

常压/真空环境激光焊接焊缝成形特性及残余应力与变形对比

张国滨，姜梦，陈曦，陈奥，雷正龙，陈彦宾

(哈尔滨工业大学, 先进焊接与连接国家重点实验室, 哈尔滨, 150001)

摘要: 在高功率激光焊接中, 采用增大激光功率的方法以获得更大熔深时, 面临焊接过程稳定性差、焊接缺陷频发等问题, 目前国内外普遍认为真空激光焊接是解决以上问题的有效手段。文中采用工艺试验和数值模拟的方法, 研究了常压和真空环境下中厚度全熔透激光焊接在焊缝成形及残余应力与变形分布的差异。结果表明, 降低环境压力可显著增加激光焊接熔透深度, 真空环境可以将常压环境 10 mm 全熔透激光焊接所需激光功率从 10 kW 降低到 6 kW, 并获得更好的焊接质量。常压环境和真空环境下, 全熔透激光焊接工件展现出类似的横向残余应力、纵向残余应力和变形分布规律, 但由于真空环境下热输入较低, 焊缝深宽比大, 焊后残余应力的峰值和变形程度均显著小于常压环境。

创新点: (1) 试验对比分析了中厚板常压/真空激光全熔透焊接焊缝成形。
(2) 利用有限元模拟方法对比研究了中厚板常压/真空激光焊接残余应力与变形差异。

关键词: 激光焊接; 真空环境; 焊接工艺; 数值模拟; 残余应力; 变形

中图分类号: TG 456.7 文献标识码: A doi: 10.12073/j.hjxb.20220503002

0 序言

激光和电子束作为高能束焊接热源, 在中厚板焊接方面具有显著优势。激光由于适合柔性加工、加工效率高等特点在近年来备受关注, 但是一般情况下, 激光焊接无论在熔透深度还是在焊接质量方面较电子束焊接均存在差距^[1]。随着大功率激光器的快速发展, 目前可供激光焊接使用的万瓦级固体激光器已经出现超过 10 年, 而且近几年十万瓦级别的激光器已经在售^[2]。但大功率激光焊接普遍存在焊接过程不稳定、焊接缺陷频发等问题, 目前中厚板焊接仍多采用多层多道焊接^[3-5], 大功率激光全熔透焊接在中厚板焊接方面应用不多。因此, 如何实现中厚板单道高质量全熔透焊接是高功率激光焊接推广应用的一个主要难题。

为改善高功率激光焊接的焊接质量, 国内外学

者研究了许多解决方法, 例如附加辅助磁场^[6-8]、摆动光束焊接^[9-11]、优化保护气体^[12]、采用横焊^[13]、采用激光-电弧复合热源^[14]等, 但以上方法的改善效果均十分有限。目前国内外学者普遍认为真空激光焊接是解决高功率激光焊接应用瓶颈的有效手段。真空激光焊接的概念最早由日本大阪大学接合科学研究所 (JWRI) Arata 教授提出, 距今已经有超过 30 多年的历史^[15]。当时, 此新概念的提出是为了抑制高功率 CO₂ 激光焊接严重的等离子体。当时的研究发现: 真空环境不仅可以抑制等离子体, 还可以显著增加熔深。但由于 20 世纪 90 年代激光焊接技术刚处于起步阶段, 在很长一段时间内, 真空激光焊接技术没有引起广泛关注。2001 年大阪大学接合科学研究所的 Katayama 等人^[16] 研究了真空环境对于激光焊接缺陷的改善效果。2010 年以后, 随着大功率固体激光器的出现, 真空激光焊接受到了越来越多的关注。德国亚琛工业大学的学者 Reisgen 等人^[17] 对比了相同热输入下电子束和真空激光焊接的熔深。德国布伦瑞克工业大学的学者 Börner 等人^[18] 研究了环境压力对焊接飞溅的影响。

收稿日期: 2022-05-03

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (52105328); 黑龙江省“百千万”工程科技重大专项 (2020ZX03A01); 中国博士后基金面上项目 (2021M700990); 黑龙江省博士后基金项目 (LBH-Z20143)。

规律。国内学者研究了环境压力对焊缝成形、羽辉行为、匙孔行为和熔池行为的影响规律^[19-20]。

目前在真空激光焊接技术领域,国内外虽然开展了一些研究,但仍主要集中在平板堆焊条件下环境压力对焊缝成形和焊接热物理过程变化的影响规律,鲜有关于采用真空激光焊接技术进行中厚板全熔透焊接的研究,更缺乏对常压和真空环境激光焊接残余应力和变形的对比研究。文中采用工艺试验和有限元数值模拟相结合的方法,对比研究了常压和真空环境下中厚板全熔透激光焊接焊缝成形、残余应力和变形的差异,以展现真空激光焊接在中厚板全熔透焊接上的优势。

1 试验方法

1.1 工艺方案

为开展真空激光焊接试验研究,在常规大功率激光焊接系统基础上,自行设计并制造了小型真空

舱室,形成真空激光焊接系统。采用的激光器为IPG YLS-10000,其最大输出功率10 000 W,波长为1070 nm。采用的激光头聚焦距离460 mm,理论光斑直径为0.46 mm。真空室上方设置了激光耦合窗口,激光通过耦合窗口进入真空室,同时真空室内安装了一维数控运动平台,依靠平台移动完成焊接过程。真空室配备机械泵和罗茨泵两级泵组,可以快速实现0.1~101 kPa(常压环境压力)范围内任意设置环境压力。

