

激光技术在铝-钢异种金属焊接研究中的应用*

刘佳, 石岩, 张宏

长春理工大学机电工程学院, 吉林 长春 130022

摘 要: 随着车辆轻量化越来越被重视, 钢-铝合金连接问题逐渐被提出。但由于钢-铝合金焊接容易产生脆性金属间化合物, 使得钢-铝合金的连接问题成为焊接领域中热点和难点问题。激光焊接技术凭借其独特的优势, 近年来在钢-铝合金焊接方向被广泛采用。作者将参与国际合作、文献检索与参加国际会议等获得的信息进行了整理, 综述了激光技术在钢-铝合金异种金属焊接研究中的各种应用, 供从事激光焊接和钢-铝合金焊接方向研究人员参考借鉴, 促进激光技术在科研与工业生产中更为广泛的应用。

关键词: 激光技术; 异种金属; 焊接; 铝合金; 钢

Applications of Laser Technology in Research of Steel-Al Dissimilar Metals Welding

Jia Liu*, Yan Shi, Hong Zhang

College of Electromechanical Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun, P. R. China, 13002

Email: longwind111@126.com

Abstract: With the demand of lightweight vehicles becoming stronger and stronger, the joining of aluminum and steel is brought forward gradually. However, the brittle intermetallic compounds form easily during the welding process of steel and aluminum alloy, which makes it become a difficulty in the field of welding. In recent years, the laser technology has been adopted widely in the welding field of steel and aluminum alloy for its unique advantages. Authors collect some literatures through participating international cooperation, attending international conference and documents searching, and summarize the applications of laser technology in the research of steel-Al dissimilar metals welding. The purpose is to provide a reference for the researcher engaging in the joining of steel and aluminum and boost the applications of lasers in the research and production.

Keywords: Laser Technology; Dissimilar Metals; Welding; Aluminum Alloy; Steel

引言

人类进入 21 世纪以来, 汽车工业开始面临着能源、公害和安全三大问题, 汽车轻量化越来越被重视。因此, 铝-钢焊接问题也开始逐渐被提出^[1]。直到 2005 年, 铝-钢焊接问题开始逐渐被大家重视起来, 各国也纷纷开始进行铝-钢焊接的研究。

由于钢和铝合金材料在热膨胀系数、热传导率、比热等物理方面的性能存在着较大差异, 从而导致在焊接过程中极易产生焊接热应力, 最终导致焊接后的铝-钢异种金属焊接接头存在着较高的残余应力。此外, 由于钢在铝中的固溶度小, 在钢-铝合金焊接的过程中, 其焊接接口非常容易产生 Al-Fe 脆性金属间化合物。因此, 使得二者的连接问题成为了焊接领域中热点和难点问题。目前, 各国学者们对铝-钢焊接的研究几乎涉及了所有可利用的焊接技术。近年来随着激光器以及激光加工技术的成熟, 激光技术以其独特的优势在铝-钢焊接研究中得到广泛的采用。作者通过参与国际合作项目, 经过广泛的调研, 查阅了大量近年国内外公开发表的文献和国际会议报告, 对激光技术在铝-钢异种金属焊接研究中的应用进行综述, 供激光焊接领域的研究人员参考。

*基金项目: 吉林省自然科学基金(201115156)资助项目。

1 熔化焊

熔化焊是将焊件接头加热至熔化状态，在不加压力的情况下，完成焊接的方法。目前，在钢-铝合金激光熔化焊中主要以连续或者脉冲 Nd: YAG 固体激光器作为热源进行焊接^[2-6]，也有少数学者采用激光-MIG 复合热源^[7]。

1.1 激光熔化焊

南非国家激光中心的 M. Theron 等人利用 4 kW 连续 Nd: YAG 激光器对 316L S/S-Al 5052 搭接接头进行了焊接^[2]。研究表明：316L S/S-Al 5052 搭接熔焊时激光最优光斑直径为 0.3 mm；钢-铝合金搭接熔焊时焊接参数存在一个可以获得良好接头的窗口范围：激光功率为 0.75~1.8 kW，焊接速度为 1~7 m/min；在该窗口范围内，当光斑直径和焊接速度为某一特定值时，钢-铝合金焊接接头的剪切强度随着功率的升高而增大。

法国蒙彼利埃第二大学力学与土木工程实验室的 Guillaume Sierra 等人利用连续 Nd: YAG 激光器对 DC 04 钢和 6065 T4 铝合金板搭接接头进行激光小孔焊接^[3-4]。研究表明：当铝上钢下时，所获得的焊接接头力学性能较差，金属间化合物脆性层厚度超过了 100 μm ；当钢上铝下时，金属间化合物脆性层厚度不到 50 μm ，且当下层熔深控制在 0.3 mm 时，所获得焊接接头的最大抗拉强度和剪切强度分别为 175 MPa 和 90 MPa，均超过了弱侧母材相应强度的 60%；金属间化合物脆性层主要由 Fe₂Al₅ 和 FeAl₃ 组成。

