

激光深熔焊焊缝表面形状的影响因素*

强宏亮 程兆谷 雒江涛 夏金安

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

摘 要 从理论和实验两方面研究了各种物理和工艺参数对激光深熔焊焊缝表面形状的影响, 并对改善表面质量的激光焊接工艺提出了建议。

关键词 激光深熔焊, 焊缝表面形状, 工艺和物理参数。

1 引 言

当前, 对激光深熔焊的研究工作, 无论理论还是实验, 绝大多数都集中在对熔深和焊缝深宽比的研究上。主要原因在于一般情况下, 焊接的最终质量和焊件性能取决于熔深和焊缝深宽比。然而, 随着激光焊接技术应用范围的扩大, 在某些特定的应用环境中, 如汽车表面蒙皮和底盘钢板的焊接, 对焊后表面平整程度提出了很高的要求, 这就有必要对焊缝表面形状及其影响因素进行研究。本文从较为简化的物理模型出发, 按照由简单到复杂、由部分到全面的次序, 从理论和实验两方面讨论了各种物理因素和工艺参数对激光深熔焊焊缝表面形状的影响。

2 激光深熔焊焊缝表面的形成过程

图 1 所示为激光深熔焊的过程。在此过程中, 熔池前端材料的液化过程与其尾部熔体的凝固过程同时发生, 并达到动态平衡, 保持熔池大小和形状不变。熔池后面凝固的熔体就形成了激光深熔焊的焊缝。从图中可以看出, 在理想的稳态工作方式下, 焊缝的宽度 d 就是熔池的最大横向尺度 AC , 熔深 h 就等于熔池的最大深度, 而焊缝表面形状曲线 $A'B'C'$ 恰好就是熔池后半周边缘 ABC 在焊接方向上的投影。

可以看出, 激光焊接焊缝宽度、熔深以及表面形状都与激光熔池的大小、形状和表面有十分密切的关系。因此, 对焊缝表面形状的研究就转化为对熔池表面形状的研究问题。同时应看到, 激光焊接中熔池的表面形状

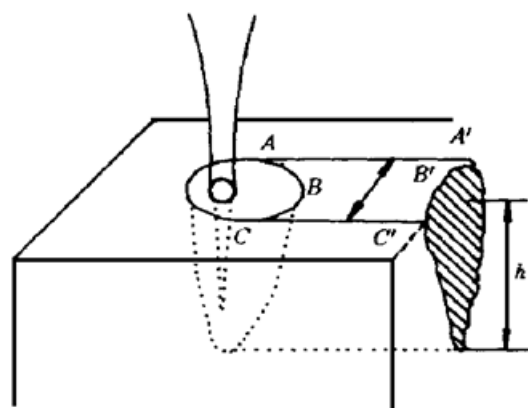


Fig. 1 Schematic of deep penetration laser welding

* 福特-中国研究与发展基金资助项目(09415518)。

收稿日期: 1998-02-28; 收到修改稿日期: 1998-08-06

受到诸多因素的影响,包括内外压强差、表面张力、熔体流动、等离子体作用、小孔的形成与坍塌以及相变和接触角变化等等。同时考虑上述许多因素是有困难的。首先从一较简单模型出发,研究主要因素的影响和变化规律;再在此模型基础上,逐步考虑其它一些次要因素的影响,以期得出较为全面的结论。

3 激光焊接熔池的静流体模型

为简单起见,首先考虑一个静流体模型,在该模型中引入如下假定:1) 整个焊接过程中熔池和小孔大小、形状等均保持稳定,不考虑开始和结束时的过程;2) 除因工件相对激光束移动所引起的整体速度外,不考虑熔体流动。

其中条件1)在连续波焊接中一般可以满足;条件2)在扫描速度很低的条件下可近似满足。根据静流体理论,熔池表面形状满足^[1]:

$$\gamma \nabla^2 \xi = -\delta p \quad (1)$$

其中 γ 为表面张力系数, ξ 为熔池表面各点的竖直位移, δp 为液体内部与外界压强差。边界条件为:

$$\left. \begin{aligned} \xi &= 0, & x < 0 \\ \frac{\partial \xi}{\partial x} &= 0, & x > 0 \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

