

# 中厚板的高功率激光焊接\*

## High-Power Laser Welding of Plate

上海市激光制造与材料改性重点实验室 黄坚 李铸国 唐新华



黄坚

工学博士,上海交通大学副教授,硕士生导师。主要从事材料激光焊接与熔敷、焊接过程的数值模拟等方面的研究。现任上海市激光制造与材料改性重点实验室副主任,上海交通大学材料学院激光制造实验室副主任。

商用高功率激光器的出现和不断发展,使高功率激光焊接技术得到了深入的研究和发展。高功率激光在中厚板的焊接制造上展现出高速、单道熔透、高质量接头、低变形等优点,得到了工业界越来越多的关注,

\* 原国防科工委资助项目(B1420080218)。

研究和应用结果表明,采用高功率激光焊接技术可实现高速、极小焊后变形的中厚板焊接,焊接接头质量好,某些钢种的激光焊缝和热影响区表现出远优于常规焊接的冲击韧性,为激光焊接在重大装备制造中的应用提供了有力的支撑。随着高功率激光焊接的优越性逐渐得到业内的认可,高功率激光焊接工艺必将在重大装备的中厚板焊接甚至厚板焊接中得到更为深入的应用。

未来将在船舶制造、飞机制造、钢铁生产等重大设备制造、能源等工业领域得到突破应用,促进焊接生产效率和质量的提高。

激光应用于焊接始于上世纪60年代,自70年代以来,随着激光器输出功率的增加和光束质量的提高,具有大深宽比特点的激光深熔焊接得到了快速发展。作为先进焊接技术,激光焊接技术近年来在工业制造中得到越来越广泛的应用,比如汽车制造业、航空航天等领域。目前的应用主要集中在薄板或熔深要求较小的场合。由于激光焊接的突出优点,对于更厚材料的激光焊接,国外西方国家已开展了相应的研究,国内目前开

展了些零星的研究工作。

为了能焊接更厚的材料,往往需要更高功率的激光。高功率激光焊接具有一次熔深大、深宽比大、焊接速度快、热输入量低、变形小等特点。高功率激光焊接更多地被应用于中型和重型工业的生产制造中,如船舶、核电、钢铁、能源、油气管道等。

对于工业制造中涉及的板材,不同工业领域、不同材料对板厚的划分实际上有所不同。我们在此粗略地把板厚在6~20mm之间的板材称为中厚板,板厚在20mm以上的则称为厚板。采用激光焊接的中厚板焊缝通常具有长度长、形状规则、低

变形要求等特点。

## 高功率激光焊接技术

### 1 高功率激光器及其功率

要进行高功率激光焊接自然首先需要高功率激光。通常我们把输出功率在 1kW 以上的激光称为高功率激光。当然,激光类型不同,其高功率的界限实际上会有所不同。自上世纪 90 年代以来,激光技术有了快速发展,商用激光器的输出功率不断提高,从而使高功率激光焊接得以实现。

在现有的激光器类型中,二氧化碳(CO<sub>2</sub>)激光器和固体激光器是目前主要的 2 种高功率激光器。

CO<sub>2</sub>激光器为气体激光器,以 He:N<sub>2</sub>:CO<sub>2</sub> 混合气体为激光工作气体,通过对 CO<sub>2</sub> 分子的激励而发出激光,激光波长为 10.6 μm。由于气体介质在谐振腔内的分布均匀性好,所以容易获得近衍射极限的高斯光束。CO<sub>2</sub>激光器按照结构可细分为多种类型,其中快速轴流型、横流型和扩散冷却型是市场上高功率 CO<sub>2</sub>激光器的三大类型。这其中又以扩

散冷却型的可达激光束质量最高,以快速轴流型的输出功率最高(可达 20kW 以上)。

市场上高功率的固体激光器主要有 3 类,即 Nd:YAG 激光、光纤激光和半导体激光,它们输出激光的波长均在 1 μm 左右。半导体激光因受限于其工作机理而只能获得光束质量较差的激光,即激光的发散角大、方向性差。所以半导体激光主要用于堆焊(表面熔敷)、钎焊和浅熔深焊接。Nd:YAG 激光的最大输出功率已达 6kW。在其基础上发展起来的盘片式激光器输出功率可达 8kW,电光转换效率达 20% 以上。光纤激光是近几年来得到快速发展的固体激光器,其激光器结构独特并且创新。光纤激光以双包层光纤为谐振腔,以二极管激光为泵浦源,其多模状态下可输出激光功率达 25kW 以上的高质量光束。因结构紧凑、维护简单、运行可靠,已表现出良好的应用势头,在相当多的领域正在逐步替代传统的 Nd:YAG 激光和 CO<sub>2</sub>激光器。

