

文章编号: 0258-7025(2009)02-0261-08

# 异种金属激光焊接关键问题研究

虞 钢 赵树森 张永杰 何秀丽 庞 铭

(中国科学院力学研究所, 北京 100190)

**摘要** 现代工程结构要求对异种金属材料进行焊接。激光焊接具有密度高、焊缝深宽比大、热影响区窄以及变形小等特点, 成为异种金属材料焊接的有效方法。异种金属激光焊接过程包含多种效应, 机制复杂。比如, 材料性能差异对焊缝微观组织与宏观性能的影响; 焊接熔池的形成、演化机制; 熔池凝固过程焊接缺陷及残余应力形成等。围绕异种金属激光焊接过程中的关键问题, 国内外开展了诸多研究工作, 对此进行了全面阐述。在此基础上, 指出异种金属材料激光焊接研究中的不足及发展方向。

**关键词** 激光焊接; 异种金属; 熔凝机制; 焊接缺陷

**中图分类号** TG456.7 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20093602.0261

## Research on Key Issues of Laser Welding of Dissimilar Metal

Yu Gang Zhao Shusen Zhang Yongjie He Xiuli Pang Ming

(Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

**Abstract** Advanced engineering structures require dissimilar metal jointing. Laser welding has such merits as high energy density, high depth-to-width ratio, narrow heat-affected zone and limited shape-deformation. Therefore, it becomes one of the effective approaches for jointing dissimilar metal combination. The procedure of laser welding for dissimilar metal is very complex. There are some key issues about laser welding mechanism, for instance, thermal-physical material properties, melt pool dynamics, melt-condensation mechanism, formation of welding defects and residual stress. The progress and present research of experimental and numerical simulation about these issues are discussed. On this basis, some problems of laser welding of dissimilar metal materials are put forward.

**Key words** laser welding; dissimilar metal; melt-condensation mechanism; welding defect

## 1 引言

异种金属材料焊接是解决构件同时满足多方面性能要求的有效途径。焊接方法有多种, 比如氩弧焊(TIG)、电阻焊、摩擦焊、电子束焊以及激光焊等。与其他焊接方法相比, 激光焊具有热源密度集中、焊缝深宽比大、热影响区小、可控性好等特点, 而且相对电子束焊, 激光焊接气氛要求低, 通常不需要真空环境。异种金属激光焊接始于 20 世纪 70 年代<sup>[1]</sup>, 目前成为航空航天、船舶制造、汽车制造诸领域重要的先进制造技术之一。

异种金属激光焊接过程包含多种物理效应<sup>[2]</sup>。

具体表现为: 金属材料对激光的吸收; 激光材料相互作用引起的材料相变; 能量与动量的传递与转换; 光致等离子体对激光的散射与吸收; 熔池形成及演化; 匙孔(keyhole)效应以及熔池凝固等。从复杂物理现象中提取科学问题, 并对这些科学问题开展研究工作具有重大意义。

## 2 异种金属激光焊接关键问题

异种材料激光焊接机制复杂。比如, 焊接材料热物性随温度变化差异; 异种金属对于激光的吸收率差异及其随温度变化特性; 熔池形成及演化机制;

收稿日期: 2008-09-23; 收到修改稿日期: 2008-10-10

基金项目: 中国科学院知识创新工程重大项目(KGCX1-11)资助项目。

作者简介: 虞 钢(1958—), 男, 浙江人, 研究员, 博士生导师, 主要从事激光与材料相互作用和激光制造工艺力学方面的研究。E-mail: gyu@imech.ac.cn

凝固过程焊缝熔化区与热影响区组织演化;激光焊接接头缺陷的形成、焊接残余应力与变形产生等<sup>[1]</sup>。但其关键问题可归结为材料性能差异对焊缝微观组织与宏观性能的影响;焊接熔池的形成、演化机制和熔池凝固过程焊接缺陷及残余应力形成。

## 2.1 材料性能差异对焊接接头微观组织与宏观性能的影响

异种金属材料具有热物性差异(常见金属热物性见表1所示<sup>[2]</sup>),这种差异是影响焊接过程的最主要因素<sup>[3]</sup>。具体表现为:异种材料熔点不同,熔点低的材料达到熔化状态时,熔点高的材料仍呈固体状态,这时已经熔化的材料容易渗入过热区的晶界,造成低熔点材料的流失、合金元素烧损或蒸发,使焊缝

的化学成分发生变化,力学性能难以控制,尤其是焊接异种有色金属时更为显著。异种材料线膨胀系数差异导致熔池结晶时产生较大焊接应力与焊接变形,由于焊缝两侧材料承受的应力状态不同,容易导致焊缝及热影响区产生裂纹,甚至导致焊缝金属与母材的剥离。材料的热导率和比热容差异使焊缝金属的结晶条件变坏,晶粒严重粗化,并影响难熔金属的润湿性能。异种材料焊接时易产生金属间化合物,同时会发生组织变化,导致焊接接头力学性能下降,尤其是热影响区容易产生裂纹,甚至发生断裂。同时,材料膨胀系数、热导率和比热容等热物性参数随温度变化而变化,导致异种材料激光焊接过程更加复杂。