这里,设原点位于光束中心, x 轴方向为光束扫描反方向。上面第二个边界条件表示液面凝固时高度不发生变化。这在宏观上是合理的,但若从微观界面动力学的角度分析仍有待讨论。

由定解(1)式和边界条件(2)式组成了关于 ξ 的定解问题,其解 $\xi(x, y)$ 的形式决定了熔池表面形状,从而决定了焊缝的最终形状。由方程(1)式可以看出, $\xi(x, y)$ 与表面张力 γ 、熔池内外压强差 δp 有关。现分别对压强差 δp 和表面张力 γ 进行讨论。如前所述, δp 为熔池内部压强 p_l 与液面上部气体压强 p_g 之差。由于 p_l 和 p_g 分属液体和气体的压强,变化规律不尽相同,将分别予以讨论。

3.1 熔池内部压强

根据静流体模型假设,不考虑流动的影响,同时忽略重力的作用,欧拉方程形式为: $\nabla p = 0$ ^[2],即 $p = \text{常数}$,熔池内部压强处处相等,其数值大小由外加压强唯一确定。如图1所示,激光熔池可看作是由基体、小孔和上部大气三者所包围的“密封”液体,故熔池内部压强也与这三者有密切关系。上部大气的压强另行论述,下面先对基体和小孔的影响进行讨论:

1) 基体的压强

在激光作用过程中,由于工件纵深方向温度梯度的存在,使得工件上部激光作用点周围基体的热膨胀过程受到下部冷基体的约束,从而在上部基体中形成压应力分布。当熔池形成后,屈服极限下降为0,熔池横向两侧的基体壁在压应力作用下相互靠近,挤压熔池中的液体,导致熔池中液体压强增大,液面向上凸起,并最终导致焊接表面形成凸起。这就是激光焊接表面“焊珠”形成的机理。激光焊接工件上表面的横向收缩变形以及伴随的翘曲现象已在实验中观察到^[3]。

2) 小孔的压强

在激光深熔焊过程中,小孔孔壁材料在激光作用下非平衡汽化产生汽化压 p_{abl} 。该压强与小孔内壁表面张力所产生的压强 p_γ 、熔体流动的压强 p_n 以及静压强 p_{hy} 相互平衡^[3],即

$$p_{abl} = p_{\gamma} + p_{\eta} + p_{\eta\gamma} \quad (3)$$

使小孔得以形成和维持。

在稳态条件下,小孔内压强与熔池内压强及内壁张力的作用相互平衡,使小孔的大小和形状保持不变。从熔池液体的角度来看,小孔的存在只相当于在液体中增加了一个硬壁空腔,不会对液体中的压强产生额外的影响(尽管小孔内部压强大于液体压强),因此也不会影响熔池表面形状及焊缝的最终面形。

3.2 熔池的外部压强

激光焊接过程中,熔池上部的气压 p_g 主要受到三个因素的影响:外界大气压 p_0 ,辅助及保护吹气压强,小孔内溢出等离子体压强。其中外界大气压为一恒量,其对熔池面形的影响可不予考虑。

当 p_g 在熔池表面范围内分布均匀,为一常量时,(1)式可数值求解,其结果为一较为平缓的曲面^[1],对应于较为平缓的熔池表面和焊缝表面。当分布不均匀为一变量时,求解(1)式十分复杂,很难精确求解,对应于熔池表面十分不规则,焊缝面形也随之变差^[4],甚至将一部分气体导入液体内,凝固后造成气孔缺陷^[5]。此种情况的发生,通常是由于吹气流量过大引起间歇冲击波效应^[6],致使吹气压强空间和时间分布不均,以及小孔内的等离子体不能顺利排出等因素所致。