伊朗激光科学与技术国家中心的 M. J. Torkamany 等人利用 Nd: YAG 脉冲激光对 ST14 低碳钢和 5754 铝合金进行了异种金属焊接，主要研究了激光功率、脉宽和占空比对焊接质量的影响^[5]。通过对峰值功率、脉冲宽度和占空比的优化（PP=1.43 kW，D=5 ms，Of=80%），获得了较少的金属间化合物、较好的表面质量和较高的抗拉强度，且没有任何微观缺陷的 Al-Fe 异种金属焊接接头，如图 1 所示。

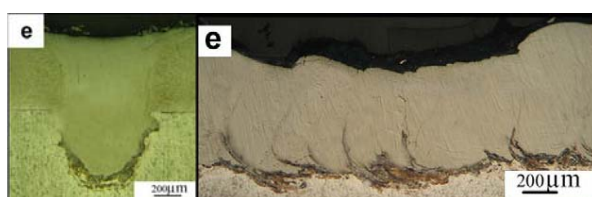


图 1 无缺陷的 Al-Fe 异种金属焊接接头^[5]

长春理工大的石岩和日本千叶大学工学部的 Takehiro Watanabe 等人利用连续和脉冲双光束 YAG 激光对 JSC270CC 低碳钢和 A6111-T4 铝合金进行异种金属焊接^[6]。研究表明：连续和脉冲双 YAG 激光束可以明显降低焊缝中的气孔率，同时在脉冲激光照射的区域根部形成了一个类似于“树根”状的焊缝，如图 2 所示，大大增强了 Al-Fe 接头的剪切强度，但由于在焊接过程中母材金属发生了熔化，产生了大量的金属间化合物，使其最大剪切强度为 128 MPa，远远小于弱侧母材 A6111-T4 铝合金的 244 MPa。

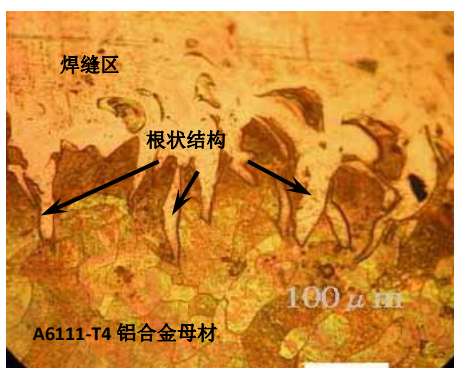


图 2 焊缝中根状组织结构^[6]

1.2 激光-电弧复合熔化焊

都灵迪巴里机械工程与管理学系的 Giuseppe Casalino 等人利用 CO₂ 激光和 MIG 复合热源对不锈钢和铝合金拼焊接头进行复合焊, 主要研究了焊接速度、激光功率以及弧焊枪和激光光束位置对其焊接质量的影响^[7]。研究表明: 采用该方法所获得的最大抗拉强度为 35~70 MPa, 最大延伸率不到 0.1%, 均远远小于弱侧母材铝合金 220 MPa 的抗拉强度和 8% 的延伸率。同时, 利用这种技术焊接钢-铝合金获得了不规则的 Al-Fe 接口, 在靠近铝合金母材一侧发现了大量的脆性层碎片和 Fe 元素。这是由于熔焊导致大量的金属间化合物脆性相产生, 在接头内应力的作用下使得金属间化合物脆性层开裂形成碎片; 同时由于 Fe 的密度比 Al 的密度大很多, 因此, 液态的 Fe 向 Al 一侧流动, 从而导致不规则的 Al-Fe 接口和 Fe 在铝合金母材一侧的富集。

总之, 熔化焊的机理决定了在熔化焊接过程中必然会产生大量的金属间化合物, 无论采用哪种焊接方式均无法从根本上解决铝-钢焊接接头力学性能差的问题。

2 激光压焊

激光压焊是在激光熔焊的基础上通过增加辅助压力来增强接头连接强度的一种新的焊接方法, 根据压力作用方式的不同, 又可以分为激光滚压焊接 (如图 3 所示) 和激光轮压焊接 (如图 4 所示)。

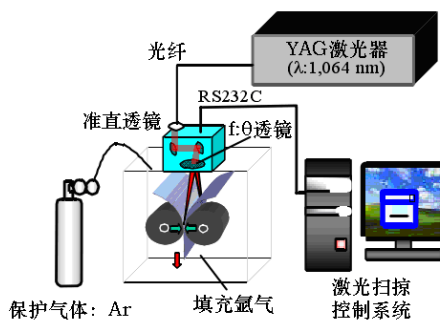


图 3 激光滚压焊实验装置原理示意图^[8]

