

单道多层电弧增材制造成形控制理论分析

张金田, 王杏华, 王 涛

(中国船舶重工集团公司第七二五研究所, 洛阳 471023)

摘 要: 文中采用冷金属过渡 (CMT) 技术, 围绕船用高强钢的电弧增材制造 (WAAM) 开展研究. 分析不同比例的保护气体对单道单层形貌尺寸的影响. 结果表明, 单道单层的润湿铺展能力随着保护气中 CO_2 含量的增加而提高, 并建立了能够准确预测 $80\%\text{Ar} + 20\%\text{CO}_2$ 混合气体保护下单道单层截面轮廓的全周期余弦函数模型. 依据单道多层电弧增材的成形特点, 利用面积关系并根据几何形貌建立了单道多层抬升量 h 的预测模型, 抬升量 h 预测值的相对误差不超过 3.50%. 通过建立抬升量预测模型, 为单道多层的电弧增材成形控制提供了理论支撑.

关键词: 冷金属过渡; 电弧增材制造; 单道单层; 单道多层

中图分类号: TG456.4

文献标识码: A

doi: 10.12073/j.hjxb.2019400314

0 序 言

电弧增材制造技术因设备成本低、成形效率高等优势而倍受关注^[1]. 成形尺寸精度直接决定了成形表面质量及后续精加工的材料去除量^[2].

单道单层作为电弧增材的基本单元, 分析其形貌尺寸是电弧增材工艺研究的基础. 目前, 单道单层截面轮廓曲线模型主要有三种^[3], 分别是抛物线模型 $f(x) = ax^2 + b$ 、圆弧曲线模型 $f(x) = \sqrt{a^2 - x^2} + b$ 和半周期余弦曲线模型 $f(x) = a \cos(bx)$. CMT 焊机通过焊丝回抽与熔滴过渡相结合, 可避免大的电磁力, 消除飞溅^[4-6], 在电弧增材领域具有一定优势. 然而, 混合气体保护下的船用高强钢 CMT 电弧增材时, 现有轮廓曲线模型无法完全适用. 因此, 需要对单道单层轮廓曲线模型进行优化.

单道多层电弧增材即单道单层沿垂直方向相互叠加. Jayaprakash 等人^[7] 研究单道多层 CMT 增材的成形工艺, 将单道单层截面轮廓和单道多层熔合线均简化为圆弧曲线, 并通过几何关系建立单道多层抬升量 h 与单道单层尺寸之间的关系, 即抬升量 $h = 2R \cos \theta_n$, 且 $\theta_n - \sin \theta_n \cos \theta_n = 0.5(\pi - \theta_1 + \sin \theta_1 \cos \theta_1)$. 但是, 不同工艺参数所成形单道单层的尺寸、形貌差异较大, 并非所有的单道单层截面轮廓都可简化为圆弧曲线, 且 θ_1 角也不是定值. 因此, 该抬升量

h 预测模型不具有普遍适用性.

电弧增材工件的横截面可近似为单道单层横截面的积分形式. 文中以单道单层横截面的形貌和面积为出发点, 通过研究船用高强钢 CMT 电弧增材, 优化单道多层电弧增材的抬升量, 改善电弧增材制造的尺寸精度.

1 试验方法

电弧增材设备采用 CMT 4000Rnc 焊机和 KUKA KR30HA 机器人的复合系统. 基板材料选用屈服强度 590 MPa 级的船用高强钢, 尺寸为 $300 \text{ mm} \times 150 \text{ mm} \times 12 \text{ mm}$; 增材材料选用与基板材料匹配的屈服强度为 590 MPa 级船用钢实心焊丝, 直径为 1.2 mm, 焊丝伸出长度为 14 ~ 16 mm.

保护气体中 CO_2 可以提高熔覆金属的宽度和熔深, 且 5% ~ 25% 比例的 CO_2 最适合碳钢熔覆, 75% ~ 80% 的氩可以提高电弧的稳定性^[8]. 因此, 针对试验中的电弧增材制造, 保护气采用 Ar 和 CO_2 的混合气体, 其中 CO_2 所占比例范围为 0 ~ 20%, 气体流量为 15 L/min. 试样经金相制样后, 采用 VHX-600E 超景深三维显微镜测量试样的横截面尺寸和面积.