在气体压强分布中,应特别注意的是熔池中部与尾部压强差大小。在静流体模型中,熔池表面各点相对高度主要由各点上的相对压强决定。由于吹气和等离子体等影响,一般说来,焊接熔池前部和中部压强要高于尾部压强^[7],相应熔池尾部液面要高于前部和中部。由于熔池的俯视形状为一不规则椭圆形(扫描速度快时呈雨滴状),其周线各点纵向越到尾部,横向就越接近于中心线,则熔池首尾压强差所造成的高度差将导致其后半周上各点的横向高度差。按前面所述,熔池后半周各点相对高度决定了最终焊缝的横截面形状。这样就形成了人们熟悉的焊缝面形:中间一道峰状突起,两侧有两条凹槽。须注意,由于前面提及的基体热变形所引起的堆积“净”体积增量,使得突起部分的体积一般并不恰好等于凹下部分的“亏空”。

3.3 表面张力的影响

Antony 等人的文章指出了激光表面熔化过程中 γ 的分布规律^[8]:由于表面温度从激光作用点向外逐渐下降,张力系数从中心向四周逐渐增大,从而在熔池表面形成了径向的表面张力梯度。在此张力梯度的驱动下,表面液体产生径向流动,造成熔池液面中心下凹,四周高起,直到在此高度差驱动下的反向流动可以补偿表面径向流动为止。

上述机制完全适用于激光深熔焊的熔池情况,表面张力与汽化压、吹气压一起造成了熔池中部的下凹。但是,由于熔池边缘周线可近似看作是温度等于材料熔点的等温线,故其边缘各点温度及表面张力系数值也相等,边缘各点相对高度不受径向张力梯度影响;而如前所述,决定焊缝最终形状的正是熔池周线上各点(而非中央与边缘)相对高度。因此,一般来说,焊缝的最终形状将不会受到表面张力分布的影响。

4 动态模型

4.1 对边界条件的修正

在前面的分析中,只考虑了焊缝横向的凹凸,而未涉及焊缝在纵向(平行于扫描方向)的

不平问题, 如此处理的主要依据是加工过程为准稳态过程的假定。而要保持这一准稳态过程的连续性, 就必须要求在熔池尾部固、液、气三相交汇处液面为水平, 如图 2(a) 所示。而根据界面动力学原理, 液-气界面与液-固界面夹角(接触角), 是一由材料本身特性决定的常数。一般说来, 由接触角数值所决定的液面方向很难恰好就是水平方向。实际可能发生的过程将会是, 或者液面上斜, 如图 2(b), 导致焊缝表面抬高, 使得由于凝固离开熔池的材料多于由于熔化进入熔池的材料, 最终致使熔池中熔体量减少, 液面下降; 或者液面下降, 如图 2(c), 导致焊缝表面降低, 离开熔池的材料少于进入熔池的材料, 熔池液面上升, 从而又转化成图 2(b) 的情形。实际焊接中的情况将是图 2(b) 和图 2(c) 两种状态来回转换, 从而在焊缝表面形成一圈一圈的波纹状褶皱^[9]。

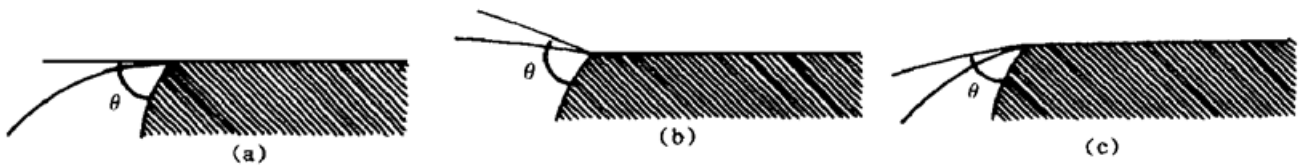


Fig. 2 Relationship of solid vapor, solid liquid and liquid vapour interfaces at back edge of laser melted pool

应当注意的是, 液面下斜持续一定时间后, 有可能由于熔池中熔体的增多而发生熔体“倒流”现象, 即熔体溢出熔池覆盖了一部分已经凝固甚至氧化了的固相表面, 这种现象的发生大大降低焊缝的表面质量。而此种情况是否发生, 主要取决于“倒流”后, 界面能的增加量是否小于熔体重力势能的减少量, 这又与材料液、固、气三相间界面张力系数等有关。

