

# 薄板 CO<sub>2</sub> 激光焊中的小孔机理

蒲万林 肖敏 陈祖涛

(华中工学院焊接教研室)

**提要:** 研究了薄板小功率 CO<sub>2</sub> 激光焊接的小孔效应。首次用实验方法证明了薄板焊接过程中存在的穿透小孔, 确定了产生小孔的功率密度条件, 提出了“小孔效应”焊接方法。

## “Keyhole” mechanism in welding thin plates with a low power CO<sub>2</sub> laser

Pu Wanlin, Xiao Min, Cheng Zhutao

(Huazhong University of Science and Technology)

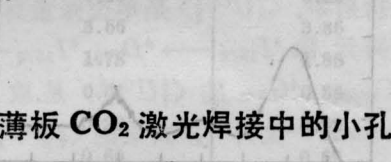
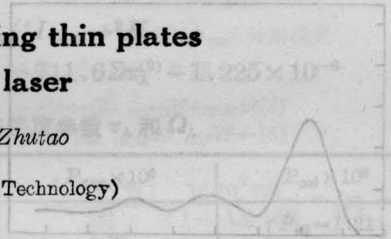
**Abstract:** A new effect was discovered in welding thin metal plates with a low power CO<sub>2</sub> laser. In the welding process, a small hole exists in the welding puddle and penetrates the plate. This effect was proved experimentally for the first time. The conditions of power and energy density were also investigated experimentally and theoretically.

### 一、引言

用几百~几千瓦的 CO<sub>2</sub> 激光焊接薄板 (<1mm), 如罐头盒用的镀锡马口铁板 (0.26mm) 和燃气轮机散热器用的镍基合金板 (0.203mm) 的焊接等, 具有重要的经济或军事意义。人们在対大功率激光的深熔透焊接的焊接机理、热过程、焊接特性及功率密度条件等都已作了较为系统的研究。但对功率数百瓦的 CO<sub>2</sub> 激光焊接薄板研究得很少, 经常引用的还是文献 [1] 所给出的结果。本文就是报道我们在这方面的一些研究结果。

### 二、薄板 CO<sub>2</sub> 激光焊接中的小孔

文献 [2] 认为 CO<sub>2</sub> 激光焊形成射束孔道的条件是光束斑点上的功率密度必须在  $10^6 \text{ W/cm}^2$  以上, 小于  $10^6 \text{ W/cm}^2$  则不能形成射束孔道和深熔透焊缝, 只能以传热熔化焊的方式进行。在本文的实验研究中发现, 薄板的小功率 CO<sub>2</sub> 激光焊, 除了通常所说的传热熔化焊以外, 还有另外一种机理, 即穿孔焊, 类似于等离子弧焊中的小孔效应。这个重要事实, 可以通过以下三个方面的实验加



收稿日期: 1985年3月12日。

以证明。

### 1. 穿透小孔的存在性实验

在各种焊接方法中, 出现小孔或射束孔道的方法有等离子焊、电子束焊和大功率CO<sub>2</sub>激光焊。特别是在等离子焊过程中, 如果有小孔效应存在, 则在被焊材料的背后可观察到透过小孔的部分等离子弧。因此判断薄板焊接中是否有穿透小孔存在, 就是设法造成出现小孔的条件及检测薄板背面是否有激光辐照。

采用图1所示的实验方法。夹具上装一块厚0.35mm的硅钢片, 在其下5mm处放一块黑相纸, 然后用激光在薄板上堆焊。用堆焊而不用对接的目的是为了避免激光透过接头间隙可能造成的假象。

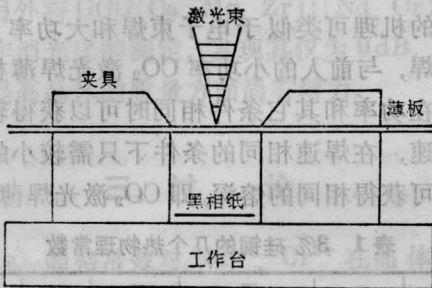


图1 薄板下激光接收示意图

焊接后, 获得了正反面成形良好的全熔透焊缝, 而置于板下的黑相纸也同时被整齐地切开成两块, 见图2。相纸放于被焊薄板之下, 聚焦的激光束不可能直接透过薄板切割相纸; 相纸与薄板背面不相接触, 不可能被炽热的焊缝金属烧断; 良好成形的焊缝表明焊接中没有产生切割使光下漏。这就说明焊接过程中存在着类似等离子焊那样的小孔效应, 激光辐射除了与金属作用产生熔化、蒸发