### 2 主要激光焊接技术

目前,常见的激光焊接技术,即

纯激光焊接、激光填丝焊接和激光电弧复合焊接,也是高功率激光焊接的主要焊接技术方法。

纯激光焊接时因没有填充金属,对焊接件接头间隙有相当高的要求,要求间隙小、避免大的错边,所以厚板单道激光对接焊时一般较少采用纯激光焊,以避免出现过大的焊缝表面凹陷。激光填丝焊则因填充金属加入而使其对间隙有一定的容忍度。激光电弧复合焊,这里一般指激光-熔化极电弧复合焊,则因为熔化极的高效率熔化而进一步提高了间隙容忍度。同时电弧热源的加入,使焊接过程热循环的变化更丰富。图 1 显示的是这 3 种高功率激光焊接技术的原理和典型焊接接头横截面形状。其中所给的激光电弧复合焊原理示意图中电弧是旁轴式的,通常还会有同轴复合方式。从图中焊缝横截面形状上可以发现,纯激光和激光填丝焊的焊缝截面形状是相近的,而激光电弧复合焊的焊缝横截面形状结合了熔化极电弧焊和激光深熔焊的熔深特征,其上部为熔化极电弧形成的上宽下窄的倒三角熔深,下半部为激光束形成的窄而深的熔化区。

有研究对埋弧焊、激光填丝焊和激光电弧复合焊在焊接速度、一次可焊厚度、间隙容忍度、变形、金相和疲劳性能等方面进行了比较。研究表明,激光电弧复合焊具有最优的综合性能,即其焊接速度最高、接头疲劳性能最优,一次可焊板厚大于埋弧焊,并与纯激光焊接相同;焊接变形比埋弧焊小一个数量级,与激光填丝焊的接近;其间隙容忍度介于激光填丝和埋弧焊之间。由此可以看到,激光电弧复合焊既有高的焊接生产率又有较高的间隙容忍度,是中厚板和厚板激光焊接的优选焊接方法。