4.2 熔体流动的影响

在前面的讨论中均未考虑熔体流动的影响, 而在实际焊接中, 尤其是扫描速度比较快的情况下, 熔体流动的影响也是不可忽略的。为简化起见, 将熔池中的熔体流动分为两类: 平行于光束方向的纵向流动和平行于工件表面的环流。其中环流不影响熔池表面形状, 这里只对纵向流动加以讨论。

纵向流动的主要起因可归结为熔池内存在纵向的压强梯度^[11]。该压强梯度的产生与小孔内的压强分布紧密相关。前面假定小孔中压强为恒量, 并与孔壁表面张力压和熔体静压强相平衡; 而实际上由于小孔与外界相通, 从小孔内部高于外界的压强过渡到大气压, 必然存在着纵向的压强梯度分布。当小孔为只在上端开口的盲孔时, 压强梯度方向一般为向下方向, 在此压强梯度驱动下, 熔体发生向上的轴向流动, 正是这种流动形成了前面所述的表面突起。

当小孔贯通整个工件厚度时(穿透焊), 为两端开口的通孔, 其中压强分布也更为复杂, 压强梯度及熔体轴向流动的方向也不唯一, 但一般说来, 在工件上下表面均会形成一定量的突起。考虑重力和上表面吹气附加压强的作用, 下表面焊珠突起更为明显。上表面与小孔为盲孔的情况相对较为平整, 有时甚至略有下凹, 如图 3 照片所示。从照片中可看出, 下表面焊缝表面的平滑程度要大大好于上表面, 这主要是由于下表面不存在激光作用汽化压、等离子体和吹气等不稳定因素的影响, 表面温度梯度也小于上表面等原因。

实际上, 除了纵向流动和环流外, 由于表面张力梯度的作用, 熔池表面存在由中心向外的径向表面液流, 作为补偿, 重力驱动熔池内部发生反向回流, 从而形成如图 4 所示的流动。此种流动的起因是由于温度梯度引起的表面张力梯度, 它对面形的影响也可与前面述及的表面张力的影响归为一类, 这里不再详述。

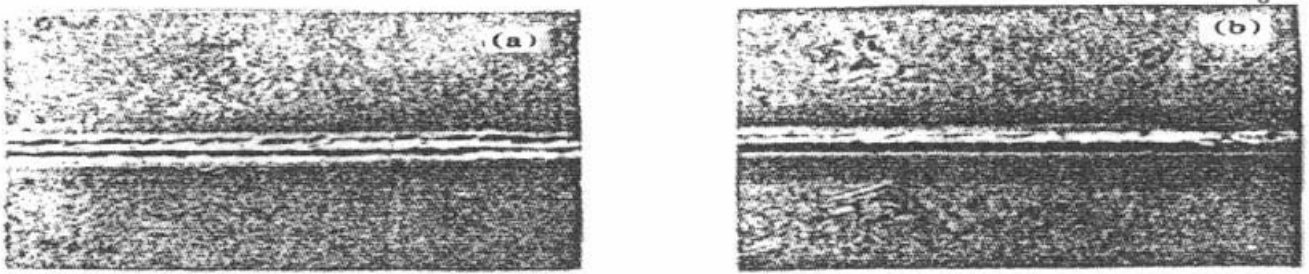


Fig. 3 Top view of upper (a) and lower surfaces (b) of a laser weld in 45# steel with a 5 kW CO₂ laser.
(thickness of the sample: 3 mm)

4.3 始点与终点的不平

前面讨论表面张力梯度的影响时,认为其对焊缝面形的影响可忽略不计。但这只适用于焊接中间过程,而不适于焊接的始点和终点。

如前所述,由于温度梯度引起的径向张力梯度的作用,激光熔池表面会形成下凹的曲面。熔池中心降低的同时,边缘液面必然高出基体,当激光束向前扫描时,溢出的熔体凝固,从而在焊接的始点形成凸起;焊接结束时,下凹的熔池表面迅速冷却凝固,从而在焊接的终点形成下陷^[8]。这种焊缝两端的不平除了影响焊缝的表面质量外,由于下凹处焊缝有效截面小于其它部分,还会对焊接头的强度造成影响。

