

自保护药芯焊丝激光-电弧复合热源堆焊参数对焊道表面成形的影响

刘西洋^{1,2}, 孙凤莲¹, 王君宇², 许可贵², 杨凤君²

(1. 哈尔滨理工大学 材料科学与工程学院, 哈尔滨 150080; 2. 哈尔滨焊接研究院有限公司, 哈尔滨 150028)

摘要:以自保护药芯焊丝(414N-O)为研究对象,借助焊道表面成形系数来评价自保护药芯焊丝激光-电弧复合热源堆焊焊道的表面成形特征,研究了自保护药芯焊丝激光-电弧复合热源堆焊过程中堆焊参数对焊道表面成形的影响。结果表明,复合热源堆焊过程中,激光的加入明显降低了自保护药芯焊丝电弧作用点漂移概率,有效地克服了自保护药芯焊丝长弧堆焊气孔问题,降低了电弧对工件表面的作用能量。堆焊参数中,光丝前后位置和光丝间距对焊道表面成形特征起决定性影响,激光前置时光丝间距对焊道表面成形影响显著,激光后置时则影响较小;光丝间距 $D_{LA}=0$ mm 和 $D_{LA}=+2$ mm 时,有利于焊道表面成形;光丝间距 $D_{LA}=-2$ mm 时,恶化了焊道表面成形;激光功率、堆焊速度、堆焊电流和堆焊电压对焊道余高影响显著,激光功率、堆焊电流和堆焊电压对焊道表面成形系数影响显著,焊丝伸出长度对焊道余高和焊道表面成形系数影响较小。

关键词:激光堆焊; 复合热源堆焊; 自保护药芯焊丝; 堆焊参数; 焊道表面成形

中图分类号: TG 456.7 **文献标识码:** A **doi:**10.12073/j.hjxb.2018390074

0 序 言

近年来,随着电弧焊设备和激光器性能的提高,激光-电弧复合焊接技术发展迅速,现代焊接技术高效化、实用化的发展,适应新材料、新结构、高效优质焊接的生产需要,激光-电弧复合焊接技术作为一种优质、高效、节能的焊接方法,已成为当前国际上的一项热门技术和研究热点^[1-2]。

大多数焊接工作者主要在焊接连接领域研究激光-电弧复合热源焊接技术,激光-电弧复合热源焊接的应用研究主要是针对高速薄板焊接、中厚钢板焊接、高强钢、钛合金、不锈钢和铜铝合金等高反射材料的焊接等,其目的是提高焊接效率、增大熔深、减小焊接变形,为连接领域服务,且在焊接工艺、机理、接头性能、数值模拟等方面已经取得了优异的成绩^[3-6],但在堆焊领域主要还是采用激光熔敷和激光填丝^[7-8]。目前激光-电弧复合热源焊接在堆焊领域特别是在自保护药芯焊丝激光-电弧复合热源堆焊方面国内外相关研究报道极少。

通过该试验研究了自保护药芯焊丝激光-电弧复合热源堆焊过程中堆焊参数(堆焊电流、堆焊电压、激光功率、堆焊速度、光丝间距、光丝前后位置、

焊丝伸出长度)对焊道表面成形的影响,分析了复合热源堆焊过程中堆焊参数对焊道表面成形特征的影响规律。

1 试验方法

1.1 试验条件及试验参数

试验用激光器为额定功率6 kW的光纤激光器,输出波长为1.07 μm 的连续波激光,聚焦透镜焦距为300 mm,焦点直径为0.6 mm。堆焊电源型号为NB-500IGBT,采用直流反接。焊丝选用英国WA的CHROMECORE 414N-O,试板选用Q235钢板。

试验中依次选取一个堆焊参数作为变量,其它堆焊参数不变,进行堆焊试验,测量其对应焊道的余高及熔宽,并计算其余高-熔宽比值(焊道表面成形系数),作为依据分析自保护药芯焊丝激光-电弧复合热源堆焊参数对焊道表面成形特征的影响规律。选定的基础试验参数见表1。

表1 选定的基础试验参数

Table 1 Basic parameters of selected

光丝间距 D_{LA}/mm	光丝 位置	堆焊电压 U/V	堆焊电流 I/A	激光功率 P/kW	堆焊速度 $v/(\text{m}\cdot\text{min}^{-1})$
-2,0,+2	激光前置	26	220	2.0	0.6

1.2 焊道表面成形系数

自保护药芯焊丝激光-电弧复合热源堆焊焊道表面成形可以用焊道余高和焊道金属表面的铺展性来描述,焊道金属表面的铺展性可以用焊道表面成形系数来描述,定义焊道的余高 h 与熔宽 b 的比值($Y = h/b$)为焊道表面成形系数,即焊道余高越小,表面成形系数越小,表明焊道表面成形越好.图1为单一电弧堆焊和复合热源堆焊下的焊道横截面.