表1 部分常用金属热物性参数(室温)

Table 1 Thermal-physical properties of several common metal(Data are for room temperature)

Metal	Melting temperature/K	Boiling temperature/K	Thermal conductivity /W/(m·K)	Specific heat capacity /J/(kg·K)	Thermal expansion coefficient/(10 <sup>6</sup> /K)
W	3673	5852	174	138	4.5
Mo	2888	4883	137	251	5.1
Nb	2740	5013	54	268	7.2
Zr	2125	4673	23	289	5.9
Ti	1940	3558	22	528	8.9
Fe	1809	3133	78	456	12.1
Ni	1728	3188	89	452	13.3
Cu	1356	2833	397	386	17.0
Al	933	2793	238	917	23.5
Zn	693	1184	120	394	31.0

表2 部分常用金属激光吸收率(室温)

Table 2 Absorptivity of several metals at 1.06  $\mu\text{m}$  and 10.6  $\mu\text{m}$ (Data are for room temperature)

Metal	Absorptivity	
	1.06 $\mu\text{m}$ (Nd:YAG)/%	10.6 $\mu\text{m}$ (CO <sub>2</sub> )/%
Stainless steel	31	9
Ti	26	8
Zn	16	3
Ni	15	5
Fe	10	3
Carbon steel	9	3
Al	6	2
Cu	5	1.5

激光焊接过程中激光束与材料吸收的相容性取决于材料的一些重要性能,如吸收率、反射率、热导

率、熔点温度等,其中最重要的是吸收率<sup>[4]</sup>。常温下金属对激光的吸收率一般比较小(见表2所示<sup>[1]</sup>),

而且同种金属对于不同波长激光吸收率也具有差异。另外,随着温度升高,当达到熔点附近时,吸收率会出现大幅增长<sup>[1]</sup>。针对吸收率差异较大的金属材料激光焊接,熔池容易出现偏熔现象,匙孔不稳定,给焊接过程建模带来困难<sup>[2]</sup>。

## 2.2 异种金属材料激光焊接熔池形成与演化机制

异种金属激光焊接熔池形成与演化过程具有多场(激光场、熔池流场、固体应力-应变场、温度场等)、多尺度(时间尺度( $10^{-3} \sim 10^0$  s):熔池形成-凝固过程,空间尺度( $10^{-6} \sim 10^{-3}$  m):微结构-熔池形貌)和多参数(激光功率、光强分布、移动速度等)的特点,如图 1 所示。

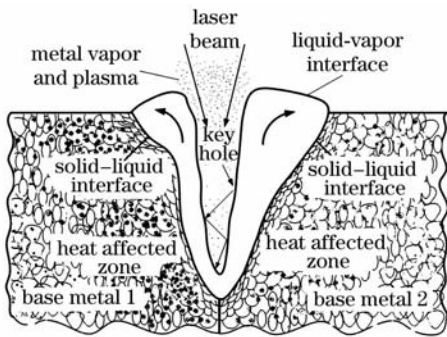


图 1 异种金属激光深熔焊接熔池示意图

Fig. 1 Schematic diagram of laser welding melt pool of dissimilar metal

熔池形成与演化是激光异种金属焊接中的关键科学问题,它涉及材料对激光束的吸收<sup>[5]</sup>、能量与动量的运输与转换、固-液-气的快速相变及相界面移动、熔池中热-力场及梯度分布与演化规律、混合界面各相浓度分布等。其中,较大梯度的温度、压力与浓度变化以及表面张力变化对熔池形成的状态产生影响。熔池形成后,当激光密度达到阈值,就会形成气体蒸发和等离子体,伴随很大的压力与浓度梯度,产生匙孔效应<sup>[1]</sup>。对于异种材料激光焊接,由于热物性参数的差异,熔池偏熔严重,匙孔不稳定。提高焊接质量的关键是对熔池形成过程进行准确描述。

## 2.3 熔池凝固过程焊接缺陷及残余应力的形成

激光异种金属焊接存在多场耦合,焊缝熔化区凝固过程及热影响区微结构演化复杂。在熔池凝固过程中,熔池的快速冷却、凝固的不均匀传热过程会产生很大热应力。在热应力与相变应力共同作用下会引起塑性变形、生成微缺陷、形成残余应力<sup>[6]</sup>。其中接头典型缺陷主要有热裂纹、气孔以及有害相等。在焊接过程中,由于低熔物的形成,扩大了焊缝的结晶温度范围,在焊接熔池凝固后期,熔池中大部分金

