

航空航天焊接及成形典型技术

Typical Welding and Forming Technology in Aerospace Industry

南京航空航天大学材料科学与技术学院 沈以赴 顾冬冬 陈文华



沈以赴

南京航空航天大学研究生院副院长，教授，博士生导师。长期从事金属材料焊接、激光加工、表面工程等学科的教学和研究工作，先后主持和参加国家自然科学基金重点项目、面上项目，航空科学基金，国防预研基金，江苏省自然科学基金等 10 余项课题的研究，发表学术论文 80 余篇，其中 SCI 收录 20 余篇，EI 收录 40 余篇。

近年来，随着高性能飞机（新型战机、大型军用运输机、特种军用飞机和武装直升机）、太空飞行器的发展，各国政府和军方不断推出新的研究计划，投入巨额资金，发展了一系列先进的航空航天制造技术，特别是先进焊接与成形技术，其中包括搅拌

随着高性能飞机（新型战机、大型军用运输机、特种军用飞机和武装直升机）、太空飞行器的发展，各国政府和军方不断推出新的研究计划，投入巨额资金，发展了一系列先进的航空航天制造技术，特别是先进焊接与成形技术，其中包括搅拌摩擦焊接技术、超塑成形 / 扩散连接、瞬时液相扩散连接、激光复合热源连接等。

摩擦焊接技术、超塑成形 / 扩散连接、瞬时液相扩散连接、激光复合热源连接等。

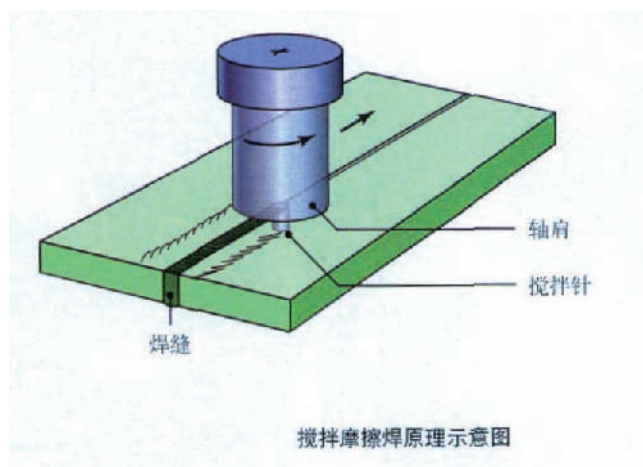
搅拌摩擦焊

搅拌摩擦焊 (Friction Stir Welding, FSW) 是英国焊接研究所 (TWI) 1991 年发明的，是世界焊接技术发展史上自发明到工业应用时间跨度最短和发展最快的一项固相连接新技术，1996 年就在工业制造领域得到成功应用。

搅拌摩擦焊是利用一种特殊的非耗损的搅拌头，旋

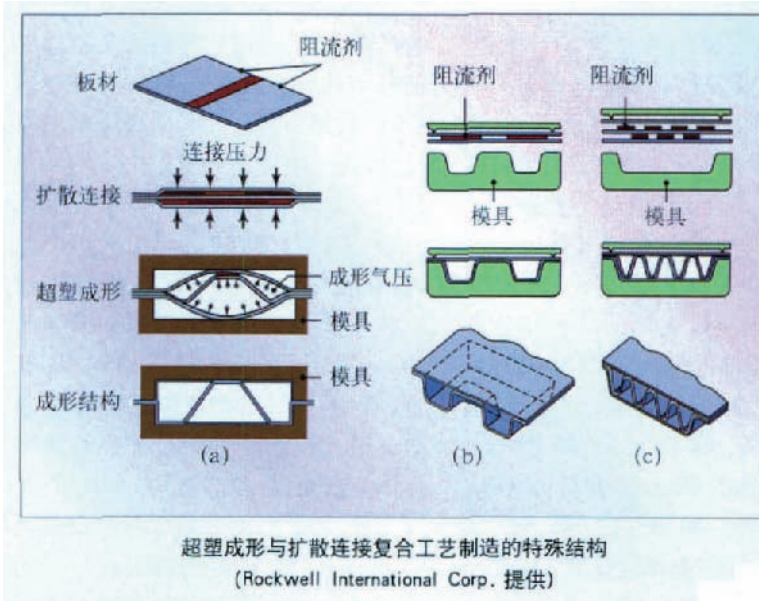
转着压入被焊零件的界面，搅拌头与被焊零件的摩擦使被焊材料迅速加热产生热塑性，当搅拌头沿着焊接界面向前移动时，产生热塑性的部分在搅拌头的旋转移动作用下由前向后转移，再在搅拌头顶锻压力作用下扩散连接形成致密的固相连接接头。

