

GMAW 焊接工艺因素对 E501T-1 型药芯焊丝发尘率的影响

朱师琦¹, 卜智翔¹, 鲍升凯¹, 王立世¹, 孟庆润²

(1. 湖北工业大学, 绿色轻工材料湖北省重点实验室, 武汉 430068; 2. 武汉铁锚焊接材料股份有限公司, 武汉 430085)

摘要: 影响 GMAW 药芯焊丝发尘率的焊接工艺因素较多, 通过选择焊接电流、电弧电压、焊接速度和保护气体流量作为发尘率的主要影响因素, 进行正交试验、单因素试验与交互试验, 采用方差分析、单因素分析和回归拟合, 得到了焊接工艺因素对发尘率的影响规律, 以及降低发尘率的最优焊接工艺参数。结果表明, 焊接电流对发尘率的影响最显著, 发尘率随电弧电压与焊接电流的变化趋势符合 Boltzmann 模型, 正交分析的优化焊接工艺参数符合该药芯焊丝的焊接工艺规范要求。

关键词: 熔化极气体保护焊; 药芯焊丝; 发尘率; 正交试验

中图分类号: TG444.73

0 前言

药芯焊丝具有熔敷效率高、焊接质量好、飞溅小、能耗低等优点^[1], 因而在工程领域中应用广泛, 但 GMAW 焊接时药芯焊丝的发尘率是实心焊丝的 2~3 倍, 前者对环境的危害更为显著, 因此降低药芯焊丝发尘率成为了一项亟待解决的问题。研究 GMAW 工艺因素对药芯焊丝发尘率的影响规律, 从工艺上控制药芯焊丝发尘量, 对改善焊接环境具有积极的意义。目前国内外研究药芯焊丝发尘率的文献较少, 由于影响 GMAW 发尘率的工艺因素较多, 分析焊接工艺因素与发尘率之间的规律相当复杂^[2-3], 使得相关研究更多集中于实心焊丝。文中在国内外相关研究的基础上, 确立了四个对焊接发尘率影响较为典型的焊接因素^[4-8]作为正交试验的四个因素, 以发尘率作为试验指标, 运用多种方法来分析发尘率与焊接工艺因素之间的关系, 得到了焊接工艺因素对 GMAW 发尘率的影响规律。

1 试验仪器与试验设计

1.1 试验仪器及设备

焊接发尘率测试装置依据 ISO 15011-1—2009^[9]国际标准和试验要求来设计制造, 该装置由数据采集

与控制系统、烟尘抽滤系统和测尘室腔体等组成, 可实现焊条电弧焊和 GMAW 自动化焊接的发尘率测量, 装置实物如图 1 所示。称量用的电子天平为 JA5003B 型, 精度为 1 mg。

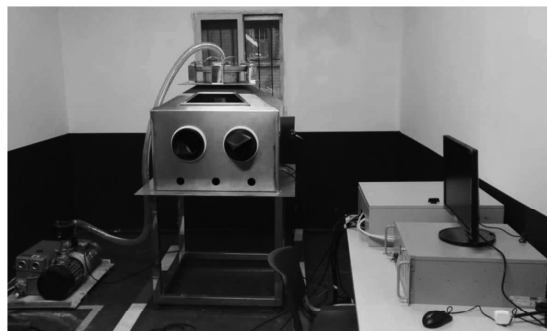


图1 焊接发尘率测试装置

1.2 正交试验设计

焊丝选用铁锚 E501T-1 型药芯焊丝。滤纸选用吸收效率高于 99.5% 的 JK14058 型滤纸。母材尺寸为 300 mm × 150 mm × 20 mm。电源极性选用直流反接。正交试验的焊接参数选用范围见表 1。

试验选用 4 个因素, 每个因素取 3 个水平, 此外还选取了焊接电流与焊接速度的交互作用作为试验因素, 正交试验表采用 L18(3⁷) 正交表, 其表头设计见表 2, 焊接烟尘试验因素水平表见表 3。

在焊前称量并记录滤纸质量 M , 焊接过程中系统记录焊接时间 T , 且焊接时间必须大于 60 s, 焊后称重并记录焊后滤纸质量 M' , 单位时间焊接发尘率为:

$$R_{FF} = \frac{M' - M}{T} \tag{1}$$

为减少试验操作过程所产生的误差,对每组数据进行三次重复试验并求平均值,平均值为此组试验的发生率;若某次试验发生率不在平均值的±10%

内,每组数据再重复两次试验,总计得到同组五次发尘率并求其平均值,再次评估每次试验发尘率;若在平均值的±10%内,此平均值为此组数据发尘率,否则调整试验设备并重复上述步骤。试验结果见表4。