图2 薄板下被切开的相纸

$P=400\text{ W}; V=37.5\text{ mm/s}; f=150\text{ mm}; \Delta F \approx 0$

外, 还有少部分激光通过熔池中的小孔到达薄板背后, 使相纸切开。

为了进一步确证该事实, 把一块厚3mm的有机玻璃置于板下, 两者间距3mm, 同样用上述方法对薄板进行焊接, 结果在有机玻璃上刻上一道槽, 见图3。槽的形状与激光束横截面上的能量分布相当一致, 这表明有机玻璃上的槽是一种类似于激光的热源蒸发而成。在本实验的条件下, 它就是通过小孔后被削弱的激光。



图3 有机玻璃上的蒸发槽( $\times 32$ )

$P=400\text{ W}; V=25.9\text{ mm/s}; f=150\text{ mm}; \Delta F \approx 0$

在薄板背面除了能接收到激光外, 一部分高温气体也会通过小孔向下泄漏, 在薄板背面形成一类似于正面的亮光, 这个事实在实验中也观察到了。

### 2. 焊接过程中的蒸发及小孔痕迹

激光焊中小孔形成的动力是金属蒸发所产生的反冲压力, 因此焊接过程中明显蒸发是小孔产生的必要条件。在薄板的焊接过程中, 可以观察到激光与金属作用产生的强烈蒸发, 并伴随着较大的“滋滋”声音, 同时还出现强烈的蓝光。

由于强光的屏蔽, 使在焊接中对熔池和小孔的观察十分困难。采用焊接过程中突然断光的方法, 使熔池和小孔部分保留下来, 还可以得到部分信息。图4是断光处熔池的形貌。从图可清楚看出由金属反冲压力所形成的蒸发坑。特别值得注意的是: 蒸发坑中有一个针眼, 这个现象几乎存在于所有穿透焊



(a) 小孔痕迹(×22)



(b) 小孔高倍像(×1600)

图4 断光处熔池形状及小孔痕迹(SEM)

试样中,这个针眼被认为是焊接中小孔效应留下的痕迹。

### 3. 与电子束焊和大功率 CO<sub>2</sub> 激光焊的比较

人们对电子束焊已积累了许多数据、资料 and 曲线。激光焊和电子束焊同属于高能束焊接,因此电子束焊的一些结果和规律对激光焊仍有一定的参考指导作用。常用的是

Hablian 曲线,见图5。

从图5可以看出,大功率 CO<sub>2</sub> 激光深熔透焊的实验数据都能与电子束焊的实验曲线很好地相符合。曲线下方是小功率 CO<sub>2</sub> 激光焊薄板的结果,从中得出这样一个结论:只有射束孔道产生的深熔透焊的实验数据才能与曲线相符合;反之若激光焊的实验数据与曲线相符合,就可以推断其焊接是以深熔方式进行的;不产生小孔的传热熔化焊的实验数据偏于曲线的下方。

本文用硅钢薄板为例进行穿孔焊,3%硅钢的一些热物理常数见表1,焊接规范参数及相应的实验数据见表2。把表中的数据画在图5中标为“×”,可以看出本文的实验结果和电子束焊、大功率 CO<sub>2</sub> 激光焊的实验曲线相吻合。这表明小功率 CO<sub>2</sub> 激光焊接薄板的机理可类似于电子束焊和大功率 CO<sub>2</sub> 激光焊,与前人的小功率 CO<sub>2</sub> 激光焊薄板相比,在功率和其它条件相同时可以获得较高的焊速,在焊速相同的条件下只需较小的功率就可获得相同的熔深,即 CO<sub>2</sub> 激光焊薄板,

表1 3% 硅钢的几个热物理常数

$\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	$C_p$ (J/g·°C)	$\bar{K}$ (J/cm·s·°C)	$\bar{D}$ (cm <sup>2</sup> /s)	$\bar{T}_m$ (°C)	$h$ (cm)
7.65	0.681	0.270	0.052	1925	0.035

表2 薄板小功率 CO<sub>2</sub> 激光焊实验数据

试样 编号	$P$ (W)	$V$ (cm/s)	$d$ (cm)	$\frac{h\bar{K}\bar{T}_m}{P}$	$\frac{Vd}{\bar{D}}$
2.21(A)	420	3.75	0.05	0.041	3.62
2.21(1)	400	3.75	0.05	0.044	3.61
3.3(9)	310	2.88	0.05	0.056	2.77
3.30(1)	325	2.59	0.05	0.054	2.49
3.31(4)	340	2.34	0.05	0.051	2.25
3.31(5)	330	2.21	0.05	0.053	2.12
4.26(1)	310	2.88	0.03	0.059	1.65
4.26(28)	200	2.03	0.03	0.091	1.16
4.26(36)	250	2.34	0.03	0.073	1.35