使用的材料为在中厚板结构应用广泛的Q690高强钢,其化学成分如表1所示。试验采用的两个焊接试板尺寸均为150 mm×200 mm×10 mm,形成300 mm×200 mm×10 mm的焊接工件。焊前采用机械打磨的方式对材料表面进行了清理。首先在平板对接条件下进行了工艺试验,获得环境压力对焊缝熔深的影响规律,然后针对10 mm厚Q690高强钢分别在常压和真空环境下进行了对接全熔透工艺试验。

表1 Q690高强钢材料化学成分(质量分数, %)
Table 1 Chemical composition of Q690 high-strength steel

C	Mn	Si	S	P	Ni	Cr	Mo	Ti	V	Nb	Fe
≤0.18	1.0~1.6	≤0.55	<0.025	<0.025	1.5	1.2	0.6	0.2	0.1	0.06	余量

1.2 数值模型

1.2.1 有限元模型及网格划分

为对比研究常压和真空环境下全熔透激光焊接的残余应力与变形,通过有限元软件建立了对接试样1:1模型,由于两个试板尺寸均为150 mm×200 mm×10 mm,因此模型整体尺寸为300 mm×200 mm×10 mm。网格划分采用C3D8T温度-位移耦合六面体单元,焊缝位置处划分为加密网格,向外过渡到母材部分划分为稀疏网格,以降低计算成本。建立模型的网格划分情况如图1所示,共257 000个网格单元。

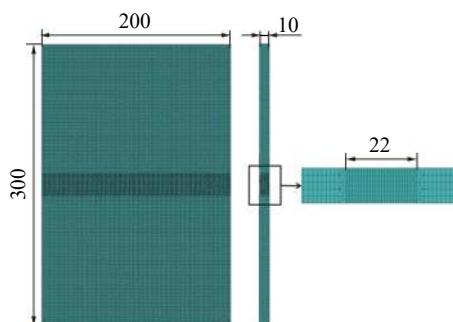


图1 有限元模型网格划分(mm)
Fig. 1 Meshing of the finite element model

1.2.2 材料属性与边界条件

不同环境压力下,焊件换热方式有所区别:常压环境下,设置为对流换热与辐射换热,对流换热系数设置为12 W/(m²·°C),材料表面辐射率设置为0.35,环境温度为20 °C;真空环境下对流换热可以被忽略,因此换热方式仅有辐射换热,辐射率设置为0.35,环境温度为20 °C。两种环境压力下对流换热、辐射换热符合公式^[21]

$$-k(\nabla T \cdot n) = P - h(T - T_0) - \varepsilon\sigma(T^4 - T_0^4) \quad (1)$$

式中:P为激光总功率;h为对流换热系数;n为工件外表面法向量;T,T₀分别为工件表面和周围环境温度;ε为材料的辐射率;σ为Stefan-Boltzmann常数,恒等于5.67×10⁻⁸ W/(m²·K⁴)。

工件夹持方式为四角夹持固定,并在冷却10 000 s后释放。模拟计算过程中采用的Q690高强钢热物性参数参考文献[22-23]。

1.2.3 热源模型

常压环境下,激光作用于材料表面产生强烈光致等离子体,对材料吸收激光能量的程度造成影

响,因此,采用 Gauss 面热源模拟匙孔表面等离子体,钉子形体热源模拟激光热源。采用的面热源能量密度表达式为

$$J_1 = q_m \exp\left(-\frac{ar^2}{r_s^2}\right) \quad (2)$$

$$q_m = \frac{aQ_s}{\pi r_s^2} \quad (3)$$

式中: q_m 是面热源的最大热流密度; a 为材料对能量的吸收率; Q_s 为面热源功率; r 为面热源任意一点到热源中心的距离; r_s 为面热源的作用半径。钉子形体热源的任一水平截面上的能量密度表示为

$$J_2 = q'_m \exp\left(-\frac{3r'}{r_v^2}\right) \quad (4)$$

$$q'_m = \frac{6Q_v[H - b(z_0 - z)]}{\pi r_v^2 H^2 (2 - b)} \quad (5)$$

式中: q'_m 为钉子形体热源的最大热流密度; b 为体热源衰减系数; Q_v 为体热源功率; H 为体热源作用深度; z_0 为厚度方向初始坐标; z 为厚度方向坐标; r_v 为钉子形体热源有效作用半径; r' 为钉子形体热源任意一点到热源中心线的距离。

真空环境下,由于等离子体被有效抑制,等离子体对激光能量吸收的干扰可以忽略不计,故采用锥形体热源模拟真空环境激光热源。锥形体热源的任一水平截面上的能量密度表示为

$$J_3 = q''_m \exp\left(-\frac{2r''^2}{r_b^2}\right) \exp\left(-\frac{|z - 0.01|}{a'}\right) \quad (6)$$

$$q''_m = \frac{0.6Q}{\pi ar^2} \quad (7)$$

式中: q''_m 为锥形体热源的最大热流密度; a' 为激光穿透深度; Q 为激光功率; r'' 为锥形体热源任意一点到热源中心线的距离; r_b 为锥形体热源有效作用半径。

