

高强钢用无镀铜与镀铜实心焊丝焊接烟尘的分析

石柏成¹, 杨子佳¹, 马一鸣¹, 赵松柏¹, 洪烨¹, 樊星², 宋建廷³

- (1. 中国机械总院集团哈尔滨焊接研究所有限公司, 哈尔滨 150028;
2. 中国机械工程学会, 北京·埃森焊接与切割展览会组委会, 北京 100048;
3. 哈尔滨威尔焊接有限责任公司, 哈尔滨 150060)

摘要: 【目的】旨在了解高强钢用无镀铜和镀铜实心焊丝焊接烟尘的差异。【方法】通过采用试验室自主研发的焊接烟尘捕集系统, 收集上述 2 种高强钢用实心焊丝的焊接烟尘颗粒。在收集过程中, 测定实心焊丝熔化极气体保护焊焊接烟尘排放速率, 结合电感耦合等离子体原子发射光谱仪、扫描电子显微镜与能谱仪、激光粒度分析仪等设备对焊接烟尘样品成分、形貌、粒度分布及尺寸进行分析。【结果】结果表明, 焊丝 2 的焊接烟尘排放速率最小, 为 4.68 mg/s, 焊丝 4 排放速率最稳定, 不同制备工艺对于焊接烟尘排放速率未发现明显影响; 焊丝 3 的平均粒径最大, 为 2.056 μm ; 不同制备工艺的实心焊丝焊接时所产生的焊接烟尘在粒度分布上存在差异; 在相同焊接工艺下, 焊接烟尘成分主要由焊丝成分决定, 主要元素为 Fe, Mn, Si, 其中 Fe 元素含量占比在 50% 以上。【结论】通过对试验结果的对比与分析可以知道, 无镀铜实心焊丝在绿色环保方向上具有一定优势。

关键词: 焊接烟尘; 烟尘排放速率; 实心焊丝; 烟尘粒度分布

中图分类号: TG422.3 文献标识码: A doi: 10.12073/j.hj.20240226005

Welding fume for uncoated and coated copper wire electrodes of high-strength steels

Shi Baicheng¹, Yang Zijia¹, Ma Yiming¹, Zhao Songbai¹, Hong Ye¹, Fan Xing², Song Jianting³

- (1. Harbin Welding Institute Limited Company, Harbin 150028, China; 2. Chinese Mechanical Engineering Society, Beijing Essen Welding&Cutting Fair Organising Committee, Beijing 100048, China; 3. Harbin Well Welding Co., Ltd., Harbin 150060, China)

Abstract: [Objective] In order to understand the difference of welding fumes between the uncoated copper wire electrodes and coated copper wire electrodes of high-strength steels. [Methods] The welding fume particles of the wire electrodes for the two kinds of high strength steel were collected by using the welding fume trapping system self-developed by the laboratory. During the collection process, the fume emission rate from wire electrodes GMAW was measured, the composition, morphology, particle size distribution and size of welding fume were analyzed by inductively coupled plasma atomic emission spectrometer, scanning electron microscope, energy spectrometer and laser particle size analyzer. [Conclusion] The results showed that the fume emission rate of wire electrodes 2 was the lowest, 4.68 mg/s, and the fume emission rate of wire electrodes 4 was the most stability, no obvious influence of different preparation processes on the emission rate of welding fume was found. The average particle size of wire electrodes 3 was the largest, 2.056 μm . There were differences in the particle size distribution of welding fumes generated during wire electrode welding by different preparation processes. In the same welding process, the composition of welding fume was mainly determined by the composition of welding wire, the main elements were Fe, Mn, Si, and the content of Fe was more than 50%. [Results] Through the comparison and analysis of the test results, we knew that uncoated copper wire electrodes has certain advantages in the direction of green environmental protection.

Key words: welding fume, fume emission rate, wire electrodes, fume particle size distribution

0 前言

焊接会对周围环境造成污染,依据形成机制,焊接污染可以分为化学有害污染和物理有害污染两类。其中物理有害污染包括噪声、高频电磁辐射和光辐射等;化学有害污染主要为焊接烟尘和有害气体^[1]。焊接烟尘中的烟尘颗粒可能会引发哮喘、支气管炎、肺炎、肺水肿等疾病,对长时间接触焊接的操作人员的身体健康会产生严重危害^[2]。焊接烟尘的粘性大,会随着温度和湿度的变化在空中飘浮,通常焊接烟尘漂浮在7~10 m的空间位置^[3]。如果焊接操作人员长期在高密度焊接烟尘的环境中工作,将会导致身体机能下降,甚至有引发癌症的风险。

近年来,实心焊丝作为焊接材料的重要组成部分之一,在产量和使用量上都在逐年提升,在国内焊接领域得到了广泛的应用。在试验中,实心焊丝的焊接发尘量普遍要明显低于焊条与药芯焊丝,但在使用实心焊丝进行熔化极气体保护焊(Gas metal arc welding, GMAW)的过程中也会产生明显的焊接烟尘,在一些半封闭或通风较差的环境中,其焊接烟尘对空气质量造成明显影响。因此,对实心焊丝产生的焊接烟尘进行研究也是有必要的。

