

# 钢/铝异种合金激光深熔钎焊与深熔焊工艺研究进展\*

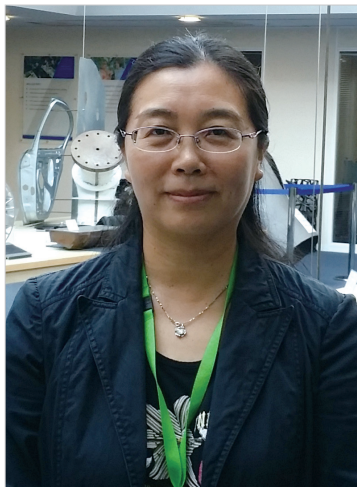
崔丽, 卢东琪, 王国红, 贺定勇

(北京工业大学材料科学与工程学院, 北京 100124)

**[摘要]** 近年来激光深熔焊接技术在异种合金的高效、优质连接中的应用受到了研究人员的广泛关注。依据钢/铝异种合金接头界面反应过程中钢母材是否熔化, 分别从激光深熔钎焊和激光深熔焊接两个角度来论述钢/铝异种合金激光深熔焊接工艺的研究进展。在激光深熔钎焊方面, 从不同形式的激光热源形式来讨论钢/铝异种合金的国内外研究现状; 在激光深熔焊接方面, 按照接头的形式不同来分析钢/铝异种合金激光深熔焊接的国内外研究进展。最后, 提出了钢/铝异种接头激光深熔焊接技术研究的重要方向。

**关键词:** 激光深熔钎焊; 激光深熔焊; 钢/铝异种接头; 焊接工艺

**DOI:** 10.16080/j.issn1671-833x.2018.03.066



崔丽

博士、副研究员、硕士生导师, 现任中国焊接学会计算机辅助焊接工程专业委员会委员。在薄板不锈钢、铝合金、钛合金激光焊接工艺、接头组织和力学性能评价方面, 积累了丰富的研究和实践经验。在国内外学术期刊上发表论文60余篇, 获国家发明专利7项。

\* 基金项目: 国家自然科学基金项目(51475006)和北京市教育委员会科技计划重点项目, 暨北京市自然科学基金B类项目(KZ20160005004)资助。

为满足现代装备轻量化、高性能化和低成本化制造的发展要求, 钢/铝异种合金连接结构在汽车、航空航天、船舶以及军事国防等领域的应用不断扩大<sup>[1-3]</sup>。随着钢/铝异种合金连接结构应用的日益增多, 其高效、优质连接问题越来越受到研究人员的重视<sup>[4-6]</sup>。然而, 由于铝和钢的热物理性质存在很大差异, 冶金相容性差, 采用普通的熔化焊接方法难以实现连接, 尽管摩擦焊、爆炸焊、扩散焊、超声波焊及磁脉冲焊等一些固态焊接方法能够实现钢/铝异种合金的连接<sup>[7-11]</sup>, 并且可以得到优质的焊接接头, 但这些固态焊接方法受到工艺局限性的限制, 焊接效率较低, 加工柔性差, 连接件的尺寸大小受加热设备的限制, 制造大尺寸零件和结构复杂工件较为困难, 应用受到一定的限制。

目前国内外对钢/铝异种合金的熔化连接已开展了大量的探索, 结果表明, 铝/钢异种合金焊接最显著的特征是在接头内易形成脆硬

的金属间化合物, 降低了接头的力学性能<sup>[4-11]</sup>。为了获得良好力学性能的钢/铝异种接头, 一般认为需将界面金属间化合物的厚度控制在 $10\mu\text{m}$ 以下<sup>[11-13]</sup>。研究结果证实, 界面金属间化合物的形成与界面热传导的速度(时间)和温度有直接关系<sup>[13-14]</sup>。与普通电弧热源相比, 激光束具有高能量密度、焊接热输入低且对工件的加热位置及局部热输入可精确控制等优势<sup>[14-16]</sup>。在异种合金的焊接过程中, 精确控制热输入、高的焊接速度使得焊接加热和冷却速率高, 可有效地减少界面金属间化合物的生长时间, 有利于控制接头处界面金属间化合物厚度和形态, 是异种合金焊接中最有前途的方法之一。

从现有的文献报道看, 用于异种合金的激光焊接技术主要有反应润湿焊(Reactive Wetting Welding)<sup>[16-18]</sup>、熔钎焊(Welding-Brazing)和深熔焊(Keyhole Welding)3大类。其中, 反应

润湿焊与熔钎焊界面反应机理相同,均是液态铝/固态钢之间的冶金反应,深熔焊接接头界面反应则是液态铝/液态钢之间。激光熔钎焊是近些年发展起来的新型焊接方法,激光深熔焊是激光焊接中最常用的焊接模式。

新近发展起来的激光熔钎焊有利于获得较薄的金属间化合物,是目前钢/铝异种合金焊接研究较多的方法,且通过填充材料(如添粉、填丝、过渡层或涂层等)加入合金元素,促进金属间化合物的形核,抑制金属间化合物的生长,或加入的元素可替换金属间化合物中Al或Fe元素,使形成新的具有较高延性的金属间化合物,从而改善金属间化合物的脆性。

虽然现有的激光熔钎焊方法对抑制接头界面金属间化合物的脆性取得了较大的研究进展,然而,接头界面液态铝对固态钢的润湿性很差,给焊缝成形、焊接过程的稳定性和适应性带来一系列问题。与之相比,激光深熔焊则不存在熔钎焊过程中界面润湿铺展的难题,并且具有良好的焊接稳定性与适应性。

本文主要从激光深熔钎焊及激光深熔焊接两方面来讨论铝/钢异种合金激光深熔焊接技术的国内外研究现状。

## 激光深熔钎焊

### 1 概念与分类

根据激光能量吸收机制的不同,激光熔钎焊可分为激光热导熔钎焊和激光深熔钎焊两类<sup>[1]</sup>。激光热导熔钎焊是指通过材料(工件、焊丝)表面吸收激光能量,依靠热传导方式加热/熔化被焊工件和焊丝以实现异种材料连接的熔钎焊方法<sup>[1]</sup>。受热传导的限制,激光热导熔钎焊一般适合于薄板焊接。而激光深熔钎焊是采用聚焦的激光作用于低熔点母材一侧进行深熔焊接,熔化的低熔点母材金属在接头界面处与高熔点母材通过合金元素的溶解与扩散等