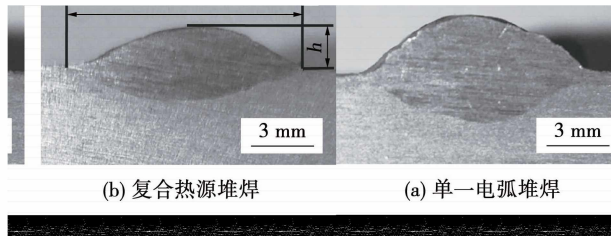


图1 单一电弧堆焊和复合热源堆焊下的焊道横截面

Fig. 1 Bead cross section of Hybrid surfacing and single arc surfacing

2 试验结果与分析

2.1 光丝间距和光丝前后位置对焊道表面成形的影响

在试验中,光丝间距 D_{LA} 用激光光斑中心到焊丝端头与工件表面接触点的距离来表示,定义激光光斑作用在母材上,光丝间距为正值;激光光斑作用在焊丝上,光丝间距为负值.光丝前后位置指沿着堆焊方向激光和焊丝的前后位置,包括激光前置和激光后置.图2为光丝间距和光丝前后位置示意图.

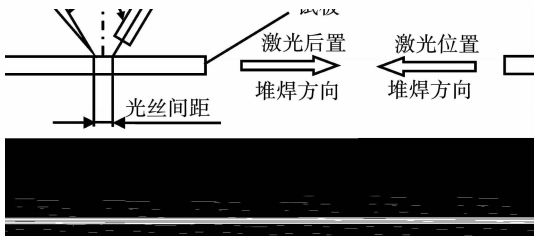
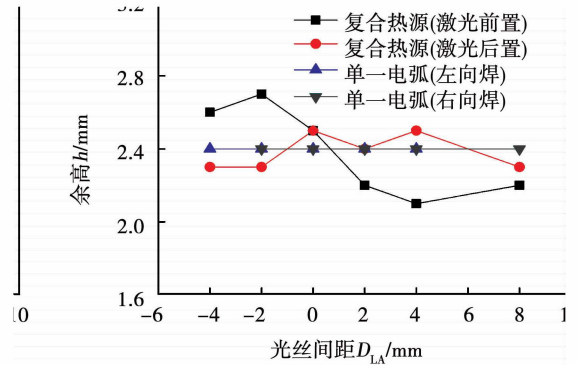


图2 光丝间距和光丝前后位置示意图

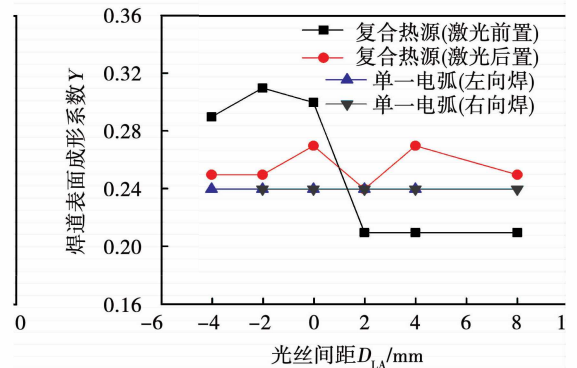
Fig. 2 Diagram of the anteroposterior position and distance between laser and wire

图3为不同光丝前后位置下单一电弧堆焊和复合热源堆焊焊道表面成形随着光丝间距的变化曲线.如图3所示,采用不同的光丝前后位置、光丝间距对复合热源堆焊焊道余高和表面成形系数影响规律不同.从图3a可知,激光前置时,复合热源堆焊

焊道余高随着光丝间距的增加先减小后增大,最终趋近于单一电弧堆焊焊道的余高.当光丝间距 $D_{LA} = +4$ mm时,余高($h = 2.1$ mm)达到最小值,并存在一个分界点,即光丝间距 $D_{LA} < 0.5$ mm时复合热源堆焊焊道余高大于单一电弧堆焊, $D_{LA} > 0.5$ mm时则相反.