表 1
 熔化极气体保护焊因素选择表

类别	焊接电流 I/A	电弧电压 U/V	焊接速度 $v/(cm \cdot min^{-1})$	保护气体流量 $Q/(L \cdot min^{-1})$	保护气体种类
数值	170 ~ 380	25 ~ 31	16 ~ 24	10 ~ 20	CO ₂
因素编号	A	B	C	D	—
类别	焊丝直径 D_1/mm	母材牌号		导电嘴到工件距离 l/mm	气体喷嘴直径 D_2/mm
数值	1.2	Q235B		18	12
因素编号	—	—		—	—

表 2
 L18(3⁷) 正交表表头设计

因素	1	2	3	4	5	6	7	R_{FF}
编号	A	B	误差 e	C	$(A \times C)_1$	$(A \times C)_2$	D	—

表 3
 焊接烟尘试验因素水平表

水平数	焊接电流 I/A	电弧电压 U/V	焊接速度 $v/(cm \cdot min^{-1})$	保护气体流量 $Q/(L \cdot min^{-1})$
1	200 ~ 230	25 ~ 27	16	10
2	230 ~ 260	27 ~ 29	20	15
3	260 ~ 290	29 ~ 31	24	20

表 4
 焊接发尘率试验结果

组号	发尘率 R_{FF} $/(mg \cdot min^{-1})$	组号	发尘率 R_{FF} $/(mg \cdot min^{-1})$
1	549.7	10	497.9
2	367.1	11	409.9
3	478.7	12	452.5
4	754.3	13	615.5
5	502.7	14	575.3
6	389.3	15	449.0
7	602.8	16	757.8
8	759.0	17	740.9
9	762.9	18	687.7

1.3
 单因素试验与交互试验

为分析在一定焊接速度条件下,焊接电流的变化对发尘率的影响,需在相同焊接速度条件下,对应设置四种不同焊接电流来进行交互试验。交互试验参数见表5。在正交试验及相关分析得出的优方案基础上,再

分别进行焊接电流和电弧电压的单因素变量试验。单因素变量试验参数见表6。

表 5
 焊接电流与焊接速度交互试验参数表

变量区间	焊接电流 I/A	焊接速度 $v/(cm \cdot min^{-1})$
1	170 ~ 200	16
2	200 ~ 230	20
3	230 ~ 260	24
4	260 ~ 290	28

表 6
 焊接电流与焊接电压单因素试验参数表

变量区间	焊接电流 I/A	电弧电压 U/V
1	170 ~ 200	25 ~ 27
2	200 ~ 230	27 ~ 29
3	230 ~ 260	29 ~ 31
4	260 ~ 290	31 ~ 33
5	190 ~ 320	33 ~ 35
6	320 ~ 350	—
7	350 ~ 380	—

2 试验结果与分析

2.1 方差分析

根据国际标准^[9]规定,发尘率测试的允许误差为 $\pm 10\%$,选取显著性水平 $\alpha = 0.1$,此时临界值 $F_{0.1}(2,5) = 3.78$, $F_{0.1}(4,5) = 3.52$,若 $F_j >$ 临界 F 值,则该因素

对发尘率有显著影响;若 $\alpha = 0.5$,此时临界值为 $F_{0.05}(2,5) = 5.79$, $F_{0.05}(4,5) = 5.19$,若 $F_j >$ 临界 F 值,则该因素对发尘率有非常显著影响。对焊接发尘率试验结果进行方差分析,方差分析表见表7, S_{s_j} 表示各因素离差平方和, d_{f_j} 表示各因素自由度, M_{s_j} 表示各因素均方, F_j 为各因素均方与误差均方的比值。

表7 方差分析表

因素	S_{s_j}	d_{f_j}	M_{s_j}	F_j	显著性
A	208 385.22	2	104 192.600	32.52	非常显著
B	28 257.04	2	14 128.520	4.41	显著
误差 e	16 021.45	5	3 204.290	—	—
C	14 254.14	2	7 127.072	2.22	不显著
$A \times C$	58 954.59	4	14 738.650	4.60	显著
D	7 605.02	2	3 802.510	1.19	不显著