2 结果与讨论

2.1 常压/真空中厚板激光焊接焊缝成形特性

目前国内外普遍认为降低环境压力可以显著提高激光焊接的熔深^[16-17, 24]。为验证这一现象,文中在激光功率为 8 kW, 焊接速度为 1 m/min 的条件下,研究了环境压力变化对激光焊接熔深和表面成形的影响规律。如图 2 所示,随着环境压力的降低,焊缝横截面的熔深显著增加,熔宽显著降低,深宽

比明显增大,在真空下获得的焊接接头展现出了与电子束焊接极其类似的形状。熔深的增加与环境压力降低后沸点降低、羽辉行为抑制和反冲压力变化等因素相关。在常压环境下,激光焊接的熔深为 7.16 mm,而 1 和 0.1 kPa 下的熔深为 16 mm 左右。相同热输入的条件下,环境压力为 1 kPa 时可以得到常压环境下 2 倍以上的熔深,并且从环境压力对熔深的影响规律可以看出:存在 1 kPa 这一临界环境压力,当环境压力低于这一临界环境压力,熔深几乎不再增加。因此之后的真空环境下激光焊接试验与数值模拟在 0.1 ~ 1 kPa 范围内的环境压力下进行。

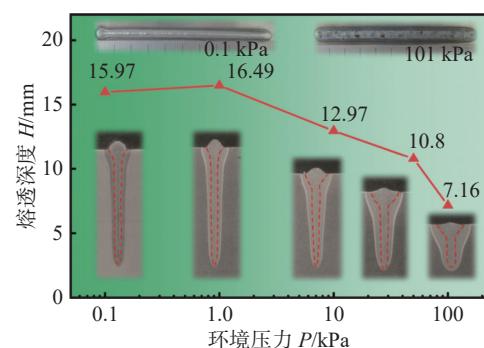


图 2 环境压力对焊缝横截面及熔深的影响规律
Fig. 2 Effect of ambient pressure on weld cross section and penetration depth under different atmospheric pressures

中厚板大功率激光全熔透焊接存在焊接缺陷频发、工艺区间窄等问题^[25],而真空激光焊接可以显著改善这一系列问题。为凸显真空激光焊接在中厚板全熔透焊接的优势,文中分别在常压和 0.1 kPa 真空环境下开展了 10 mm 厚 Q690 高强钢全熔透焊接的对比试验。经工艺优化发现,常压环境下,只有在激光功率为 10 kW、焊接速度为 1.5 m/min 的一个很窄的工艺区间内时,才可以获得背部无焊瘤的焊接接头,如图 3 所示,焊缝正面仍存在些许下塌。在同样的焊接速度下,真空环境下获得的焊缝横截面如图 3 所示。由于真空环境对焊缝熔深的增加效果,因此只需 6 kW 的激光功率即可获得一个焊接质量较好的全熔透接头。通过对不同环境压力下全熔透激光焊接的研究,可以证实:低真空环境下可以显著改善全熔透接头的成形质量,并明显降低热输入。

2.2 常压/真空中厚板激光焊接残余应力与变形

2.2.1 模型验证与温度场分布

为校验有限元模型的准确性,分别对常压和真空

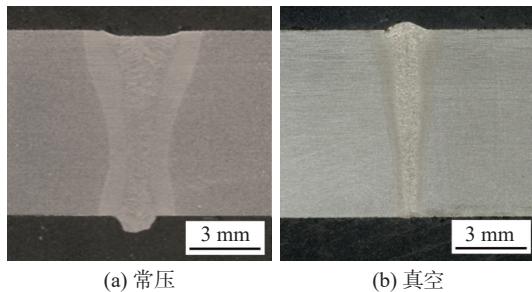


图3 常压和真空下10 mm高强钢全熔透焊缝横截面对比

Fig. 3 Comparison of the cross section of full-penetration high-strength steel welds obtained at different ambient pressures. (a) atmospheric pressure; (b) vacuum

环境下试验和数值模拟获得的焊缝横截面进行对比(图4). 图4a, 4b中不同颜色对应图例中不同温度, 灰色标记的区域为温度大于液相线温度(1520°C)的区域, 即为焊缝横截面. 数值模拟获得的常压和真空环境下焊缝上熔宽分别为4.00, 2.44 mm, 而试验获得的实际结果为4.10, 2.69 mm. 对比试验和模拟获得的焊缝横截面可以发现, 数值模拟所获得的结果无论是焊缝形状还是焊缝尺寸均与试验结