(a) 余高



(b) 焊道表面成形系数



图3 光丝间距对焊道表面成形的影响

Fig. 3 Influence curve of D_{LA} to bead appearance

自保护药芯焊丝堆焊采用平特性电源,送丝速度稳定,通过调节电流来维持电弧电压恒定,即电弧长度恒定.激光的加入,加快了焊丝的熔化速度,增加了电弧长度,促使电弧电压增大,导致实际输出电流减小来维持电弧电压恒定.光丝间距越近,激光作用到焊丝的能量越多,焊丝熔化所需实际堆焊电流越小,同时激光和电流作用到工件表面的能量越少,熔池越小,降低了工件表面的润湿性,不利于液态熔滴的铺展,表现为复合热源堆焊焊道余高增大;反之光丝间距越远,工件表面的润湿性越好,越有利于液态熔滴的铺展,余高减小.

激光后置时,复合热源堆焊焊道余高随着光丝间距的变化不大,与单一电弧堆焊焊道余高相近.随着光丝间距的增大,激光降低实际输出堆焊电流

的能力变弱,光丝间距正值时,堆焊电流减少幅度不大,对焊道余高影响小;光丝间距为负值时,激光作用在焊丝上,堆焊电流减少幅度增大,促使焊道余高增大,同时通过高速摄像发现,激光的加入降低了自保护药芯焊丝电弧作用点的漂移概率(图4),且电弧作用点偏向激光,当激光后置时,使得电弧作用点偏向熔池后部,促使焊道余高减小,上述两方面的原因使得复合热源堆焊焊道的余高变化不大。

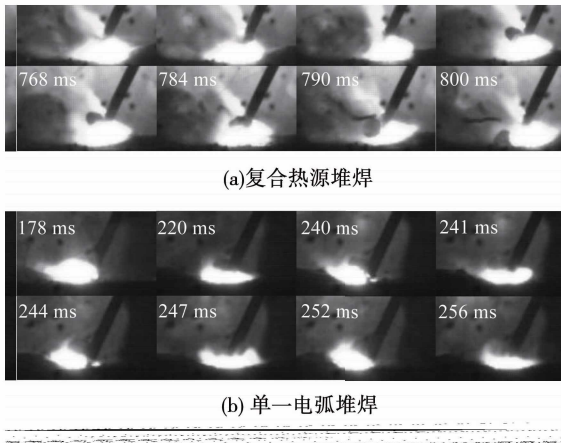


图4 复合热源堆焊与单一电弧堆焊高速摄像形貌

Fig. 4 High speed camera figure of Hybrid surfacing and single arc surfacing

从图3b可知,激光前置时,复合热源堆焊焊道表面成形系数随着光丝间距的增加而减小,与对余高的影响类似,同样存在一个分界点,光丝间距 $D_{LA} < 1.5$ mm复合热源堆焊焊道表面成形系数大于单一电弧堆焊, $D_{LA} > 1.5$ mm则相反。激光的加入,一方面降低了实际输出堆焊电流,电弧对熔池的扩展性变弱,熔池变小,不利于焊道金属的铺展;一方面对工件表面起到了预热作用,有利于电弧对熔池扩展,提升了堆焊金属的铺展性。说明当光丝间距 $D_{LA} < 1.5$ mm时,激光对堆焊电流的影响起主导作用,不利于焊道成形,反之激光对工件表面的预热起主导作用,有利于焊道成形。

激光后置时,复合热源堆焊焊道表面成形系数随着光丝间距的变化不大,略高于单一电弧堆焊,意味着激光的加入恶化了焊道金属的铺展性;同时激光的加入,同样降低了实际输出堆焊电流,不利于熔池的扩展,焊道表面成形系数大,即焊道高而窄,不利于焊道成形。