相互作用而形成钎接接头,即在低熔点母材一侧为激光深熔焊,而在高熔点母材一侧为钎焊<sup>[1]</sup>。

与热导熔钎焊相比,在激光深熔焊过程中,母材的熔化是通过深熔机制实现的,激光的能量利用率以及焊接效率都较激光熔钎焊有很大的提高,可以实现较大厚度材料接头的连接。因此,新近,钢/铝异种合金激光深熔钎焊成为国内外的研究热点。在激光深熔钎焊过程中,作为焊接的激光热源主要有单束激光、双光束及激光-电弧复合等不同形式,本文从这3方面来详细讨论国内外铝/钢异种合金激光深熔钎焊的研究现状。

### 2 单束激光深熔钎焊

目前国内外对钢/铝异种合金激光深熔钎焊接工艺、接头组织与力学性能进行了一定的研究,取得了较好的研究成果。

肖荣诗等<sup>[19-20]</sup>在国内明确提出了激光深熔钎焊的工艺方法。在不使用任何钎剂的情况下,成功实现了钢/W-Cu粉末冶金材料、黄铜/低碳钢、工业纯铝/紫铜、铝合金/钛合金对接接头的高效连接,具有较好的普适性。苗玉刚等<sup>[21]</sup>也发表了镁合金/低碳钢对接接头激光深熔钎焊研究报告,表明激光深熔钎焊方法可实现多种材料的连接。

Liu等<sup>[22]</sup>对0.8mm厚的镀锌钢和1.5mm厚的5052铝合金搭接接头进行激光熔钎焊,结果表明,镀锌层对接头有润湿作用,当金属间化合物层的厚度不超过6 $\mu\text{m}$ 时,接头断裂处位于铝合金熔合线上。Peyre等<sup>[17]</sup>进行了1.2mm厚的DC04钢与1mm厚的6016-T4铝合金搭接接头的激光深熔钎焊,结果表明,界面处生成的金属间化合物层厚度不超过20 $\mu\text{m}$ ,且接头抗力最高为220N/mm,接头断裂处位于热影响区。Zhang等<sup>[23]</sup>对1.2mm厚的镀锌钢和1.15mm厚的铝合金对接接头进行添加4043焊丝激

光深熔钎焊,光斑直径0.4mm,其焊接装置及原理如图1所示。研究结果显示,接头界面处的金属间化合物厚度在1.5~13 $\mu\text{m}$ 之间,接头横向拉伸断裂在铝合金的热影响区,接头抗拉强度为162MPa。Sun等<sup>[24]</sup>进行2mm厚的低碳钢/铝合金对接接头的填充4043焊丝激光深熔钎焊研究,钢侧开60°坡口,为了增加其润湿性,在坡口表面进行了热浸镀锌。接头界面金属间化合物厚度在1.8~6.2 $\mu\text{m}$ 之间,接头横向拉伸断裂在金属间化合物层,呈现了脆性断裂,接头最高抗拉强度为120MPa。

上述这些研究都是通过激光准确加热低熔点铝合金及铝合金焊丝,然后通过熔化的低熔点材料浸润高熔点钢界面来形成接头,从而在低熔点材料一侧获得熔焊接头,高熔点材料一侧获得钎焊接头,接头界面的金属间化合物层较薄。

然而,上述研究还表明,当激光照射在低熔点铝合金时反射率较高,激光利用率较低,且快速焊接时瞬间熔化的铝合金不能很好地润湿固态钢,难以获得较好的钢/铝熔钎接头。为了获得较好的接头成形,一般需要加钎剂、镀锌层、填充焊丝或者对接头进行预热<sup>[25]</sup>。此外,当采用单束激光进行焊接时,由于单束激光热源能量的分布特点,使得接头界面加热反应及冷却速度很快,界面的温度梯度很大,导致界面发生的冶金反应不均匀,存在界面组织和力学性能的不均匀性,甚至出现未钎合现象,导致接头力学性能较低。

### 3 双光束激光深熔钎焊

针对单束激光焊接时存在的界面组织不均匀性问题,研究人员努力调控激光熔钎焊界面的温度分布。研究思路是采用能量分布均匀的激光光斑配合适当的坡口形式(如V形),有效地抑制界面反应的不均匀,提高在整个界面上温度分布的均匀程度,从而获得良好力学性能的异种

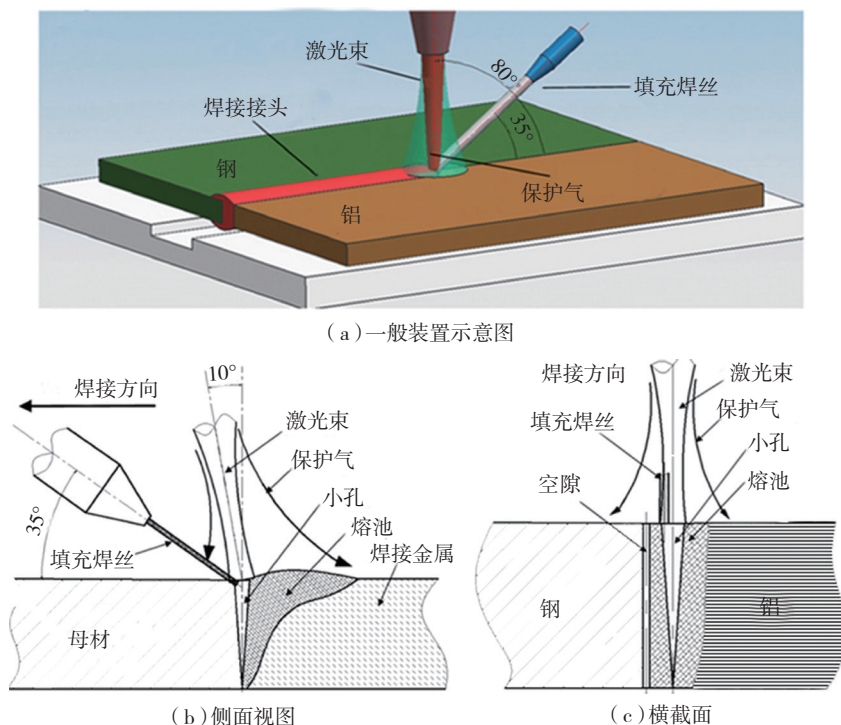


图1 不同角度激光深熔钎焊接工艺示意图

Fig.1 Schematic view of the laser keyhole welding-brazing process from different perspectives