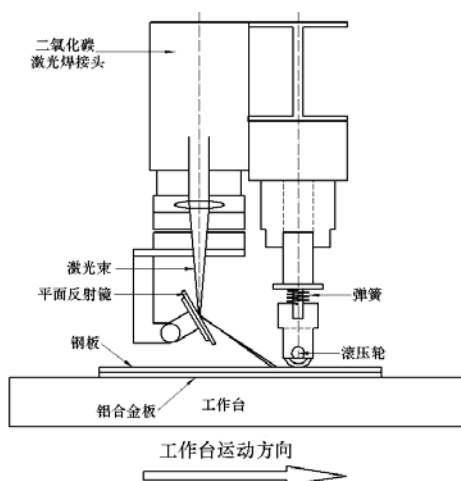


图 4 激光轮压焊过程示意图^[9]

日本阿南工业高等专门学校的 Koji Nishimoto 与大阪大学连接与焊接研究中心的 Seiji Kateyama 等人^[8]采用激光滚压焊的方式对 1 mm 厚的 GA 镀锌钢与 A1050 纯铝异种金属接头进行了连接 (如图 3 所示), 通过对相关参数的优化, 获得了强度超过弱侧母材强度的异种金属焊接接头。

日本名古屋大学材料加工部的 Muneharu Kutsuna 等人^[9]采用激光轮压焊的方式对 0.55 mm 厚的 GI 镀锌钢与 1 mm 厚的 6000 系列的铝合金异种金属接头进行了焊接, 如图 4 所示。通过对相关参数的优化, 也获得了超过弱

侧母材强度的异种金属焊接接头。Muneharu Kutsuna 还给出了 Al-Fe 异种金属焊接接头强度超过弱侧母材强度的金属间化合物层厚度范围为小于 $10\ \mu\text{m}$ ，如图 5 所示。

在激光压焊过程中，由于增加了机械力的作用，使得焊接过程中所需的热输入量可以相应地减少，从而降低了金属间化合物产生的可能，因此，接头的力学性能得到了改善。虽然几位日本学者利用激光压焊方法焊接铝-钢接头时均获得了超过弱侧母材强度的接头，但是压焊过程需要上下的支撑，并只能焊接搭接接头，且会导致焊缝周围的母材存在一个很严重的变形。因此，该方法未在工业生产中得到应用。

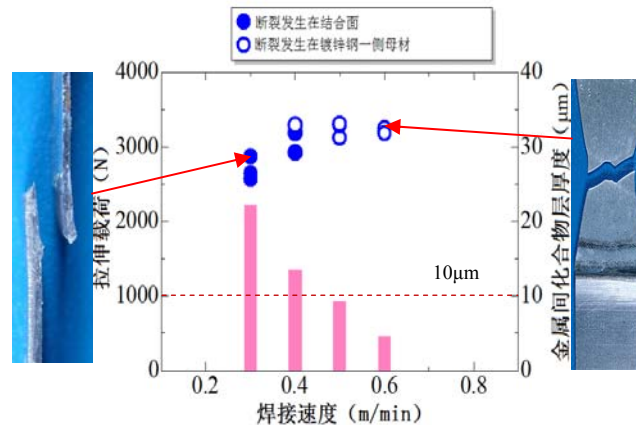


图 5 轮压速度和金属间化合物层厚度对 GI/A6000 激光轮压焊接接头的影响^[9]

3 钎焊

钎焊是一种利用熔点比母材低的填充金属（钎料或焊料），在低于母材熔点、高于钎料熔点的温度下，利用液态钎料在母材表面润湿、铺展和在母材间隙中填充，与母材相互溶解与扩散，而实现零件间连接的焊接方法。其焊接过程为将表面清洗好的工件以搭接型式装配在一起，把钎料放在接头间隙附近或接头间隙之间，当工件与钎料被加热到稍高于钎料熔点温度后，钎料熔化（工件未熔化），并借助毛细管作用被吸入和充满固态工件间隙之间，液态钎料与工件金属相互扩散溶解，冷凝后即形成钎焊接头。根据是否添加钎料，钎焊又可以分为自溶性钎焊（也叫反应润湿焊）和传统钎焊。

3.1 自溶性钎焊（反应润湿焊）

自溶性钎焊（也叫反应润湿焊）是指在焊接异种材料时，将低熔点金属视为钎料，并对其加热至其熔化，同时将温度控制在高熔点材料的熔化温度以下，借助钎焊原理对两种材料进行连接的一种焊接手段。