### 中厚板的激光焊接

中厚板在多个工业领域得到使用,如船舶制造、石油天然气输送、大

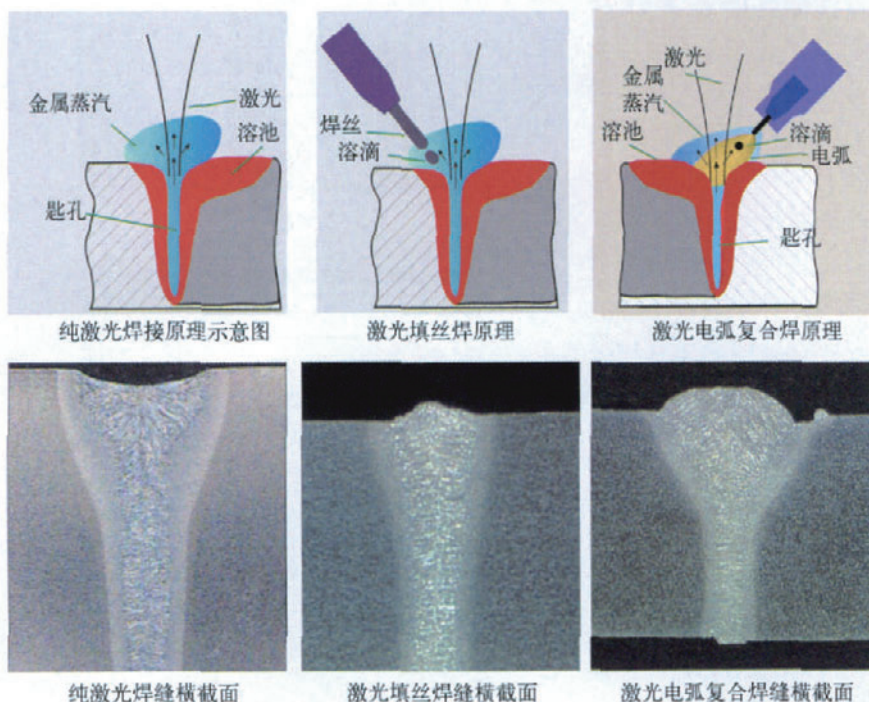


图1 高功率激光焊接的主要技术方法

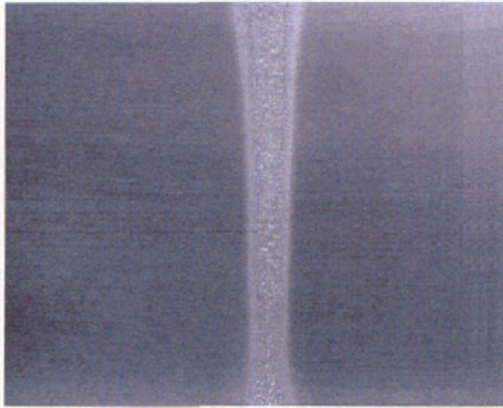


图2 12mm厚的X70钢板的激光焊缝

型装备制造等。中厚板的激光焊接国内外已开展了不少工作(图2)。

### 1 船用钢

我国船舶工业近年来的飞速发展已经引起了日韩的充分警觉,在其制订的战略目标中都有针对未来中国船舶工业发展的相应对策措施。在这样一种态势下,我国船舶工业事实上已开始进入与日、韩展开战略性对抗竞争的阶段。虽然我国目前已是造船大国,和日韩一起位于世界造船三甲,但我国船舶制造水平与日韩的差距仍然很大,大致相当于上世纪90年代初的世界水平。我国要想成为造船强国,则必须进一步快速提高自身的船舶制造技术水平。国家已要求造船企业通过引进消化,重点提高模块化舾装、焊接、切割等船舶建造关键技术水平和现代化造船生产管理技术,尽快达到现有国际先进水平。焊接技术是造船的关键技术之一,一般焊接工序所耗工时约占船体建造总工时的30%~40%,焊接成本约占船体建造总成本的30%~50%。因此,先进的船舶高效焊接技术对提高船舶的建造效率、降低船舶建造成本、提高船舶建造质量以及提高企业经济效益起着很大的作用。鉴于激光焊接的先进性和高效性,欧美国家率先开展了船舶材料的激光焊接研究并获得了应用。近几年我国也对此开展了相应的研究。

在船舶制造中会涉及多种钢

材,如CCS-B、A36、AH32等低碳结构钢,E、E36、10CrNiMnMo等低合金钢/微合金化钢/高强钢以及不锈钢等。根据德国船级社的一个关于船用板CO<sub>2</sub>激光焊接的指导文件,对于船舶结构钢的化学成分,即碳含量、硫磷杂质含量等提出了建议性要求,通常要求结构钢的碳含量

≤0.12%,硫磷杂质含量应分别小于0.005%和0.01%。然而我国不少船用结构钢的硫磷杂质含量往往相对偏高,鉴于材料现状,上海交通大学激光制造实验室于2005年起开展了多种国内船用钢中厚板的激光焊接研究。