合金激光熔钎焊接头。这是由于激光光斑模式会对界面微观组织产生很大影响,如果激光光斑的能量密度的分布较为均匀,温度梯度小,钎料均匀受热,反应层在厚度方向上的差别变小,则有利于对界面组织不均匀性的控制。在焊接过程中采用双光束激光就是一个典型的例子。

双光束激光焊接是将激光通过光学分光或者通过组合两个激光发生器,将其用于激光焊接的方法<sup>[26]</sup>。在同质材料的焊接中,双光束激光表现出了明显的优势:不仅具有单光束激光焊接熔深大,速度快等优点,还可通过改变光束能量比、光束间距,或者两束激光的能量分布模式,对双光束激光焊接过程中的温度场进行调节,降低在界面的温度梯度,减小界面反应层在厚度方向上的差别,同时有效地改善焊缝成形、减少焊接气孔、裂纹等焊接缺陷,提高接头焊接质量<sup>[27-28]</sup>。

目前国内外已有异种合金双光束激光深熔钎焊的研究报道。Miyashita等<sup>[29]</sup>进行双光束激光焊

接1mm厚的镁合金/铝合金的研究,结果表明双光束激光能够控制界面温度场分布、改善熔化金属的流动行为,抑制界面金属间化合物的形成。檀财旺等<sup>[30]</sup>研究了钢/镁异种金属双光束激光熔钎焊的特性,结果表明,双光束能改善单光束产生的未钎合,可获得更大的界面铺展,改善钎料的润湿性能,可提高试验参数的适应性和焊接的稳定性。Shi等<sup>[31]</sup>进行了双光束激光焊接0.8mm厚的低碳钢和1.2mm厚的铝合金搭接接头的工艺研究,结果表明双光束激光不仅能控制金属间化合物层的厚度,还可提高接头强度。Chen等<sup>[32]</sup>研究了填充铜过渡层的钢/铝异种合金双光束激光焊接接头界面组织和断裂行为。与单束激光焊接相比,双光束激光焊接及添加Cu箔使深熔小孔具有更好的稳定性,获得更好的焊缝表面成形,有利于提高接头机械抗力。

#### 4 激光-电弧复合热源熔钎焊

为了调控异种接头界面温度的

均匀分布,另一种有效的方法就是采用激光电弧复合热源。哈尔滨焊接研究所雷振等<sup>[33-34]</sup>最早提出了大光斑激光-电弧复合热源焊接铝合金/镀锌钢搭接接头的研究思路。研究表明,激光-MIG热源复合焊接铝/镀锌钢的焊接速度可以达到3~5m/min,并且熔钎焊接头的抗拉强度可达到5A02铝母材强度的72%~75%,界面金属间化合物层的厚度在1.5~4.0 $\mu\text{m}$ 之间。

与上述大光斑激光思路不同,德国不莱梅应用激光研究所(BIAS)研究人员则提出采用聚焦的激光-电弧复合焊接方法用于钢/铝异种合金焊接。迄今为止,他们进行了AA6016铝合金/低碳钢激光-MIG电弧复合深熔钎焊的可行性<sup>[35-36]</sup>,还系统研究了复合焊工艺参数对接头力学性能、坡口间隙容忍度、界面润湿宽度和润湿行为的影响。结果表明,激光-MIG复合熔钎焊界面金属间化合物层的厚度小于4.0 $\mu\text{m}$ ,获得的接头抗拉强度超过了180MPa。特别是,与单束激光熔钎焊相比,接头间隙容忍度可达1mm(板厚1.15mm),焊接速度高于6m/min。

除了上述几种热源形式的激光深熔钎焊以外,还有以下几种激光复合热源焊接钢/铝异种合金接头的报道。

樊丁等<sup>[37]</sup>提出了采用小功率TIG电弧辅助激光的研究思路,进行了5A06铝合金/镀锌钢对接熔钎焊工艺的研究。结果表明,电弧辅助激光热源焊接接头抗拉强度最高可达163MPa,约为5A06铝合金母材强度的74%,是单束激光焊接接头强度的1.3倍。

高明等<sup>[38-39]</sup>采用光纤激光·冷金属过度(CMT)复合热源焊接铝/钢异种合金对接接头,结果表明当激光偏移量为0.4mm时,热输入的优化范围为80~110J/mm,界面金属间化合物层厚度为3~8.5 $\mu\text{m}$ ,接头抗拉强度高于130MPa,达到铝母材的

80% 以上。

Atabaki 等<sup>[40]</sup>研究了厚板异种 AA6061 铝合金 / 高强钢用爆炸焊过渡接头的激光 - 电弧复合焊接工艺, 结果表明, 采用这种激光复合方法可在相对宽的工艺参数范围内, 获得 12.6mm 厚全熔透铝 / 钢 T 型接头, 接头拉伸断裂在铝合金侧。

上述这些研究可以证实, 采用聚焦的激光 - 电弧复合热源进行钢 / 铝异种合金的深熔钎焊是可行的, 且在焊接速度、接头强度及坡口间隙容忍性等方面具有明显的优势。

### 激光深熔焊

上述钢 / 铝异种合金激光深熔钎焊的研究结果表明了深熔钎焊的优势, 然而, 在激光深熔钎焊过程中, 激光是作用于低熔点铝合金母材侧, 由于铝合金母材对激光的反射率较高 (CO<sub>2</sub> 激光约 97%, YAG 激光约 95%), 带来了激光能量利用率较低的问题。此外, 铝合金激光深熔焊接稳定性差, 而且铝合金激光焊缝金属易形成气孔、裂纹等缺陷, 这些都会降低接头力学性能。为了解决上述钢 / 铝异种合金激光深熔钎焊过程的这些问题, 研究人员将激光作用于高熔点钢母材侧将钢母材直接熔化进行深熔焊接研究。

