铝合金电子束填丝焊接的送丝参数优化研究

汤莹莹[1] 王 磊[2] 张益坤[1] 夏 春[2] 谢美蓉[1] 陈 悦[1] 杨 宇[1]
（1. 首都航天机械有限公司，北京 100076；2. 南昌航空大学，南昌 330063）

摘要：针对带间隙薄壁件电子束焊接焊缝成形差的问题，基于5A06铝合金试板匹配5B06焊丝的表面堆焊试验，通过控制单一变量法，研究了不同送丝参数对电子束填丝焊接焊缝成形的影响。得出获得良好焊缝成形的送丝参数窗口为：采用前置送丝方式，送丝角度控制在15°～25°，焊丝干伸长控制在8～12mm，丝束处于部分相交状态，丝束交汇高度为0mm，丝束水平间距为0～1mm，在焊接线能量为432J/cm时，送丝速度控制在900～2400mm/min。

关键词：铝合金；电子束填丝焊接；送丝参数；焊缝成形

中图分类号：TG456.3 **文献标识码：**A

Optimization of Wire Feeding Parameters for Electron Beam Filling Welding of Aluminum Alloy

Tang Yingying[1] Wang Lei[2] Zhang Yikun[1] Xia Chun[2] Xie Meirong[1] Chen Yue[1] Yang Yu[1]
(1. Capital Aerospace Machinery Co., Ltd., Beijing 100076；2. Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063)

Abstract：To solve the problem of poor weld formation in electron beam welding of thin-walled parts with gaps, based on the surfacing welding test of 5A06 aluminum alloy plate matched with 5B06 welding wire, the influence of different wire feeding parameters on the weld formation of electron beam wire filling welding is carried out by controlling the single variable method. It is concluded that the optimal window of wire feeding parameters to obtain good weld forming is as follows: the front wire feeding mode is adopted, the wire feeding angle is controlled at 15°～25°, the dry elongation of the welding wire is controlled at 8～12mm, the welding wire and the electron beam are partially intersected, the intersection height and horizontal spacing between the welding wire and the electron beam are 0mm and 0～1mm respectively, and the wire feeding speed is controlled at 900～2400mm/min when the welding linear energy is 432J/cm.

Key words：aluminum alloy；electron beam wire filling welding；wire feeding parameters；weld forming

1 引言

铝合金密度小、比强度高、耐蚀性好且易于加工的优点非常符合航空航天产品高安全性、高可靠性以及低成本的需求，因而在航空航天领域广泛应用[1]。在铝合金产品制造过程中，经常涉及到零部件的焊接。电子束焊接因为功率密度高、真空环境保护好、焊缝质量优异、焊接变形小等优势，成为铝合金高质量焊接最常用的方法之一。但是，电子束的束斑尺寸很小，通常直径在0.8mm以下，对束缝对中精度、零件加工精度以及待焊件装配间隙的要求均比较高[2, 3]。在采用电子束焊接铝合金薄壁钣金零件时，受钣金成形精度的影响，零件之间经常存在局部装配间隙不满足电子束焊接要求的情况。若直接焊接，焊缝会出现咬边、凹陷、未熔合等成形缺陷，导致焊缝质量及接头强度达不到设计要求。

近些年，在电子束焊接的基础上衍生出来的电子束填丝焊接技术，通过在电子束焊接过程中同步向熔

作者简介：汤莹莹（1988），博士，焊接专业；研究方向：高能束焊接及其熔丝增材制造技术。
收稿日期：2022-04-17

池送进焊丝，能够降低对束缝对中精度、零件加工精度以及待焊件装配间隙的要求，解决带间隙产品焊缝成形差的难题。但是，焊丝送进不仅会引入多个参量，增加工艺参数优化的难度，而且使电子束的热力分配变得十分复杂[6~9]。

目前，关于铝合金的电子束填丝焊接研究还鲜有报道。本文以焊缝成形质量为考察目标，在 4mm 厚度的 5A06 铝合金试板上，通过开展一系列不同送丝参数条件下的电子束填丝焊接的表面堆焊（即熔覆）试验，一方面旨在理清不同送丝参数对铝合金填丝焊接焊缝成形的影响规律，另一方面旨在获得良好焊缝成形的送丝参数范围，为产品的电子束填丝焊接提供试验依据。

