

文章编号: 1001-3806(2016)06-0853-07

## CFRP与不锈钢激光焊接的有限元分析

王强<sup>1,2</sup>, 焦俊科<sup>2\*</sup>, 王飞亚<sup>2</sup>, 张文武<sup>2</sup>, 盛立远<sup>3</sup>

(1. 宁波大学 机械工程与力学学院, 宁波 315211; 2. 中国科学院 宁波材料技术与工程研究所, 宁波 315201; 3. 北京大学 深圳研究院, 深圳 518055)

**摘要:** 为了研究碳纤维增强热塑性复合材料(CFRP)与不锈钢激光焊接的机理,及不同工艺参量对焊缝质量的影响规律,采用 ANSYS 建立了基于热传导焊的 3 维有限元模型,计算得到了温度场和应力场的分布,分析了激光功率、焊接速率和光斑直径等参量对焊缝宽度和焊接深度的影响规律,并进一步计算分析了焊接后的残余应力对焊接质量的影响情况。结果表明,该有限元模型能够快速、有效模拟激光对 CFRP-不锈钢焊接温度场和残余应力分布;激光功率、焊接速率和光斑直径等工艺参量对焊缝宽度和焊接深度有着重要的影响;计算出的焊接残余应力与残余应力的理论分布规律也基本吻合,验证了该有限元模型的可靠性。该研究结果对获得高质量 CFRP-不锈钢焊接接头是有帮助的。

**关键词:** 激光技术;激光焊接;有限元分析;碳纤维增强热塑性复合材料;温度场;残余应力

**中图分类号:** TG456.7      **文献标志码:** A      **doi:** 10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2016.06.017

### Finite element analysis of CFRP and stainless steel laser welding

WANG Qiang<sup>1,2</sup>, JIAO Junke<sup>2</sup>, WANG Feiya<sup>2</sup>, ZHANG Wenwu<sup>2</sup>, SHENG Liyuan<sup>3</sup>

(1. The Faculty of Mechanical Engineering and Mechanics, Ningbo University, Ningbo 315211, China; 2. Ningbo Institute of Industrial Technology, Chinese Academy of Sciences, Ningbo 315201, China; 3. Shenzhen Institute, Peking University, Shenzhen 518055, China)

**Abstract:** In order to investigate the mechanism of laser welding of carbon fiber reinforced plastics (CFRP) and stainless steel, and find out the effect of different process parameters on welding quality, a 3-D finite element model based on heat conduction welding was built by ANSYS. The distributions of temperature field and stress field were calculated by ANSYS. The effect of process parameters, including laser power, scanning welding and spot diameter, on welding width and welding depth was investigated. And the influence of welding residual stress on the quality of welding was also investigated. The results show that temperature field and residual stress distributions can be rapidly and effectively simulated by the proposed finite element model. Welding width and depth are affected by laser power, scanning welding and spot diameter. The calculated distribution and the theoretical distribution of residual stress agree well. The result confirms that the model is reliable. The result is helpful to obtain high quality welded joints of CFRP-stainless steel.

**Key words:** laser technique; laser welding; finite element analysis; carbon fiber reinforced plastics; temperature field; residual stress

## 引言

碳纤维增强热塑性复合材料(carbon fiber reinforced plastics, CFRP)是近年来发展迅速的一类纤维增强复合材料<sup>[1-2]</sup>。以热塑性树脂为基体、以碳纤维为增强体而制成的复合材料,具有比强度高、比模量高、

密度小、抗疲劳性好等一系列的优异性能,已开始应用于航空、船舶和汽车等领域<sup>[3]</sup>。目前,因为模具尺寸、加工设备限制及使用需要,在结构中不可避免地需要将 CFRP 与常见的金属材料进行连接,如轻量化汽车 CFRP 车身覆盖件与金属结构的连接,轻量化远程导弹 CFRP 内腔与金属壳体的连接等<sup>[3]</sup>。随着现代工业对连接件之间的强度、精度、纯净度的要求越来越高,传统的胶结与机械连接已不能满足加工需要。激光焊接作为一种非接触、高效的焊接方式,与其它传统焊接技术相比,具有速度快、精度高、变形小、便于实现自动化等优势,在 CFRP 与金属材料的焊接上具有很大的潜力。

研究各工艺参量对焊接质量的影响,寻求最佳工

基金项目:宁波市自然科学基金资助项目(2015A610078);深圳市基础研究布局资助项目(JCYJ20150529162228734)