由方差分析可知焊接电流对焊接发尘率有非常显著的影响,焊接电压、焊接电流与焊接速度的交互作用对焊接发尘率有显著的影响,焊接速度与保护气体流量对焊接发尘率的影响不显著。使用药芯焊丝时,GMAW工艺参数对焊接发尘率的影响强弱程度,由大到小依次排列为:焊接电流、焊接电流与焊接速度的交互作用、电弧电压、焊接速度和保护气体流量。

焊接热输入对发尘率的影响同样反映焊接因素的交互作用对发尘率的影响。由图2可知,焊接热输入对发尘率有影响,当焊接热输入在 $300 \sim 400 \text{ J/cm}$,且焊接电流处于 $260 \sim 290 \text{ A}$ 时,发尘率达到 740 mg/min

以上,其中,电弧电压在 $29 \sim 30 \text{ V}$,焊接速度为 24 cm/min 时,发尘率最高;当电流在 $200 \sim 230 \text{ A}$,电弧电压在 $27 \sim 29 \text{ V}$,焊接速度为 20 cm/min 时,发尘率最低。根据图中的数据可知焊接热输入并不能确定焊接发尘率的大小。

根据上述因素分析并考虑表8中的因素水平搭配,发尘率最低的正交试验参数为 $A_1 B_3 C_2 D_2$ 。该型焊丝的生产企业推荐了相应的焊接工艺参数以保证熔敷金属的力学性能。对照两种方案,仅气体流量 D_2 (15 L/min)不在推荐范围内,由于气体流量对焊接发尘率的影响不显著,为符合焊丝使用要求,气体流量最终选取为 20 L/min ,详细参数见表9。基于优选参数的实测焊接发尘率为 349.7 mg/min ,与正交试验中的最低与最高发尘率相比,其发尘率分别降低了4%与49%,说明此优选参数即符合焊丝推荐参数,又可显著降低焊接发尘率。

表8 因素水平搭配表

因素	C_1	C_2	C_3
A_1	959.557 0	819.657 4	976.584 3
A_2	964.571 6	1 203.341 9	1 118.202 0
A_3	1 290.527 5	1 516.805 5	1 503.794 6

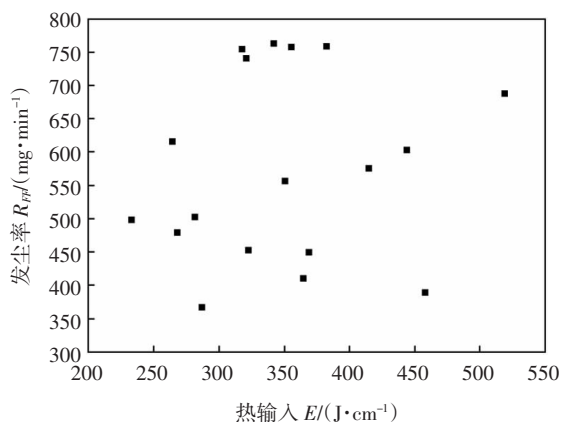


图2 发尘率与热输入关系

表 9 参数对照表

类别	焊接电流 I/A	电弧电压 U/V	焊接速度 $v/(cm \cdot min^{-1})$	气体流量 $Q/(L \cdot min^{-1})$	热输入 $E/(J \cdot cm^{-1})$
正交参数	200 ~ 230	29 ~ 31	20	15	150 ~ 180
推荐参数	140 ~ 300	20 ~ 32	—	20 ~ 25	80 ~ 180
优选参数	200 ~ 230	29 ~ 31	20	20	150 ~ 180