2　试验方法

电子束填丝焊接试验在配有外置送丝系统的德国 SST 公司 KS15-PN150KM 型真空电子束焊机上进行，采用表面堆焊方式，如图 1 所示。工件采用厚度 4mm 的 5A06 铝合金试板，焊丝采用直径 1.2mm 的 5B06 铝合金焊丝。

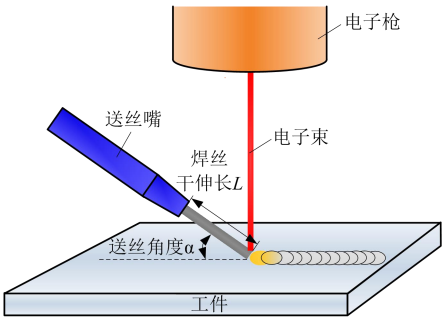


图 1　电子束填丝焊接示意图

电子束填丝焊接的主要工艺参数及设置见表 1。其中，送丝参数包括送丝方式、送丝角度α、焊丝干伸长 L、丝束位向关系和送丝速度 V_f。送丝方式是指焊丝相对于焊接方向的送进位置，分为前置、侧置和后置三种。如图 2 所示，前置送丝是指焊接过程中焊丝从焊接方向的正前方送向熔池的方式，侧置送丝是指焊接过程中焊丝从垂直于焊接方向送向熔池的方式，后置送丝是指焊接过程中焊丝从焊接方向的正后方送向熔池的方式。送丝角度α是指焊丝与工件之间的夹角，焊丝干伸长 L 是指焊丝从送丝嘴出口端到焊丝末端的长度（见图 1）。丝束位向关系是指焊丝末端与电子束之间的位置关系，可用丝束交汇高度 h 和丝束水平间距δ表征。如图 3 所示，丝束交汇高度 h 是指焊丝末端送至电子束束斑中心区域时焊丝末端到工件的垂直距离，丝束水平间距δ是指焊丝末端与工件的接触点与电子束中心线之间的水平距离。定义：当焊丝末端与工件的接触点位于电子束中心线的左侧时，$\delta>0$；反之，$\delta<0$。

表 1　电子束填丝焊接的主要工艺参数

工艺参数	初始值	变化范围
加速电压 U/kV	60	无
电子束流 I/mA	12	无
焦点状态	表面聚焦	无
焊接速度 V_w/mm·min^{-1}	1000	无
送丝方式	前置	前置/侧置/后置
送丝角度α/(°)	20	10～40
焊丝干伸长 L/mm	10	5~15
丝束交汇高度 h/mm	0	0～3
丝束水平间距δ/mm	0	−3～+5
送丝速度 V_f/mm·min^{-1}	1200	600～3000

