌摩擦焊技术。

5 搅拌摩擦焊设备研究

搅拌摩擦焊技术实现离不开焊接设备保证,在设备开发和研制方面,已走过通用设备改造到专用搅拌摩擦焊设备研制的过程。在搅拌摩擦焊技术研究早期,人们利用通用设备特别是利用铣床或者数控铣床进行搅拌焊接可行性或焊接机制研究,直到目前,在没有专用搅拌摩擦焊机的情况下,仍可用此方法进行实验研究。但目前,已有各类专用搅拌摩擦焊机,设备的研究方向除了固定式搅拌摩擦焊机,还出现了各类移动式小型摩擦焊机,并有对虚拟轴搅拌摩擦焊机的研究。

5.1 固定式搅拌摩擦焊设备

在搅拌摩擦焊设备研制开发中,绝大部分专用设备为固定式搅拌摩擦焊设备,从小型悬臂式到大型龙门式搅拌摩擦焊机已成系列,焊接构件从样件焊接研究到小型构件实际生产直至大型构件焊接,应用领域涵盖航天器制造、飞机船舶轻金属构件焊接、电子设备制造、民用设备制造等。摩擦搅拌焊机应有较为宽泛的材料适应性,对于不同材料和厚度的构件焊接,要有以实验验证为基础的搅拌头结构尺寸、焊接参数、运动参数等焊接工艺和操作规范,并可进行非线性焊接。如美国制造技术系统公司(MTS)开发了液压驱动搅拌摩擦焊设备;华盛顿西雅图的MCE公司则生产了商业化的搅拌摩擦焊专用设备;通用T具公司(GTC)首次制造出了带有真空夹紧装置的搅拌摩擦焊设备;英国、瑞典等国则分别制造了龙门式搅拌摩擦焊设备^[20],北京中国搅拌摩擦焊中心亦有多种搅拌摩擦焊设备制造。

5.2 移动式便携搅拌摩擦焊设备

除了固定式焊机研制外,对于一些小型构件的焊接,特别是在维修及应急抢修中,固定式搅拌摩擦焊机应用存在困难,要求设备能够方便、灵活具有便携性,因此移动式便携搅拌摩擦焊设备研究变成需要。由于搅拌摩擦焊是在一定工作压力作用下,在适当的搅拌头转速和焊接进给速度下靠摩擦热使焊接材料产生塑性流动从而实现固相连接,因此,便携式搅拌摩擦焊的工艺和参数就与固定式焊机的工艺有所区别。由于焊机的便携性要求使得其驱动装置为小功率动力驱动或手动移动,因此移动式便携搅拌摩擦焊设备研究要首先保证焊接过程稳定性,以保证焊接接头的性能稳定。鉴于此,便携搅拌摩擦焊设备研究,要解决高功率动力装置小型化、适合的搅拌头结构形状及尺寸、科学的搅拌焊接工艺规范等。移动式便携搅拌摩擦焊设备的研究将扩大搅拌摩擦焊技术的应用范围^[20]。

5.3 虚拟轴搅拌摩擦焊设备及复杂曲面焊接技术

随着信息技术和计算机技术的进步,现代设计技术及加

工技术也有飞快的发展,多轴(五轴、六轴)联动及虚拟轴技术已广泛应用于现代产品加工,航天航空交通运输等现代产品的轻金属合金及非金属结构框架连接也迫切需要虚拟轴搅拌摩擦焊设备的研究,伴随着复杂曲面焊接技术需求的扩大,虚拟轴搅拌摩擦焊设备研究必将成为搅拌摩擦焊技术研究的另一个热点。

6 搅拌摩擦焊运动学、动力学及热流场数值模拟研究

在大量搅拌摩擦焊焊接机制实验研究基础上,越来越多的学者试图从理论上对焊接机制予以科学解答,在云计算、云设计、云制造等信息处理技术高度发达的今天,对搅拌摩擦焊运动学、动力学及热流场数值模拟研究越来越多,手段与方法趋于多元化,从不同的角度进行数值模拟仿真研究。基于温度场与运动学、动力学参数的密切关系,以及对于焊接接头的力学性能、残余应力、流场变化以及微观组织结构的影响,众多国内外学者对搅拌摩擦焊温度场都作了深入的研究,通过不同的边界约束条件设定,利用不同的数值模拟方法,以期得到较为精确的搅拌摩擦焊热流场数学模型,从而对不同材料的搅拌摩擦焊焊接机制予以科学解答,并对搅拌摩擦焊焊接工艺的规范化提供理论依据。如搅拌摩擦焊接热力耦合数值模拟模型^[21-22]、有限元数值计算模拟^[23-24]等,模拟仿真焊件温度场、应力及变形情况,比较试验和仿真结果的差异,为大型及复杂结构件的焊接变形研究提供了基础。随着现代信息处理技术的进步,数值模拟边界约束条件的设定将更加接近真实环境,搅拌摩擦焊焊区热流场数学模型将更为精确。伴随着研究的深入,对搅拌摩擦焊焊接机制及各种能量流场的解释将更加科学。