与传统的焊接方法相比，搅拌摩擦焊避免了弧焊方法带来的冶金缺



搅拌摩擦焊原理示意图

陷,也具有压焊方法诸多的优越性,如焊接变形小;可以焊接多种接头型式,特别适用于长直焊缝;无烟尘、飞溅、紫外辐射;容易实现自动化等。当然搅拌摩擦焊也存在它的局限性,例如,由于焊接时,搅拌头向被焊工件施加足够大的顶锻压力和向前驱动力,要求对被焊零件进行刚性固定;焊接末尾会存在“锁孔”;由于是利用



材料热塑性实现的连接成形,要求被焊材料具有一定的热塑性,即不能焊接热塑性很差的材料。此外,与弧焊或电阻点焊相比较,在机器人等柔性设备的应用上也受到了一定的限制。

鉴于搅拌摩擦焊在焊接过程中不存在材料熔化的特点,可以有效地避免熔焊方法带来的冶金缺陷,所以该焊接技术特别适用于焊接容易产生冶金缺陷的高强度铝合金,搅拌摩擦焊几乎可以焊接所有系列的铝合金材料以及颗粒增强铝基复合材料(Metal Matrix Composites, MMC)。对于用熔焊方法认为不可焊接的2000系列(A1-Cu)和7000系列(A1-Zn)、8000系列(A1-Li)等高强铝合金,采用搅拌摩擦焊获得了巨大的成功。因此该项技术迅速在航空航天领域得到了广泛应用。在航空航天领域适于用FSW技术焊接的结构包括:军用或民用飞机的蒙皮、航天器中的低温燃料箱,航空器油箱、军用机的副油箱、军用或科技探测火箭等。在航空方面,TWI与美国ALCOA公司进行合作,GRAWFORD-SWIFT公司和BAE空中客车公司合作,将搅拌摩擦焊用于中型和大型飞机结构件、蒙皮等的焊接,美国ECLIPSE(月蚀)航空公司还采用搅拌摩擦焊制造包括飞机蒙皮、翼肋、弦状支撑、飞机地板以及结构件的装配等。在航天方面,TWI应用此技术为波音公司生产了3个2000系列铝合金航天飞机燃料箱;美国洛克希德·马丁航空航天公司用该技术焊接了航天飞机外部储存液态氧的低温容器;在马歇尔航天飞行中心,也已用该技术焊接了大型圆筒形容器。

对于异种材料连接,搅拌摩擦焊也具有优越性,如搅拌摩擦焊不仅可以实现2024/6061以及2024/7075等不同牌号铝合金材

震撼推出P1800系列



新款P1800系列刀具预调仪秉承了其经典机型P1500系列的所有优点,将更好的人体工程设计和卓越的内在品质完美结合,创造了极佳的刀具测量和检测解决方案,在任何条件下都可轻松完成刀具各种参数的测量,实现微米级的测量精度!外观更加简约,实用。操作更加简便,快捷!

两年质保

帕莱克是全球刀具系统和刀具预调仪解决方案的领航者,一直致力于为客户提供全方位的加工解决方案,以其先进的技术,高质量的产品,本土化的服务,帮助您在生产经营中降低成本,创造更高效益!

帕莱克机械(南京)有限公司

全国办事处:上海,广州,天津,成都,武汉

电话:025-66612228 传真:025-66612278

Email: sales@parlec.com.cn

www.parlec.com.cn

http://www.cnki.net

料的焊接,还可以实现铜合金和铝合金等不同种材料的焊接。

搅拌摩擦焊还可以焊接铜、镁、锌、铅等合金材料,对于钢合金、钛合金和金属基复合材料的搅拌摩擦焊开发研究也已取得了成功。

超塑成形 / 扩散连接

超塑性是指材料在一定的内部(组织)条件(如晶粒形状及尺寸、相变等)和外部(环境)条件(如温度、应变速率等)下,呈现出异常低的流变抗力、异常高的流变性能(例如大的延伸率)的现象。