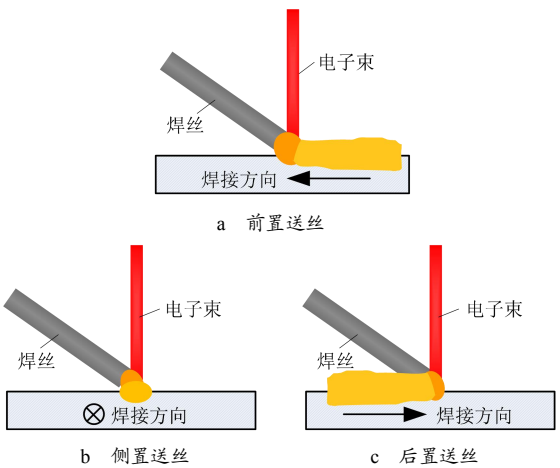


图 2　不同的送丝方式

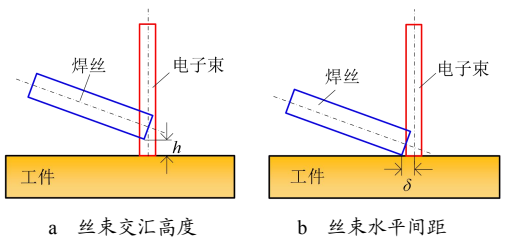


图 3　丝束位向关系表示

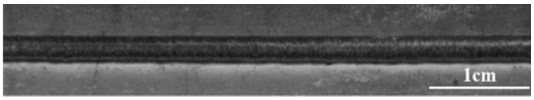
为研究不同送丝参数对电子束填丝焊接焊缝成形的影响规律，获得良好焊缝成形的送丝参数范围，本文采用控制单一变量法，即改变某一送丝参数时，保持其它参数为初始值。另外，通过焊机上配置的监视器观察焊接过程中的焊丝熔化过渡行为，用于辅助分析不同送丝参数对焊缝成形的影响。焊接后，使用单

反数码相机拍摄焊缝表面成形。

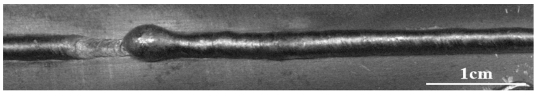
3　试验结果与分析

3.1　送丝方式的影响

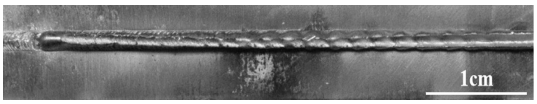
图 4 是三种送丝方式下的焊缝成形图像。可以看出，三者的焊缝成形有明显差异。前置送丝的焊缝连续、均匀、笔直；侧置送丝的焊缝局部有断续和焊瘤，笔直性稍差；后置送丝的焊缝存在大段锯齿形的咬边现象，成形最差。这是因为前置送丝时，焊丝直接指向熔池的前端，此区域存在大量的熔融金属，熔池尺寸比较大，有助于焊丝熔化金属进入熔池后在熔池内充分铺展，获得良好的焊缝成形，且对焊丝末端送入熔池的位置精度要求比较低，即对送丝扰动的包容性强，有利于保证焊接过程的稳定；后置送丝时，焊丝直接指向熔池的末端，此区域熔融金属面积小且温度梯度大，焊丝熔化金属进入熔池后还未充分铺展便凝固，焊缝成形差，对焊丝扰动的包容性弱，焊接过程的稳定性差；侧置送丝的焊接过程稳定性及焊缝成形质量介于前置送丝和后置送丝的之间，由于焊丝从熔池一侧送入，熔池金属容易被焊丝末端推向一侧，造成焊缝成形不对称。



a　前置送丝



b　侧置送丝



c　后置送丝

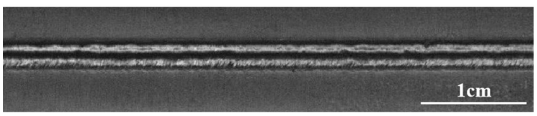
图 4　不同送丝方式下的焊缝成形

综合比较，前置送丝对送丝扰动的包容性更强，工艺稳定性更好，更易获得优质的焊缝。因此，前置送丝为最佳送丝方式。

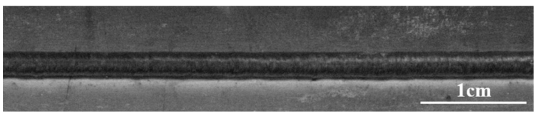
3.2　送丝角度的影响

图 5 为不同送丝角度下的焊缝成形图像。根据焊丝送进对电子束的遮挡作用，可以把送丝速度 V_f 分解为与电子束入射方向垂直和平行两个方向的分速度 V_{fx}、V_{fy}，如图 6 所示。其中，只有与电子束入射方向垂直的送丝速度 V_{fx} 对电子束有遮挡作用。由于 $V_{fx}=V_f\cos\alpha$，可见送丝角度α越小，V_{fx} 越大，相当于焊丝对电子束的遮挡越多，更多的电子束能量用于焊丝的熔化。根据图 5 所示，送丝角度α为 10°时，电子束用于熔化焊丝的能量充足，但用于熔化工件的能量相对较少，熔池尺寸比较小，容易发生送丝扰动而影响焊缝的连续性；送丝角度α为 15°～25°时，焊丝熔化量及熔池尺寸匹配比较合理，焊缝成形连续、均匀；送丝角度$\alpha\geqslant30°$时，焊丝熔化不充分，不能连续过渡到熔池中，焊缝成形断续且表面粗糙。