属已凝固,在晶界的少部分低熔物还在液态状态下,在焊接应力作用下,易成为裂纹萌生和开裂的地方。激光焊接气孔是由焊接过程中形成的匙孔不稳定将保护气体卷入焊接熔池,以及匙孔底部金属蒸发间歇产生大量气泡所导致。有害相的形成是由于焊接过程中的非平衡凝固导致焊接过程中元素的偏析所致<sup>[7]</sup>。

## 3 异种金属激光焊接研究进展

### 3.1 异种金属材料的激光焊接

#### 3.1.1 异种钢激光焊接

目前国内外异种钢激光焊接主要集中在不锈钢、低碳钢。异种钢热物性差别主要是由于其金相组织的不同。印度先进技术中心 Kaul 等<sup>[8]</sup>采用钨极氩弧焊和激光方法对奥氏体钢与铁素体钢进行焊接,将焊接结果进行了对比分析,发现激光焊较钨极氩弧焊可以得到更小的焊缝熔化区和热影响区,从而获得较好的微观结构。爱尔兰都柏林(Dublin)城市大学 Anawa 等<sup>[9]</sup>利用 CO<sub>2</sub> 激光器对不锈钢 AISI316 与不锈钢 AISI1008 进行焊接,也得到了铁素体和奥氏体钢焊接能够成功使用激光焊接的结论,并设计实验来优化焊接参数,得到了小的残余应力和热影响区,并发现残余应力与输入能量有直接关系,具体体现在工艺参数中的焊接速度和激光功率。

#### 3.1.2 铝钢激光焊接

铝/钢熔点差异大,易形成金属间化合物的异种材料,并且铝/钢合金具有高反射率和高热传导系数的特点,在焊接过程中难以形成匙孔,焊接时需要较高的能量密度。北京工业大学激光工程研究院左铁钊等<sup>[10]</sup>对高强铝合金的激光焊接性能进行了深入探索,研究了填充合金粉末对铝合金高功率 CO<sub>2</sub> 激光焊接功率阈值、焊缝成形和焊接过程稳定性的影响<sup>[11,12]</sup>。

国内外对钢铝异种材料填充焊丝的激光焊接技术进行了大量研究,并实现了生产应用,如德国的“空中客车”飞机的机翼和隔板 T 型接头的激光焊接<sup>[10]</sup>。法国酷彩(Le Creusot)公司激光材料处理实验室的 Mathieu 等<sup>[13]</sup>对铝钢材料进行了 Zn 基钎料激光焊,指出钎焊可以限制脆硬相的生成。日本阿南(Anan)国立技术学院 Nishimoto 等<sup>[14]</sup>运用激光压力焊对铝合金 A6061 及低碳钢 SPCC 进行焊接,焊接过程如图 2 所示。实验发现通过控制激光能量与材料的作用时间,可以减小界面反应层的厚度,有

效控制中间相的生成。

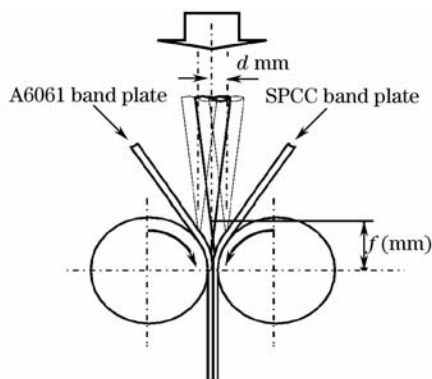


图 2 激光压辊焊接过程图

Fig. 2 Schematic diagram of laser roll welding

### 3.1.3 镁铝及镁铝合金焊接

铝及其合金具有良好的耐蚀性、较高的比强度、较好的导电性及导热性等优点。镁是比铝还轻的一种有色金属,也具有较高的比强度和比刚度及良好的抗震能力。镁铝焊接的主要问题在于母材本身极易氧化,热传导系数大,易产生裂纹和气孔等焊接缺陷,且极易产生金属间化合物,从而显著降低了焊接接头的力学性能。

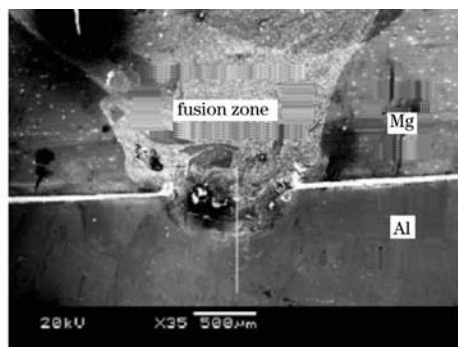


图 3 镁铝 TIG-激光复合焊接接头微观结构扫描电镜图片  
(中间层为铈金属)

Fig. 3 SEM microstructure of Mg and Al joint made by hybrid welding with cerium as interlayer