国内外对于钢 / 铝异种合金激光深熔焊接工艺的最初研究是进行钢上铝下的搭接形式, 在此基础上, 新近进行了对接接头的研究。已有的结果表明, 激光深熔焊的突出优势是, 不存在激光深熔钎焊的界面润湿、铺展困难问题<sup>[8,20]</sup>, 且深熔激光焊接具有良好的稳定性与适应性。因此, 本文按照接头的形式不同来分析钢 / 铝异种合金激光深熔焊接的国内外研究进展。

#### 1 搭接接头

Katayama 等<sup>[14]</sup>采用钢上铝下的搭接接头进行了激光深熔焊接工艺研究, 激光直接辐照钢表面形成

匙孔, 液态的钢嵌入到铝合金发生冶金反应。实现了 2mm 厚低碳钢或不锈钢与 3mm 厚铝合金的有效连接, 接头获得了良好的力学性能。Sierra 等<sup>[41]</sup>在不使用任何焊剂的条件下采用钢上铝下搭接形式进行激光深熔焊接低碳钢 / 6016、6056 铝合金, 当焊缝熔深不超过 500 μm 时获得了无焊接缺陷的接头, 接头强度为 250MPa, 而当焊缝熔深继续增加时, 接头强度反而降低。Torkamany 等<sup>[42]</sup>采用钢上铝下的搭接方式, 对低碳钢 / 5754 铝合金进行激光深熔焊接研究, 结果表明工艺参数脉冲宽度和功率对接头组织性能可产生很大影响。Kouadri-David 等<sup>[18]</sup>对 DP600 钢 / 6082 铝合金进行了激光深熔焊试验, 钢焊缝在铝合金侧熔深为 600 μm 时, 接头强度达 190MPa。采用这种钢上铝下搭接形式的优势在于铝的密度小, 焊接时液态铝会上浮进入液态钢的熔池中, 而铝在钢中的溶解度较高, 脆性金属间化合物不会在熔池的内部形成, 从而提高接头力学性能。

在国内, 陈树海等<sup>[43]</sup>以 201 不锈钢 / 5052 铝合金钢上铝下的搭接接头为研究对象, 并添加 100 μm 厚的镍箔为中间层进行激光深熔焊接, 研究了热输入对焊缝成形及接头力学性能的影响, 结果如图 2 所示。结果表明, 不锈钢焊缝金属嵌入到铝合金内的熔深对接头力学性能有重要的影响, 且镍

中间层的添加有效地改善了接头力学性能, 扩大了可用工艺参数范围。

此外, 周愆武等<sup>[44-45]</sup>开展了添加 Si 粉、Sn 粉的激光深熔焊接钢 / 铝合金的研究。结果表明, 添加 Si 粉、Sn 粉的接头形成了具有较好的室温塑性和高温稳定性的 Al<sub>9</sub>Si, Fe<sub>0.9</sub>Si<sub>0.1</sub> 和 FeSn 新相, 抑制了脆性金属间化合物的产生, 从而改善了接头力学性能。周愆武等<sup>[46]</sup>还进行了添加 Cu、Pb 中间层镀锌钢板 / 6016 铝合金激光深熔焊接研究。结果表明, 添加 Cu、Pb 中间层接头的平均抗拉强度和伸长率明显提高, 其中 Pb 提高效率优于 Cu 中间层, 这是由于 Pb 中间层的加入, 产生了新的 Mg<sub>2</sub>Pb 金属间化合物相, 改善了接头的力学性能。

Shi 等<sup>[47]</sup>进行了双光束激光焊接 0.8 mm 厚的低碳钢和 1.2mm 厚的铝合金搭接接头的工艺研究, 结果表明双光束激光不仅能控制金属间化合物层的厚度, 还可提高接头强度。Chen 等<sup>[48]</sup>研究了填充铜过渡层的钢 / 铝异种合金双光束激光焊接接头界面组织和断裂行为。与单光束相比, 双光束激光焊接及添加 Cu 箔使深熔小孔具有更好的稳定性, 获得更好的焊缝表面成形, 有利于提高接头机械抗力。

崔丽等<sup>[49]</sup>采用双光束光纤激光热源对 1.5mm 厚的 5083 铝合金和 1.8mm 厚的不锈钢异种搭接接头进行了激光深熔焊接工艺试验, 研究了光

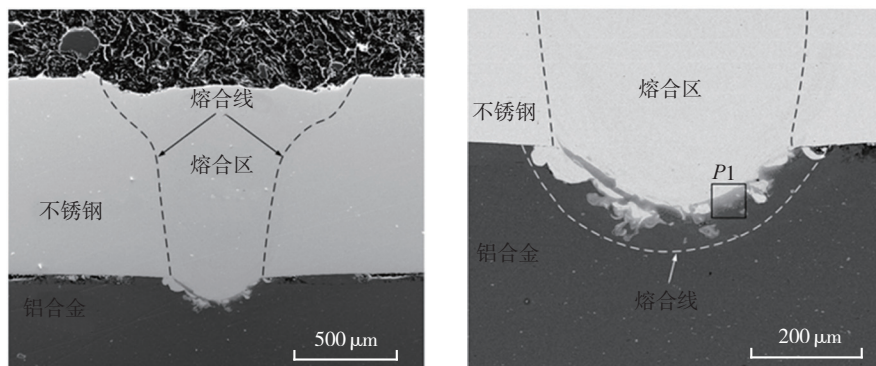


图2 激光深熔焊接钢/铝异种接头横截面形貌  
Fig.2 Cross section of laser keyhole welded steel/Al joints

束相对位置对接头焊缝成形、界面组织及接头力学性能的影响。结果表明,在无任何填充材料条件下,采用双光束激光深熔焊接钢/铝异种接头能够获得优良的焊缝表面和横截面成形,结果如3所示。此外,小能量的分光束在前时,钢/铝接头的焊缝熔深、熔宽和余高均大于分光束在后焊缝的尺寸,且分光束在前的钢/铝接头界面金属间化合物厚度较薄。

## 2 对接接头

除了上述钢/铝搭接接头的研究外,在钢/铝对接接头中,研究人员将激光作用在高熔点母材侧形成深熔小孔,焊接熔池热量通过界面附近形成固态热影响区,过渡到低熔点母材使其熔化,则可获得熔-钎焊接头。