法国蒙彼利埃第二大学力学与土木工程实验室的 Guillaume Sierra 等人利用连续 Nd: YAG 激光器对 1.2 mm 厚的 DC04 低碳钢和 1 mm 厚的 6016-T4 铝合金搭接接头进行了反应润湿焊^[10-11]。其中 DC04 低碳钢又分为镀锌和未镀锌两种，其板厚均为 1.2 mm，镀锌钢的镀层为 $20\ \mu\text{m}$ 厚，镀锌层中铝的含量接近 0.2%，作用是防止 $\text{Fe}(\text{Zn})_x$ 的生成。文中将激光光源呈 30° 倾角照射于工件表面，获得了一个 $2.3\ \text{mm} \times 1.8\ \text{mm}$ 的椭圆形光斑。通过对镀锌钢与铝合金和非镀锌钢与铝合金两种接头润湿角度的比较，发现镀锌层改善了铝在钢上的润湿与散布。这是因为在镀锌钢表面，铝合金的分散出现在液体镀锌层上，而并非在固态钢上。在镀锌钢上，涂覆钎料使得其润湿角度显著增加，但是仍小于非镀锌钢的润湿角度。焊接后，在非镀锌钢与铝合金的焊缝区域内产生了 $2\text{-}10\ \mu\text{m}$ 的厚的金属间的化合物 Fe_2Al_5 层，而在镀锌钢与铝合金的焊缝区域内的金属间的化合物 Fe_2Al_5 层达到了 $30\ \mu\text{m}\text{-}40\ \mu\text{m}$ 。但拉伸试验结果表明，非镀锌钢与铝合金接头的强度约为 110 MPa，而涂了钎料的镀锌钢与铝合金接头的强度约为 230 MPa，其中，非镀锌钢与铝合金接头的主要失效形式为剪切断裂，无钎料的镀锌钢与铝合金接头的主要失效形式为熔化区的拉伸断裂，使用钎料的镀锌钢与铝合金接头的主要失效形式为热影响区的拉伸断裂。

3.2 传统钎焊

传统钎焊不同于自熔化钎焊，是利用外部添加的钎料来实现两种母材金属连接的方法，其中两种母材均不熔化。

德国汉诺威激光研究中心的 Lars Engelbrecht 等人对 DC05、H320LA、HXT600X 等钢和 AA6016 铝合金的对接和搭接接头进行了激光钎焊^[12]。钎焊中所用的钎料和钎剂被制作成一种药芯焊丝，其芯部为一种非腐蚀性钎剂 CsAlF_4 （型号为：LH20 EN1045，其熔化温度为：420-470℃），其外部为锌基焊料 ZnAl_{12} 和 $\text{ZnAl}_{12}\text{Cu}_{10}$ ，其熔化温度分别为 400℃ 和 480℃。焊接所用激光器为 4 kW 的 Nd: YAG 激光器。试验证明，使用非腐蚀性钎剂的激光钎焊工艺使得 6000 系列铝合金与不同厚度和机械强度等级的钢材的复合接头的连接成为可能。对于对接接头，使用锌基焊料可以完全避免铝板边角的熔化；对于搭接接头，使用锌基焊料可以将铝板边角的熔化限制在最低限度，如图 6 所示。在静拉伸过程中，搭接钎焊接头在母材发生断裂。这是由于润湿充分，且其宽度超过了 3 毫米。相比之下，对接钎焊接头的静拉伸强度达到了弱侧母材强度的 80%。钎焊焊缝显示出了相对较低的延展性，异种金属钎焊接头的变形能力有限。这一方面是由于锌基钎料本身六角形结构相对较低的延展性，另一方面是由于钎料与钢边角之间的结合强度不充分。此外，还发现 Fe-Al 金属间化合物相对钎焊焊缝的塑性起着负面作用。

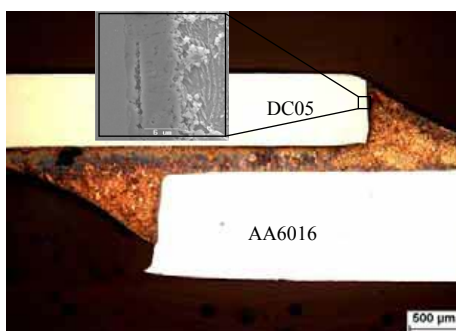


图 6 钎焊典型接头示意图^[12]

由于在钎焊的焊接过程中只有钎料熔化，而母材不熔化，因此，在其焊接过程中金属间化合物产生的量要远远小于前面的熔化焊和压焊两种方法。但是钎焊接头强度低，耐热性差，且焊前清理要求严格，钎料价格较贵，钎剂一般具有腐蚀性，对环境有一定的污染。此外，一般钎焊均对工件的尺寸和形状有较高的要求。因此，该方法在工业生产中也未得到应用。

4 熔-钎焊

熔-钎焊是在钎焊的基础上发展而来，是一种将熔焊和钎焊相结合，并在不同的焊接区域同时发生熔焊和钎焊的焊接方法，其典型接头如图 7 所示。

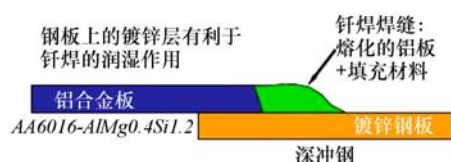


图 7 熔钎焊典型接头示意图^[13]