超塑性现象最早的报道是在1920年,Rosenhain等人发现Zn-4Cu-7Al合金在低速弯曲时,可以弯曲近180°。1934年,英国的C P Pearson发现Pb-Sn共晶合金在室温低速拉伸时可以得到2000%的延伸率。1945年前苏联的A A Bochvar等发现Zn-Al共析合金具有异常高的延伸率并提出“超塑性”这一名词。1964年,美国的W A Backofen对Zn-Al合金进行了系统的研究,并提出了应变速率敏感性指数 m 值这个新概念,为超塑性研究奠定了基础。

上世纪60年代后期及70年代,由于欧美等发达国家超音速巡航飞机计划的推动,钛合金材料的使用和用量增加,世界上形成了超塑性研究

的高潮。各国学者在超塑性材料、力学、机理、成形等方面进行了大量的研究,并初步形成了比较完整的理论体系。特别引人注意的是,近几十年来金属超塑性已在工业生产领域中获得了较为广泛的应用。一些超塑性的Zn合金、Al合金、Ti合金、Cu合金以及黑色金属等以其优异的变形性能和材质均匀等特点,在航空航天以及汽车零部件生产、工艺品制造、仪器仪表壳罩件和一些复杂形状构件的生产中发挥了不可替代的作用。

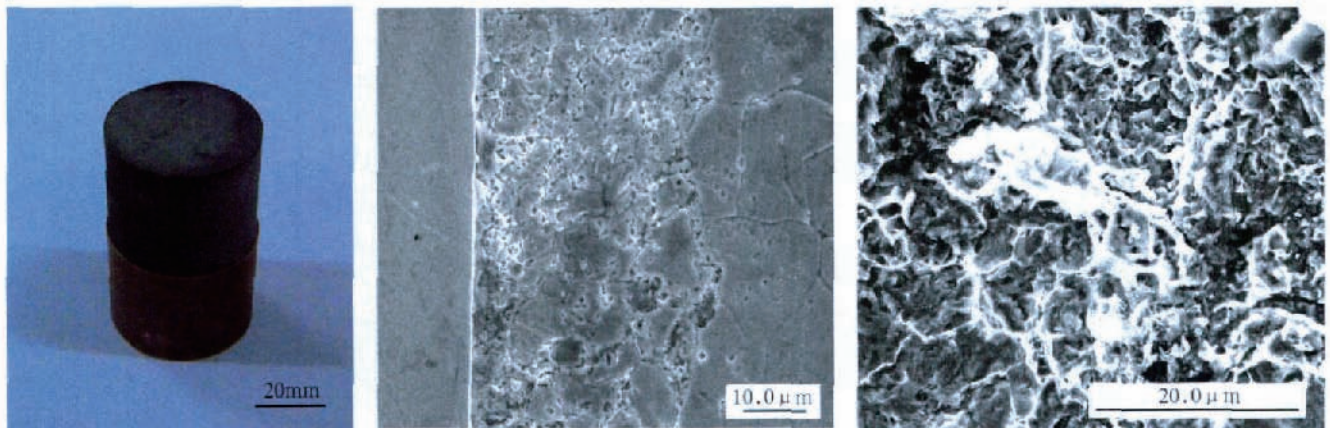
同时超塑性金属的品种和数量也有了大幅度的增加,除了早期的共晶、共析型金属外,还有沉淀硬化型和高级合金;除了低熔点的Pb基、Sn基和著名的Zn-Al共析合金外,还有Mg基、Al基、Cu基、Ni基和Ti基等有色金属以及Fe基合金(Fe-Cr-Ni, Fe-Cr等)、碳钢、低合金钢以及铸铁等黑色金属,总数已达数百种。除此之外,相变超塑性、“先进材料”(如纳米材料、金属基复合材料、金属间化合物、陶瓷等)的超塑性也得到了很大的发展。

金属超塑性可以在很多领域中得到应用,包括压力加工、热处理、焊接、铸造、甚至切削加工等方面。在航空航天制造业中,典型的超塑性工艺——超塑成形 / 扩散连接复合工艺已发挥着日益重要的作用。超

塑成形(Superplasticity Forming, SPF) / 扩散连接(Diffusion Bonding, DB)是利用材料在一定温度和压力下的很高延伸率和固态扩散的能力,在一个热循环中完成成形和焊接的工艺技术,其技术可用于生产低成本、高减重和近无余量加工的复杂构件。在模压超塑性合金薄板时,只需要具备一种阴模或阳模即可,节省一半模具费用。