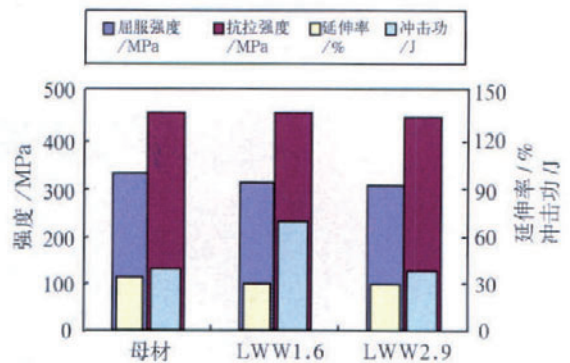
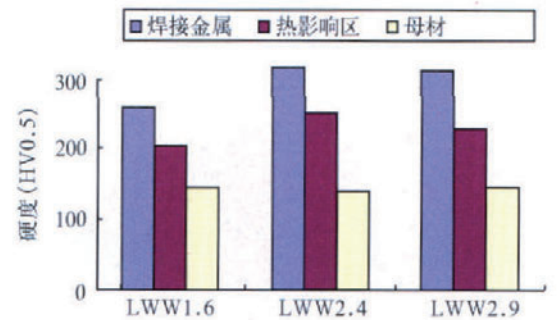
利用最大输出功率达15kW的高功率CO<sub>2</sub>激光,先采用激光填丝焊接(LWW)技术实现了8mm SUS304 不锈钢,8mm CCS-B 钢、10mm CCS-A36 钢和12mm 10CrNiMnMo 钢的对接焊以及8mm 不锈钢板的单边熔透角焊。使用的激光功率基本都在8kW以上。接头性能测试(图3)表明,结构钢和低合金高强钢的接头焊缝区因马氏体的出现使其硬度最大,一般为HV300以上,低合金高强钢甚至可达HV360以上。可见焊缝强度必然明显高于母材。接头的拉伸性能显示焊接接头与母材是等强的,试样的拉伸断裂均发生在母材侧。对8mm CCS-B 钢激光填丝焊焊缝进行的室温Charpy 缺口冲击试验表明,焊缝冲击性能不低于母材。在通过工艺优化,适当降低焊接速度和激光功率,使焊缝金相组织得到优化,马氏体

成分减少,焊缝硬度值降低,冲击韧性有所提高。

采用激光-MIG 电弧复合焊接方法实现了8mm SUS304 不锈钢、8mm CCS-B 钢、10mm CCS-A36 钢、15mm 10CrNiMnMo 钢和16mm E级钢的对接和/或角接。焊接接头质量良好。

### 2 船用铝合金

随着对某些船体减重的需求,铝合金材料在船体中得到了应用。船用铝合金5083H是目前在船体制造中使用较多的一种铝合金。将激光焊接应用在此类铝合金材料同样具有积极的作用。由于铝合金对激光有高发射率,尤其是CO<sub>2</sub>激光,所以激光焊接铝合金时往往要求高的光斑功率密度。采取电弧辅助热源,对激光前方的焊接区域进行预热,可以提高材料对激光的吸收。激光与电弧复合焊时电弧可以在激光的前面,也可以在其后面。为避免入射到工件表面的激光被反射后按原路返



注: LWW1.6、LWW2.4、LWW2.9 分别对应焊接速度为1.6m/min、2.4m/min 和2.9m/min 的焊接接头。

图3 船用钢CCS-B激光填丝焊接接头力学性能

回到激光器谐振腔,在实际焊接时将激光束相对工件表面法线做微小角度的偏离。试验中采取激光在前、电弧在后的复合热源排列方式。通过试验研究和工艺优化,实现了6mm和10mm铝合金5083H的单道激光电弧复合焊接,焊接速度达2m/min以上,焊缝深宽比达1以上,焊接接头质量符合要求,接头强度和180°弯曲性能与母材相当或相等。

### 3 管线钢

为适应我国经济发展的需要,石油天然气的需求量大大增加,因此,石油天然气输送管线的铺设已成为其主要决定因素。管线钢的焊接成为必然要涉及的问题。采用常规焊接方法已经能够实现管线钢的焊接。但为了提高焊接效率和接头质量,国外开展了管线钢的激光焊接研究,研究激光焊接热循环条件下接头的组织性能变化、接头焊接缺陷情况等。激光制造实验室利用15kW的CO<sub>2</sub>激光功率一次焊透15mm厚的管线钢X52和X70。焊接过程稳定,焊接速度达0.6m/min,接头无明显焊接缺陷,接头焊缝处和热影响区的冲击韧性与母材相近,甚至还有超过。激光-电弧复合焊可以有更多的可能来优化工艺,其实际适应性更佳,所以管线钢的激光复合焊方面的研究工作将继续进一步开展。