作者简介:王强(1990-),男,硕士研究生,主要研究方向为激光加工技术。

\* 通讯联系人。E-mail: jiaojunke@nimte.ac.cn

收稿日期:2015-10-07;收到修改稿日期:2015-11-11

艺参量仍是当前激光焊接研究的热点。国内外众多学术研究机构对热塑性塑料的激光焊接理论、焊接工艺等方面都进行了广泛的研究<sup>[4-9]</sup>,但对于 CFRP 这种复合材料的激光焊接研究相对较少。JUNG<sup>[10-11]</sup>等人从实验上证实了激光热传导焊进行 CFRP 与金属材料之间焊接的可行性,但该方法的焊接机理、焊接热效应、焊接参量对焊接质量的影响规律等没有进行深入系统的研究。大量的焊接实验可以确定各个参量对焊接质量的影响,但是实验设计过程复杂繁琐,需花费大量时间。采用有限元模拟的方法可以综合考虑焊接过程中各个参量,进而研究焊接工艺参量与焊接质量的关系。

作者针对 CFRP-不锈钢激光传导焊建立了一个 3 维热传导模型,利用计算得到的 CFRP-不锈钢的焊接温度场,分析了不同激光功率、焊接速率、光斑直径等工艺参量对焊接过程的影响,计算出多组工艺参量下的焊缝宽度和焊接深度,以及焊接过程中的热应力和残余应力的分布情况。

### 1 CFRP-不锈钢激光焊接数学模型的建立

利用激光热传导焊<sup>[12-13]</sup>进行 CFRP 与金属材料的焊接。如图 1 所示,CFRP 与不锈钢相互接触,将激光光束聚焦于待焊区域,上层不锈钢吸收激光能量向下层 CFRP 传递,使得在焊接区域的 CFRP 熔化,热熔融状态下 CFRP 的树脂分子在焊接压力作用下相互扩散,树脂与不锈钢之间形成范德华力<sup>[14]</sup>,最终在凝固过程中熔化的树脂与不锈钢形成焊接接头,即两个焊件被连接起来。

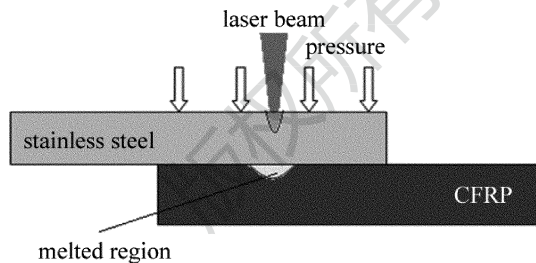


Fig. 1 Schematic diagram of laser joining between CFRP and stainless steel

作为一种常用的焊接方式,传导焊焊接温度场的时间空间分布符合 3 维热传导微分方程:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \kappa \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \kappa \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \kappa \frac{\partial T}{\partial z} \right) + A(x, y, z, t) \quad (1)$$

式中, $\rho$  为材料密度; $c$  为材料比热容; $T$  为温度; $t$  为时间变量; $\kappa$  为热导率; $A(x, y, z, t)$  为每单位时间、单位面积中内热源的生成热。

初始条件为:

$$T(x, y, z, 0) = T_0(x, y, z) \in D \quad (2)$$

边界条件为:

$$K_n \frac{\partial T}{\partial n} - q + h(T - T_0) + \varepsilon \delta (T^4 - T_0^4) = 0, ((x, y, z) \in S, t > 0) \quad (3)$$

式中, $D$  为模型范围, $S$  为模型边界, $K_n$  为边界  $S$  的法向传热系数, $n$  为法线方向, $h$  为表面传热系数, $\sigma$  为 Stefan-Boltzmann 常量, $\varepsilon$  为热辐射系数, $T_0$  为材料的初始温度, $q$  为材料表面边界  $S$  的法向热流密度。

### 2 CFRP-不锈钢激光焊接有限元模型

#### 2.1 热源模型与边界条件

焊接材料为 CFRP 和 304 不锈钢,其中 CFRP 是由中国科学院宁波材料所研发生产的,该材料是由连续纤维(T700)与树脂(polyphenylene sulfide, PPS)胶合后经过挤压和拉拔成型得到的。在显微镜下观察,CFRP 由 15 层碳纤维和树脂依次交替构成(8 层树脂,7 层碳纤维),如图 2a 所示,每层的厚度为 0.2mm。