图5 与电子束焊和大功率 CO<sub>2</sub> 激光焊的比较

$h$ ——焊接熔深(cm);  $P$ ——能束的功率(W);  $d$ ——能束斑点直径(cm);  $V$ ——焊接速度(cm/s);  $\bar{K}$ ——材料的平均导热率(J/cm·s·°C);  $\bar{D}$ ——材料的平均导热系数(cm<sup>2</sup>/s);  $\bar{T}_m$ ——材料的修正熔点

穿孔焊比熔化焊速度快得多。

由上述三方面可以得出：薄板的小功率CO<sub>2</sub>激光焊，除了传热熔化焊外，还有“小孔效应”的机理，即焊接过程中熔池里始终存在着一个穿透小孔。类似结果不仅在硅钢薄板的焊接中出现，而且存在于其它材料如不锈钢、马口铁薄板的焊接中。

### 三、小孔产生的最小功率和功率密度

金属在一定功率密度的激光作用下温度迅速升高直至蒸发是小孔产生的必要条件，在小孔产生前，薄板的加热过程仍然可用热传导理论加以描述。为此先作如下假设：

(1) 激光斑点上的功率密度服从高斯分布，即：

$$q(r) = q_m \exp(-r^2/b^2) \quad (1)$$

式中  $q_m$  为光斑中心最大功率密度； $b$  为光斑半径。

(2) 材料的热物理性能不随温度变化，并取一定温度范围内的平均值。

(3) 激光加热过程中薄板下表面是绝热的。

上述假设下，在以光束中心与薄板下表面的交点为坐标原点的运动坐标系中，温度分布可用下式表示：

$$\begin{aligned} T(x, y, z, t) &= \frac{2P_1}{C_p \rho (4\pi D)^{\frac{3}{2}}} \cdot \exp\left[-\frac{V(x-Vt_0)}{2D}\right] \\ &\times \int_0^t \frac{dt'}{\sqrt{t'(t'+t_0)}} \\ &\times \exp\left[-\frac{(x-Vt_0)^2 + y^2}{4D(t'+t_0)}\right] \\ &- \frac{V^2}{4D}(t'+t_0) \left\{ \exp\left[-\frac{(z-h)^2}{4Dt'}\right] \right. \\ &\left. + \exp\left[-\frac{(z+h)^2}{4Dt'}\right] \right\} \quad (2) \end{aligned}$$

式中， $P_1$  为薄板所吸收的有效激光功率， $P_1 = \varepsilon P$ ， $\varepsilon$  是薄板表面对激光的吸收率， $P$  是激光功率； $C_p$  为材料的平均比热(J/g·°C)； $\rho$

为材料的密度(g/cm<sup>3</sup>)； $t_0$  为热时间常数， $t_0 = b^2/4D$ (s)； $D$  为平均导温系数(cm<sup>2</sup>/s)； $b$  为光束半径(cm)； $h$  为板厚(cm)。

上面的公式没有考虑金属的熔化热，根据文献[3]，熔化热可近似等效为熔点的升高，即用修正熔点代替理论熔点，对于铁基合金，修正熔点  $\bar{T}_m$  约 1925°C，相应修正沸点  $\bar{T}_v$  约 3300°C。

#### 1. 理论计算

为了计算小孔产生的最小功率，这里又引入两条假设：

(1) 薄板上表面的最高温度一达到材料的修正沸点  $\bar{T}_v$  即认为小孔形式；

(2) 激光与材料的作用时间  $t$  定义为整个光束斑点通过材料上一点的时间。若光斑直径为  $d$ ，焊速为  $V$ ，则  $t = d/V$ 。在本文的实验中， $V$  在 10.0~37.5 mm/s 的范围内，当  $d = 0.3$  mm 时  $t$  约 0.008~0.03 s； $d = 0.5$  mm， $t$  约 0.013~0.05 s。

在上述假设下，可以把运动光束的加热转变成固定光束的加热计算。在(2)式中，令  $V = 0$ ，光斑中心加热温度最高，该点坐标(0, 0,  $h$ )，代入(2)则有：

$$\begin{aligned} T(0, 0, h, t) &= \frac{2P_1}{C_p \rho (4\pi D)^{\frac{3}{2}}} \int_0^t \frac{dt'}{\sqrt{t'(t'+\frac{b^2}{4D})}} \\ &\times \left[ \exp\left(-\frac{h^2}{Dt'}\right) + 1 \right] \quad (3) \end{aligned}$$