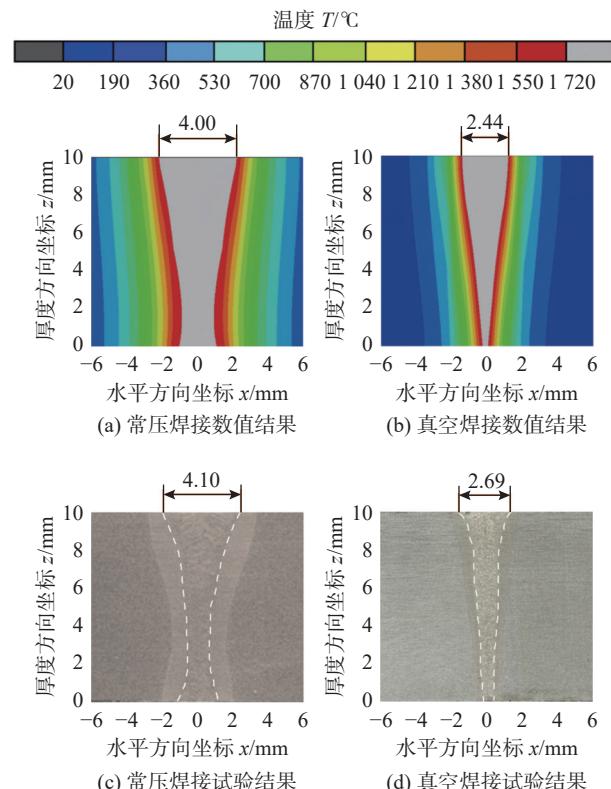


图4 数值计算与试验获得的焊缝截面对比

Fig. 4 Comparison of the numerically calculated and experimentally observed weld cross section. (a) numerical result at atmospheric pressure; (b) numerical result at vacuum; (c) experimental result at atmospheric pressure; (d) experimental result at vacuum

果具有良好的对应, 这证实了文中采用数值模型的准确性.

图5为数值模拟获得的常压和真空下熔池上表面温度场分布情况. 由图5a可以看出, 常压环境下激光焊接熔池略呈现典型的“前端宽, 后端窄”的“彗星拖尾形状”^[26], 而真空环境下激光焊接熔池则呈现均匀椭圆状. 在熔池长度上, 相比于常压环境的9 mm, 低真空环境的6 mm减小了约33%. 由于焊接参数和环境氛围的综合作用, 低真空下的熔池长度更短, 宽度更窄.

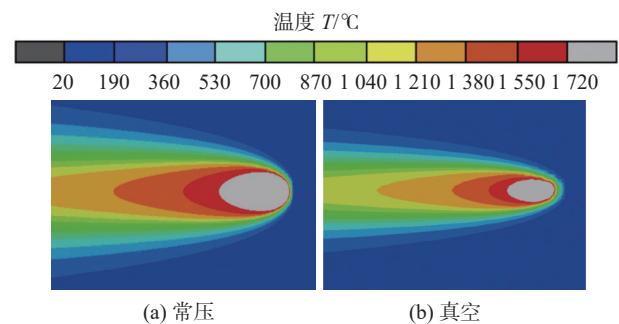


图5 数值模拟的温度场分布

Fig. 5 Numerically calculated temperature fields. (a) atmospheric pressure; (b) vacuum

2.2.2 纵向残余应力

图6给出了常压和真空下数值模拟的工件上表面纵向残余应力分布云图. 由图可知, 两种环境压力下得到的纵向残余应力分布规律基本一致, 均呈现“接头拉、母材压”的分布, 但是在分布水平上存在差异. 在激光焊接过程中, 高能量密度激光束使得金属材料熔化, 熔池后端金属凝固结晶后, 金属冷却收缩, 受到沿焊接方向结构的拉伸应力, 随着冷却时间增加, 拉伸应力值不断变大, 最终形成一定水平的残余拉应力, 同时焊接接头外的母材区域均呈现残余压应力分布, 使得工件整体应力分布均匀. 常压环境下工件上表面纵向残余拉应力峰值

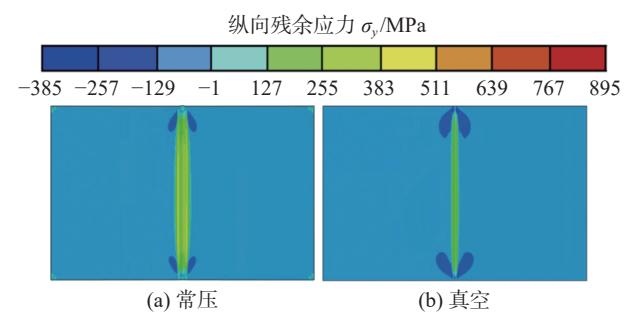


图6 试件上表面纵向残余应力分布

Fig. 6 Longitudinal residual stress distribution on the top surface of the samples. (a) atmospheric pressure; (b) vacuum

约为 500 MPa, 真空环境下约为 250 MPa; 常压环境下残余拉应力分布区域宽度最大值约为 17 mm, 真空环境约为 9 mm. 相比于常压环境, 真空环境下得到的工件在焊接接头处残余拉应力水平显著降低, 分布区域显著变窄.