日本长冈(Nagaoka)理工大学 Borrisutthekul 等<sup>[15]</sup>通过有限元分析,提出用一个支撑块作为散热片,减小中间层厚度,提高焊接质量。大连理工大学三束材料改性实验室刘黎明等<sup>[16,17]</sup>采用激光-TIG 复合焊对镁铝异种金属进行焊接,TIG-激光复合热源利用激光增加 TIG 能量利用率,同时利用 TIG 增加激光的吸收率,适合于焊接激光低吸收率、高热导率的金属焊接,焊接接头如图 3 所示<sup>[17]</sup>。可见焊接接头没有宏观裂纹。研究结果表明复合焊由于其焊速高以及对熔池的快速搅拌作用,使镁铝形成的金属间化合物由连续的层状变为弥散状,从而改善

了异种金属镁铝的焊接性。

### 3.1.4 铜与其他金属及合金焊接

铜焊接的主要困难在于高反射率。印度科技学院冶金系 Phanikumar 等<sup>[18]</sup>用连续 CO<sub>2</sub> 激光器对铜镍异种材料进行焊接,对焊缝/母材微观组织结构进行了研究,指出异种金属焊接熔池形状是不对称的,焊缝两侧有着完全不同的微观组织;对焊接熔池形貌以及两侧不同微观结构的演化过程进行了深入研究,所测焊缝区铜元素含量如图 4 所示<sup>[18]</sup>。新加坡制造技术研究院 Mai 等<sup>[19]</sup>采用无钎激光焊对钢-镍钴合金、铜-钢、铜-铝进行焊接,且认为两种材料的熔化比例是控制焊接结果无裂纹的关键因素。

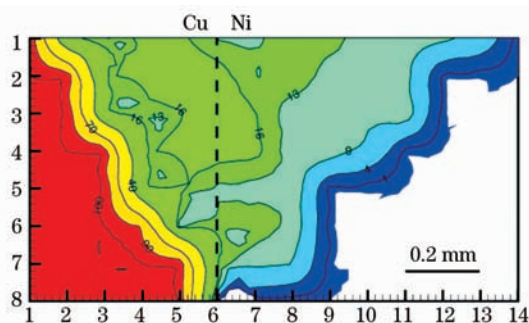


图 4 焊缝区铜元素含量分布图(虚线为焊缝中心)

Fig. 4 Composition map of Cu over whole of weld pool  
(dotted line indicates centerline of weld)

### 3.1.5 高温合金激光焊接

高温合金有钛合金、镍基合金等,主要用于航空发动机以及柴油机涡轮增压器等设备中。钛及钛合金由于其化学活性大、熔点高、热容量小、热导率小、冷冽倾向大、易产生气孔等原因使得可焊性非常差。北京航空航天大学朱颖等<sup>[20]</sup>针对采用 Ti 基快速凝固钎料对 TiAl 基合金和 42CrMo 钢的真空钎焊进行研究,通过扫描电镜(SEM)和 X 射线衍射(XRD)对接头组织进行了分析,确定了快速凝固钎料在界面层中的生成相。指出:在 TiAl 基合金和 42CrMo 钢的真空钎焊试验中,随着保温时间的延长,接头强度略有提高,但变化不大;在 970 °C 15 min 时生成了 TiCu, TiC, TiNi 和 Fe<sub>4</sub>Cu<sub>3</sub> 相;在 970 °C 30 min 和 970 °C 60 min 时,生成了 TiCu, TiC, TiNi, TiAl 和 Fe<sub>4</sub>Cu<sub>3</sub> 相。

发动机涡轮增压器涡轮叶盘材料镍基沉淀铸造高温合金(K418)由于高的 Al, Ti 含量,焊接时热裂纹敏感性高;涡轮轴材料 42CrMo 由于高的碳含量,焊接时热淬性高,且焊缝区域和热影响区易出现脆化。二者可焊接很差。中国科学院力学研究所激光加工工艺力学实验室庞铭等<sup>[21~23]</sup>针对这一问题,

提出了 K418 与 42CrMo 激光深熔焊方法。实验表明, K418 与 42CrMo 激光穿透焊接有 X 形和 T 形两种典型的焊缝形貌, 且焊缝形貌是不对称的。随着焊接速度的提高, 焊接线能量降低, 焊缝尺寸变小, 且焊缝上部尺寸变化比下部尺寸变化慢, 焊缝形貌由 X 形过渡到 T 形。当离焦量在瑞利长度范围内时, 焊缝正面宽度变化很小; 当离焦量超出瑞利长度范围时, 在足够高的激光功率密度下, 焊缝正面宽度快速增加。通过工艺参数优化获得焊缝形貌如图 5 所示<sup>[22]</sup>。