把  $t$  和  $b = \frac{d}{2}$  代入(3)并令  $T(0, 0, h, t) = \bar{T}_v$ ，则可求得使光斑中心处材料开始蒸发的最小有效功率  $P_1$ 。考虑到  $\varepsilon$ ，就可求得小孔产生所必需的最小功率  $P$  (此处  $\varepsilon$  取为 0.5)。表 3 是计算结果(材料为板厚  $h = 0.35$  mm 的 Q112B 硅钢薄板)。

#### 2. 实验结果

表 4 是实验测得的薄板(0.35 mm 厚 Q112B 硅钢)激光焊中产生小孔的最小功率和光斑直径。理论和实验结果是较为接近的。

表3 产生小孔的最小功率和功率密度计算值

光斑直径 (mm)	有效功率 (W)	光束功率 (W)	功率密度 (W/cm <sup>2</sup> )
0.3	53~61	106~122	1.5~1.7×10 <sup>5</sup>
0.5	88~110	176~220	0.9~1.1×10 <sup>5</sup>

表4 产生小孔的最小功率和功率密度实验值

透镜焦距 (mm)	光斑直径 (mm)	激光功率 (W)	功率密度 (W/cm <sup>2</sup> )
80	0.3	180	2.5×10 <sup>5</sup>
150	0.5	310	1.6×10 <sup>5</sup>

(注:表中功率是激光器输出功率,未考虑导光系统的损耗)。

#### 四、壁聚焦效应和小孔稳定存在的焊速范围

当金属在激光作用下开始蒸发后,蒸气的反冲压力将改变液态熔池的表面形状,形成一个凹坑,凹坑周围是倾斜的壁,当激光照射到坑壁上,一部分被吸收,一部分被反射,若反射光在坑底某处重新会聚会产生壁聚焦效应。在离焦量  $\Delta F < 0$  的范围内,光线与孔壁夹角较小,光线更容易向下传播形成壁聚焦效应。在  $\Delta F > 0$  的范围内,光线与孔壁夹角较大,所反射的光线不能会聚。在薄板的焊接中,虽然板薄,也产生壁聚焦效应,见图6。在  $|\Delta F|$  相等的条件下,光斑大小一样,但  $\Delta F > 0$  时产生小孔所需功率比  $\Delta F < 0$  时大。这个差别,就是壁聚焦效应产生的结果。

在功率一定的条件下,有一个速度范围使小孔稳定存在。焊速太小则小孔失稳扩大,即过渡的加热产生过大的金属蒸气反冲压力和过多的熔化金属,使液态熔池塌落造成切穿;速度过高则金属不能蒸发或蒸发很少,所产生的压力不足以维持小孔的存在,造成未焊透。因此除了功率密度必须满足外,适当的功率和焊速的搭配也是保证薄板穿孔焊稳定进行的重要条件。

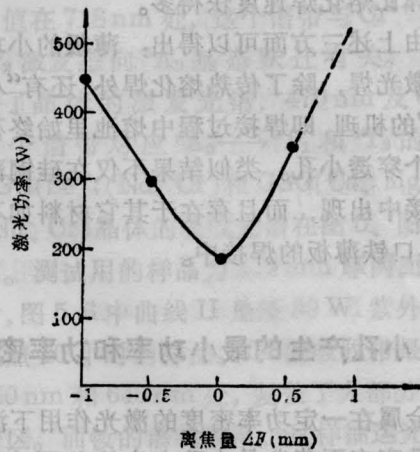


图6 产生小孔的最小功率与离焦量的关系  
材料 Q112B, 厚 0.35 mm,  $f=80$  mm

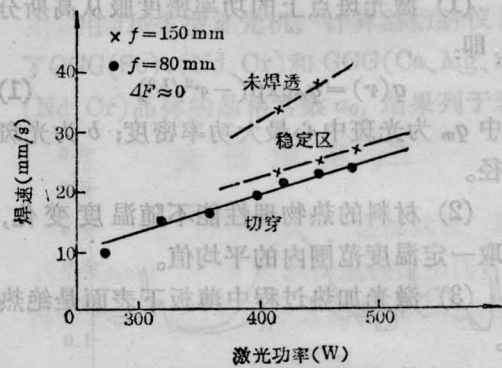


图7 小孔稳定存在的焊速功率条件  
材料 Q112B, 板厚 0.35 mm

#### 五、结 论

1. 在一定条件下,薄板的小功率 CO<sub>2</sub> 激光焊存在着“小孔效应”的焊接机理。
2. 薄板小功率 CO<sub>2</sub> 激光焊的小孔效应可以使焊接速度比常规的传热熔化焊大为提高,可单面焊双面成形,是获得全熔透、成形良好焊缝的标志。

#### 参 考 文 献

[1] J. M. Webster; *Metal Progress*, 1970, 11.  
[2] M. Banas; *Opt Engineering*, 1978, 17, No. 3, 6.