为了观察试样内部残余拉应力分布情况, 提取了焊缝方向距试验起点 100 mm 处横截面的纵向残余应力分布. 图 7 即为该横截面上常压和真空环境下激光焊接接头区域纵向残余应力分布对比云图模拟结果. 由图可知, 无论是常压还是真空环境, 纵向残余应力峰值均存在于焊接接头内部, 但是常压环境下纵向残余应力峰值位于熔合线附近, 而低真空环境下位于焊缝内部中心处. 对于纵向残余应力, 两种环境压力下在横截面上均呈相对焊缝中心的对称分布. 常压环境下的应力水平明显高于真空环境, 同时在焊缝区域, 常压环境下纵向残余应力峰值约为 800 MPa, 而真空环境下纵向残余应力峰值约为 700 MPa; 相比于试样上表面的应力分布, 横截面分布云图更直观精确地体现了二者在纵向残余拉应力分布区域宽度上的差异: 在焊接接头最上侧, 相比于常压环境, 真空环境下纵向残余拉应力分布宽度最大减小约 74%; 在焊接接头最下侧, 相比于常压环境, 低真空环境下纵向残余拉应力分布宽度最大减小约 77%, 上下侧减小幅度近似.

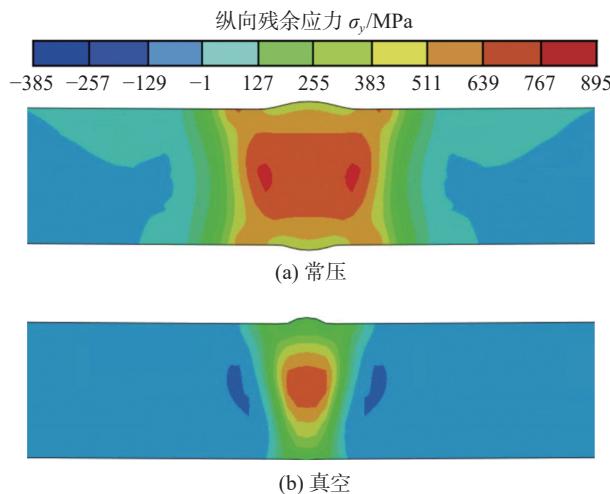


图 7 焊缝横截面纵向残余应力分布

Fig. 7 Longitudinal residual stress distribution on the weld cross section. (a) atmospheric pressure; (b) vacuum

为更加直观呈现常压和真空环境下工件外表面上纵向残余应力分布情况, 对图 7 所示横截面上表面不同位置纵向应力分布数值进行了提取, 沿垂直于焊缝方向提取绘图路径, 结果如图 8. 图中红色

点线代表真空环境, 蓝色点线代表常压环境. 由图可知, 常压环境下, 距离焊缝中心线 $-6 \sim 6$ mm 区间, 是峰值纵向残余拉应力分布区间, 最大值可达 573 MPa, 同时向外延伸, 距离焊接接头很远的母材处残余压应力水平约为 40 MPa; 真空环境下, 距离焊缝中心线 ± 2 mm 区间, 是峰值纵向残余拉应力分布区间, 最大值达到 371 MPa, 向外延伸, 距离焊接接头很远的母材处, 呈现约 20 MPa 的残余压应力.

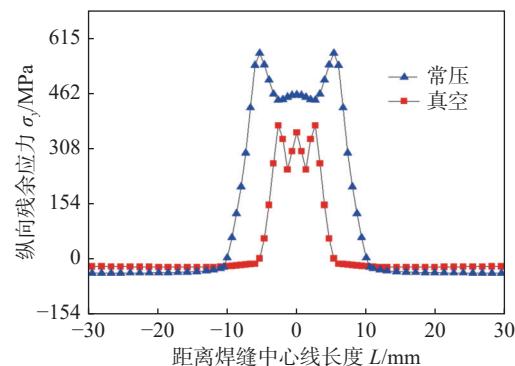


图 8 距离焊缝中心不同位置的纵向残余应力

Fig. 8 Variation of longitudinal residual stress at different positions from the center of the weld

综上所述, 数值模拟结果显示真空环境下工件的纵向残余拉应力、压应力分布水平及峰值均低于常压环境, 且拉应力作用范围更窄.

2.2.3 横向残余应力

图 9 给出了常压和真空环境下激光全熔透焊接工件上表面横向残余应力分布结果. 由图可知, 与纵向残余应力分布相似, 两种环境下的横向残余应力分布规律基本一致, 均呈现“接头压, 母材拉”的规律, 但在应力水平上也存在差异. 焊接接头区域呈现残余压应力分布, 在焊缝处达到最大值, 从焊接接头向外, 在邻近区域呈现沿焊缝长度方向分布的残余拉应力; 常压下拉应力水平显著高于真

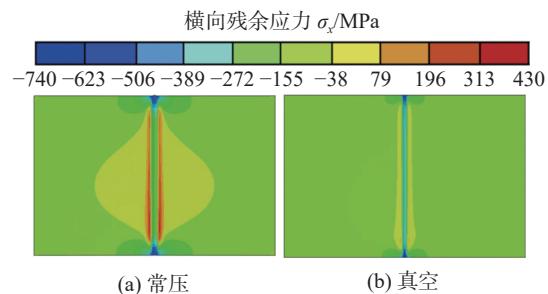


图 9 试件上表面横向残余应力分布

Fig. 9 Transverse residual stress distribution on the top surface of the samples. (a) atmospheric pressure; (b) vacuum

空,前者峰值约为400 MPa,而后者仅约为100 MPa,相比于常压,真空下横向残余拉应力峰值降低了约75%;在焊缝中心处,常压下横向残余压应力峰值约为250 MPa,而真空下可达到约500 MPa.