2.2 交互试验与的单因素试验分析

交互试验的焊接工艺参数参考优选参数进行设定。电弧电压为 30 V,保护气体流量为 20 L/min 时,焊接电流与焊接速度的交互作用试验结果如图 3 所示。

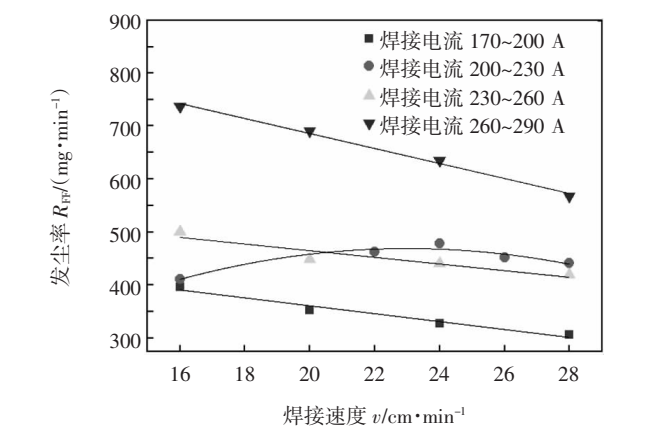


图 3 交互试验结果

由图 3 可知,当焊接电流处于 170 ~ 200 A,230 ~ 260 A 和 260 ~ 290 A 时,焊接电流与发尘率大致存在一元线性关系,随焊接速度的增大,发尘率降低。但在焊接电流为 200 ~ 230 A 时,随焊接电流的增大,发尘率先增大后减小,此时焊接电流与焊接速度存在交互作用,与正交试验结论相符合。

在方差分析和交互试验基础上,还进行了单因素试验,并根据试验结果分析了焊接电流,焊接电压与发尘率的关系,单因素试验结果如图 4、图 5 所示。基于药芯焊丝发尘率的单因素试验结果,可以采用回归拟合的方法建立药芯焊丝发尘率的函数模型。通过选用 Boltzmann 模型作为拟合函数模型,其表达式为:

$$y = A_2 + \frac{A_1 - A_2}{1 + e^{(x-x_0)/dx}} \tag{2}$$

具体参数设置见表10, A_1, A_2 分别表示底部渐近线

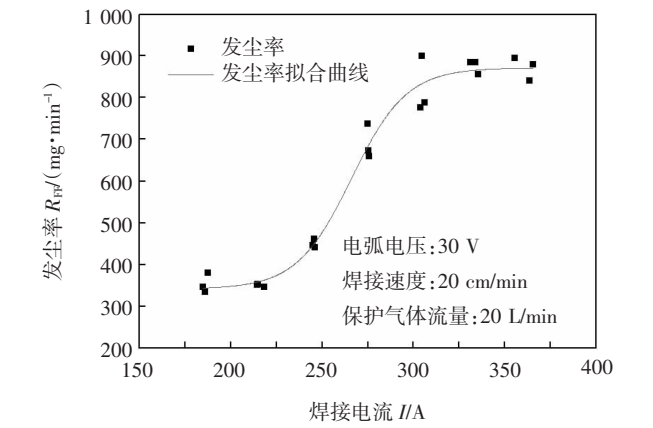


图 4 焊接电流对发尘率的影响

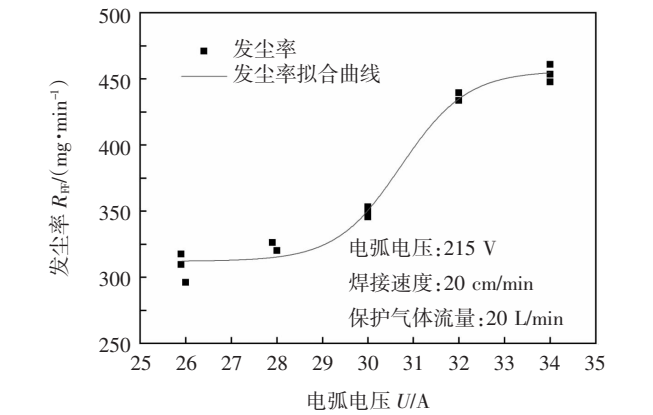


图 5 电弧电压对发尘率的影响

表 10 模型参数表

变量 x	焊接电流	电弧电压
A_1	341.418 5	312.078 0
A_2	871.532 6	456.017 6
x_0	266.099 2	30.722 7
dx	15.037 3	0.721 1

和底部渐近线; x_0 表示曲线上斜率最大点的 x 值; dx 与曲线的陡峭程度有关。

以焊接电流和电弧电压为变量的发生率模型置信度分别为 0.979 4 和 0.983 4。运用两种模型预测优选参数的发生率,分别得到焊接电流为 215 A 时发生率为 358.8 mg/min,电弧电压为 30 V 时发生率为 350.4 mg/min,预测值误差均小于实测值的 $\pm 5\%$,符合国际标准要求。