2.2 激光功率对焊道表面成形的影响

图5为不同光丝间距下单一电弧堆焊和复合热源堆焊焊道表面成形随着激光功率的变化曲线。由图5所示,复合热源堆焊焊道余高和焊道表面成形

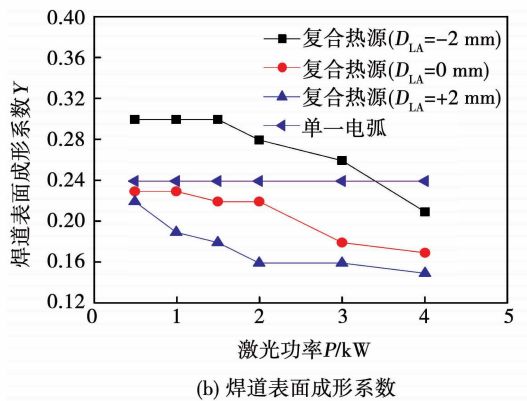
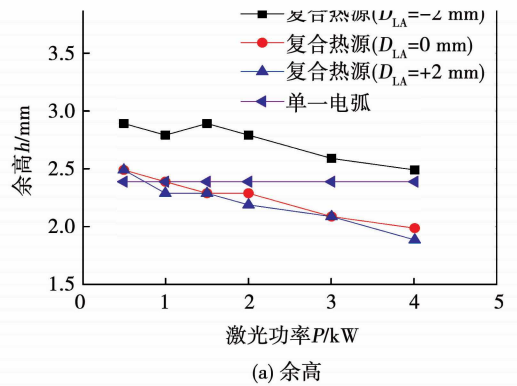


图5 激光功率对焊道表面成形的影响

Fig. 5 Influence curve of laser power to bead appearance

系数都随着激光功率的增大而减小,这是因为随着激光功率的增大,透过电弧、保护气和渣的激光能量增多,增加了复合热源堆焊的热输入,改善了工件表面的润湿性,有利于焊道的表面成形。

光丝间距 $D_{LA} = -2$ mm时,复合热源堆焊焊道余高和焊道表面成形系数都大于单一电弧堆焊,降低了焊道金属的铺展性,随着激光功率的增加降低幅度减小,当激光功率 $P > 4.0$ kW时可以转变为提高焊道金属的铺展性;光丝间距 $D_{LA} = 0$ mm和 $D_{LA} = +2$ mm时,复合热源堆焊焊道余高和焊道表面成形系数都小于单一电弧堆焊,改善了焊道金属的铺展性,随着激光功率的增加改善效果更加明显。

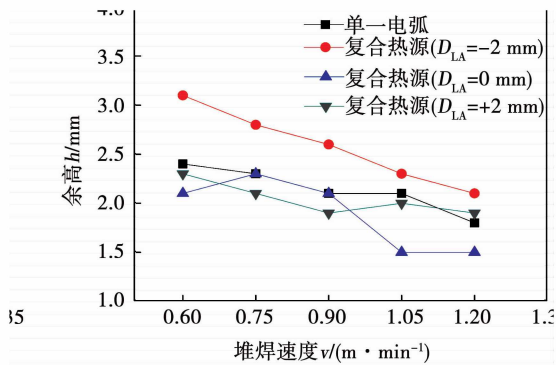
如图5b所示,光丝间距 $D_{LA} = -2$ mm, $D_{LA} = 0$ mm, $D_{LA} = +2$ mm时,复合热源堆焊焊道表面成形系数随着激光功率的变化呈明显阶梯分布,即光丝间距 $D_{LA} = -2$ mm焊道表面成形系数最高,光丝间距 $D_{LA} = +2$ mm焊道表面成形系数最低,光丝间距 $D_{LA} = 0$ mm焊道表面成形系数居中。

光丝间距 $D_{LA} = -2$ mm, $D_{LA} = 0$ mm, $D_{LA} = +2$ mm时,实际反映了激光光斑三种作用位置,即光斑作用在焊丝上,光斑作用在熔滴或焊丝端头上,光斑作用在工件上。当光斑作用在焊丝上($D_{LA} = -2$ mm)时,激光的能量主要用于焊丝的熔化,大幅度降低了堆