依照纵向残余应力在焊接接头内部出现峰值的规律,图10给出了与图7相应的焊缝横截面横向残余应力分布。由图可知,常压下横向残余拉应力水平显著高于真空。两种环境下横向残余拉应力峰值分布均呈现“中心+四角”5点分布现象,以5点为中心,划分为5个高拉应力区域,常压5个区域清晰可见,但真空下仅有中心区域拉应力分布明显,而4个角落区域则水平不高,分布不明显,即便如此,两种环境下5点分布宽度几乎一致,均约为20 mm;无论是常压还是真空,焊缝内部中心处均存在横向残余拉应力峰值,且峰值近似,约为300 MPa,焊接接头外,常压呈现约为180 MPa的拉应力分布,而真空呈现约为200 MPa的压力分布,可以推断出真空下在焊接接头内部及邻近区域,残余拉应力分布仅限于焊缝内部中心,而常压下拉应力分布区域覆盖整个焊接接头区域以及邻近区域。

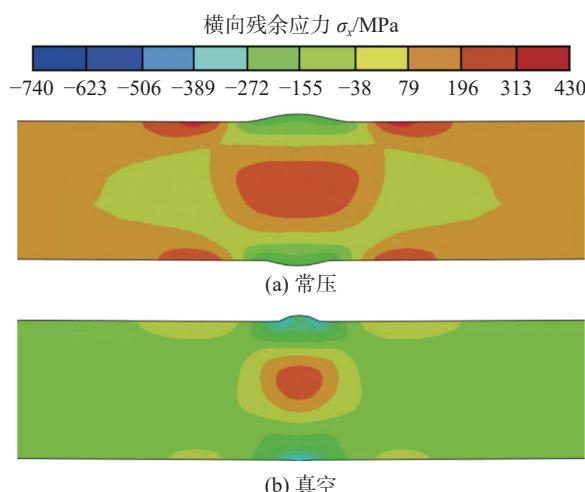


图10 焊缝横截面横向残余应力分布

Fig. 10 Transverse residual stress distribution on the weld cross section. (a) atmospheric pressure; (b) vacuum

提取图10中焊缝横截面上表面横向残余应力数值,如图11所示,直观地体现出两种环境压力下“接头压、母材拉”的残余应力分布情况。由图可知,在距离焊缝中心线约 ± 4 mm区间内,常压下残余压应力峰值为170 MPa,延伸至距焊缝中心线7 mm处,残余拉应力水平达到最大值255 MPa;在距离焊缝中心线约 ± 2 mm区间内,真空下残余压

应力水平峰值达到460 MPa,向外延伸4 mm达到峰值残余拉应力,约为70 MPa。因此,相比于常压,真空下残余拉应力峰值降低了约72%,残余压应力峰值增大了约170%;母材区域中,常压下的残余拉应力水平较高,距离焊缝中心线越远,值越低,从距离焊缝中心线6 mm处的255 MPa下降至30 mm处的57 MPa,而真空则可以忽略母材部位的残余拉应力分布。结果表明,焊接接头处,尤其是焊缝区域,真空下横向残余压应力水平远高于常压,在接头外母材区域,常压下分布着更高更显著的残余拉应力。

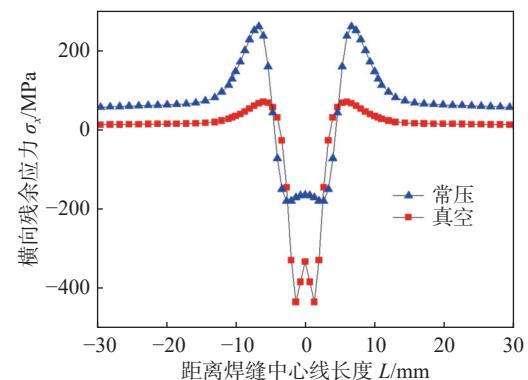


图11 距离焊缝中心不同位置的横向残余应力

Fig. 11 Variation of transverse residual stress at different positions from the center of the weld

2.2.4 变形

焊接变形的存在直接影响到工件的服役和使用性能,因此文中也针对常压和真空环境下的中厚板全熔透焊接变形进行了数值模拟研究。焊后经冷却后,常压环境和真空环境下工件的变形云图分布如图12所示。两种环境下工件均呈现中间收缩下凹、向外延伸变形逐渐减小、直到边缘处减小为零的变形分布规律,但是在变形程度上存在差异:相较于常压环境,真空环境下激光焊接能量输入更为

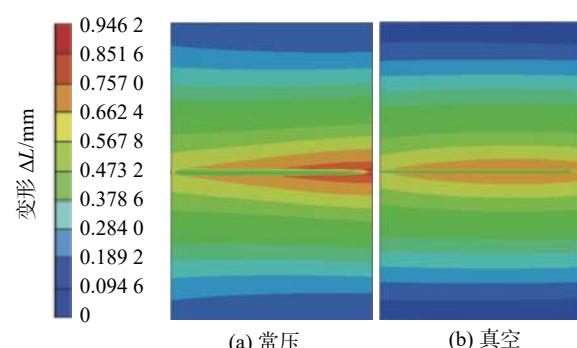


图12 外观变形云图

Fig. 12 Calculated deformation distribution. (a) atmospheric pressure; (b) vacuum