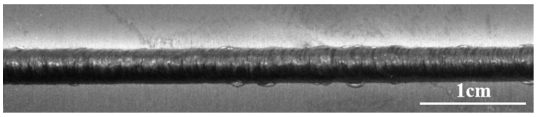
a　α=10°



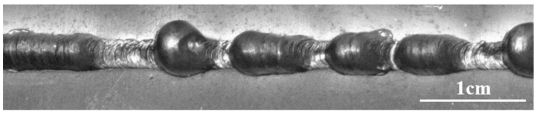
b　α=15°



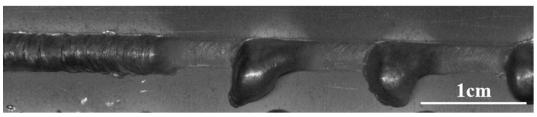
c　α=20°



d　α=25°



e　α=30°



f　α=40°

图 5　不同送丝角度下的焊缝成形

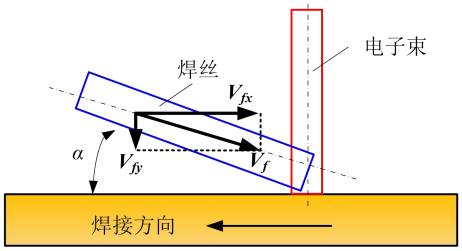
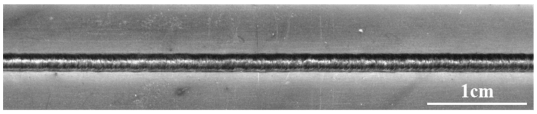


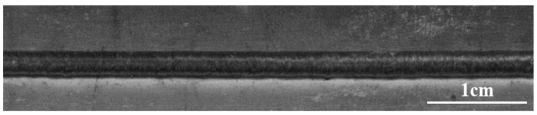
图 6　送丝速度分解示意图

3.3　焊丝干伸长的影响

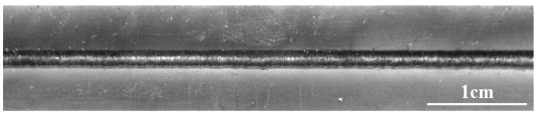
图 7 为不同焊丝干伸长下的焊缝成形图像。焊丝干伸长是影响焊丝挺直度的一个重要指标。理论上，焊丝干伸长越短，越容易保证焊丝送进的挺直度和位置准确性，获得稳定的焊接过程。根据图 7 所示，焊丝干伸长 L 在 5～12mm 范围内所得焊缝的成形质量差异不大，整条焊缝的成形连续、均匀；但是，当焊丝干伸长 L 增加到 15mm 时，焊接过程变得不稳定，焊缝成形存在断续和焊瘤现象。焊丝干伸长过短容易烧损送丝嘴，故综合确定焊丝干伸长 L 宜控制在 8～12mm。



a　L=5mm



b　L=10mm



c　L=12mm

d　L=15mm

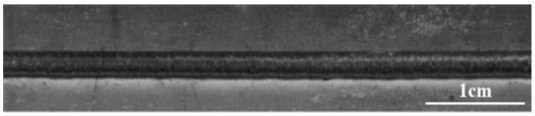
图 7　不同焊丝干伸长下的焊缝成形

3.4　丝束位向关系的影响

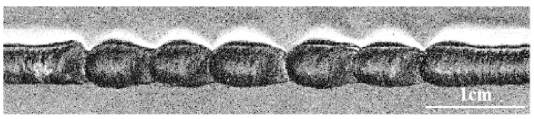
焊丝与电子束的相对位置（即丝束位向关系）可由它们分别沿垂直于焊接方向（Y 方向）和焊接方向（X 方向）上的位置偏差共同表征，分别以丝束交汇高度 h 和丝束水平间距 δ 定义。丝束位向关系决定着焊丝与工件的受热机制，因此恰当的设置十分重要。