Casalino 等<sup>[50]</sup>以 1.5 mm 厚的 AA5754 铝合金/T40 钛合金对接接头为研究对象,焊接时激光作用于钛合金侧,研究了焊接线能量及激光偏移量对接头性能的影响。发现,当线能量为 50J/mm,激光偏移量为 0.75mm 时,接头强度最大为 191MPa。杨洪亮等<sup>[51]</sup>研究了 5mm 钢/6mm 铝合金对接接头的激光深熔焊接工艺,激光热源直接作用在钢侧,通过优化工艺参数,使钢、铝实现冶金结合,但接头的最大抗拉强度较低。杨旭东等<sup>[52]</sup>针对 2mm 厚 08Al 钢与 4mm 厚 5083 铝合金对接接头,进行了添加铜箔中间层的激光深熔焊研究,焊接过程中将激光光斑偏向钢侧,在优化的工艺参数条件下,可获得最佳的焊缝成形质量;添加的铜箔中间层使焊缝截面形状从 T 形转变为近似 X 形,且界面冶金连接良好。

钱伟等<sup>[53]</sup>对 6.0mm 厚低碳钢/5083 铝合金对接接头进行了激光深熔焊接工艺的初步研究,接头连接原理如图 4 所示。在焊接过程中激光作用于对接接头的钢侧进行无任何填充材料的激光深熔焊接,研究表明深熔焊接工艺参数对钢/铝异种接头实现冶金结合有重要影响。在

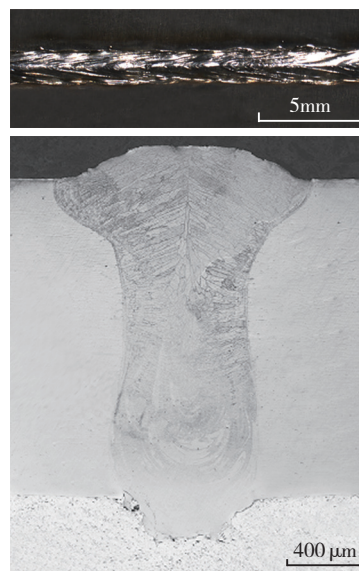


图3 双光束激光深熔焊接钢/铝异种接头焊缝成形  
Fig.3 Weld geometry obtained by dual beam laser keyhole welding of the steel/Al joints

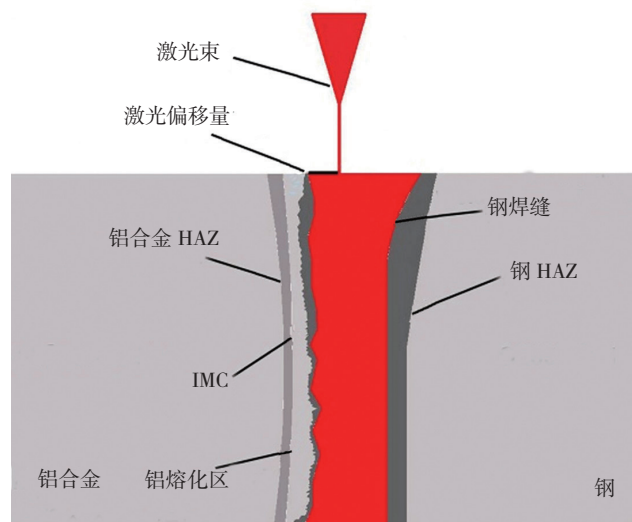


图4 钢/铝异种合金激光深熔焊接原理图  
Fig.4 Schematic diagram of laser keyhole welding of steel/Al dissimilar alloys

优化的激光工艺参数条件下,当激光偏移量在 0.3~0.7mm,焊接速度在 1.0~1.2m/min,离焦量为 0mm 时,可实现中厚板铝/钢异种材料的有效连接,焊缝表面成形良好,无明显焊接缺陷。图 5 为不同激光偏移量条件下获得的钢/铝异种接头横截面形貌<sup>[53]</sup>。这些初步的研究表明,激光深熔焊接的工艺参数对异种接头成形有重要影响,通过优化激光深熔焊接工艺参数实现中等厚度的钢/铝异种接头的连接是可行的。

## 结论

综上所述,激光深熔钎焊与激光深熔焊用于钢/铝异种合金的焊接,母材的熔化是通过深熔机制实现的,可以实现较大厚度材料接头的连接,这为满足现代装备轻量化、高性能化和低成本化制造要求,实现铝/钢异种合金连接结构的应用具有重要的现实意义。两者的本质差别在于界面反应机理的不同,激光深熔钎焊接头界面是液态铝/固