4.1 激光熔-钎焊

激光作为热源进行铝-钢异种金属接头熔-钎焊具有热输入小、加工速度快、自动化程度高、操作与控制简单和不用使用钎剂等优点。

德国拜罗伊特大学金属与合金系的 Holger Laukant 等人利用双光束激光焊接头将 Nd: YAG 激光分成两束对 0.9 mm 厚的热浸 DX56D+Z140MB 的深冲钢板和 1.1 mm 厚的快速硬化 EN AW-AA6016 铝合金异种金属搭接接头和法兰接头进行了激光熔-钎焊, 并对熔-钎焊接头进行了腐蚀测试和疲劳测试等^[13-14]。在不使用钎剂的前提下, 利用其中一束激光对钢板预热, 其预热温度要保持在钢表面锌层汽化温度 907℃ 以下, 来增加钎料在钢表面的润湿宽度, 从而提高接头强度。填充锌基焊丝所获得的接头的拉伸强度达到较高的水平, 但接头后续变形能力较差。如果针对接头变形能力这一个特定的应用需要, 有必要采用较软的铝基焊丝。微观组织分析表明: 在钎焊接口出现了 Al-Fe 金属间化合物, 这主要是由于 Al、Fe 在钎焊接口的扩散所导致。其中, Fe₂Al₅ 出现在钢一侧, 而富铝相 FeAl₃ 出现在 Al-Fe 相逢焊和钎焊缝界面。但是由于优化后的铝-钢熔-钎焊接头中的 Al-Fe 金属间化合物的厚度没有达到临界值, 因此, 对熔-钎焊接头的质量没有影响。比较铝-钢熔-钎焊接头和铝-铝接头的拉伸强度和疲劳强度发现, 所获得铝-钢接头的强度已经满足了车体结构的应用需求。经过腐蚀测试发现, 腐蚀一般出现在富锌区, 这种腐蚀往往会导致在钎焊接口出现裂纹影响接头的强度。

法国勃艮第大学激光和材料处理实验室的 Alexandre MATHIEU 等人对 1.2mm 厚的 6016-T4 铝合金板和 0.77 mm 厚的 AISI-1020 镀锌低碳钢板, 分别填充锌合金 ZnAl15 焊丝 (85% Zn, 15% Al, 熔点: 430℃) 和铝合金 AlSi12 焊丝 (88% Al, 12% Si, 熔点: 570℃) 进行激光填丝熔-钎焊^[15]。在整个焊接过程中没有使用一般钎焊中所必须用的钎剂, 且获得的接头形貌较好。拉伸后发现, 填充焊丝采用锌合金 ZnAl15 焊丝时所获得的接头的强度要优于铝合金 AlSi12 焊丝。其线强度达到了 200 N/mm, 断裂一般发生在铝合金母材的热影响区, 偶尔也在低碳钢板母材发生断裂。此外, 作者还单独对填充铝合金 AlSi12 焊丝的工艺进行了研究^[16]。研究表明, 对焊丝进行预热可以提高焊丝熔化后在母材表面的润湿性, 改善接头的强度。焊丝未进行预热所获得的接头的线强度为 100~150 N/mm, 在焊缝与钢的界面发生破坏; 而对焊丝预热后所获得的接头的线强度为 150~200 N/mm, 破坏发生在金属母材或者焊缝与钢的接口。

荷兰特温特大学机械自动化实验室的 J.van Tienhoven 等人分别对 3 mm 和 5 mm 厚的 DIN 1.0226/EN 10142 镀锌钢板 (镀锌层厚度为 10 μm) 和 AA6082 铝合金板, 利用了 CMT 法、激光-CMT 复合焊和激光-冷送丝焊等 3 种焊接方法进行了研究^[17]。所用焊丝均为 AlSi12 焊丝, 激光光源为 Trumpf 公司生产的 TL4006D 型 4kW 的 Nd: YAG 激光器。研究表明, 单纯的 CMT 焊接过程不稳定, 且出现了一些黑色的沉积; 激光-CMT 复合焊接方法获得了稳定且清洁的接头; 激光-冷送丝方法焊接过程稳定, 存在少量飞溅。由于激光-CMT 复合焊接方法熔深太浅, 而激光-冷送丝方法焊接所获得的熔深可以满足要求, 故重点研究了激光-冷送丝方法。通过合理的参数优化, 获得了质量较好的 T 形接头 (如图 8 所示), 且铝-钢界面的金属间化合物层厚度小于 5 μm, 3 mm 和 5 mm 厚的板的结合强度分别为 150 MPa 和 140 MPa。

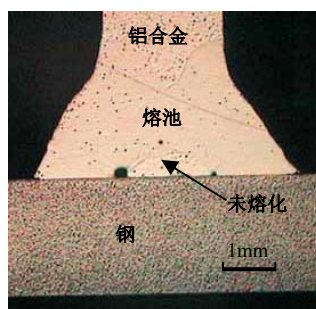
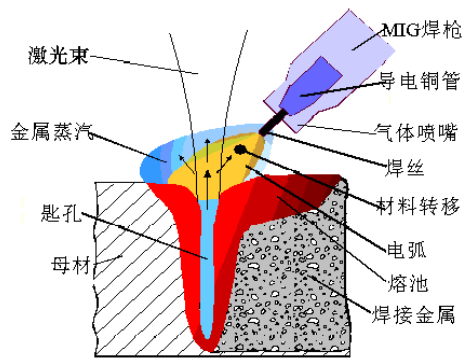