3.4.1　丝束交汇高度

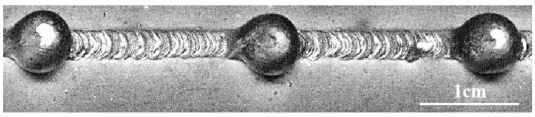
丝束交汇高度代表熔滴长大的最大空间。以丝束交汇高度 h 分别为 0mm、1mm、3mm 进行试验，获得焊缝成形如图 8 所示。可以看出，随着丝束交汇高度 h 的增加，焊接过程越不稳定，表现为焊缝成形的连续性越差。当丝束交汇高度 h 为 0mm 时，焊丝末端与熔池直接接触并持续熔化，熔滴过渡平稳；当丝束交汇高度 h 增至 1mm 时，焊丝熔化属于非接触式过渡，在焊丝末端形成的熔滴有一定的长大空间，熔滴在长大过程中会受到焊丝送进的扰动以及金属蒸汽发挥的反作用处于摆动状态，容易造成焊接过程的不稳定；当丝束交汇高度进一步增至 3mm 时，这种不稳定更加明显，导致焊缝成形随丝束交汇高度 h 的增加而变差。



a　h=0mm



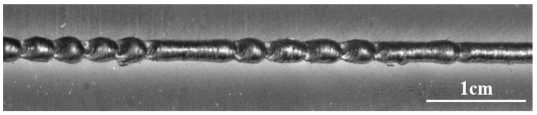
b　h=1mm



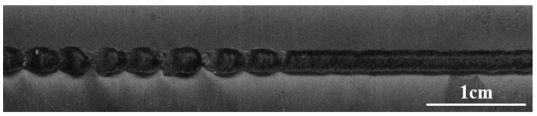
c　h=3mm

图 8　不同丝束交汇高度下的焊缝成形

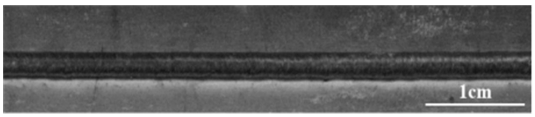
3.4.2　丝束水平距离



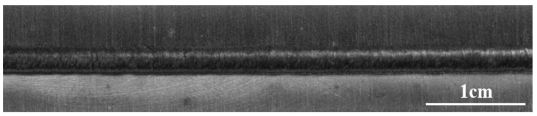
a　δ=−3mm



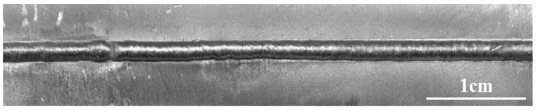
b　δ=−1mm



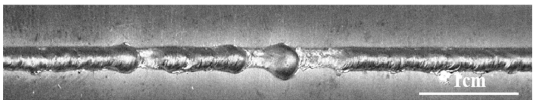
c　δ=0mm



d　δ=+1mm



e　δ=+3mm

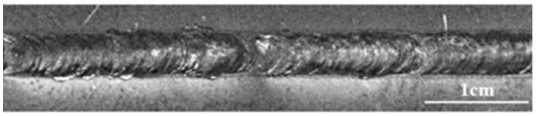


f　δ=+5mm

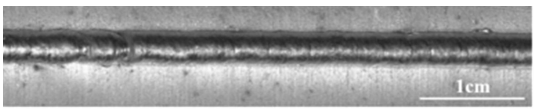
图 9　不同丝束水平间距下的焊缝成形

图 9 为不同丝束水平间距下的焊缝成形图像。当丝束水平间距δ为-3mm 和-1mm 时，丝束处于遮挡状态，此时焊缝呈周期性断续的特征；当δ为 0mm 和+1mm 时，丝束处于或基本处于部分相交状态，此时焊接过程稳定，焊缝成形良好；当δ为+3mm 和+5mm 时，丝束处于分离状态，焊接过程的稳定性又变差，故丝束水平间距δ宜控制在 0～1mm，此时丝束部分相交。