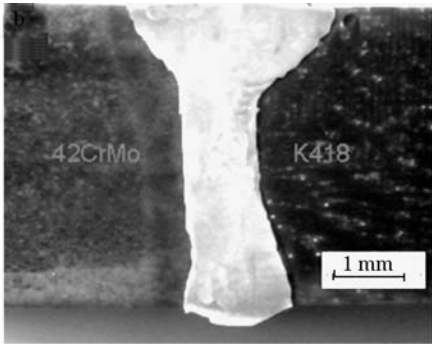


图 5 42CrMo 与 K418 焊缝形貌

Fig. 5 Weld seam of 42CrMo and K418

提出了 K418 与 42CrMo 异种金属激光焊接焊缝底部局部未熔合机制, 即“K418 与 42CrMo 异种金属热物性参数的差异会导致激光深熔焊接的临界功率密度范围有差异; 当在匙孔底部的激光功率密度范围介于 K418 与 42CrMo 临界气化功率密度范围之间, 匙孔会发生偏移; 当在匙孔底部的激光功率密度介于 K418 与 42CrMo 热传导焊接下临界功率密度范围之间时焊缝会发生偏移”。

### 3.2 激光焊接熔池演化机制

#### 3.2.1 激光焊接熔池行为

国内外针对激光焊接的实验研究还是以同种材料为主。典型的是日本大阪 (Osaka) 大学 Matsunawa 等<sup>[24]</sup>在熔池中放入直径 0.1~0.4 mm 钨颗粒, 通过 X 射线可清楚地观察到匙孔作用下熔池的流动状态, 如图 6 所示。钨颗粒的运动基本上可以代表熔池中液态金属的流动规律。

#### 3.2.2 熔池热过程及流动特性数值模拟

采用实验方法难以确定焊接过程中的温度分布、冷却速度和熔池流动的形态。数值模拟是分析激光焊接过程中温度分布和流动状态的有效途径。

自从 1973 年 Swift-Hook 等<sup>[25]</sup>开始对激光焊接温度场进行研究以来, 激光焊接数值模拟经历了 30 多年的发展历史。各国研究者在同种材料激

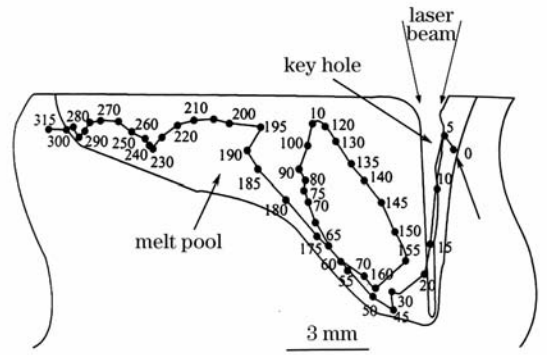


图 6 熔池中钨颗粒的运动轨迹

光焊接热源模型、匙孔模型、温度场以及熔池流动等方面做了很多研究工作。美国密西根州立大学 Mazumder<sup>[26]</sup>用有限差分法计算三维准稳态激光传热模型较具代表性。埃塞克斯 (Essex) 大学 Dowden 等<sup>[27~29]</sup>系统地研究了激光深熔焊接过程小孔周围的流动, 首次分析了小孔内等离子体逆韧致辐射的效果; 使用点线组合热源模拟了深熔焊接时的接头形貌, 解释了深熔焊缝截面呈“钉头”状的原因。澳大利亚维恩 (Wien) 技术大学高能束技术系 Kaplan<sup>[30]</sup>建立了以小孔不对称为基础的激光深熔焊接数学模型, 通过逐点计算小孔前后壁的能量平衡而获得小孔形状沿板件厚度方向的变化规律。瑞典吕勒奥 (Lulea) 理工大学 Lampa<sup>[31]</sup>对 Kaplan 这一模型又进行了改进, 研究了小孔内的表面张力梯度, 提出了小孔的热毛细模型。

随着异种金属激光焊接的工程需求, 异种材料激光焊接数值模拟逐步发展起来, 比较典型的是英国利物浦 (Liverpool) 大学工程学系 Chakraborty 等<sup>[32]</sup>研究了铜镍异种金属激光焊接熔池中的湍流行为。研究发现采用湍流模拟结果与实验更为吻合。

对 K418 与 42CrMo 异种金属激光热传导焊接模拟表明, 随激光焊接速度的增加和激光功率的降低, 焊缝正面熔池逐渐由椭圆形过渡到泪滴形, 再演变到月牙形, 焊缝形貌的不对称性增加 (如图 7 所示)。焊缝熔池的这种变化规律是由于 K418 与 42CrMo 热物性的差异导致激光热传导焊接的临界功率密度的差异。

### 3.3 熔池凝固过程中焊接缺陷及残余应力形成机制

针对 K418 与 42CrMo 异种金属激光深熔焊接接头组织, 在扫描电镜下, 在焊缝区域观察到了结晶裂纹 (如图 8 所示)。对焊缝枝晶核 1 和裂纹处区域



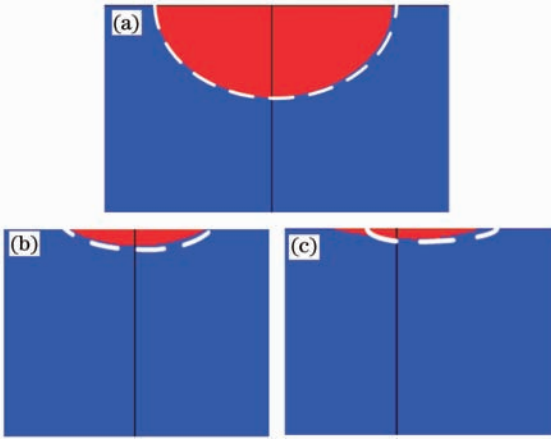


图 7 熔池轮廓实验与数值模拟对比  
(白色虚线表示实验测量焊缝轮廓线)