2 单道单层截面轮廓曲线模型优化

2.1 优化单道单层截面轮廓曲线函数

单层单道示意图如图 1 所示, 同一工艺参数

(焊接速度 8 mm/s, 送丝速度 6 m/min) 在五种不同比例的混合气体中成形单道单层的尺寸 (D) 和形貌分别如表 1 和图 2 所示。

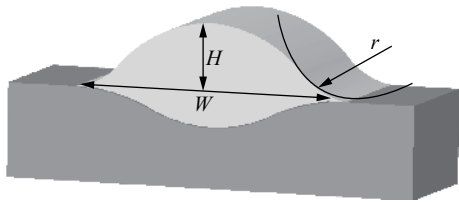


图 1 单道单层示意图

Fig. 1 Schematic of single-pass single-layer

表 1 保护气对单道单层尺寸的影响

Table 1 Influence of shielding gas on single-pass single-layer size

编号	保护气体	尺寸 D/mm		
		宽度 W	余高 H	接触半径 r
1	80%Ar + 20%CO ₂	5.49	2.39	1.79
2	90%Ar + 10%CO ₂	5.64	2.21	1.31
3	95%Ar + 5%CO ₂	5.48	2.37	0.79
4	97.5%Ar + 2.5%CO ₂	4.44	2.08	0.6
5	纯Ar	3.01	2.63	—

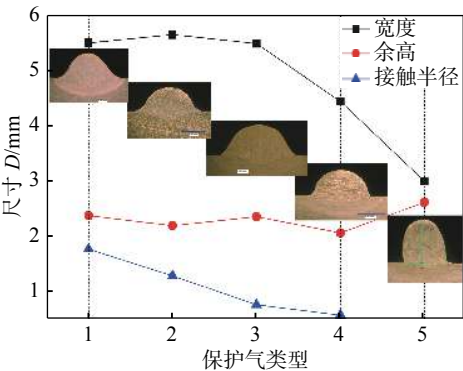


图 2 保护气对单道单层形貌的影响

Fig. 2 Influence of shielding gas on single-pass single-layer morphology

在电弧热作用下, 因 CO_2 分解所需的能量升高, 焊接电流密度增大, 熔透能力强, 同时金属润湿性提高, 熔宽增大^[9]. 如图 2 所示, 随着保护气中 CO_2 含量的减少, 宽度 W 和熔深减小, 接触半径 r 值逐渐降低, 金属润湿铺展性变差. 电弧增材制造中, 熔覆金属的润湿铺展能力将直接影响成形质量, 否则容易产生气孔、未熔合等缺陷. 试验针对船用高强钢 CMT 电弧增材的保护气最优选择为 80% Ar + 20% CO_2 混合气体。

通过对 80% Ar + 20% CO_2 保护气下的多个 CMT 单道单层进行截面轮廓形貌分析, 发现多数单道单层与基材平面之间近似圆弧过渡, 润湿性很好, 非常适合电弧增材制造. 但经过分析, 发现抛物线、圆弧曲线和半周期余弦曲线三种函数模型都无法适用于该种类型的单道单层. 通过对多种函数曲线分析, 针对 80% Ar + 20% CO_2 保护气下的 CMT 单道单层截面轮廓形貌特点, 将半周期余弦曲线 $f(x)=a\cos(bx)$ 优化为全周期余弦曲线 $f(x)=a\cos(bx)+c$, 即

$$f(x)=\frac{H}{2}\cos\frac{2\pi x}{W}+\frac{H}{2}\tag{1}$$

$$A_p=\int_{-W/2}^{W/2}f(x)dx=\frac{1}{2}HW\tag{2}$$

式中: $f(x)$ 为单道单层截面轮廓曲线函数; W 为单道单层宽度; H 为单道单层余高; A_p 为单道单层截面面积积分; a, b, c 为系数. 对比半周期余弦曲线模型 ($A_p=2HW/\pi$) 和式 (1) 的全周期余弦模型, 所得面积积分值 A_p 的绝对误差为 $0.137HW$, 相对偏差超过 20%, 差异较大。

2.2 全周期余弦模型的验证分析

在 80%Ar + 20% CO_2 保护气下进行 CMT 单道单层成形试验, 具体数据如表 2 所示, 但不论从单

表 2 单道单层截面积分析数据

Table 2 Data of single-pass single-layer cross-section area

序号	焊接速度 $v_w/(\text{mm}\cdot\text{s}^{-1})$	送丝速度 $v_s/(\text{m}\cdot\text{min}^{-1})$	宽度 W/mm	余高 H/mm	面积测量值 S/mm^2	抛物线(mm^2)		半周期余弦(mm^2)		全周期余弦(mm^2)	
						积分 A_p	误差 δ	积分 A_p	误差 δ	积分 A_p	误差 δ
1	4	2.7	4.51	2.15	5.22	6.46	-1.24	6.17	-0.95	4.85	0.37
2	6	3.9	5.49	2.31	6.51	8.45	-1.94	8.07	-1.56	6.34	0.17
3	8	4.2	5.53	2.22	6.305	8.18	-1.875	7.82	-1.515	6.14	0.165
4	10	4.8	5.22	2.1	5.486	7.31	-1.824	6.98	-1.494	5.48	0.006
5	12	5.1	4.99	2.11	5.34	7.02	-1.68	6.70	-1.36	5.26	0.08
6	14	6.0	5.15	2.14	5.75	7.35	-1.6	7.02	-1.27	5.51	0.24