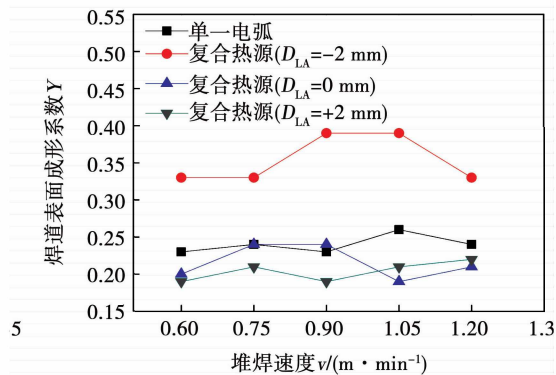
焊电流,虽然焊丝熔化速度没变,但工件获得能量减少,导致工件表面的润湿性变差,表现在复合热源堆焊焊道余高和焊道表面成形系数都大于单一电弧堆焊;当光斑作用在工件上($D_{LA} = +2$ mm)时,因与焊丝距离变大,焊丝受到激光的反射和热辐射能量变小,堆焊电流下降的幅度变小,同时激光能量对工件起到预热作用,提高了熔池的流动性,使得液态熔池更容易向四周铺展,复合热源堆焊焊道余高和焊道表面成形系数小于单一电弧堆焊;当光斑作用在熔滴或焊丝端头上($D_{LA} = 0$ mm)时,复合热源堆焊焊道余高和焊道表面成形系数介于光斑作用在焊丝上和光斑作用在工件上之间。

2.3 堆焊速度对焊道表面成形的影响

图6为不同光丝间距下堆焊速度对单一电弧堆焊和复合热源堆焊焊道成形的影响。由图6可知,单一电弧堆焊和复合热源堆焊焊道的余高随着堆焊速度的增大而减少,焊道表面成形系数随着堆焊速度的增大变化不大。这是因为随着堆焊速度的增加,焊丝熔化速度不变,即单位时间内工件表面获得的液态金属总量不变,而单位时间内液态金属沿堆焊方向铺展的距离加大,所以余高变小;同时单位时



(a) 余高



(b) 焊道表面成形系数

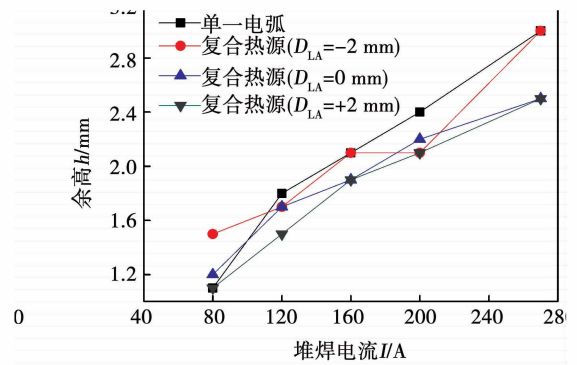
图6 堆焊速度对焊道表面成形的影响曲线

Fig. 6 Influence curve of surfacing speed to bead appearance

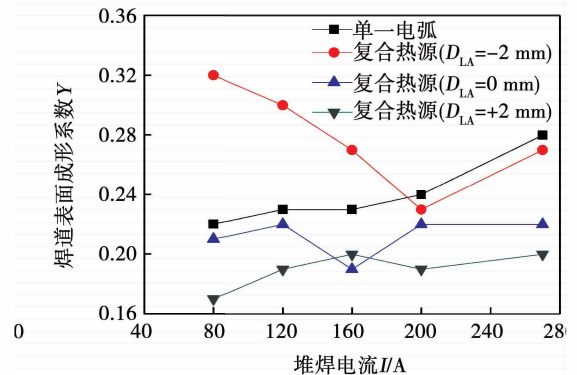
间内工件表面获得的能量减少,焊道熔宽随之变小,焊道表面成形系数变化不大。光丝间距 $D_{LA} = -2$ mm 时,复合热源堆焊焊道的余高和焊道表面成形系数明显高于单一电弧堆焊;光丝间距 $D_{LA} = 0$ mm 和 $D_{LA} = +2$ mm 时,复合热源堆焊焊道的余高和焊道表面成形系数低于单一电弧堆焊。说明激光的加入,并选择合适的光丝间距,可以提高堆焊速度,降低热输入,减少工件变形。

2.4 堆焊电流对焊道表面成形的影响

图7为不同光丝间距下堆焊电流对单一电弧堆焊和复合热源堆焊焊道表面成形的影响。如图7a所示,单一电弧堆焊和复合热源堆焊焊道的余高都随着堆焊电流的增加而增大,且变化十分明显。这是因为堆焊电流的增大,是靠提高送丝速度来实现的,送丝速度的提高,增加了工件表面金属填充量,虽然热输入也随之增大,但对熔化焊丝的贡献大于对熔化母材的贡献,导致熔池流动性提升相对变慢,影响了液态金属的铺展,余高增大。如图7b所示,光丝间距 $D_{LA} = 0$ mm 和 $D_{LA} = +2$ mm 时,复合热源堆焊焊道表面成形系数随着堆焊电流的增大而略有增加,且复合热源堆焊焊道表面成形系数小于单一电