Fig. 7 Comparison of experimental and numerical simulation results of melt pool shape (dotted line indicates contour of weld seam). (a)  $v = 8$  mm/s; (b)  $v = 50$  mm/s; (c)  $v = 70$  mm/s

2 能谱分析表明裂纹处 Mo, Al, Nb, Ti 元素聚集, 如

表 3 焊缝枝晶核能谱分析(质量分数%)

Table 3 Nuclear spectrum analysis of dendrite in weld seam (mass fraction%)

Element	Ni	Fe	Cr	Nb	Ti	Mo	Al
Area 1	52.4501	32.0260	6.6443	2.3228	0.8820	1.8907	0.8260
Area 2	36.9269	26.9393	8.7532	12.9590	4.5035	5.0603	1.8577

另外, 从图 9 观察到焊缝根部气孔, 并且焊缝靠近 42CrMo 侧焊缝的气孔比靠近 K418 侧气孔密集。这是因为 42CrMo 导热系数比 K418 高, 熔池在靠近 42CrMo 侧凝固速度比 K418 侧高, 导致靠近 42CrMo 熔池中的气孔逸出时间比靠近 K418 侧短。研究发现气孔率随焊接速度的变化而波动, 气孔数随焊接速度的增加而减少; 气孔率和气孔数随离焦量的改变而发生波动。

实验表明 K418 与 42CrMo 异种金属激光焊接焊缝区域的组织主要是枝晶组织, 并且首次发现在

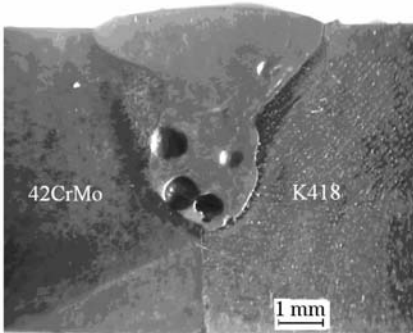


图 9 焊缝根部气孔

Fig. 9 Porosity in welding root

表 3 所示, 这些元素的聚集易在焊缝中形成 Laves,  $\gamma + \gamma'$  共晶及其他的底熔物。由于底熔物的形成, 扩大了焊缝的结晶温度范围, 在焊接熔池凝固后期, 熔池中大部分金属已凝固, 晶界的少部分低熔物还在液态状态下, 在焊接应力作用下, 易成为裂纹萌生和开裂的地方。

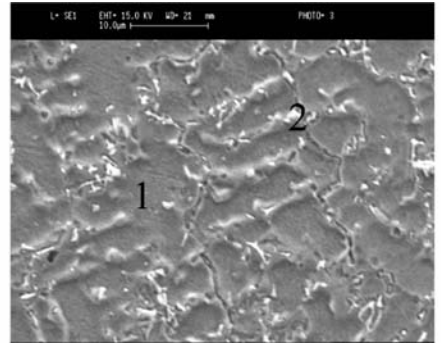


图 8 焊缝组织扫描电镜图

Fig. 8 SEM image of weld microstructure

焊缝区域弥散分布着针状的 MC 碳化物和颗粒状的 Laves 相(如图 10 所示)。Laves 相是一种密排六方相, 其特点是硬而脆, 且熔点低。Laves 相的形成扩大了焊缝区域凝固温度范围, 提高了焊缝区域的热裂纹敏感性。研究发现通过提高焊接速度可以抑制 Laves 相的形成。

Anawa 等<sup>[6,9]</sup> 利用 CO<sub>2</sub> 激光器对不锈钢 AISI316 与不锈钢 AISI1009 进行焊接, 并使用正交试验设计和分析方法, 分析采用不同工艺参数情况下焊接接头中残余应力的大小, 得到优化的焊接参