7 结论

FSW 焊接工艺广泛应用于航空航天、造船、汽车、铁路等工业领域,随着研究和应用的深入,已对连接技术的发展产生巨大的冲击和推动,特别是在航天航空领域的应用,必将带动搅拌摩擦焊技术在国民经济各行业设备制造过程中的迅速发展,具有非常光明的应用前景。

参考文献 (References)

- [1] Bae D H, Lee M H, Kim K T, et al. Application of quasicrystalline particles as a strengthening phase in Mg-Zn-Y alloys [J]. *Alloys Omp*, 2002, 34(2): 445.
- [2] Pinga D H, Honoa K, Nie J F. Atom probe characterization of plate-like precipitates in a Mg-RE-Zn-Zr casting alloy [J]. *Ser Mater*, 2003, 48: 1017.
- [3] 吴安如, 夏长清, 王少武, 等. 搅拌摩擦焊接技术的研究现状及其展望 [J]. *材料导报*, 2005, 19(4): 84-88.
Wu Anru, Xia Changqing, Wang Shaowu, et al. *The Journal of Materials*, 2005, 19(4): 84-88.
- [4] 亚敏, 戴福隆, 吕坚. 搅拌摩擦焊接接头残余应力的试验 [J]. *焊接学报*, 2002, 23(5): 53-56.
Ya Min, Dai Fulong, Lu Jian. *Transactions of the China Welding*