(a) 余高



(b) 焊道表面成形系数

图7 堆焊电流对焊道表面成形的影响曲线

Fig. 7 Influence curve of surfacing current to bead appearance

弧堆焊。这是因为复合热源堆焊时,电弧加热面积对焊道熔宽起主要作用,电弧的加热面积与堆焊电流大小成正比,随着堆焊电流的增加,电弧的加热面积增大,促使焊道熔宽也增大,所以复合热源堆焊焊道表面成形系数变化不大。复合热源堆焊时,激光的加入,一方面促使实际输出堆焊电流下降,焊道熔宽变小,另一方面激光-电弧之间的耦合作用促使焊道熔宽变大,且影响程度要大于对堆焊电流的影响,所以复合热源堆焊焊道表面成形系数小于单一电弧堆焊。

光丝间距 $D_{LA} = -2$ mm 时,焊道表面成形系数随着堆焊电流的增加先减少后增大,当电流 $I = 200$ A 时,焊道表面成形系数存在最小值。这是因为此时激光作用在焊丝上,堆焊电流下降幅度随着堆焊电流的增加而减少,电流为 80 ~ 120 A 时,下降的幅度较大,约 50%,此时激光起主导作用,焊丝的能量主要来自激光的能量,工件表面获得能量很小,熔池小,液态金属来不及铺展,表现为焊道表面成形系数很大;随着堆焊电流的增加,堆焊电流下降的幅度变小,工件表面获得的能量增加,熔池变大,液态金属铺展性变好,当堆焊电流 $I = 200$ A 时,焊道表面成形系数达到最小值,随着堆焊电流继续增加,堆焊电流起主导作用,焊丝熔化所需的能量主要由电弧提供,工件表面获得能量的增加梯度变小,焊道表面成形系数增大。

2.5 堆焊电压对焊道表面成形的影响

图 8 为不同光丝间距下堆焊电压对单一电弧堆焊和复合热源堆焊焊道表面成形的影响。如图 8a 所示,单一电弧堆焊和复合热源堆焊堆焊电压对焊道余高影响明显,余高随着堆焊电压的增大而减小,光丝间距 $D_{LA} = 0$ mm 和 $D_{LA} = +2$ mm 时复合热源堆焊焊道的余高小于单一电弧堆焊,光丝间距 $D_{LA} = -2$ mm 时则相反。

在堆焊过程中,发现堆焊电压 $U \leq 16$ V 时,无论是单一电弧堆焊还是复合热源堆焊焊道都无法成形,单一电弧堆焊过程中,堆焊电压 $U \geq 28$ V 时,焊道表面出现大量气孔,而复合热源堆焊堆焊电压 $U = 34$ V 时,焊道表面无气孔,说明激光的加入能降低自保护药芯焊丝堆焊的气孔敏感性。当堆焊电压过小时,堆焊热输入很低,导致熔池很小,工件表面润湿性较差,液态熔滴无法铺展,在工件表面上表现为断续颗粒状,无法成形;随着堆焊电压的增加,熔池得到有效扩展,工件表面润湿性提高,有利于液态熔滴铺展,焊道金属变得连续,余高减少;同时电弧长度随着堆焊电压的升高而增加,即焊丝端头到工件表面距离增加,电弧力减弱,为自保护药芯焊丝熔