### 4 哈氏合金

在化工、钢铁等领域存在着具有一定温度的较强腐蚀性环境,许多关键部件或装置需要在该环境下工作,如煤化工中的醋酸生产中的反应容器。为了使相应装备具有优良的耐腐蚀性,哈氏合金(Hastelloy)得到了开发和应用。哈氏合金是一种镍基合金,铬、钼等为主要合金元素。在汽车镀锌钢板生产中的镀锌过程需要导电辊,导电辊与一定温度的锌液接触并构成电极。为此要求导电辊外表面具有优异的耐腐蚀性能和高温稳定性。由此哈氏合金C22被

应用到了导电辊的外套制造上。

作为镍基合金,哈氏合金具有和不锈钢类似的焊接性。钨极氩弧焊、手弧焊、等离子焊、电子束焊、激光焊等焊接方法均可采用。哈氏合金具有低热传导系数、高线性膨胀系数和熔池液态金属的高粘度等特点,焊接过程中需避免高热输入量。

采用激光焊接具有热输入量小、熔池流动能力强、熔深大等优点。通过采用合理的激光功率和线能量,成功实现了10mm厚的哈氏合金C22纯激光单道焊接。接头成形良好,无宏观气孔、裂纹等缺陷。经过固溶处理,焊接接头区域具有优良的耐腐蚀性能。国内自主研发的哈氏合金筒已应用到导电辊上并在实际镀锌钢板的生产中得到了考核,耐腐蚀性能优于进口部件。

### 5 国外研发情况

欧美国家和日本在上世纪末、本世纪初进行了中厚板的激光焊接技术研究,利用高功率CO<sub>2</sub>激光和Nd:YAG激光也成功实现了20mm以下中厚度板的激光单道熔透焊接。

德国的FraunhoferILT研究所利用10kW CO<sub>2</sub>激光和熔化极气保护焊(MAG)的复合焊接了12mm厚的EH36船用钢板、12mm厚的不锈钢;通过将激光输出功率提高到15kW焊接了15mm厚的低碳钢,焊接速度达到1.2m/min。

法国的InstitutdeSoudure研究所采用17kW纯CO<sub>2</sub>激光,以1.6m/min焊接速度成功焊接了15mm厚的钛合金TA6V,采用15kW CO<sub>2</sub>激光功率、2.6m/min焊接速度和填充焊丝焊接了6mm厚的5086铝合金。另外也在12mm厚的C-Mn钢板和15mm的管线钢上获得了良好的对接接头。

日本的三菱重工TakasagoR&D Center利用高功率Nd:YAG激光开展了相应中厚板的焊接。当采用4.8kW激光输出功率时SU S304不

锈钢的焊接熔深已达到8mm以上。他们最终采用脉冲形式平均7.6kW的YAG激光功率和0.2m/min的焊速一次焊透了20mm的SU S304不锈钢。

德国的IMG公司利用美国IPG公司生产的10kW光纤激光器,成功地将光纤激光应用到了中厚度钢板的拼板焊接。他们采用激光复合焊接工艺,分别采用7.8kW和10kW的激光功率焊接了6mm和10mm的船用钢板,焊接速度分别达到3.2m/min和1.5m/min。

### 结束语

利用高功率激光单道焊接中厚度板材料在许多工业领域中有良好的应用前景并得到了成功应用。通过激光功率和焊接速度的优化、激光和其他热源如电弧的复合等,使多种材料如低碳钢、低合金高强钢、铝合金、钛合金、镍基合金等的中厚度板成功实现了激光单道熔透焊接,焊接厚度达20mm。CO<sub>2</sub>激光和YAG激光是目前最为广泛使用的激光类型,但近年来发展起来的光纤激光已展现出优异的性能并逐步得到关注和应用。对于中红外波段的CO<sub>2</sub>激光,其高功率激光焊接时所采用的激光功率一般在8kW以上。对于近红外波段的YAG激光或光纤激光,其高功率激光焊接时所采用的激光功率一般在4kW以上。研究和应用结果表明,采用高功率激光焊接技术可实现高速、极小焊后变形的中厚度板焊接,焊接接头质量良好,某些钢种的激光焊缝和热影响区表现出远优于常规焊接的冲击韧性,为激光焊接在重大装备制造中的应用提供了有力的支撑。随着高功率激光焊接的优越性逐渐得到业内的认可,高功率激光焊接工艺必将在重大装备的中厚度板焊接甚至厚板焊接中得到更为深入的应用。

(责编 依然)