道单层截面轮廓曲线拟合的角度,还是从面积积分的角度,圆弧曲线模型的误差(δ)都是最大的,所以,不再与圆弧曲线模型进行对比分析.分析面积测量值 S 与各模型积分值 A_p 之间的误差,如图3所示,结果表明,全周期余弦曲线积分 A_p 的误差最小.表2中各工艺参数所成形单道单层截面形貌分别如图4所示,采用曲线拟合的方法,单道单层截面轮廓与全周期余弦曲线的吻合程度最高.由此,针对80%Ar+20%CO₂保护气下的船用高强钢CMT单道单层,采用全周期余弦模型可准确拟合单道单层的截面轮廓形貌.

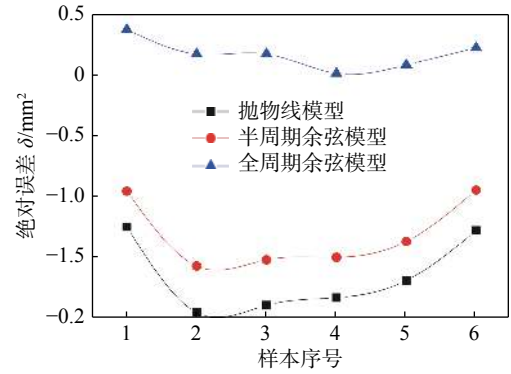


图3 单道单层截面面积误差分析结果

Fig. 3 Results analysis of single-pass single-layer cross-section area

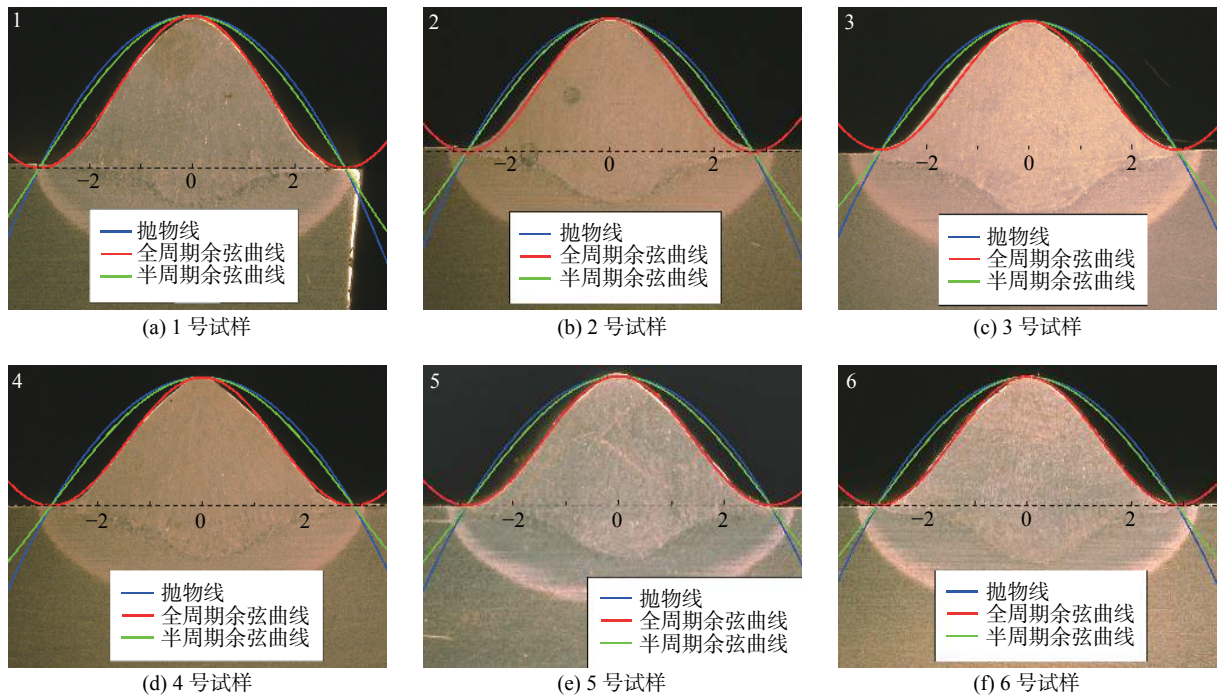


图4 单道单层轮廓曲线拟合结果

Fig. 4 Results of single-pass single-layer cross-section profile curve fitting

3 单道多层抬升量的优化分析

$$\text{抬升量} = \frac{\text{单道多层总高度}}{\text{总层数}} \quad (4)$$

3.1 抬升量 h 预测模型的建立

在电弧增材制造中,目前针对增材过程的实时跟踪、反馈、调节技术还不成熟,为保证成形形貌和质量的均匀一致性,制定合适的抬升量是一个关键因素.增材制造中,抬升量的偏差量是逐层累计的,最终导致电弧和熔滴过渡位置的较大偏移,影响增材成形的质量和尺寸精度.通过试验,建立2种抬升量的估算方法.

(1) 测量计算法

$$\text{抬升量} = \frac{\text{焊丝伸出长度}}{\text{总层数}} + \text{初始抬升量} \quad (3)$$

(2) 面积估算法. 式(5)是单道单层横截面积的积分,不论单道单层的形貌如何变化,都可以将截面轮廓曲线模型 $f(x)$ 代入该式,进行截面 A_p 的积分计算.将单道多层的横截面熔合线近似为圆弧曲线,如图5所示,通过几何关系计算相邻两条熔合线之间所围面积 S_1 ,如式(6)所示.实心焊丝电弧增材的利用率为100%,因此在 v_w 不变时, S_1 应当与 A_p 相等.由此可依据面积关系建立单道多层抬升量 h 与单道单层尺寸(宽度 W 、余高 H)之间的关系.且该关系模型具有普适性,即不论单道单层的轮廓形貌如何变化,都可以通过该模型预测单道多