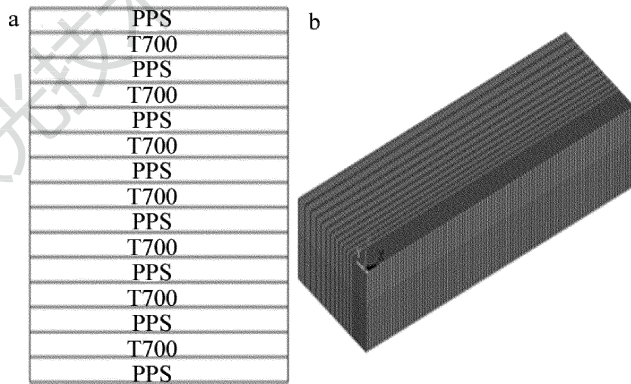


Fig. 2 a—cross sections of CFRP b—finite element model

焊接的接头形式为搭接焊,建立的模型中不锈钢尺寸为 30mm × 20mm × 2mm,CFRP 尺寸为 30mm × 20mm × 3mm。ANSYS 热分析过程中的计算量比较大,为了有效地减少计算时间,模拟过程中仅取模型的一半进行分析计算,图 2b 是建立的有限元模型。

ANSYS 分析的单元属性选为热分析单元 solid70,可以用于稳态热分析和瞬态热分析。由于不锈钢对 1064nm 波长激光的吸收深度小于 10μm,这里把激光热源视为面热源,所以焊接模拟选择高斯面热源模型,其分布规律可以表示为:

$$Q(r) = Q_{\max} \exp\left(-\frac{r^2}{R^2}\right) \quad (4)$$

式中, $Q(r)$  为  $r$  处的表面热流密度; $Q_{\max}$  为热源中心最大热流密度; $r$  为某点到热源中心的径向距离; $R$  为热源模型的有效作用半径。

#### 2.2 材料的热性能参量

304 不锈钢的材料热性能是温度的函数,在不锈

钢相变的过程中会有相变潜热,为了得到更为真实的情况,需要考虑不锈钢的相变,计算中用热焓代替比热,热焓  $H$  可表示为:  $H = \int \rho c(T) dT$  (5)

304 不锈钢热焓<sup>[15]</sup> 随温度的变化关系如图 3 所示。

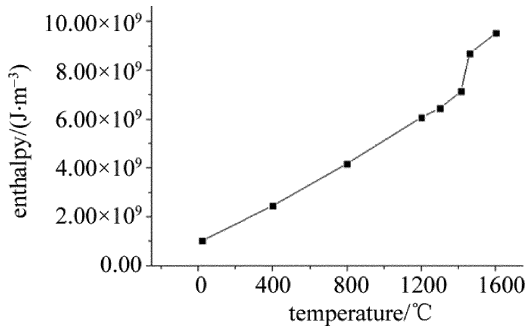


Fig. 3 Relationship between enthalpy of 304 stainless steel and temperature

热分析中材料的初始温度设为 20°C, 不锈钢的表面传热系数设为 20W/(m² · K), CFRP 的表面传热系数设为 10W/(m² · K), 辐射率设为 0.9。

由于所能查到的关于 CFRP 热物理性能参量非常少, 近似地认为在整个焊接温度区间内热物理参量不发生改变, CFRP 中 PPS 和 T700 的热物理参量见表 1。

Table 1 Thermal physical parameters of PPS and T700

	PPS	T700
specific heat capacity/(J · kg <sup>-1</sup> · K <sup>-1</sup> )	1544	712
thermal conductivity/(W · m <sup>-1</sup> · K <sup>-1</sup> )	0.278	6.5
density/(kg · m <sup>-3</sup> )	1350	1760
melting point/°C	280	3000
glass transition temperature/°C	170	—
decomposition temperature/°C	400	—

### 3 结果及讨论

#### 3.1 温度场的变化规律

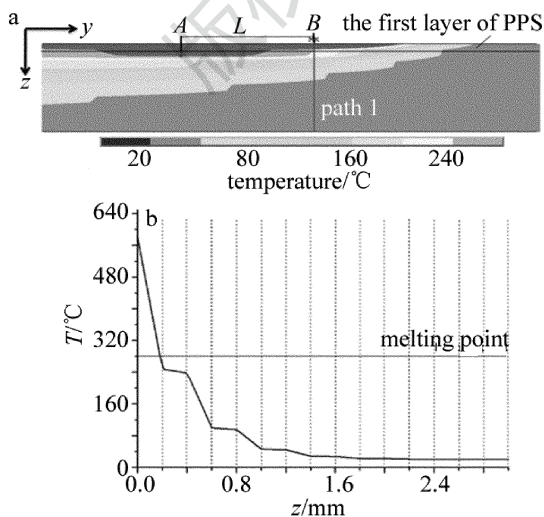


Fig. 4 a—temperature field of CFRP cross section b—temperature distribution of CFRP along depth