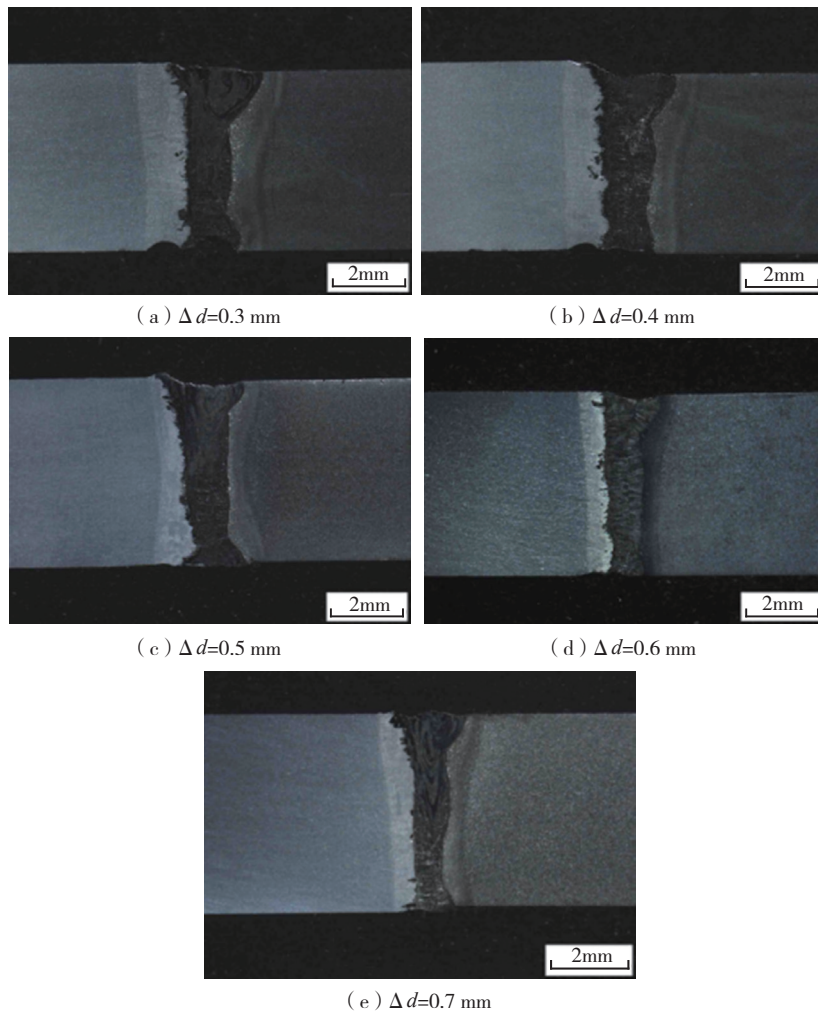


图5 激光偏移量对钢/铝接头横截面形貌的影响  
Fig.5 Effect of laser offset on cross section of steel/Al joints

态钢之间的反应,而激光深熔焊界面反应则是液态铝/液态钢之间。从高效、优质的连接需求考虑,两者各具优势和不足。激光深熔钎焊接头熔-钎特性有利于获得较薄的金属间化合物层,这可能是目前大部分钢/铝异种合金焊接研究集中在激光熔钎焊的原因。然而,激光深熔钎焊过程中,液态铝合金对固态钢的润湿性很差,施焊时必须填充材料(焊丝、钎剂或镀锌层等)来改善液态铝的润湿和铺展性能,给焊缝成形、焊接过程的稳定性和适应性带来一系列问题。与之相比,激光深熔焊则不存在熔钎过程中界面润湿、铺展的难题,具有良好的焊接稳定性与适应性,并且通过激光

深熔焊接工艺参数的控制可获得合适厚度的界面金属间化合物层。

目前国内外对异种合金激光深熔钎焊与激光深熔焊接均集中在焊接工艺方面,对于激光焊接工艺参数、填充材料与焊缝成形、接头质量的相关性已有了一定的认识,而对于激光深熔钎焊,在填充材料的设计和机理方面还需进一步深入研究。对于无任何填充材料的激光深熔焊的研究,还需将工艺参数优化与接头界面温度场的数值计算相结合,进一步进行工艺适应性的深入研究。

#### 参考文献

[1] 肖荣诗,董鹏,赵旭东.异种合金激光熔钎焊研究进展[J].中国激光,2011,38(6):

28-35.

XIAO Rongshi, DONG Peng, ZHAO Xudong. Advances in laser welding of dissimilar materials[J]. Chinese Journal of Lasers, 2011, 38(6): 28-35.

[2] 虞钢,赵树森,张永杰,等.异种金属激光焊接关键问题研究[J].中国激光,2009,36(2):2611-2618.

YU Gang, ZHAO Shusen, ZHANG Yongjie, et al. Study on key problems of laser welding of dissimilar metal[J]. Chinese Journal of Lasers, 2009, 36(2): 2611-2618.

[3] 李亚江,刘坤.钢/铝异种金属连接工艺的研究现状[J].现代焊接,2012(3):1-4.

LI Yajiang, LIU Kun. Research status of steel/aluminum dissimilar metal welding[J]. Modern Welding, 2012(3): 1-4.

[4] 杨丽群.铝合金/不锈钢TIG熔钎焊接头性能分析[D].大连:大连理工大学,2011.

YANG Liqun. Performance analysis of aluminum alloy/stainless steel TIG solder joints[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2011.

[5] 王术军.合金元素对铝合金/钢熔钎焊接头组织与性能的影响[D].济南:山东大学,2013.

WANG Shujun. Effects of alloying elements on microstructure and properties of aluminum alloy/steel welded brazing joints[D]. Jinan: Shandong University, 2013.

[6] 汪建梅.铝与钢异种材料焊接工艺研究[D].沈阳:沈阳航空航天大学,2013.

WANG Jianmei. Welding technology of dissimilar materials for aluminum and steel[D]. Shenyang: Shenyang Aerospace University, 2013.

[7] 张卫东.铝合金/不锈钢TIG熔-钎焊界面控制研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2010.

ZHANG Weidong. Aluminum alloy/stainless steel TIG melting-brazing interface control research [D]. Harbin : Harbin Institute of Technology, 2010.

[8] 董鹏.异种合金激光深熔钎焊机理与技术研究[D].北京:北京工业大学,2011.

DONG Peng. Dissimilar alloy laser deep welding brazing mechanism and technology research[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2011.

[9] 张诗正.铝-钢激光熔钎焊复合接头组织与性能研究[D].兰州:兰州理工大学,2012.

ZHANG Shizheng. Study on microstructure and properties of aluminum-steel laser brazing composite joint[D]. Lanzhou: Lanzhou University

of Technology, 2012.

[10] 石珩, 邵玲, 黄健康, 等. 铝-钢异种金属脉冲旁路耦合电弧 MIG 熔钎焊界面反应的热力学分析[J]. 焊接学报, 2013, 34(9): 87-90.

SHI Yu, SHAO Ling, HUANG Jiankang, et al. Thermodynamic analysis of interfacial reaction of MIG welding brazing of aluminum-steel dissimilar metal pulsed bypass arc welding[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2013, 34(9): 87-90.

[11] 黄鹏飞, 卢振洋, 高文宁, 等. 钢铝异种金属的低能量焊接法[J]. 机械工程学报, 2009, 45(11): 295-299.

HUANG Pengfei, LU Zhenyang, GAO Wenyu, et al. Low-energy welding method for steel and aluminum dissimilar metals[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2009, 45(11): 295-299.

[12] LIN S B, SONG J L, YANG C L, et al. Brazability of dissimilar metals tungsten inert gas butt welding-brazing between aluminum alloy and stainless steel with Al-Cu filler metal[J]. Materials and Design, 2010, 31(5): 2637-2642.

[13] DONG H G, HU W J, DUAN Y P, et al. Dissimilar metal joining of aluminum alloy to galvanized steel with Al-Si, Al-Cu, Al-Si-Cu and Zn-Al filler wires[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2012, 212(2): 458-464.