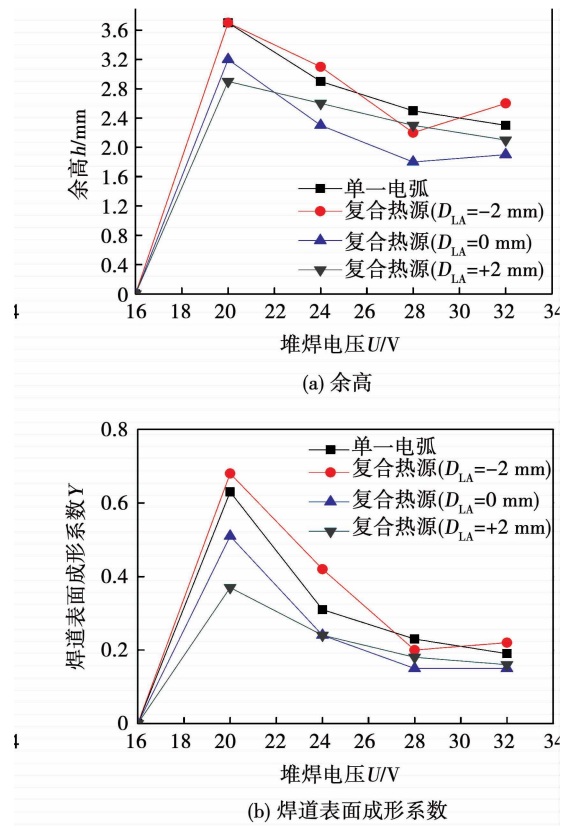


图 8 堆焊电压对焊道表面成形的影响曲线

Fig. 8 Influence curve of surfacing voltage to bead appearance

滴成长提供了足够空间和时间,熔滴过渡时间变长,保护效果变弱,产生气孔,而激光的加入提高了电弧等离子体和熔滴的温度,降低了表面张力,有利于细化熔滴,缩短了熔滴过渡时间,增强了保护效果,减少了气孔产生。

如图 8b 所示,焊道表面成形系数随着堆焊电压增加变化显著,随着堆焊电压的增大,焊道表面成形系数大幅度减小,这是因为随着堆焊电压的增加,电弧弧柱横截面积增大,电弧作用范围增加,在工件上的作用能量加大,焊道熔宽增加比较明显,焊道表面成形系数变小,增强了焊道金属的铺展性,但要注意电压升高对熔滴保护效果的影响。

2.6 焊丝伸出长度对焊道表面成形的影响

图 9 为不同光丝间距下焊丝伸出长度对单一电弧堆焊和复合热源堆焊焊道表面成形的影响。如图 9 所示,单一电弧堆焊和复合热源堆焊焊道的余高和表面成形系数随着焊丝伸出长度的增加而增大。