焊接实验参量为: 激光功率  $P = 175W$ , 焊接速率  $v = 6mm/s$ , 光斑直径  $d = 1.5mm$ 。在焊接过程中, 不锈钢吸收激光能量以热传导的形式向下层 CFRP 传递, 形成了一个沿深度方向分布的温度场(见图 4), path 1 为沿深度方向过此时刻温度最高点的路径。从图 4b 可以看出, 第 1 层树脂(0.0mm ~ 0.2mm)在焊缝区并未完全熔透, 对比图 4a 的温度云图, 第 1 层树脂已完全熔透; 另外, 树脂层上表面最高温度为 579°C (见 A

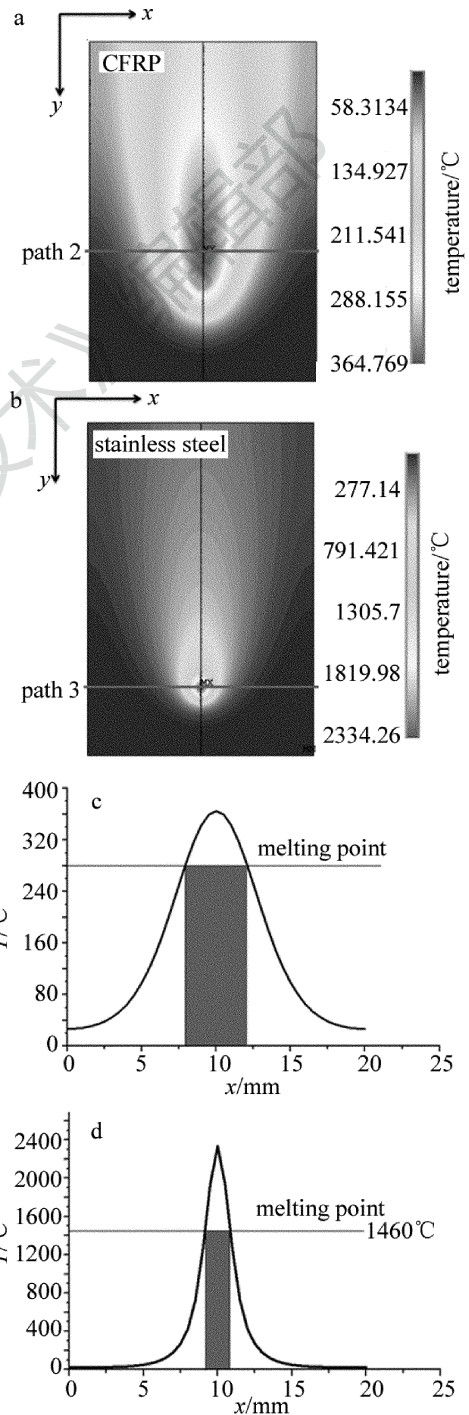


Fig. 5 a—temperature field of CFRP b—temperature field of stainless steel c—temperature distribution along path 2 d—temperature distribution along path 3

点)远高于下表面最高温度 295℃ (见 B 点),说明树脂层上下表面的温差很大,究其原因是树脂的导热率极低,沿树脂层深度方向的温度分布存在着严重的滞后,所以在树脂层上表面温度达到熔化温度时并不能保证整个树脂层的熔化。为了准确地表征所需的焊缝,本文中以树脂层下表面(0.2mm 处)完全熔透的宽度作为焊缝宽度。

在焊接过程中,熔池深度是影响焊接质量的一个重要因素。熔池深度太浅,树脂熔化过少,两部分分子间的融合减少,范德华力较小,焊接强度不够;熔池深度太深,过度熔化的区域不仅会影响塑料焊件的物理性质,而且会影响焊接的美观。在 CFRP-不锈钢的焊接中,CFRP 中树脂层之间的碳纤维层不易熔化,因此树脂层之间难以熔融在一起形成焊缝。焊接中有效的树脂熔化深度仅为第 1 层树脂,即熔化深度为 0.2mm。图 5a 和图 5b 所示为得到的焊缝温度场云图。对不锈钢的熔化深度,在保证 CFRP 熔池深度的条件下,其熔化深度是越小越好,图 5d 中不锈钢的熔化深度为 0.23mm。

焊缝宽度是衡量焊接质量的一个关键指标,直接影响到焊接强度。在图 5 所示温度云图中,路径 path 2 和 path 3 分别经过此时刻的温度最高点。从图 5c 中可以看出,焊缝处的树脂最高温度达到 364℃,高于熔化温度,沿 path 2 温度高于该值的宽度为焊缝宽度,该情况下为 1.8mm。同样在图 5d 中不锈钢的最高温度达到 2334℃,高于不锈钢熔点,其焊缝宽度为 1.37mm。

图 6 中给出了焊缝中心线上不同点温度随时间的变化曲线。在进入准稳态后,各点温度随时间变化的趋势大致如下:激光来临之前,各点保持常温状态;激光到来后,由不锈钢传递到 CFRP 的能量使得该点的温度急剧上升,达到最高值 295.28℃;激光离开后,该点处能量慢慢向低温处传递,温度慢慢降低,最后恢复至常温。