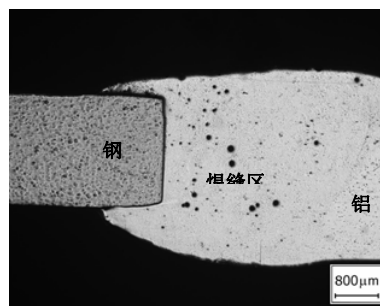
图 8 激光-冷送丝焊接铝-钢焊缝截面图^[17]

4.2 激光-电弧复合熔-钎焊

与单纯的激光热源相比, 采用激光-电弧复合热源 (如图 9 所示) 可以增加接头的间隙适应性能, 对板材的下料和装配精度不像激光焊那么严格。但是由于引入了电弧热源也导致焊接过程中热量的输入增加, 其控制难度也相应增加。

图9 传统复合过程示意图^[18]

德国不莱梅应用激光技术研究所的 Michael Kreimeyer 等人采用 Nd: YAG 激光+MIG 复合热源对 3.8 mm 厚的 AA6056-T4 铝合金板和 1.95 mm 厚级别为 THM 180 BH 的镀锌钢进行了熔-钎焊^[18]。焊接后, 所获得的熔-钎焊接头成形良好(如图 10 所示)。显微分析发现在熔-钎焊焊缝中出现了很薄一层金属间化合物相, 其厚小于 10 μm , 且该金属间化合物相由两部分组成。在靠近钢一侧母材出现了连续的金属间化合物相层, 该金属间化合物为 Fe_2Al_5 。在靠近铝合金一侧母材出现了紧凑的呈针状结构的金属间化合物相层, 该金属间化合物为 FeAl_3 。当接头间隙为 0 mm 时, 其静拉伸强度约为 100 MPa。当接头间隙为 1 mm 时, 其静拉伸强度仅仅为当间隙为 0 mm 时的 40%。对铝-钢熔-钎焊接头试样进行第一疲劳试验表明, 在疲劳循环试验中其强度上限为 17~25 Mpa, 裂纹出现在焊缝区金属间化合物相内。

图10 激光-电弧复合焊接铝-钢焊缝截面图^[18]

国内哈尔滨焊接研究所的雷振等人采用 Nd: YAG 激光+MIG 复合热源分别对 1.2 mm 厚的 SECC 镀锌钢板、1.2 mm 厚的 SAID 镀铝钢板和 1.5 mm 厚的 Q235 钢板与 1.5 mm 厚的 5A02 铝合金板异种金属接头进行了焊接^[19-23]。焊丝采用直径为 $\Phi 1.2 \text{ mm}$ 的 AlSi5 焊丝。研究表明, 利用激光-MIG 复合热源可以在较高的焊接速度下实现 5A02 铝合金与镀层钢(镀锌钢、镀铝钢)的熔-钎连接, 焊接过程稳定, 焊缝成形美观, 即使焊接速度达到 5.0 m/min 时, 仍可以得到成形良好的熔-钎焊缝。在不使用钎剂的条件下, 无法获得连续的 5A02/Q235 熔-钎焊缝, 且焊后焊缝金属与被连接的 Q235 钢母材自行分离, 焊缝与 Q235 钢板无法形成有效的钎焊接头; 通过在 Q235 钢板表面涂敷自行开发的 $\text{KAlF}_4+\text{Sn}+\text{Zn}$ 特种钎剂, 利用激光-MIG 复合热源焊接可以实现 5A02 铝合金与非镀层 Q235 钢的熔-钎连接, 获得成形良好的熔-钎焊缝, 且焊缝具有良好的铺展性。上述 3 种可靠的铝-钢接头均有较高的抗拉强度, 其中以涂敷钎剂的 5A02/Q235 钢接头的抗拉强度最高达到了 167 MPa, 为铝合金母材强度的 83.6%, 而 5A02/SECC 镀锌钢接头和 5A02/SAID 镀铝钢接头分别达到了铝合金母材的 76% 和 73%。且断裂均发生在铝合金母材一侧的热影响区内, 断口主要呈韧窝状, 但韧窝相对较浅, 局部具有脆性断裂的痕迹, 由此可以确定断裂属于以韧性断裂为主, 脆性断裂为辅的混合断裂。此外, 3 种接头的剪切强度均超过了 90 MPa, 其中以涂敷钎剂的 5A02/Q235 钢接头的剪切强度最高达到了 106.3 MPa。在铝-钢接头结合的接口出现了 1.5~3.5 μm 厚度的 Al-Fe 金属间化合物层, 其主要是由 Fe_3Al , FeAl_2 , Fe_2Al_5 以及 FeAl_3 组成。并且在所生成的 Al-Fe 金属间化合物中, Fe_3Al 主要存在于靠近钢母材一侧的化合物层中, 而 FeAl_2 , Fe_2Al_5 , FeAl_3 主要存在于靠近铝

焊缝一侧的化合物层中, 并且越远离钢母材一侧, 金属间化合物中 Al 的含量越高。同时, 作者给出了金属间化合物层的最佳厚度为 $1.5\sim 4.0\ \mu\text{m}$ 。