集中, 焊缝宽度更窄, 沿厚度方向热分布更均匀, 因此得到的工件整体外观变形趋势更小; 常压环境下, 焊接接头区域收缩下凹变形最大值约为 0.9 mm, 而真空环境约为 0.7 mm, 降低了约 22%。因此, 相较常压环境, 真空环境下激光全熔透焊接得到的工件整体变形量更小。

由于厚板本身对激光全熔透焊接产生的纵向收缩有着很大的约束作用, 因此, 在两种环境压力下对应的工件纵向收缩量很小, 可以忽略不计, 因此采用横向收缩量对两种环境压力下工件变形程度进行对比分析。

在距离焊缝中心线 2.5 mm 处沿焊接方向取一路径, 并作出此路径上两种环境压力下工件横向收缩模拟对比曲线, 如图 13 所示, 通过计算可得, 在工件上表面, 常压环境下横向收缩量平均值约为 0.110 mm, 真空环境下约为 0.049 mm; 在工件下表面, 常压环境下横向收缩量平均值约为 0.068 mm, 真空环境下约为 0.005 mm。相对于常压环境, 真空环境下工件上下表面的横向收缩量分别减小约 55% 和 93%。由于工件上表面焊缝宽度大于下表面, 因此在两种环境压力下, 工件上表面的横向收缩量均大于下表面; 同时, 由于常压环境下焊接热输入远大于真空环境, 因此无论在工件的上表面还是下表面, 常压环境下的横向收缩量均远大于真空环境, 甚至常压环境下工件下表面的横向收缩量大于真空环境下工件上表面的横向收缩量。因此, 可以进一步证明: 相比于常压环境, 真空环境下激光全熔透焊接得到的工件变形程度更小。

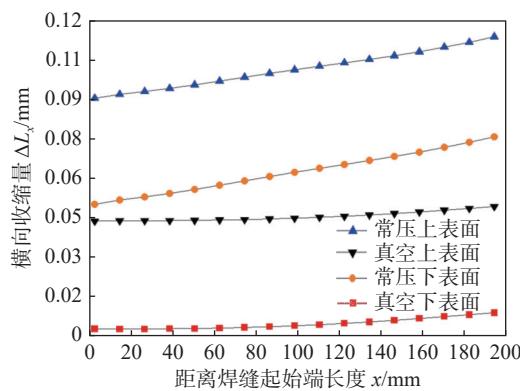


图 13 真空和常压下焊缝横向收缩量

Fig. 13 Transverse shrinkages of the weld joints obtained under atmospheric pressure and vacuum

3 结论

(1) 随着环境压力降低, 焊缝熔深增加, 熔宽降

低, 深宽比显著增加, 并存在临界环境压力 1 kPa, 低于这一环境压力时, 焊缝横截面轮廓以及熔深几乎不再变化。

(2) 真空环境下可以将常压环境高强钢中厚度板材全熔透激光焊接所需功率由 10 kW 降低到 6 kW, 在显著降低激光功率的同时还提升了焊缝成形质量。

(3) 数值模拟和试验获得的焊缝横截面, 无论是焊缝的尺寸还是几何面貌均对应良好, 同时计算证明, 真空下的熔池长度比常压的熔池长度缩短大约 33%, 所建立有限元模型的准确性得到验证。

(4) 常压环境和真空环境呈现出类似的残余应力分布规律, 即纵向“接头拉、母材压”, 横向“接头压、母材拉”, 但是真空环境下工件的纵向、横向残余拉应力峰值均显著低于常压环境, 而接头横向残余压应力峰值显著高于常压环境, 同时真空环境下的工件变形也更小。

参考文献

- [1] Weglowski M S, Blacha S, Phillips A. Electron beam welding - Techniques and trends - Review[J]. Vacuum, 2016, 130: 72 – 92.
- [2] Kawahito Y, Wang H, Katayama S, et al. Ultra high power (100 kW) fiber laser welding of steel[J]. Optics Letters, 2018, 43(19): 4667 – 4670.
- [3] Zhang X, Mi G Y, Li S, et al. Study of microstructural inhomogeneity and its effects on mechanical properties of multi-layer laser welded joint[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018, 94(5-8): 2163 – 2174.
- [4] Li R Y, Wang T J, Wang C M, et al. A study of narrow gap laser welding for thick plates using the multi-layer and multi-pass method[J]. Optics and Laser Technology, 2014, 64: 172 – 183.
- [5] Li R Y, Yue J, Shao X Y, et al. A study of thick plate ultra-narrow-gap multi-pass multi-layer laser welding technology combined with laser cleaning[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2015, 81(1-4): 113 – 127.
- [6] Zhang R L, Tang X H, Xu L D, et al. Mechanism study of thermal fluid flow and weld root hump suppression in full penetration laser welding of Al alloy with alternating magnetic field support[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2021, 166: 120759.
- [7] Uestuendag O, Bakir N, Gumeyuk A, et al. Influence of oscillating magnetic field on the keyhole stability in deep penetration laser beam welding[J]. Optics and Laser Technology, 2021, 135: 106715.
- [8] Rethmeier M, Gumeyuk A, Bachmann M. High-power laser beam welding for thick section steels - new perspectives using