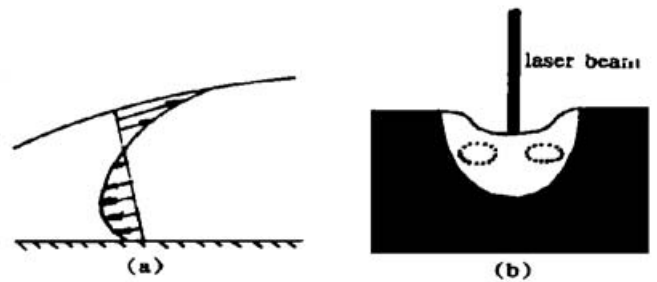


Fig. 4 Schematic diagram of the flow in the welding pool driven by surface tension gradients

4.4 相变的影响

激光焊接过程是焊缝及热影响区内材料发生显著冶金变化的过程,其中伴随着一系列的相变过程。以普通共析钢为例,加工前为珠光体,加工后焊缝中主要相组织为马氏体以及少量奥氏体,热影响区内除了马氏体外,还有因未完全淬火留下的珠光体等。可以想象,相变对面形的可能影响主要在于相变体积的变化。根据共析钢中各相组分、比容^[10]可以粗略估算出加工前后焊缝基体热影响区中材料相变体积的变化量,估算结果表明相变体积增量只有一般焊缝表面凸起部分体积的 1/10~ 1/5 左右,故可不予考虑。

5 讨 论

激光深熔焊焊缝表面形状受到诸多因素的影响,不同因素的影响程度和方式也各不相同。在一般情况下,焊缝表面横向的不平主要由工件热变形、辅助和保护吹气压强分布引起;纵向的不平主要由于熔池尾部接触角变化、功率的不稳定性以及焊接始末点的凹凸形成。

下面讨论工艺因素的取值对焊缝表面形状的影响规律。

5.1 功率密度与扫描速度

激光功率密度对焊缝面形的影响主要通过其对入射点汽化压的影响来实现。激光功率密度越高,入射点汽化压强越大,相应熔池前部压强以及首尾压强差也越大,根据前面的分析可知,此时焊缝的横向凹凸也越明显。另外,在保持一定熔深的前提下,激光功率密度越高,允许的扫描速度也越快,而随着扫描速度的增快,熔池形状会从一近似椭圆状演变为狭长的“雨滴”状,此种变化同样会导致熔池首尾压强差的增大进而增大焊缝的横向不平。综合来看,功率密度的增大不利于焊缝表面质量的提高。

5.2 加工方式和工件厚度

功率密度降低对焊缝面形的改善并不是无限的。功率密度降到一定程度,将会导致小孔难以维持而坍塌,使焊接方式由深熔焊变为传导焊,由于后者中工件内部的加热只能依靠热传导,其纵深方向的温度梯度将大于深熔焊的情况,从而导致工件热变形增大^[11]。

工件厚度对焊缝面形也有较大影响。工件厚度越薄,一方面工件纵深方向温度分布越接近均匀分布,另一方面基体对表面热膨胀的约束作用也越小,二者均有利于减小工件的热变形以及焊缝的表面不平。在薄板穿透焊的情况下,焊缝表面往往相当平整,不存在明显的凸起,此特性在汽车蒙皮和底盘钢板焊接中十分有益。

5.3 吹气方式

吹气方式的选择主要包括流量和吹气方向的选择。吹气流量的增多一方面会导致作用点气压的增高,另一方面流量多到一定程度会形成间歇冲击波效应,气压的空间和时间均匀性都会变差,这两方面因素均不利于焊缝表面质量的改善。

通过选择合适的吹气方向,有可能在熔池上空获得较均匀的压强分布,部分地平衡汽化压等因素所造成的熔池首尾压强差。一种行之有效的方法是采用多个喷嘴从不同方向进行辅助吹气,实验结果表明此种吹气系统可显著改善焊缝的表面质量^[12]。