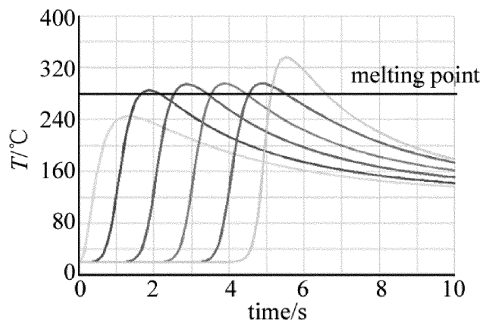


Fig. 6 Relationship between temperature at different points of center line of weld seam and time

可以发现,在焊接区的开始位置点,其温度一直都

小于树脂的熔化温度,而一段距离后(约 4.8mm)的最高温度则达到熔点温度,可以实现焊接。所以为了保证焊接的可靠性,避免出现焊接刚开始部分的未熔透现象,可以对不锈钢进行预热,设定激光先沿焊接方向加热 5mm 长的不锈钢,再进入待焊区域。

### 3.2 激光功率

在相同焊接速率和光斑直径的条件下,激光功率决定了各点功率密度的大小,直接影响焊缝宽度和焊接深度。在焊接速率 6mm/s、光斑直径 1.5mm 的情况下,图 7a 和图 7b 中分别给出了不同激光功率下的焊缝宽度和焊接深度。可以看出,随着激光功率的增加,焊缝区域的最高温度逐渐增加。当功率低于 125W 时,树脂最高温度低于熔化温度(见图 7a),第 1 层树脂未熔透。当激光功率为 175W,225W,275W 时,树脂最高温度高于熔化温度,表明第 1 层树脂已完全熔透,得到的焊缝宽度分别为 1.8mm,4.18mm 和 5.45mm,熔化深度分别为 0.2mm,0.416mm,0.469mm,但由于碳纤维层的阻隔,所以实际焊接深度均为 0.2mm。由以上的结果可以看出,在相同的焊接速率和光斑直径下,功率越高,得到的焊缝越宽,焊接深度越深,焊接的连接强度越大。

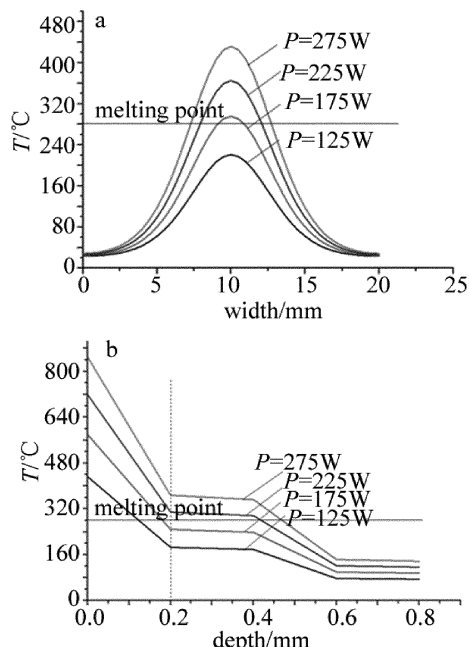


Fig. 7 a—weld width at different laser powers b—throat depth at different laser powers

### 3.3 焊接速率

在相同激光功率和光斑直径的条件下,焊接速率决定了材料表面受激光辐射作用时间的长短。速率大时激光辐射作用时间短,材料所吸收的能量就较少;速率小时激光辐射作用时间长,材料所吸收的能量就较多,这就会影响焊缝宽度和焊接深度。在激光功率

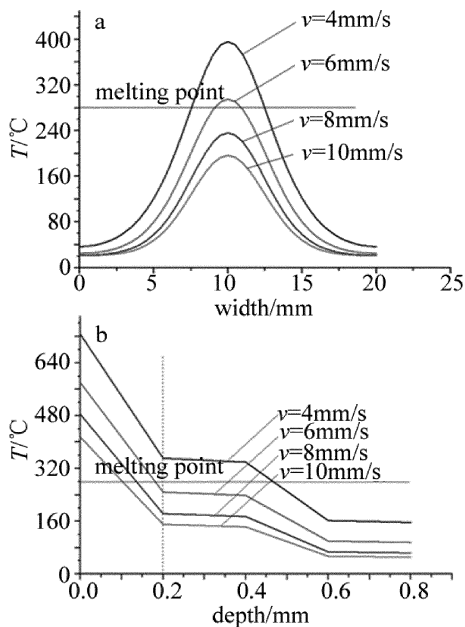


Fig. 8 a—weld width at different scanning speeds b—weld depth at different scanning speeds