钛合金材料的性能非常适合SPF/DB技术,现已广泛应用于飞机、航空发动机、导弹、航天器等结构的生产中。亚微米晶或纳米晶的TC4、TC11、Ti-10-2-3、TiAl等合金,利用SPF / DB技术可将亚微米晶的Ti-6Al-4V合金板材成型出形状复杂、组织高度均匀的空心近净型件。SPF/DB技术在航空航天部件的生产上已得到越来越广泛的应用,超塑性成形结构可使成本节省20%~40%。

利用SPF/DB技术成形的合金材料包括钛、铝、镁、碳钢、不锈钢和高温合金等。近年来,随着搅拌摩擦焊技术的广泛应用,搅拌摩擦焊 / 超塑成形复合工艺技术得到了发展。由于铝合金在应用SPF/DB技术成形时,为了保证扩散连接的质量,去除表面氧化膜的工艺变得较为复杂,如果改用搅拌摩擦焊替代扩散连接将使铝合金的成形变得容易且经济



(a) 成形件

(b) 冶金结合界面
W与Cu的TLP连接成形

(c) 韧性断口

PARLEC
Measurably Better

Your total machining solution!

得多。

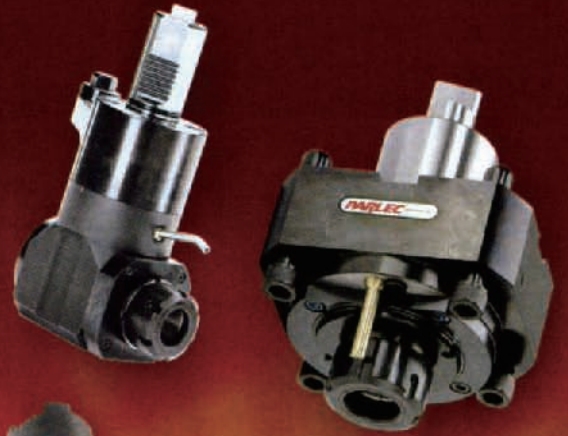
瞬时液相扩散连接

扩散连接分为固态扩散连接和液相扩散连接两大类。扩散连接发展的初期主要是指固态扩散连接,随着扩散连接技术的发展,出现了液相扩散连接。瞬时液相扩散(Transient Liquid Phase, TLP)连接技术是上世纪70年代发展的一种新型的连接技术。对TLP的研究,一开始便应用于航空航天先进材料连接,成功应用的典型例子是在Ni基高温合金领域的连接。镍基高温合金的可焊性比较差,采用传统的焊接方法焊接涡轮叶片的镍基高温合金时,很难达到满意的焊接质量。钎焊镍基高温合金导致焊缝的机械性能和耐腐蚀性能下降严重,固相扩散焊接虽然能够实现对沉淀强化和弥散强化镍基合金的有效焊接,但对试样焊接表面的加工质量要求较高,扩散焊接所施加的压力很大,并且固相扩散焊接难以焊接形状复杂的镍基高温合金构件。为解决上述问题,美国科学家研究开发了TLP连接技术,并成功应用于镍基高温合金涡轮叶片的焊接。

瞬时液相扩散连接,顾名思义,材料连接时在界面处出现了液相,由于液相中原子扩散速度更快,更有利于界面原子的扩散,也可大幅度降低扩散连接所需压力,因此焊接时间大大缩短,焊接压力也大大降低,从而可以焊接形状复杂的构件。由于两被焊材料的性质决定了扩散界面能否形成液相,所以为了有效地实现液相扩散连接,往往需要加入中间合金层。中间层合金一般为成分接近于母材、熔化温度低于母材或通过扩散能形成液相的TLP合金(中间层合金厚度约30~50 μm)。

焊接时,将工件装配好后,在惰性气体的保护下,加热到焊接温度,并施加一定的压力,中间层首先熔化或通过扩散能形成液相,润湿母材,工件配合面间形成一薄层液体。保温时,中间层与母材间的元素迅速扩散,使界面成分发生变化,这种变化导致连接温度下发生等温凝固,形成可靠的焊接接头。等温凝固发生后,接头组织与母材基本相似,但在成分上仍有差别,需保温以达到接头成分均匀。整个过程为:液相形成→液相扩散→等温凝固→成份均匀化。