电焊机输出电压 U_0 可表示为

$$U_0 = U_c + U_g + U_d \quad (1)$$

式中: U_c 为电焊机内阻电压、电缆电阻电压、接触电

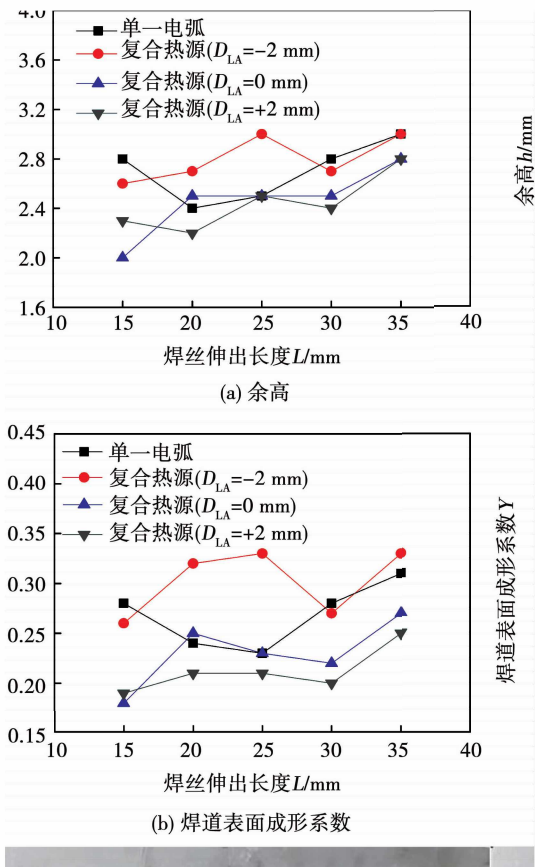


图9 焊丝伸出长度对焊道表面成形的影响曲线

Fig. 9 Influence curve of wire extension to bead appearance

阻电压和工件电阻电压之和; U_g 为焊丝伸出长度电阻电压; U_d 为电弧电压。

$$U_0 = I(R_c + R_g + R_d) \quad (2)$$

式中: I 为电焊机输出电流; R_c 为电焊机内阻、电缆电阻、接触电阻和工件电阻之和; R_g 为焊丝伸出长度电阻; R_d 为电弧电阻。

自保护药芯焊丝粉芯中含有大量的矿物质粉, 焊丝截面电阻很大。随着焊丝伸出长度增加, R_g 增大, 由于 U_0 恒定, 整个回路的 I 减少, 同时 R_g 上的压降 U_g 增加, 而 R_c 上的压降 U_c 减少; 另外, 由于焊丝伸出长度增加, 焊丝伸出长度部分电阻热增加, 所谓热丝效果显著, 导致实际输出电流 I 减少以维持 U_0 的恒定, 使得 U_c 和 I 减小, 工件表面获得的电弧能量减少, 焊道的余高和焊道表面成形系数增大, 不利于焊道成形。

3 结 论

(1) 复合热源堆焊过程中, 选择适合的光丝前后位置和光丝间距是改善焊道表面成形的先决条件。激光前置、光丝间距为 2 ~ 4 mm 时, 有利于焊道

表面成形。

(2) 激光加入自保护药芯焊丝电弧堆焊过程中, 明显降低了自保护药芯焊丝电弧作用点的漂移概率, 有效地克服了自保护药芯焊丝长弧堆焊的气孔问题, 改善了焊道表面成形。

(3) 复合热源堆焊焊道余高受激光功率、堆焊速度、堆焊电流和堆焊电压的变化影响显著; 焊道表面成形系数受激光功率、堆焊电流 ($D_{LA} = -2$ mm) 和堆焊电压的变化影响显著; 焊丝伸出长度对焊道余高和焊道表面成形系数影响较小。

参考文献:

- [1] 许新猴. 激光-电弧复合焊接技术综述[J]. 现代焊接, 2014(11): 8-11.
Xu Xinhou. Review on the technology of laser arc hybrid welding [J]. Modern Welding, 2014(11): 8-11.
- [2] 赵耀邦, 成群林, 徐爱杰, 等. 激光-电弧复合焊接技术的研究进展及应用现状[J]. 航天制造技术, 2014(4): 11-14.
Zhao Yaobang, Cheng Qunlin, Xu Aijie, et al. Recent advances in research and application of laser-arc hybrid welding technology [J]. Aerospace Manufacturing Technology, 2014(4): 11-14.
- [3] Neubert J, Kranz B. Characteristics and strength behaviour of laser hybrid welds on T-and butt joints considering European and international standards[J]. Welding in the World Le Soudage Dans Le Monde, 2013, 57(3): 373-382.
- [4] Suga T, Murai Y, Kobashi T, et al. Research on laser-arc hybrid welding of Ht780 steel[J]. Welding in the World Le Soudage Dans Le Monde, 2012, 56(11-12): 105-118.
- [5] Lorenz S, Kannengiesser T, Posch G. Solidwire vs. flux cored wire-comparing investigations for GMA-laser-hybrid welding[M]. Design, Fabrication and Economy of Welded Structures, 2008.
- [6] Lorenz S, Kannengiesser T, Posch G. Suitability of high-alloyed flux-cored wire electrodes for laser-GMA hybrid welding [J]. Welding & Cutting, 2012, 64(3): 181-187.
- [7] 钱兆勇, 钟敏敏, 刘文今, 等. 瓦楞辊高耐磨激光熔覆颗粒增强铁基复合涂层[J]. 中国激光, 2008, 35(8): 1271-1276.
Qian Zhaoyong, Zhong Minlin, Liu Wenjin, et al. High wear-resistant particulate reinforced composite coatings for corrugated rollers by laser cladding[J]. Chinese Journal of Lasers, 2008, 35(8): 1271-1276.
- [8] 徐国建, 刘爽, 杭争翔, 等. 激光堆焊单道 Co 基金属与 WC 混合粉末的性能研究[J]. 激光技术, 2014, 38(1): 132-136.
Xu Guojian, Liu Shuang, Hang Zhengxiang, et al. Characteristics of clad layer of mixture of stellite-6 and tungsten carbide powder by means of single-pass laser cladding[J]. Laser Technology, 2014, 38(1): 132-136.

作者简介: 刘西洋, 男, 1980 年出生, 硕士研究生. 主要研究方向为激光-电弧复合热源堆焊技术. 发表论文 5 篇. Email: 2004liuxiyang@163.com

通讯作者: 孙凤莲, 女, 博士, 教授, 博士研究生导师. Email: sunflian@163.com