从图 4 可以明显得知焊接电流在 170 ~ 380 A 范围内,焊接电流的增大使得焊接过程的发生率增大。当焊接电流较小时,焊接电流的增大会使焊接发生率小幅度增长;当焊接电流在 250 ~ 300 A 区间增大时,发生率急剧增大;当焊接电流大于 300 A 时,随着焊接电流的继续增大,焊接发生率增速放缓。焊接电流在 200 ~ 250 A 范围变化时,焊接发生率的斜率有较大变化,此区间内熔滴的过渡形式发生了变化。可能存在大颗粒排斥过渡向细滴过渡转变的现象^[10]。由于熔滴是焊接烟尘的来源之一,药芯焊丝的熔滴过渡频率随焊接电流的增大也在不断增大,导致发生率也在增大,因此焊接发生率在 250 ~ 300 A 存在明显的发生率变化。

对比 Quimby 实心焊丝发生率试验^[3],电弧电压为 30 V 时,实心焊丝在焊接过程中发生率随焊接电流的增大而减小,而药芯焊丝发生率随焊接电流的增大而增大。从发生机理上解释两种焊丝发生规律差异的相关报道较少,有待进一步研究。

由图 5 可知,在 26 ~ 34 V 的电弧电压范围内,电弧电压的增大也会使焊接过程的发生率增大。焊接速度在较小时,26 ~ 28 V,电弧电压对焊接过程中的发生率影响不大;当电弧电压大于 28 V 时,电弧电压的增大会引起发生率的急剧上升。综合图 4、图 5 明显可知,焊接电流的变化对于焊接发生率的影响要强于电弧电压变化对于焊接发生率的影响,此现象与正交试验的结论相符合。

3 结论

(1)通过上述分析,一定条件下,焊接电流对焊接发生率有非常显著的影响;电弧电压以及焊接电流与焊接速度的交互作用对焊接发生率有显著的影响;焊接速度、保护气体气流量对焊接发生率的影响不显著。

(2)通过上述分析,得到了符合该药芯焊丝使用要求的最低发生率焊接参数,即焊接电流 200 ~ 230 A、电弧电压 29 ~ 31 V、焊接速度 20 cm/min 和保护气体气流量 20 L/min,此条件下的焊接发生率为 349.7

mg/min。

(3)一定条件下,电弧电压和焊接电流的增大都会让发生率增大,二者的增长趋势符合 Boltzmann 模型。

参考文献

- [1] 张军强,任杰亮,薛铜辉,等.药芯焊丝焊接烟尘的产生机理研究[J].热加工工艺,2017,46(19):188-191.
- [2] 卜智翔,鲍升凯,王立世,等.熔化极气体保护焊发生率研究进展[J].焊接,2016(7):17-21.
- [3] Quimby B J, Ulrich G D. Fume formation rates in gas metal arc welding[J]. Welding Journal, 1999, 84(4):142-149.
- [4] Scotti A, De Meneses V A. Governing parameters affecting fume generation in short-circuit MAG welding[J]. Welding in the World, 2014, 58(3):367-376.
- [5] Pires I, Quintino L, Miranda R M, et al. Fume emissions during gas metal arc welding[J]. Toxicological & Environmental Chemistry, 2006, 88(3):385-394.
- [6] Sivapirakasam S P, Mohan S, Santhosh Kumar M C, et al. Modeling of fume formation from shielded metal arc welding process[J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 2017, 48(2):1268-1278.
- [7] Vishnyakov V I, Kiro S A, Oprya M V, et al. Effects of shielding gas temperature and flow rate on the welding fume particle size distribution[J]. Journal of Aerosol Science, 2017, 114:55-61.
- [8] Sajedifar J, Kokabi A H, Farhang S D, et al. Evaluation of operational parameters role on the emission of fumes[J]. Industrial Health, 2017, 56(3):198-206.
- [9] International Organization for Standardization. Health and safety in welding and allied processes-laboratory method for sampling fume and gases-part 1: determination of fume emission rate during arc welding and collection of fume for analysis: ISO 15011-1—2009[S]. 2009-10-15.
- [10] 王宝,杨林,王勇.药芯焊丝 CO₂ 焊熔滴过渡现象的观察与分析[J].焊接学报,2006,27(7):77-80.

第一作者简介:朱师琦,1994 年出生,硕士研究生;主要从事焊接发生率方面研究。

通信作者简介:卜智翔,1975 年出生,讲师;主要从事焊接烟尘的数值模拟及焊接环境性方面的研究。