[14] KATAYAMA S. Laser welding of aluminium alloys and dissimilar metals[J]. Welding International, 2004, 18(8): 618-625.

[15] MATHIEU A, HABADI R S, CHAMPS A D, et al. Dissimilar material joining using laser (aluminum to steel using zinc based filler wire) [J]. Optical Laser Technology, 2007, 39(3): 652-661.

[16] SIERRA G, PEYRE P, DESCHAUX-BEAUME F, et al. Steel to aluminum braze welding by laser process with Al-12Si filler wire[J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2008, 13(5): 430-437.

[17] PEYRE P, SIERRA G, DESCHAUX-BEAUME F, et al. Generation of aluminium-steel joints with laser-induced reactive wetting[J]. Materials Science and Engineering A, 2007, 444(1-2): 327-338.

[18] KOUADRI-DAVID A, PSM Team. Study of metallurgic and mechanical properties of laser welded heterogeneous joints between DP600 galvanized steel and aluminium 6082[J]. Materials and Design, 2014, 54: 184-195.

[19] CHEN K, WANG Z Y, XIAO R S, et al. Mechanism of laser welding on dissimilar metals between stainless steel and W-Cu alloy[J]. China Optical Letters, 2006, 4(5): 294-296.

[20] 皮友东, 董鹏, 杨武雄, 等. 黄铜低碳钢异种金属激光深熔钎焊[J]. 中国激光, 2007, 34(11): 1562-1566.

PI Youdong, DONG Peng, YANG Wuxiong, et al. Brass low carbon steel dissimilar metal laser deep welding brazing[J]. Chinese Journal of Lasers, 2007, 34(11): 1562-1566.

[21] 苗玉刚, 韩端锋, 姚竞争, 等. 镁/钢异种合金激光深熔钎焊工艺特性[J]. 焊接学报, 2011, 32(1): 45-48.

MIAO Yugang, HAN Duanfeng, YAO Jingzheng, et al. Process characteristics of laser deep-melting brazing of magnesium/steel dissimilar alloys[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2011, 32(1): 45-48.

[22] LIU J, JIANG S, SHI Y, et al. Laser fusion-brazing of aluminum alloy to galvanized steel with pure Al filler powder[J]. Optics & Laser Technology, 2015, 66: 1-8.

[23] ZHANG M J, CHEN G Y, ZHANG Y, et al. Research on microstructure and mechanical properties of laser keyhole welding-brazing of automotive galvanized steel to aluminum alloy [J]. Materials & Design, 2013, 45: 24-30.

[24] SUN J H, YAN Q, GAO W, et al. Investigation of laser welding on butt joints of Al/steel dissimilar materials[J]. Materials & Design, 2015, 83: 120-128.

[25] MA H, QIN G, WANG L, et al. Effects of preheat treatment on microstructure evolution and properties of brazed-fusion welded joint of aluminum alloy to steel[J]. Materials & Design, 2016, 90: 330-339.

[26] 李俐群, 陈彦宾, 陶汪. 铝合金双光束焊接特性研究[J]. 中国激光, 2008, 35(11): 1783-1788.

LI Liqun, CHEN Yanbin, TAO Wang. Study on welding characteristics of aluminum alloy double beam[J]. Chinese Journal of Lasers, 2008, 35(11): 1783-1788.

[27] HAROONI M, MA J, CARLSON B, et al. Two-pass laser welding of AZ31B magnesium alloy[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2015, 216: 114-122.

[28] 杨瑾. 铝钢异种材料激光焊接工艺与机理研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2015.

YANG Jin. Aluminum alloy dissimilar materials laser welding process and mechanism research [D]. Nanchang: Nanchang University, 2015.

[29] MIYASHITA Y, BORRISUTTHEKUL R, CHEN J, et al. Application of twin laser beam on AZ31/A5052 dissimilar metals welding[J]. Key Engineering Materials, 2007, 353-358: 1956-1959.

[30] 檀财旺, 梅长兴, 李俐群, 等. 镁/镀锌钢异种合金单、双光束激光熔钎焊特性[J]. 中国有色金属学报, 2012, 22(6): 1577-1585.

TAN Caiwang, MEI Changxing, LI Liqun, et al. Single and dual beam laser welding-brazing characteristics of magnesium/zinc-coated steel dissimilar alloys[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2012, 22(6): 1577-1585.

[31] SHI Y, ZHANG H, WATANABE T, et al. CW/PW dual-beam YAG laser welding of steel/aluminum alloy sheets[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2010, 48(7-8): 732-736.

[32] CHEN S, ZHAI Z, HUANG J, et al. Interface microstructure and fracture behavior of single/dual-beam laser welded steel-Al dissimilar joint produced with copper interlayer[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016, 82(1-4): 631-643.

[33] 雷振, 于宁, 游爱清, 等. 5A02/Q235 钢 Nd: YAG 激光-脉冲 MIG 复合热源熔-钎连接[J]. 焊接学报, 2008, 29(6): 21-24.

LEI Zhen, YU Ning, YOU Aiqing, et al. Fused-brazing connection of 5A02/Q235 steel Nd: YAG laser-pulsed MIG composite heat source[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2008, 29(6): 21-24.

[34] 雷振. 铝/钢大光斑 Nd: YAG 激光-脉冲 MIG 复合热源高效熔-钎连接技术[D]. 哈尔滨: 机械科学研究总院, 2007.

LEI Zhen. Aluminum/steel large spot Nd: YAG laser-pulsed MIG composite heat source efficient melt-brazing connection technology[D]. Harbin: Mechanical Science Research Institute, 2007.

[35] THOMY C, VOLLERTSEN F. Laser-MIG hybrid welding of aluminium to steel-effect of process parameters on joint properties[J]. Welding in the World, 2012, 56(5-6): 124-132.

[36] KREIMEYER F, VOLLERTSEN F. Gap tolerant joining of aluminum with steel sheets using the hybrid technique[C]//Proceedings of the 25th International Congress on Applications of Lasers and Electro-Optics (ICALEO). Scottsdale, 2006: 947-952.

[37] 李春玲, 樊丁, 王斌, 等. 电弧辅助铝/镀锌钢涂粉激光熔钎焊界面特性与性能[J]. 机械工程学报, 2015, 51(18): 57-63.