W与Cu连接时,W、Cu间热膨胀系数和弹性模量差别大,在高温连接时易产生残余应力及接头开裂;且W与Cu既不互溶,也不形成金属间化合物,很难直接用扩散焊进行连接。针对这一问题,笔者领导的课题组通过中间层合金设计(如Cu-Mn合金、Mn-Ni合金)和TLP工艺参数优化,控制合金形成熔点相对较低的特定含量的过渡液相。考虑到Cu-Mn合金相图是具有极小点的特殊类型的匀晶相图,这类相图在一定的成分点,其液相线和固相线重合,不存在结晶温度区间,即在恒温下结晶成单相固溶体组织,不像大多数过渡液相是通过共晶(大多含有金属间化合物脆性相)而形成的,故获得的TLP接头的显微组织有利于改善接头的塑性和抗裂性。



帕莱克动力刀座

—世界知名机床厂商的OEM供应商!

日本MAZAK (马扎克) SQT, MP系列
美国HAAS (哈斯) SL20, SL30, SL40系列
日本MORI SEIKI (森精机) CS, NL系列
韩国DAEWOO (大宇) PUMA系列
日本CITIZEN (西铁城) M, L, C, K系列

★ North America

★ Asia

★ Europe

- NSK高精度轴承: 对称的双轴承设计, 安装更加贴近齿轮, 刚性更佳!
- 高速密封: 独有的专利技术, 可实现密封圈更换, 大大提高了刀座的使用寿命。
- 美国格里森高精度螺旋伞齿轮: 高精度, 低噪音, 超长寿命!

新年送福, 贴心服务

为了让更多客户享受帕莱克提供的优质服务, 值此动力刀座维修中心新装开幕之际, 特别推出MAZAK (马扎克) SQT, MP系列动力刀座免费维修服务活动, 期待您的参与!

帕莱克是全球刀具系统和刀具预调仪解决方案的领航者, 一直致力于为客户提供全方位的加工解决方案, 以其先进的技术, 高质量的产品, 本土化的服务, 帮助您在生产经营中降低成本, 创造更高效益!

帕莱克机械(南京)有限公司

全国办事处: 上海, 广州, 天津, 成都, 武汉
电话: 025-66612228 传真: 025-66612278

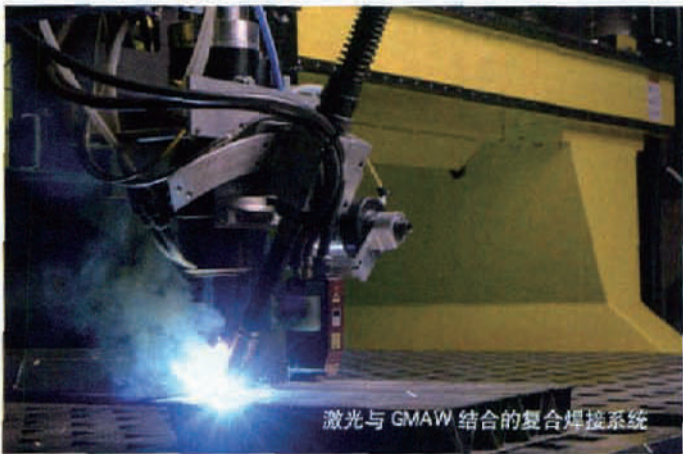
Email: sales@parlec.com.cn

www.parlec.com.cn



激光复合热源连接

激光焊接是激光加工技术应用的重要方面之一。上世纪70年代主要用于焊接薄壁材料和低速焊接。激光焊接是一种高质量、高精度、低变形、高效率和高速度的焊接方法。随着激光器功率等级的提升以及光纤传输技术的完善、金属钎焊聚束物镜等的研制成功,激光焊接在航空航天、机械制造、汽车工业、粉末冶金、生物医学微电子行业等领域的应用越来越广。但是金属材料(铝、镁、铜等)反射率高等因素限制了激光焊接的实际工程适用范围,尤其在航