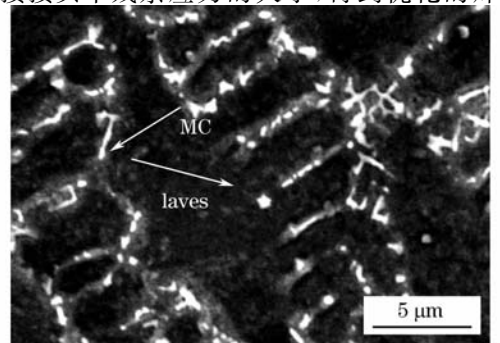


图 10 焊缝区域扫描电镜图——Laves 相

Fig. 10 SEM image of weld seam zone—Laves phase

数从而达到控制残余应力的目的。

## 4 结 论

激光焊接异种金属材料从异种钢扩展到了有色金属及其合金,特别是针对镁铝合金、钛铝合金以及镍基高温合金的激光焊接已取得进展,获得了具有一定熔深与强度的焊接接头。异种金属激光焊接熔池的形成与演化过程复杂。对焊接热源模型、匙孔模型、温度场以及熔池流动等问题从数值模拟与实验两方面进行了深入研究,特别是考虑热传导焊熔池流动中的湍流问题,给出了镍基高温合金与合金钢焊接匙孔发生偏移的条件。熔池凝固过程中接头组织演变、焊缝缺陷以及残余应力形成机制方面,深入分析了凝固过程中热裂纹、有害相、气孔的产生机制,并从工艺角度对残余应力进行控制。

目前,异种金属激光焊接熔池行为,特别是等离子体与匙孔效应的实验研究比较缺乏;熔池形成、凝固过程力学精确建模仍存在困难。另外,需要对激光钎焊,TIG-激光复合焊等焊接机制进行深入研究,以期解决异种金属性能差异带来的可焊性问题。

## 参 考 文 献

- 1 W. W. Duley. Laser Welding[M]. New York: John Wiley & Sons, 1999
- 2 Z. Sun, J. C. Ion. Laser welding of dissimilar metal combinations [J]. *Journal of Materials Science Letters*, 1995, **30**: 4205~4214
- 3 Li Yajiang, Wang Juan, Liu Peng. Welding of Badly Welding Dissimilar Materials and Application[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2004. 1  
李亚江,王娟,刘鹏. 异种难焊材料的焊接及应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004. 1
- 4 Yu Gang, Yu Heji. Integrated Laser Intelligent Manufacturing [M]. Beijing: Metallurgy Industry Press, 2001. 1  
虞钢,虞和济. 集成化激光智能加工工程[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2001. 1
- 5 A. F. H. Kaplan. Unbounded keyhole collapse and bubble formation during pulsed laser interaction with liquid zinc[J]. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 2002, **35**(11): 1218~1228
- 6 E. M. Anawa, E. M., A. G. Olabi. Control of welding residual stress for dissimilar laser welded materials [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2008, **204**(1-3): 22~33
- 7 C. Radhakrishna, K. P. Rao. The formation and control of Laves phase in superalloy 718 welds[J]. *Journal of Materials Science*, 1997, **32**(8): 1977~1984
- 8 R. Kaul, P. Ganesh, A. K. Nath. Microstructural characterization of dissimilar laser weld between austenitic and ferritic stainless steels [J]. *Journal of Laser Applications*, 2005, **17**(1): 21~29
- 9 E. M. Anawa, A. G. Olabi. Using Taguchi method to optimize welding pool of dissimilar laser-welded components [J]. *Optics and Laser Technology*, 2008, **40**(2): 379~388
- 10 Zuo Tiechuan, Xiao Rongshi, Chen Kai. Laser Materials Processing of High Strength Aluminum Alloys [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2002  
左铁钊,肖荣诗,陈凯. 高强铝合金的激光加工[M]. 北京: 国防工业出版社, 2002
- 11 Zhang Shenghai, Chen Kai, Xiao Rongshi *et al.*. Influence of metal powder on high power CO<sub>2</sub> laser welding of aluminum alloy [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(6): 860~863  
张盛海,陈凯,肖荣诗等. 填充粉末对铝合金高功率 CO<sub>2</sub> 激光焊接的影响[J]. 中国激光, 2005, **32**(6): 860~863
- 12 Zhang Shenghai, Chen Kai, Xiao Rongshi *et al.*. High power CO<sub>2</sub> laser powder welding of aluminum alloy [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(5): 714~718  
张盛海,陈凯,肖荣诗等. 铝合金高功率 CO<sub>2</sub> 激光粉末焊接 [J]. 中国激光, 2006, **33**(5): 714~718
- 13 A. Mathieu, R. Shabadi, A. Deschamps *et al.*. Dissimilar material joining using laser (aluminum to steel using zinc-based filler wire) [J]. *Optics and Laser Technology*, 2007, **39**(3): 652~661
- 14 K. Nishimoto, H. Fujii, S. Katayama. Laser pressure welding of Al alloy and low C steel [J]. *Science and Technology of Welding and Joining*, 2006, **11**(2): 224~231
- 15 R. Borrisutthekul, T. Yachi, Y. Miyashita *et al.*. Suppression of intermetallic reaction layer formation by controlling heat flow in dissimilar joining of steel and aluminum alloy [J]. *Materials Science and Engineering*, 2007, **467**(1-2): 108~113
- 16 L. M. Liu, G. Song, M. L. Zhu. Low-power laser/arc hybrid welding behavior in AZ-based Mg alloys [J]. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2008, **39A**(7): 1702~1711
- 17 L. M. Liu, X. J. Liu, S. H. Liu. Microstructure of laser-TIG hybrid welds of dissimilar Mg alloy and Al alloy with Ce as interlayer [J]. *Scripta Materialia*, 2006, **55**(4): 383~386
- 18 G. Phanikumar, P. Dutta, K. Chattopadhyay. Continuous welding of Cu-Ni dissimilar couple using CO<sub>2</sub> laser [J]. *Science and Technology of Welding and Joining*, 2005, **10**(2): 158~166
- 19 T. A. Mai, A. C. Spowage. Characterisation of dissimilar joints in laser welding of steel-kovar, copper-steel and copper-aluminium. materials science and engineering a-structural materials [J]. *Properties Microstructure and Processing*, 2004, **374**(1-2): 224~233
- 20 Zhu Ying, Zhang Mo, Wang Guojian *et al.*. The effect of different crystal conditions of filler metal on vacuum brazing of TiAl alloy and 42CrMo [J]. *China Welding*, 2007, **16**(4): 17~19
- 21 M. Pang, G. Yu, H. H. Wang *et al.*. Microstructure study of laser welding cast nickel-based superalloy K418 [J]. *Journal of Materials Processing Tech.*, 2008, **207**(1-3): 271~275
- 22 X. B. Liu, G. Yu, M. Pang *et al.*. Dissimilar autogenous full penetration welding of superalloy K418 and 42CrMo steel by a high power CW Nd: YAG laser [J]. *Applied Surface Science*, 2007, **253**(17): 7281~7289
- 23 Pang Ming, Yu Gang, Liu Zhao *et al.*. Dissimilar metal of K418 and 42CrMo full penetration laser welding [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(8): 1122~1126  
庞铭,虞钢,刘兆等. K418与42CrMo异种金属的激光穿透焊接[J]. 中国激光, 2006, **33**(8): 1122~1126
- 24 A. Matsunawa, N. Seto, J. D. Kim *et al.*. Dynamics of keyhole and molten pool in high-power CO laser welding [C]. *SPIE*, 2000, **3888**: 34~45
- 25 D. T. Swift-Hook, A. E. F. Gick. Penetration welding with lasers [J]. *Research Supplement*, 1973, **52**(11): 492~498
- 26 Mazumder J. W. M. Steen. Heat transfer model for cw laser material processing [J]. *J. Appl. Phys.*, 1980, **51**: 941~950
- 27 J. Dowden, N. Postacioglu, M. Davis *et al.*. A keyhole model in penetration welding with a laser [J]. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 1987, **20**(1): 36~44