LI Chunling, FAN Ding, WANG Bin, et al. Characteristics and properties of laser-assisted aluminum/galvanized steel powder laser welding brazing [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015, 51(18): 57-63.

[38] MEI S W, GAO M, YAN J, et al. Interface properties and thermodynamic analysis

of laser-arc hybrid welded Al/steel joint[J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2013, 18(4): 293-300.

[39] 梅述文, 成群林, 姜勇, 等. 铝/钢异种合金激光-电弧复合焊接接头的界面性能及抗拉强度[J]. 中国有色金属学报, 2015, 25(2): 351-359.

MEI Shuwen, CHENG Qunlin, JIANG Yong, et al. Interfacial properties and tensile strength of aluminum/steel dissimilar alloy laser-arc composite welded joint[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2015, 25(2): 351-359.

[40] ATABAKI M M, MA J, LIU W, et al. Hybrid laser/arc welding of advanced high strength steel to aluminum alloy by using structural transition insert[J]. Materials and Design, 2015, 75: 120-135.

[41] SIERRA G, PEYRE P, DESCHAUX-BEAUME F. Steel to aluminium key-hole laser welding[J]. Materials Science and Engineering A, 2007, 447: 197-208.

[42] TORKAMANY M J, TAHAMTAN S, SABBAGHZADEH J. Dissimilar welding of carbon steel to 5754 aluminum alloy by Nd:YAG pulsed laser[J]. Materials & Design, 2010, 31: 458-465.

[43] 陈树海, 黄继华, 杨冬冬, 等. 镍箔中间层对不锈钢/铝合金激光深熔焊的影响[J]. 焊接学报, 2012, 33(8): 9-12.

CHEN Shuhai, HUANG Jihua, YANG Dongdong, et al. Effect of nickel foil interlayer on deep welding of stainless steel / aluminum alloy[J]. Journal of Welding, 2012, 33(8): 9-12.

[44] 王涛, 周惦武, 彭艳, 等. 钢/铝异

种金属预置 Si 粉的光纤激光焊接[J]. 中国激光, 2012, 39(3): 106-113.

WANG Tao, ZHOU Dianwu, PENG Yan, et al. Fiber laser welding of steel/aluminum dissimilar metal presetting Si powder[J]. Chinese Journal of Lasers, 2012, 39(3): 106-113.

[45] 周惦武, 彭艳, 徐少华, 等. 添加 Sn 粉激光焊接钢/铝合金异种金属的显微组织与性能[J]. 金属学报, 2013, 49(8): 959-968.

ZHOU Dianwu, PENG Yan, XU Shaohua, et al. Microstructure and properties of dissimilar metals with Sn powder laser welded steel/aluminum alloy[J]. Journal of Metals, 2013, 49(8): 959-968.

[46] 周惦武, 吴平, 彭利, 等. 镀 Zn 钢-6016 铝合金异种金属的激光熔钎焊及数值模拟[J]. 中国有色金属学报, 2012, 22(6): 1738-1746.

ZHOU Dianwu, WU Ping, PENG Li, et al. Laser welding and numerical simulation of dissimilar metals of plated steel-6016 aluminum alloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2012, 22(6): 1738-1746.

[47] SHI Y, ZHANG H, WATANABE T, et al. CW/PW dual-beam YAG laser welding of steel/aluminum alloy sheets[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2010, 48(7-8): 732-736.

[48] CHEN S H, ZHAI Z L, HUANG J H, et al. Interface microstructure and fracture behavior of single/dual-beam laser welded steel-Al dissimilar joint produced with copper interlayer[J]. International Journal of Advanced Manufacture Technology, 2016, 82(1-4): 631-643.

[49] 潘峰, 崔丽, 钱伟, 等. 铝合金/不锈钢双光束激光深熔焊接接头组织及力学性

能[J]. 金属学报, 2016, 52(11): 1388-1394.

PAN Feng, CUI Li, QIAN Wei, et al. Microstructures and mechanical properties of dual-beam laser keyhole welded joints of aluminum alloys to stainless steels[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2016, 52(11): 1388-1394.

[50] CASALINO G, MORTELLO M, PEYRE P. Yb-YAG laser offset welding of AA5754 and T40 butt joint[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2015, 223: 139-149.

[51] 杨洪亮. 钢/铝异种金属激光深熔焊接数值模拟与实验研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2015.

YANG Hongliang. Steel/aluminum dissimilar metal laser deep melting welding numerical simulation and experimental study[D]. Changsha: Hunan University, 2015.

[52] 杨旭东, 石岩, 刘佳. 铜箔中间层对铝/钢异种金属激光对接焊接头质量的影响[J]. 机械工程学报, 2014, 50(14): 143-149.

YANG Xudong, SHI Yan, LIU Jia. Effects of copper foil interlayer on the quality of aluminum/steel dissimilar metal laser butt joint[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2014, 50(14): 143-149.

[53] 钱伟, 崔丽, 马彪, 等. 中厚板铝/钢异种材料激光深熔钎焊工艺的研究[J]. 应用激光, 2015, 35(4): 451-455.

QIAN Wei, CUI Li, MA Biao, et al. Study on laser deep welding brazing of aluminum/steel dissimilar materials in medium plate[J]. Journal of Applied Laser, 2015, 35(4): 451-455.

通讯作者: 崔丽, E-mail: cuili@bjut.edu.cn.

## Research Progress of Steel/Aluminum Dissimilar Alloys Joining Using Laser Keyhole Welding-Brazing and Keyhole Welding Processes

CUI Li, LU Dongqi, WANG Guohong, HE Dingyong

(College of Materials Science and Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

**[ABSTRACT]** Recently, laser keyhole welding technique has brought it widespread attention due to its good quality and high productivity in joining dissimilar alloys. The laser keyhole welding technique used in joining dissimilar alloys can be classified as keyhole welding-brazing and keyhole welding according to whether the steel base materials are melted or not at the interface of steel/Al joints. The research status of laser keyhole welding-brazed steel/Al joints is discussed in terms of different laser beam sources in details. In considering laser keyhole welding of steel/Al joints, the research progress in abroad and at home is described by means of different joint configurations. Finally, a very import research direction of dissimilar joining steel/Al joints using laser keyhole welding technique is proposed.

**Keywords:** Laser keyhole welding-brazing; Laser keyhole welding; Steel/Al joint; Welding process

(责编 大漠)