激光与 GMAW 结合的复合焊接系统

空航天及国防工业中的推广应用遇到极大困难。为拓宽激光焊接技术的应用领域,激光与其他方法的复合焊接技术成为各先进国家研究的重点,希望借助其他方法的焊接特点来弥补激光焊接的不足之处,充分发挥激光焊接的优越性。除此之外,借助复合热源的高能量效应,有望焊接两种单热源难以完成的接头形式,获得单热源不可能达到的高效焊接效果。其中最具影响的当数激光-电弧复合焊接技术的研究与应用。

激光-电弧复合热源焊接技术既具备一般电弧焊的高适应性特点,又具备激光作为焊接热源的大熔深、高速、低变形特点,是近几年迅速发展起来的优质高效焊接技术。铝合金由于其反射率高、导热性好,激光焊接时功率等级要求高,易产生气

孔、裂纹。采用激光-电弧复合热源焊接可有效解决这些问题,铝合金液态熔池的反射率低于固态金属,由于电弧的作用,激光束能够直接辐射到液态熔池表面,增大吸收率,提高熔深。采用直流反接(DCEP)可在激光焊之前清理氧化膜。此外,电弧形成的较大熔池在激光束前方运动,增大熔池与固态金属之间的润湿性,防止形成咬边。日本学者 TShida 与 M Hirokawa 应用 10kW CO₂ 激光与交流 TIG 复合焊接 A5083 铝合金,焊缝中没有气孔和缩孔出现,咬边现象也明显减小。激光-TIG 复合热

源在高速焊接条件下,可以得到稳定的电弧,焊缝成型美观,减少了气孔、咬边等焊接缺陷的产生。尤其是低电流、高焊速和长电弧时,激光-TIG 复合热源的焊接速度可达到激光焊接的两倍,因此激光-TIG 电弧复合热源主要用于薄板高速焊接,也可以用于不等厚材料的焊接。

激光-脉冲 MIG 电弧复合热源焊接铝合金时,在相同焊接热输入量条件下,复合焊获得的焊缝熔深大于相同电流的脉冲 MIG 焊;在获得相同焊缝熔深的条件下,复合焊与相同电流的脉冲 MIG 焊相比具有更高的焊接速度、更低的热输入量和更小的变形。所以激光-MIG 与激光-TIG 相比,其焊接板厚更大、焊接适应性更高。通过调节电弧与激光的不同作用位置,可有效提高对间隙的容忍度,减少焊缝边缘的处理工作量。它的高适应性带来的优点在于,不仅对间隙、错边、对中偏离的敏感性降低,还可以减少焊接装夹、定位、

焊后处理等许多工作。

激光-等离子弧(PA)复合热源焊接具有刚性好、温度高、方向性强、电弧引燃性好、加热区窄、对外界的敏感性小等优点,非常利于进行复合热源焊接。在薄板对接、不等厚板连接、镀锌板搭接、铝合金焊接、切割和表面合金化等方面的应用都获得了良好的效果。采用等离子弧辅助激光在 YAG 和 CO₂ 激光器上进行薄板(0.16mm 厚镀锌钢板)焊接,有效解决了激光高速焊带来的表面成型不连续问题,焊接速度比单独激光焊提高了 100% 左右。而且,由于电弧与激光之间的相互作用,使得电弧非常稳定,即使焊接速度高达 90m/min 时电弧也没有出现不稳定状态,可以获得较宽的焊道和光滑的焊缝表面。

激光-电弧复合热源技术的出现解决了激光焊接中存在的诸多问题,将激光焊接技术的应用提高到一个新的台阶。但是,随着航空、航天与武器制造业中新材料、新结构的不断出现,激光复合热源连接技术同样也存在着一些应用上的局限性。轻质化、高强度是飞行器发展的主要趋势,减重成为了各种新型号的首要解决问题,一些内部件必须采用可替换的高比强度材料,异种材料的焊接技术必不可少,如钛合金、铝合金、镁合金同种金属间连接及镁合金-铝合金、钛合金-不锈钢、高温合金-钢异种金属连接等。另一方面,在结构上采用蒙皮与骨架的新型设计来减轻重量,如某型号导弹的仪器舱体和钛合金空气舵均采用这种结构,在强度满足要求的前提下,通常希望骨架厚度越小越好。为保证接头强度,这种焊缝焊接时蒙皮必须完全焊透,结合面宽度与焊缝在骨架中的深度都有一定要求,因此,焊接过程的同步加压、焊缝形状控制等是保证焊接质量的关键因素。

(责编 晓霞)