28 J. Dowden, P. Kapadia, N. Postacioglu. An analysis of the laser-plasma interaction in laser keyhole welding[J]. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 1989, **22**:741~749

29 J. Dowden, P. Kapadia. A mathematical investigation of the penetration depth in keyhole welding with continuous CO<sub>2</sub> lasers [J]. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 1995, **28**(11):2252~2261

30 A. Kaplan. A model of deep penetration laser welding based on calculation of the keyhole profile [J]. *J. Phys. D: Appl.*

*Phys.*, 1994, **27**: 1805~1814

31 C. Lampa. An analytical thermodynamic model of laser welding [J]. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 1997, **30**: 1293~1299

32 N. Chakraborty, S. Chakraborty. Modelling of turbulent molten pool convection in laser welding of a copper-nickel dissimilar couple[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2007, **50**(9-10): 1805~1822



## 《激光与光电子学进展》“光学制造”栏目征稿启事

《激光与光电子学进展》是中国科学院上海光学精密机械研究所主办的激光、光电子领域行业性期刊,中国科技核心期刊。该刊 1964 年创刊,至今已出刊 500 余期,旨在促进国内外学术交流,沟通科研单位、生产部门与用户的联系。2009 年,《激光与光电子学进展》将加大光学制造方向的报道力度,深入研讨光学制造的技术发展及其在工业、科研各方面的应用。主要涉及方向有光学元器件、光学仪器、光学加工、光学设计、光学材料、光学薄膜、光学检测等领域。

欢迎相关的科研、技术、市场人员根据我们栏目内容定位,撰写或向我们推荐涉及上述领域的优秀技术论文。来稿不收取审稿费和版面费,一经录用将优先发表并支付丰厚稿酬。

• 本栏目基本要求:

- 1) 稿件内容应为光学制造领域的最新进展、研究动态、科研和新品开发成果等方面;
- 2) 文章要求内容新颖、论点正确、论据充分、数据可靠、文理通顺;
- 3) 技术文章字数一般为 5000 字左右;综述文章字数最多不超过 10000 字,且第一作者需为副教授及以上职称。

• 投稿方式:通过网上投稿系统(<http://www.opticsjournal.net/lop.htm>)直接上传稿件(主题标明“光学制造”投稿),也可以直接将稿件 word 版发至邮箱:dingjie@siom.ac.cn(主题标明“光学制造”投稿),如有问题欢迎垂询 021-69918198 与栏目编辑丁洁联系。

《激光与光电子学进展》编辑部