- electromagnetic systems[J]. *Science and Technology of Welding and Joining*, 2022, 27(1): 43–51.
- [9] 李军兆, 孙清洁, 张清华, 等. 空间多位置摆动激光填丝焊接熔池动态行为及焊缝成形 [J]. *焊接学报*, 2021, 42(10): 35–39, 61.
Li Junzhao, Sun Qingjie, Zhang Qinghua, et al. Dynamic behavior of weld pool and weld forming in space multi-position swing laser wire filling welding[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2021, 42(10): 35–39, 61.
- [10] Chen C, Zhou H, Wang C, et al. Laser welding of ultra-high strength steel with different oscillating modes[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2021, 68: 761–769.
- [11] Uestendag O, Avilov V, Gumenyuk A, et al. Improvement of filler wire dilution using external oscillating magnetic field at full penetration hybrid laser-arc welding of thick materials[J]. *Metals*, 2019, 9(5): 594.
- [12] Lyu F, Wang L, Feng Y, et al. Thermal behavior and microstructure evolution mechanism of Ti6Al4V 80 mm thick plates jointed by laser melting deposition[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2021, 71: 12–26.
- [13] Shen X F, Li L, Guo W, et al. Comparison of processing window and porosity distribution in laser welding of 10 mm thick 30CrMnSiA ultrahigh strength between flat (1G) and horizontal (2G) positions[J]. *Journal of Laser Applications*, 2016, 28(2): 022418.
- [14] Han Y Q, Han J, Chen Y, et al. Stability of fiber laser-MIG hybrid welding of high strength aluminum alloy[J]. *China Welding*, 2021, 30(3): 7–11.
- [15] Arata Y, Oda T. Vacuum laser beam welding: JP62144889-A[P]. 1987-06-29.
- [16] Katayama S, Kobayashi Y, Mizutani M, et al. Effect of vacuum on penetration and defects in laser welding[J]. *Journal of Laser Applications*, 2001, 13(5): 187–192.
- [17] Reisgen U, Olschok S, Turner C. Welding of thick plate copper with laser beam welding under vacuum[J]. *Journal of Laser Applications*, 2017, 29(2): 022402.
- [18] Börner C, Kruessel T, Dilger K. Process characteristics of laser beam welding at reduced ambient pressure[C]//Conference on High-Power Laser Materials Processing - Lasers, Beam Delivery, Diagnostics, and Applications II, 2013: 86030M.
- [19] 孟圣昊, 司昌健, 任逸群, 等. 中厚板 TC4 钛合金真空环境激光焊接特性 [J]. *焊接学报*, 2021, 42(8): 40–47, 74.
Meng Shenghao, Si Changjian, Ren Yiqun, et al. Laser welding characteristics of TC4 titanium alloy plate in vacuum environment[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2021, 42(8): 40–47, 74.
- [20] Jiang M, Chen X, Chen Y B, et al. Mitigation of porosity defects in fiber laser welding under low vacuum[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2020, 276: 116385.
- [21] 任朝晖, 刘振, 周世华, 等. 钛合金激光熔丝增材制造的温度场与应力场模拟 [J]. *东北大学学报(自然科学版)*, 2020, 41(4): 551–556.
Ren Zhaohui, Liu Zhen, Zhou Shihua, et al. Simulation of temperature field and stress field of titanium alloy laser fuse additive manufacturing[J]. *Journal of Northeastern University (Natural Science)*, 2020, 41(4): 551–556.
- [22] Yang Z Y, Wang W Y, Zhang J, et al. Effect of fire exposure on residual stresses relief in welded high strength Q690 steel sections[J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2021, 177: 106455.
- [23] Wang W Y, Wang K, Kodur V, et al. Mechanical properties of high-strength Q690 steel at elevated temperature[J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2018, 30(5): 103010.
- [24] 姜梦. 低真空激光焊接特性及热物理过程的试验研究与数值模拟 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020.
Jiang Meng. Experimental study and numerical simulation of low vacuum laser welding characteristics and thermal physics process[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2020.
- [25] 李时春. 万瓦级激光深熔焊接中金属蒸气与熔池耦合行为研究 [D]. 长沙: 湖南大学, 2014.
Li Shichun. Research on coupling behavior of Metal vapor and molten pool in 10000-watt laser Deep fusion Welding[D]. Changsha: Hunan University, 2014.
- [26] 唐琪, 陈静青, 陈鹏, 等. 基于有限元的激光增材过程熔化热积累模拟 [J]. *焊接学报*, 2019, 40(7): 100–104.
Tang Qi, Chen Jingqing, Chen Peng, et al. Simulation of melting heat accumulation in laser additive process based on finite element method[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2019, 40(7): 100–104.

第一作者: 张国滨, 学士; 主要研究方向为激光焊接与增材制造数值模拟; Email: 2478467239@qq.com.

通信作者: 姜梦, 博士, 讲师; Email: mengjiang@hit.edu.cn.

(编辑: 高忠梅)