层的抬升量 h , 如式 (7) 所示, 而抬升量 h 的预测值会随着单道单层截面形貌的变化而改变, 具体如表 3 所示.

$$A_P = \int_{-W/2}^{W/2} f(x)dx \tag{5}$$

$$S_1 = hW \tag{6}$$

$$h = \frac{\int_{-W/2}^{W/2} f(x)dx}{W} \tag{7}$$

式中: $f(x)$ 表示单道单层截面轮廓曲线; h 表示抬升量; W 表示单道单层宽度.

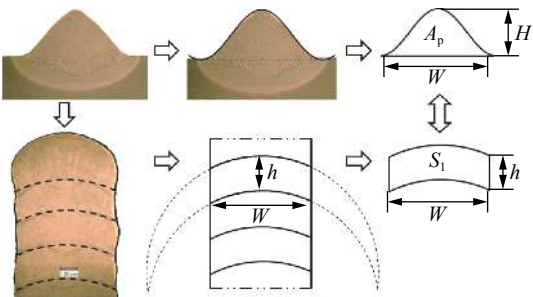


图 5 抬升量预测模型示意图
Fig. 5 Prediction model for uplift distance

表 3 不同形貌单道单层的抬升量计算值
Table 3 Uplift distance calculation of different profile

编号	轮廓曲线模型	积分值 A_P/mm^2	估算值 S_1/mm^2	抬升量 h/mm
1	$f(x) = -\frac{4H}{W^2}x^2 + H$	$\frac{2}{3}HW$		$\frac{2}{3}H$
2	$f(x) = H \cos \frac{\pi x}{W}$	$\frac{2}{\pi}HW$	hW	$\frac{2}{\pi}H$
3	$f(x) = \frac{H}{2} \cos \frac{2\pi x}{W} + \frac{H}{2}$	$\frac{1}{2}HW$		$\frac{1}{2}H$

3.2 抬升量预测模型的验证分析

选取几组不同的工艺参数, 针对单道多层抬升量预测模型进行电弧增材试验, 单道多层成形长度为 150 mm, 往复连续增材 20 层, 具体参数如表 4 所示. 依据测量算法 (式 (3) 和式 (4)) 所得的平均值作为抬升量的测量值; 依据面积估算法 (式 (7)) 所得值作为抬升量的预测值, 并将两者结果进行对比分析, 结果如图 6 所示.

图 6 表明, 抬升量预测值的绝对误差最大值为 0.07 mm, 相对误差不超过 3.50%. 因此, 该抬升量预测模型可以为单道多层的电弧增材成形控制提供工艺参考和理论支撑. 抬升量预测模型在电弧增材制造中得到实践应用, 成形良好, 如图 7 所示.