除上述因素外,由接触角变化所引起的焊缝表面纵向皱褶也是一种重要的不平,但由于接触角数值与材料本身物性密切相关,不易受加工参数影响;一般认为提高工件表面清洁程度和激光功率稳定性有利于减少此种不平。

加工始末点的凹凸由表面张力梯度引起。因其只分布在局部,对工件总体表面质量影响不大,特别是在大面积板材焊接中。但在一些特定的应用场合,如齿轮焊接中,末点处的下凹有可能造成熔深损失,构成局部强度缺陷。Antony 等人提出可通过加快扫描速度来消除此种皱褶^[8],其机制尚有疑问,而且受熔深要求以及功率水平的限制,扫描速度的提高也有一定限度。一种可能的途径是在焊接的始末点采用不同于中间过程的激光功率,并调节首尾衔接长度等,对此问题更深入的研究有待于进一步的工作。

结 论 1) 激光深熔焊焊缝的表面形状受到工件热应力、吹气压强、熔池表面张力梯度以及熔池尾部接触角变化等因素的影响;

2) 一般情况下,减慢激光扫描速度、降低功率密度、减少吹气流量以及改进吹气系统均有助于焊缝表面质量的提高;

3) 在其它条件相同时,薄板焊接,尤其是薄板穿透焊的焊缝表面质量明显好于厚板焊接的情况。

参 考 文 献

- [1] Postacioglu N, Kapadia P, Davis M *et al.*. Upwelling in the liquid region surrounding the keyhole in penetration welding with a laser. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 1987, **20**(3): 340~ 345
- [2] 朗道 Л Д 栗弗席茨 Е М. 流体力学. 北京: 高等教育出版社, 1983. 7~ 8
- [3] Qiang H, Cheng Z, Luo J *et al.*. Influence of thermal deformation and shielding gas upon topography of weld in deep penetration laser welding. *Proc. SPIE*, 1996, **2888**: 299~ 305
- [4] Kroos J, Gratzke U, Simon G. Towards a self-consistent model of the keyhole in penetration laser

- beam welding. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 1993, **20**(3) : 474~ 480
- [5] 唐霞辉, 朱海红, 段 军等. 辅助气体对 CO₂ 激光焊接等离子体的作用. 华中理工大学学报, 1995, **23**(1) : 53~ 56
- [6] 王家金. 激光加工技术. 北京: 中国计量出版社, 1992. 455~ 456
- [7] Moore P, Kim C, Weinman L S. Topographical characteristics of laser surface melted metals. *Laser Solid Interaction and Laser Processing*, 1979, **50**(2) : 221~ 224
- [8] Antony T R, Clime H E. Surface rippling induced by surface-tension gradients during laser surface melting and alloying. *J. Appl. Phys.*, 1977, **48**(9) : 3888~ 3894
- [9] Copley S M, Beck D, Esquivel O. Laser melt quenching and alloying. *Laser Solid Interaction and Laser Processing*, 1979, **50**(1) : 161~ 172
- [10] 田 蔚, 李秀臣, 刘正堂编. 金属物理性能. 北京: 航空工业出版社, 1994. 70~ 71
- [11] 强宏亮, 程兆谷, 雒江涛等. 材料热变形对激光深熔焊焊缝表面突起影响的研究. 中国激光, 1997, **A24**(4) : 375~ 379
- [12] Luo J, Cheng Z, Qiang H *et al.*. Influence of different configurations of assisting gas in high-power CW-CO₂-laser welding. *Proc. SPIE*, 1996, **2888** : 292~ 298

Influencing Factors on Topography of Weld in Deep Penetration Laser Welding

Qiang Hongliang Cheng Zhaogu Luo Jiangtao Xia Jin'an

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800)

(Received 28 February 1998; revised 6 August 1998)

Abstract Several physical and technical factors that influence on the topography of weld in deep penetration laser welding were investigated theoretically and experimentally. Suggestions on technical methods of laser welding are put forward to improve the quality of the weld surface.

Key words deep penetration laser welding, topography of weld, physical and technical factors.