对于熔-钎焊, 与钎焊类似, 在其焊接过程中金属间化合物产生的量要远远小于前面的熔化焊和压焊两种方法, 并且可以在一定程度上避免钎料的使用。与其它三种焊接方式相比, 熔-钎焊除了可以获得良好的铝-钢异种金属焊接接头外, 还具有操作简单, 适应性广, 成本低等特点, 使得熔-钎焊成为了目前铝-钢异种金属焊接研究中最火热的方法。

5 结论与展望

由于激光焊接具有热源和光路容易操控、控制简单、工件变形小、热影响区小、精确性和自动化程度高等独特的优点, 在铝-钢异种金属焊接研究中得到广泛采用, 但目前的研究仍具有一定的局限性。作者利用金属粉末易于制备, 成分可以任意配比或添加这一特性, 将其应用于薄板钢-铝合金异种金属激光填粉焊接, 通过对粉末材料的优化, 改善激光焊接过渡区成分, 抑制或避免脆性金属间化合物的产生, 从而提高焊接接头的力学性能。

前期的研究工作表明, 利用激光作为焊接热源, 采用同轴送粉头对 $1.2\ \text{mm}$ 厚的 A6111-T4 铝合金板和 $0.7\ \text{mm}$ 厚的 JSC270CC 低碳钢板进行填充 F314 铁基热喷涂粉末的拼焊和搭接焊试验, 可以获得了表面成型良好, 且接头弯曲角度超过 120° 的接头。在铝-钢母材界面未出现金属间化合物层, 只是在填充材料与铝合金母材界面出现了厚度小于 $10\ \mu\text{m}$ 的金属间化合物层。但是由于填充粉末的熔点较高导致铝合金母材和低碳钢母材均发生了熔化。在铝合金母材热影响区内的晶粒虽然得到了细化, 但是由于热影响区温度过高导致该区域晶界粗大, 如图 11 所示, 从而破坏了力学性能。因此, 断裂均发生在该区域内。针对目前存在的问题, 项目组正在开展进一步的研究工作, 包括粉末材料的选择与配比, 焊接工艺的优化等等, 相关研究成果也会在近期发表。