175W、光斑直径 1.5mm 情况下,得到的不同焊接速率下焊缝宽度和焊接深度如图 8a 和图 8b 所示。可以看出,焊缝的最高温度随速率的增大而减小。当焊接速率大于 8mm/s 时,树脂最高温度低于其熔化温度,树脂层未熔透。当速率为 4mm/s 和 6mm/s 时,树脂最高温度高于熔化温度,得到的焊缝宽度分别为 4.95mm 和 1.8mm,树脂熔化深度则分别为 0.468mm 和 0.2mm,同样实际焊接深度为 0.2mm。因此,在相同的焊接速率和光斑直径下,速度越小,得到的焊缝越宽,焊接深度越深,焊接连接强度就越大。

3.4 光斑直径

光斑直径同样对焊缝宽度和焊接深度有着直接的影响。在其它参量保持不变的情况下,增大光斑直径就减小了激光功率密度,材料在单位时间单位面积内吸收的能量就会减少,焊缝的最高温度也会降低,从而影响焊缝的连接强度。在激光功率 175W、焊接速率 6mm/s 的情况下,图 9 中分别给出了不同光斑直径下的焊缝宽度和焊接深度。可以看出,最高温度随着光斑直径的增大而减小。当光斑直径大于 3.5mm 时,树脂最高温度低于其熔化温度,第 1 层树脂未熔透;当光斑直径减小为 2.5mm, 1.5mm 和 0.5mm 时,树脂最高温度高于熔化温度,得到的焊缝宽度分别为 0.58mm, 1.8mm 和 2.04mm,实际焊接深度均达到 0.2mm。因此,在相同的激光功率和焊接速率条件下,得到的焊缝宽度和焊接深度随光斑直径的减小而增加。

3.5 热应力的变化规律

理论上,在焊接过程中,焊接区材料在短时间内被急剧加热膨胀,受到周围较冷区域的约束而产生弹性

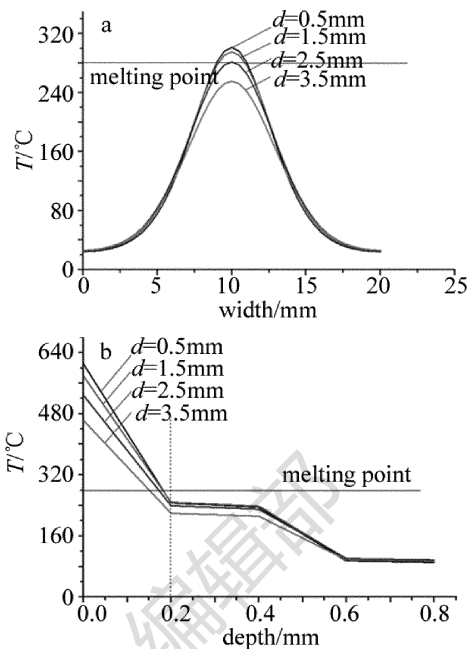


Fig. 9 a—weld width at different laser spot diameters b—weld depth at different laser spot diameters

范围内的热应力。随温度上升,材料内部压缩变形不断增加,热应力也不断增加,超过部分区域的屈服极限;最终,在焊接区域形成塑性热压缩;冷却后,压缩变形区域比周围区域相对缩短。因此,焊缝区域呈现拉应力,周围区域呈现压应力。焊接过程中的压应力一般不会对接头效果产生较大的影响,但拉应力的存在可能导致焊缝产生裂纹。

在激光功率 125W、焊接速率 6mm/s、光斑直径 1.5mm 的情况下,得到的焊缝中心线上 C 点(见图 10a)的纵向热应力分布,如图 10b 所示。焊接过程中 C 点的最大压应力达 103MPa,大于树脂的屈服极限,使得焊缝处树脂发生压塑性变形。焊接中适量的压力可以增加搭接焊件的连接强度,但考虑熔融的树脂具有一定的流动性以及树脂层的厚度仅为 0.2mm,所以

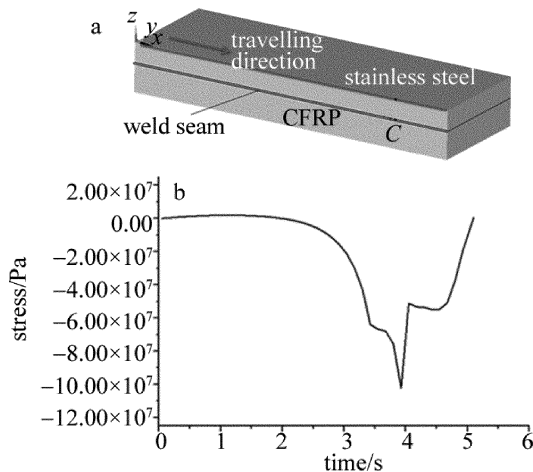


Fig. 10 a—finite element model b—relationship between longitudinal thermal stress at point C and time