- Institution*, 2002, 23(5): 53-56.
- [5] Thomas W M, Woollin P, Johnson K I. Friction stir welding of a ferritic stainless steel feasibility study: UK, 7417. 01/98/ 1010.03[P]. 1998.
- [6] Rommevaux-Jestin C, Li Y. Friction-stir welding of aluminum alloy 2024 to silver [J]. *Journal of Materials Science Letters*, 2000, 19 (12): 1047-1051.
- [7] Johnson R. Preliminary assessment of the friction stir welding of magnesium alloys: UK, 13203.1/01/1117.03[P]. 2002.
- [8] 印红羽, 彭晓芙, 林增栋. 组立方氮化硼摩擦搅拌焊接搅拌头: 中国, CN201253731[P]. 2009-06-10.
Yin Hongyu, Peng Xiaofu, Lin Zengdong. Composite cubic boron nitride friction stir welding head: PRChina, CN201253731[P]. 2009-06-10.
- [9] 柯黎明, 潘际奎, 邢丽, 等. 搅拌针形状对搅拌摩擦焊焊缝截面形貌的影响[J]. 焊接学报, 2007, 28(5): 33-37.
Ke Liming, Pan Jiluan, Xing Li, et al. *Transactions of the China Welding Institution*, 2007, 28(5): 33-37.
- [10] 董学伟, 黎向锋, 左敦稳, 等. 基于螺纹锥形搅拌头的搅拌摩擦焊三维流场仿真研究[J]. 航空制造技术, 2012(4): 66-68.
Dong Xuewei, Li Xiangfeng, Zuo Dunwen, et al. *Aviation Manufacturing Technology*, 2012(4): 66-68.
- [11] 柯黎明, 潘际奎, 王善林, 等. 搅拌头形状对焊缝塑化金属流动行为的影响 [C]/第十一次全国焊接会议论文集. 哈尔滨: 中国焊接协会, 2005: 299-302.
Ke Liming, Pan Jiluan, Wang Shanlin, et al. Stir tool shape on the weld metal plastication liquidity for influence [C]/Proceedings of 11th National Welding Conference. Harbin: China Welding Association, 2005: 299-302.
- [12] 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.
Yang Xinqi, Qin Hongshan. *Sciencepaper Online*, 2011, 6(2): 109-114.
- [13] 王训宏, 王快社. 搅拌摩擦焊的发展现状及存在的问题[J]. 焊接技术, 2006, 35(6): 1-4.
Wang Xunhong, Wang Kuaishe. *Welding Technology*, 2006, 35(6): 1-4.
- [14] 张华, 林三宝, 吴林, 等. 搅拌摩擦焊研究进展及前景展望[J]. 焊接学报, 2003, 124(3): 91-96.
Zhang Hua, Lin Sanbao, Wu Lin, et al. *Transactions of the China Welding Institution*, 2003, 124(3): 91-96.
- [15] 王伟, 史清宇, 李亭, 等. 搅拌摩擦焊工艺参数窗口的建立与接头性能[J]. 焊接学报, 2008, 29(5): 77-80.
Wang Wei, Shi Qingyu, Li Ting, et al. *Transactions of the China Welding Institution*, 2008, 29(5): 77-80.
- [16] 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.
- [17] 陈玉华, 董春林, 倪泉, 等. 钛合金/铝合金搅拌摩擦焊接头的显微组织[J]. 中国有色金属学报. 2010, 20(专辑 1): 211-214.
Cen Yuhua, Dong Chunlin, Ni Quan, et al. *The Chinese Journal of Nonferrous Metal*, 2010, 20(S1): 211-214.
- [18] 董丰波, 陈文华, 宿国友, 等. 铝/铜异种材料搅拌摩擦焊焊接工艺的优化[J]. 电焊机, 2011, 41(2): 76-78.
Dong Fengbo, Cen Wenhua, Su Guoyou, et al. *Electric Welding Machine*, 2011, 41(2): 76-78.
- [19] 陈杰, 张海伟, 刘德佳, 等. 我国搅拌摩擦焊技术的研究现状与热点分析[J]. 电焊机, 2011, 41(10): 92-97.
Chen Jie, Zhang Haiwei, Liu Dejia, et al. *Electric Welding Machine*, 2011, 41(10): 92-97.
- [20] 张平, 曾庆强, 赵军军, 等. 便携式搅拌摩擦焊设备研制可行性探讨[J]. 焊接, 2010(6): 2-7.
Zhang Ping, Zeng Qingqiang, Zhao Junjun, et al. *Welding Magazine*, 2010(6): 2-7.
- [21] 鄢东洋, 史清宇, 吴爱萍, 等. 搅拌摩擦焊的热力耦合分析模型[J]. 机械工程学报, 2010, 46(16): 106-112.
Yan Dongyang, Shi Qingyu, Wu Aiping, et al. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2010, 46(16): 106-112.
- [22] 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.
Zhou Mingzhi, Lei Danggang, Liang Ning, et al. *Transactions of the China Welding Institution*, 2010, 31(2): 5-9.
- [23] 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.
Yang Weiping, Ma Yue, Deng Yong, et al. *The Journal of Aerospace Development*, 2010, 1(2): 116-119.
- [24] 李文亚, 余敏, 李京龙. 质量放大因子对搅拌摩擦焊插入过程的影响[J]. 焊接学报, 2010, 31(2): 1-4.
Li Wenya, Yu Min, Li Jinglong, et al. *Transactions of the China Welding Institution*, 2010, 31(2): 1-4.
- [25] 张新超, 杨建国, 王庆霞, 等. 2024 铝合金搅拌摩擦焊初始温度场数值模拟与分析[J]. 电焊机, 2012, 42(3): 78-81.
Zhang Xinchao, Yang Jianguo, Wang Qingxia, et al. *Electric Welding Machine*, 2012, 42(3): 78-81.
- [26] 祝舜丰, 柯黎明, 郭正华, 等. 搅拌摩擦焊过程金属流场的数值模拟研究进展[J]. 热加工工艺, 2011, 40(13): 118-122.
Zhu Shunfeng, Ke Liming, Guo Zhenghua, et al. *Hot Working Technology*, 2011, 40(13): 118-122. (责任编辑 朱宇)

《科技导报》“综述文章”栏目征稿

“综述文章”栏目发表对当前自然科学有关学科领域的研究热点、前沿分支发展现状及动向的评述性文章。要求在所属学科领域从事比较深入研究的一线科研人员在研读相当数量文献资料的基础上,全面、深入、系统地论述该领域的问题,并对所综述的内容进行归纳、分析、评价,以反映作者的观点和见解。在线投稿:www.kjdb.org。