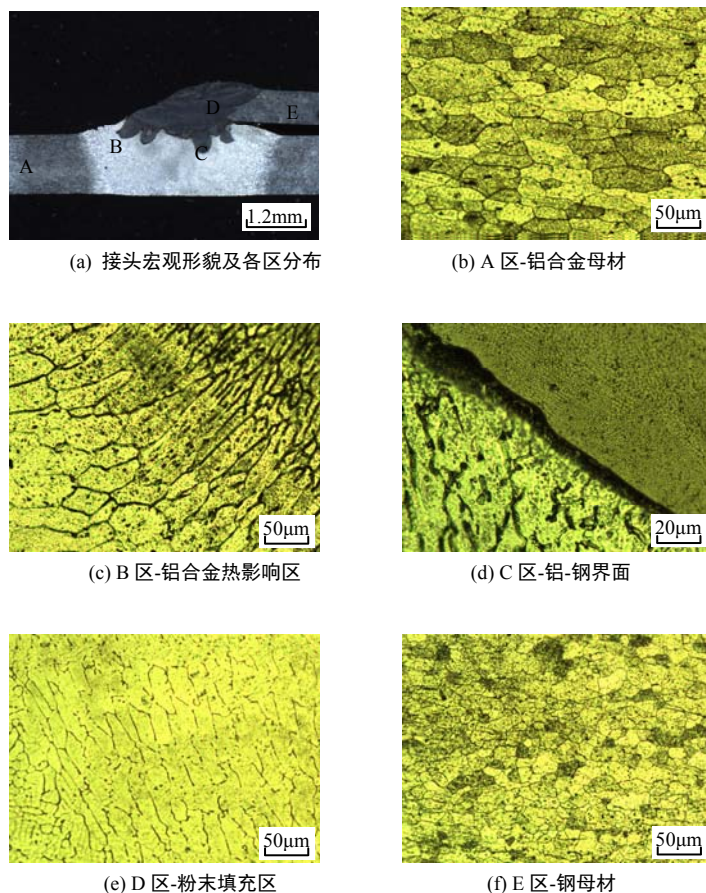


图 11 激光填粉焊接铝-钢焊缝截面微观组织

由于激光填粉焊接具有粉末易制备,且能任意配比和激光能量易于调控等优点,相信不久的将来激光填粉焊接会得到更多学者的认可和研究。

参考文献

- [1] Wagner, F. Zerner, I. Kreimeyer, et al.. Characterization and Properties of Dissimilar Metal Combinations of Fe/Al and Ti/Al-Sheet Material[C]. Jacksonville, USA. 2001. p.1301.
- [2] M. Theron, C. van Rooyen, L.H. Ivanchev. CW Nd:YAG Laser Welding of Dissimilar Sheet Metals[C]. Orlando, FL USA. 2007. p. 391–398.
- [3] Guillaume Sierral, Patrice Peyre, Frédéric Deschaux Beaume, et al.. Nd:YAG Laser Welding of Aluminum to Low Carbon Steel[C]. Proceedings of the 23rd International Congress on Applications of Lasers and Electro-Optics, 2004.
- [4] G. Sierra, P. Peyreb, F. Deschaux-Beaume, et al.. Steel to aluminium key-hole laser welding[J]. Materials Science and Engineering A, 2007, (447): 197–208.
- [5] M.J. Torkamany, S. Tahamtan, J. Sabbaghzadeh. Dissimilar Welding of Carbon Steel to 5754 Aluminum Alloy by Nd: YAG Pulsed Laser[J]. Materials and Design, 2010, (31): 458–465.
- [6] Shi Yan, Zhang Hong, Takehiro Watanabe, et al.. CW/PW Dual-Beam YAG Laser Welding of Steel/Aluminum Alloy Sheets[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2010, (48):732–736.
- [7] Giuseppe Casalino, Carlo Rella. MIG-Laser Combined Welding of Aluminum Alloy to 304 Stainless Steel[C]. Orlando, FL USA. 2007. p. 287–292.
- [8] Koji Nishimoto, Yoshihiro Okumoto, Tomoki Harano, et al.. Laser Pressure Welding of Zn-Coated Steel and Pure Aluminum[C]. Orlando, FL USA. 2007. p. 436–442.
- [9] Hitoshi Ozaki, Muneharu Kutsuna. Laser Roll Welding of Dissimilar Metal Joint of Zinc Coated Steel and Aluminum Alloy[C]. Scottsdale, AZ USA. 2006. p. 298–302.
- [10] P. Peyre, G. Sierra, F. Deschaux-Beaume, et al.. Generation of Aluminium–Steel Joints with Laser-induced Reactive Wetting[J]. Materials Science and Engineering A, 2007, (444): 327–338.
- [11] G. Sierraa, P. Peyreb, F. Deschaux Beaume, et al.. Galvanised Steel to Aluminium Joining by Laser and GTAW Processes[J]. Materials Characterization, 2008, (59):1705–1715.
- [12] Lars Engelbrecht, Oliver Meier, Andreas Ostendorf. Laser Beam Brazing of Steel Aluminum Tailored Hybrid Blanks[C]. Scottsdale, AZ USA. 2006. p. 312–319.
- [13] Holger Laukant, Elisa Guimaraens, Uwe Glatzel. Laser Beam Aluminum Steel Joints Mechanical and Dynamical Properties and Detailed Microstructural Analysis of Intermetallic FeAl-Phases[C]. Orlando, FL USA. 2007. p. 588–595.
- [14] J. Wlok, H. Laukant, U. Glatze, et al.. Corrosion Properties of Laser Beam Joints of Aluminium with Zinc-coated Steel[J]. Corrosion Science, 2007, (49): 4243–4258.
- [15] Alexandre Mathieu, Simone Mattei, Luis Rodriguez, et al.. Laser Brazing of Steel-Aluminum Assembly[C]. Proceedings of the 23rd International Congress on Applications of Lasers and Electro-Optics, 2004.
- [16] Alexandre Mathieu, Simone Mattei, Jean-Claude Viala, et al.. Laser Braze Welding Using Hot (88%-Aluminum, 12%-Silicon) Filler Material to Join Steel with Aluminum[C]. Miami, FL USA. 2005. p. 985–991.
- [17] J. van Tienhoven, B. Pathiraj, J. Meijer. Laser Jointing of Steel-Aluminum Joints in T Configuration[C]. Scottsdale, AZ USA. 2006. p. 52–58.
- [18] Michael Kreimeyer, Frank Vollertsen. Gap Tolerant Joining of Aluminum with Steel Sheets Using the Hybrid Technique[C]. Scottsdale, AZ USA. 2006. p. 947–952.
- [19] 雷振, 秦国梁, 林尚杨等. 基于激光-MIG复合热源的5A02铝合金/镀锌钢熔-钎焊[J]. 机械工程学报, 2009, 45(3): 94–98.
- [20] 雷振, 秦国梁, 林尚杨等. 铝/钢异种金属Nd: YAG激光-MIG复合热源熔-钎焊接工艺[J]. 焊接, 2006, (6): 35–37.
- [21] 雷振, 王旭友, 游爱清等. 铝/钢激光-MIG复合热源熔-钎连接实验研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2009, (38): 229–233.
- [22] 雷振, 王旭友, 王伟波等. 铝/镀锌钢复合热源熔-钎接头中的Al-Fe金属间化合物层分析[J]. 焊接学报, 2007, 11(28): 65–68.

[23] 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: 哈尔滨焊接研究所, 2007. 29-98.

【作者简介】



刘佳 (1983-), 男, 汉, 博士, 讲师, 激光加工技术, 已发表论文 9 篇, 其中被 EI 收录 4 篇, 被 SCI 收录 3 篇, Email: longwind111@126.com。