在后续的实验过程中,需控制搭接焊夹具的夹紧力大小,否则会出现大量树脂熔化后在压力的作用下被挤压分布不均或者挤压出搭接界面,从而影响焊件连接强度。

焊接完成冷却后,根据残余应力产生的理论<sup>[16]</sup>,凝固后的焊缝区会形成拉应力,远离焊缝后逐渐过渡到压应力。图 11a 为焊缝上 C 点纵向残余应力随时间变化图,可以看出最终焊缝区的纵向残余拉应力小于材料的屈服应力。图 11b 为焊接纵向残余应力在横截面的分布图,焊缝及其附近区域(约 0mm ~ 2mm)的纵向残余应力是拉应力,离开焊缝区后拉应力急剧下降,以致出现了压应力(约 2.6mm 处),工件端部的纵向残余应力小于焊缝区域并接近于 0。另外,由模拟的结果可知,最大残余应力不在焊缝中心位置,而是在距离焊缝中心 0.8mm 处。可以看出模拟的残余应力变化规律和焊接残余应力理论是一致的。

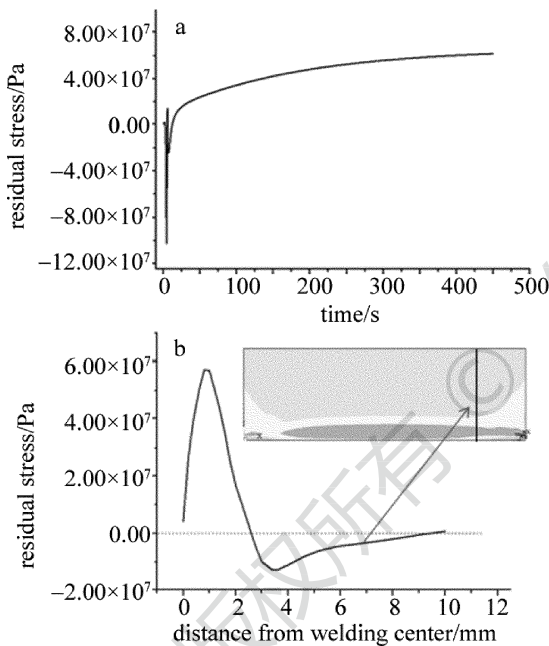


Fig. 11 a—relationship between longitudinal residual stress at point C and time b—relationship between longitudinal residual stress and distance from welding center

#### 4 模拟结果与实验结果的对比

实验中所用光纤激光焊接系统完全自主搭建,集成了 500W 掺镱光纤激光器(波长 1064nm,最大功率 500W)、1410R ABB 机器人、水冷系统、保护气系统

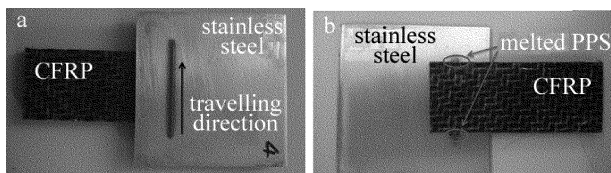


Fig. 12 Appearances of metal-plastic hybrid joint samples

和激光加工头等,自行设计了气动工装。焊接后的样品如图 12 所示。选取 6 组工艺参量,比较了焊缝宽度的测量值(实验)和计算值(模拟),工艺参量见表 2。比较结果如图 13 所示。

Table 2 Process parameters of the measured weld width

sequence number	laser power/W	scanning speed/(mm · s <sup>-1</sup> )	laser diameter/mm	melt width/mm
1	175	6	1.5	1.95
2	225	6	1.5	4.58
3	175	4	1.5	5.22
4	175	8	1.5	0
5	175	6	0.5	2.54
6	175	6	2.5	0.68

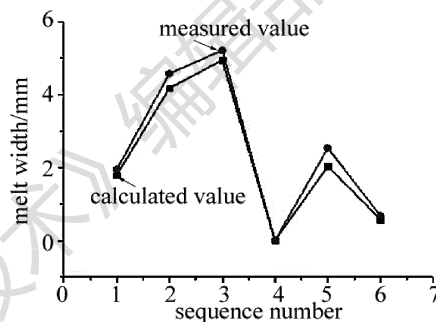


Fig. 13 Comparison of the measured width and the calculated width

可以看出,实验结果都略高于模拟结果,最主要的原因是模拟中没有考虑夹具压力作用下熔池的流动,导致 CFRP 中树脂熔化宽度的模拟计算值比实验测量值小些。但总体来讲,模拟结果与实验结果比较吻合,说明该有限元模型可以模拟实验中温度场的分布,也验证了该有限元模型的可靠性。