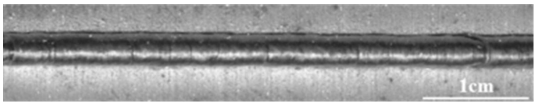
3.5 送丝速度的影响



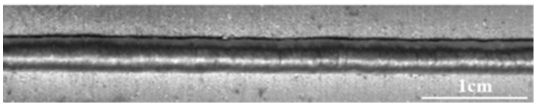
a V_f= 600mm/min



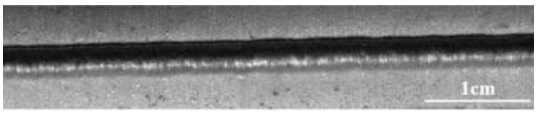
b V_f= 900mm/min



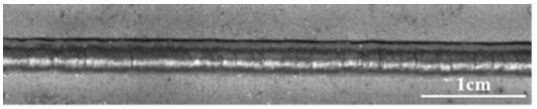
c V_f= 1500mm/min



d V_f= 1800mm/min



e V_f= 2100mm/min



f V_f= 2400mm/min

g V_f= 2700mm/min

h V_f= 3000mm/min

图 10 不同送丝速度下的焊缝成形

图 10 是不同送丝速度下的焊缝成形图像。可以看出，当送丝速度 V_f为 600mm/min 时，送丝量不足，焊丝熔化后不能及时向熔池过渡，焊缝成形粗糙且有断续现象；当送丝速度 V_f为 900～2400mm/min 时，送丝量较为充分，焊缝趋于连续；但是，当送丝速度 V_f为 2700～3000mm/min 时，送丝量过大，焊接熔池面积有限，过多熔化的焊丝不能在熔池中充分铺展而严重堆积。因此，在焊接线能量 UI/V_w=432J/cm 时（U、I、V_w 取值见表 1），合理的送丝速度 V_f范围为 900～2400mm/min。

4 结束语

本文使用 4mm 厚度的 5A06 铝合金试板匹配直径 1.2mm 的 5B06 铝合金焊丝，采用表面堆焊形式，通过控制单一变量法，研究了不同送丝参数对电子束填丝焊接焊缝成形的影响规律，获得良好焊缝成形的送丝参数窗口如下：

a. 相对侧置送丝和后置送丝，前置送丝对送丝扰动的包容性更强，焊接过程更稳定，焊缝成形良好。

b. 铝合金焊丝送进角度宜控制在 15°～25°，焊丝干伸长宜控制在 8～12mm。

c. 铝合金焊丝与电子束呈丝束部分相交状态，丝束交汇高度为 0mm，丝束水平间距宜控制在 0～1mm。

d. 在焊接线能量为 432J/cm 时，送丝速度宜控制在 900～2400mm/min。

参考文献

1 张钰. 铝合金在航天航空中的应用[J]. 铝加工，2009(3)：50～53

2 王静. 铝合金电子束焊接技术[J]. 电焊机，2011，41(8)：112～115

3 马正斌，刘金合，卢施宇，等. 电子束焊接技术研究及进展[J]. 电焊机，2012，42(4)：93～96

4 Tsukamoto S, Irie H, Inagaki M, et al. Electron beam welding with filler wire. Report 1 Effects of welding parameters on the distribution of filler metal[J]. Quarterly Journal of the Japan Welding Society, 1984, 2(4): 613～618

5 姚舜，李铸国，吴毅雄，等. 角焊缝低真空填丝电子束焊接[J]. 焊接学报，2000，21(3)：86～88

6 张健，张秉刚，李晓鹏. 丝束位向关系对电子束填丝堆焊焊缝成形的影响[J]. 焊接学报，2014(9)：41～44

7 锁红波，毛智勇，刘方军，等. 聚焦电流对电子束填丝焊接焊缝几何特征的影响[J]. 焊接学报，2007，28(3)：53～56

8 锁红波，李晋炜，吴冰，等. 不锈钢薄板电子束填丝焊接间隙裕度研究[J]. 航空精密制造技术，2007(2)：45～46，62

9 Zhang Binggang, Zhao Jian, Li Xiaopeng, et al. Analysis of metal transfer during electron beam welding with filler wire[J]. China Welding (English Edition), 2013, 22(4): 14～18