表 4 单道多层增材试验数据

Table 4 Data of single-pass multi-layer forming

编号	焊接速度 $v_w/(\text{mm} \cdot \text{s}^{-1})$	送丝速度 $v_s/(\text{mm} \cdot \text{min}^{-1})$	余高 H/mm	抬升量 h/mm		
				测量值	预测值	误差
1	3	2	2.92	2.01	1.96	0.05
2	3	3	3.11	2.14	2.08	0.06
3	3	4	3.37	2.23	2.26	-0.03
4	5	2	2.24	1.46	1.49	-0.03
5	5	4	2.69	1.74	1.79	-0.05
6	5	6	3.00	2.07	2.00	0.07
7	7	3	2.21	1.43	1.48	-0.05
8	7	5	2.42	1.66	1.62	0.04
9	7	7	2.61	1.72	1.75	-0.03

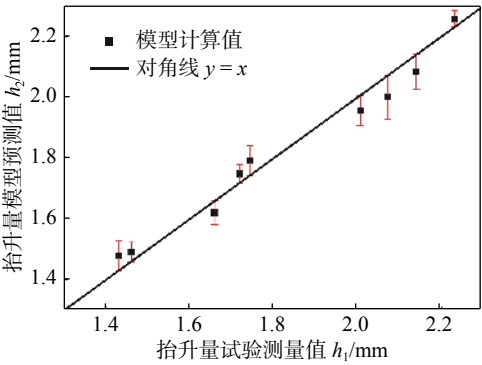


图 6 抬升量预测模型误差分析
Fig. 6 Error analysis of uplift distance calculation model



图 7 抬升量模型的电弧增材应用
Fig. 7 Application of uplift distance model in WAAM

4 结 论

- (1) 通过对现有单道单层截面轮廓曲线模型进行优化, 建立了适用于 80%Ar + 20%CO₂ 保护气体下船用高强钢 CMT 单道单层截面轮廓的全周期余弦函数曲线模型.
- (2) 利用面积关系和几何形貌, 建立单道多层的抬升量预测模型, CMT 电弧增材的抬升量 h 预测值的相对误差低于 3.50%.

(3) 抬升量预测模型已应用于薄壁结构样件的电弧增材制造, 可以为单道多层的电弧增材成形控制提供工艺参考和理论支撑。

参考文献:

- [1] Hofer K, Mayr P. 3DPMD-arc-based additive manufacturing with titanium powder as raw material[J]. China Welding, 2019, 28(1): 11 – 15.
- [2] 熊 俊. 多层单道 GMA 增材制造成形特性及熔敷尺寸控制 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014.
- [3] Ding D H, Pan Z X, Cuiuri D, *et al.* A multi-bead overlapping model for robotic wire and arc additive manufacturing (WAAM)[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2015, 31: 101 – 110.
- [4] 张 栋, 陈茂爱, 武传松. 高速 CMT 焊送丝速度和焊接电流波形参数的优化 [J]. 焊接学报, 2018, 39(1): 119 – 122.
- Zhang Dong, Chen Maoai, Wu Chuansong. Optimization of waveform parameters for high speed CMT welding of steel[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2018, 39(1): 119 – 122.
- [5] Ge J Q, Wang K H, Zhang D K, *et al.* Microstructure characteristics and mechanical properties of steel stud to Al alloy by CMT welding-brazing process[J]. China Welding, 2016, 25(1): 49 – 56.
- [6] 孙清洁, 桑海波, 刘一搏, 等. 基于电弧增材制造的截面扫描轨迹规划 [J]. 焊接学报, 2017, 38(10): 21 – 24.
- Sun Qingjie, Sang Haibo, Liu Yibo, *et al.* Research on deposited layer scanning trace skanning based on rapid-prototyping using CMT technology[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2017, 38(10): 21 – 24.
- [7] Jayaprakash S P, Suryakumar S. Manufacture of complex thin-walled metallic objects using weld-deposition based additive manufacturing[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2018, 49: 194 – 203.
- [8] Belinga M, Paul K. Effects of shielding gas control: welded joint properties in GMAW process optimization[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, 88: 2369 – 2387.
- [9] Olga L, Américo S. Influence of the CO₂ content on operational performance of short-circuit GMAW[J]. Welding in the World, 2015, 59: 217 – 224.

第一作者简介: 张金田, 男, 1991 年出生, 硕士. 主要从事金属增材制造和焊接技术方面的研究. Email: 1960388192@qq.com

通信作者简介: 王涛, 男, 博士. Email: wangtao@725.com.cn