#### 5 结论

对 CFRP 与不锈钢焊接过程中的传热过程进行了分析,发现焊缝的最高温度滞后光斑中心一段距离。在进入准稳态后,焊缝中心线上各点的温度变化大致相同,但是在达到稳定状态之前需要一定的过渡时间,所以预加热不锈钢一段距离后再进入待焊区,可以保证树脂熔透。激光功率、焊接速率和光斑直径都是影响焊接质量的重要因素,随着激光功率增大,不锈钢向下传递的能量增大,焊缝宽度增大;随着焊接速率的增加,不锈钢在单位时间向下传递的能量减小,焊缝宽度减小;随着光斑直径增大,不锈钢在单位面积向下传递的能量减小,焊缝宽度也随之减小。分析了焊接过程中纵向热应力对焊缝的影响,计算得到在焊缝周围区域的残余应力大于焊缝中心的残余应力,模拟的焊接残余应力的变化过程与焊接残余应力理论相吻合。最后比较了实验结果与模拟结果,两者的趋势基本一致,

也验证了该有限元模型的正确性和可行性。

#### 参 考 文 献

- [1] YIN X Y, ZHU B, LIU H Zh, *et al.* Advance of the research in carbon fiber reinforced thermoplastic resin matrix composite[J]. Hi-Tech Fiber & Application, 2011, 12(6):42-44(in Chinese).
- [2] TAN X H, SHAN J G, REN J L. Effects of Cr planting layer on shear strength and interface bonding characteristics of mild steel/CFRP joint by laser heating[J]. Acta Metallurgica, 2013, 49(6):751-756 (in Chinese).
- [3] WANG X G, YU Y, LI Sh M, *et al.* The research on fiber reinforced thermoplastic composite[J]. Fiber Composites, 2011, 6(2): 44-47 (in Chinese).
- [4] XING A. Laser transmission welding of thermoplastic polyurethane films[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2009:42-57 (in Chinese).
- [5] WU Y W, LIU H X, LI P, *et al.* Experimental study of laser transmission welding between polycarbonate and polyphenylene oxide [J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42(5):1801-1807 (in Chinese).
- [6] GONG F, HU X Y, TAN Y, *et al.* Semiconductor laser transmission welding of thermoplastic polypropylene [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2013, 34(4): 109-112(in Chinese).
- [7] JIAO J K, JIANG H R, ZHANG W W. Study on thremal plastics laser transimisson welding[J]. Electromachining & Mould, 2013(6): 55-58(in Chinese).
- [8] JIAO J K, BAI X B, WANG X B. Finite element analysis of PMMA laser transmission welding[J]. Laser Technology, 2011, 35(4):453-456 (in Chinese).
- [9] CHEN Y J, GUO Zh N, LIAN H Sh. Finite element simulation and experimental study about laser micro-joining between biopolymer and metal [J]. Laser Technology, 2013, 37(6): 760-765 (in Chinese).
- [10] JUNG K W, KAWAHITO Y, TAKAHASHI M, *et al.* Laser direct joining of carbon fiber reinforced plastic to zinc-coated steel [J]. Materials and Design, 2013, 47(9):179-188.
- [11] JUNG K W, KAWAHITO Y, KATAYAMA S. Laser direct joining of carbon fibre reinforced plastic to stainless steel [J]. Science Technology of Weld Joint, 2011, 16(8):676-680.
- [12] LIU X X, HUANG R, YAO G. Numerical simulation of the temperature field of laser butt welding of titanium alloy sheet [J]. Laser Technology, 2013, 37(5):700-704 (in Chinese).
- [13] LIU H X, XING A, ZHANG H Zh, *et al.* Temperature field simulation on laser transmission welding of polyvinylchloride [J]. Chinese Journal of Lasers, 2008, 35(11):1801-1807 (in Chinese).
- [14] WANG X, LI P, LIU H X, *et al.* Temperature field simulation on laser transmission joining of PET films and titanium [J]. Chinese Journal of Lasers, 2010, 37(5):1391-1397 (in Chinese).
- [15] DENG D, MURAKAWA H. Numerical simulation of temperature field and residual stress in multi-pass welds in stainless steel pipe and comparison with experimental measurements [J]. Computational Materials Science, 2006, 37(3):269-277.
- [16] WU Q, XU L Y, YANG Y Q, *et al.* Study on laser welding residual stress of high strength steel [J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42(6):0603007 (in Chinese).