目前,从制备工艺上来看,实心焊丝可分为镀铜实心焊丝和无镀铜实心焊丝。镀铜实心焊丝生产过程对环境的污染较大,主要污染源是镀铜液,其次是各种酸碱化学品的使用和各种酸碱雾气等,目前一般使用3种工艺进行镀铜生产,分别为电镀、电镀与化镀结合、化镀,电镀会用到氰化物对环境危害极大,化镀的镀液和蒸汽对人体有极大的危害^[4]。无镀铜实心焊丝作为一种高效、优质、环保、低成本的新型焊接产品逐渐兴起,其在生产中省去了镀铜工艺,利用表面涂层替代原有镀铜层,使焊丝在导电、防锈、润滑等方面满足焊接工艺要求,无镀铜焊丝在生产及使用过程中节能环保,适用于半自动焊、自动焊和机器人焊接等^[5]。

文中主要研究镀铜与无镀铜2种制备工艺对于实心焊丝GMAW焊接烟尘的影响,以期环保焊接领域做出有利贡献。

1 试验方法

试验采用的母材为Q355B钢板,尺寸为300 mm×200 mm×20 mm,试验焊接前进行打磨,去掉表面的锈

迹、油污等杂质。选取4种 $\phi 1.2$ mm规格实心焊丝进行试验,分别为690 MPa级无镀铜实心焊丝、830 MPa级无镀铜实心焊丝、690 MPa级镀铜实心焊丝和830 MPa级镀铜实心焊丝,分别用焊丝1、焊丝2、焊丝3、焊丝4进行记录区分。

焊接烟尘的形成主要受2个因素的影响,即焊接材料和焊接工艺^[6]。其中焊接材料不仅会影响焊接烟尘排放速率,还决定了焊接烟尘的形貌和成分^[7]。参考文献[6]表明,在实心焊丝进行GMAW焊接时,随着焊接电压增加过程中,熔滴过渡从短路过渡到粗滴过渡的过程中,发尘量逐渐增加,转变到喷射过渡过程中发尘量又逐渐降低,到射流过渡时发尘量又再次增加。Scotti等学者^[8]的研究结果表明,在短路过渡时,熔滴直径、短路电流、弧长的增加都会使发尘量增加,这几个因素共同作用时,发尘量的增加更加明显。Carpenter等学者^[9-10]针对保护气体对GMAW的焊接发尘量的影响进行了研究,其结果表明,改变混合气体中CO₂的添加量可以控制发尘量。为进行比对研究,4种焊丝选用相同焊接工艺参数,见表1。

表1 焊接工艺参数

Tab. 1 Welding process parameters

电弧电压 <i>U/V</i>	焊接电流 <i>I/A</i>	保护 气体	保护气体流量 <i>Q/(mL·min⁻¹)</i>
29	280	100%CO ₂	20

高强钢用实心焊丝的成分中包含Mn, Cr, Cu等元素。焊接烟尘的形成主要来源于焊丝,由焊丝导致的发尘量占总发尘量的90%。只要母材中没有高挥发性的元素,来自于母材的发尘量只占总发尘量的很少一部分^[11]。在相同工艺参数焊接下,焊丝成分是影响焊接烟尘成分的主要因素,试验焊丝化学成分见表2。

通常市场上的镀铜焊丝Cu元素含量会明显高于无镀铜焊丝,由于在焊丝表面镀铜膜,镀铜实心焊丝在检测焊丝化学成分时,Cu元素含量可达到0.20%~0.30%,相对较高。此次选用的镀铜实心焊丝,由于焊材厂家生产工艺的改善,其Cu元素含量为0.09%,虽然仍高于无镀铜实心焊丝的0.07%,但对比以往焊丝Cu元素含量相对较低。为满足强度等级要求,830 MPa级的实心焊丝相较于690 MPa级实心焊丝在Mn, Cr和Ni元素上有所增加。

表2 焊丝化学成分(质量分数, %)

Tab. 2 Chemical compositions of wire electrodes (wt.%)

焊丝编号	焊丝类别	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu	Fe
焊丝 1	690 MPa 无镀铜	0.07	0.77	1.46	0.013	0.006	0.15	0.63	0.07	余量
焊丝 2	830 MPa 无镀铜	0.06	0.77	1.66	0.010	0.004	0.42	1.12	0.07	余量
焊丝 3	690 MPa 镀铜	0.07	0.66	1.56	0.013	0.004	0.33	0.03	0.09	余量
焊丝 4	830 MPa 镀铜	0.08	0.60	1.65	0.010	0.003	0.37	0.80	0.09	余量

通过试验室自主研发的焊接烟尘捕集系统进行试验,该装置满足 ISO 15011-1:2009《焊接及相关工艺中的健康安全—烟尘和气体取样的实验室方法—第 1 部分:弧焊时排放速率的测定和分析用烟尘的收集》中的试验要求,采用福尼斯 TPS 5000 型焊机进行焊接,测定其焊接烟尘排放速率,焊接烟尘捕集系统试验舱如图 1 所示。每种焊丝分别进行 5 次焊接试验,每次燃弧时间持续 50 s,开动抽气泵,通过大小椎体之间的滤纸收集焊接烟尘,根据滤纸的质量差得出试验过程中的焊接烟尘质量,计算焊接烟尘排放速率 F_s ,即单位时间内焊接烟尘排放的质量,与 GB/T

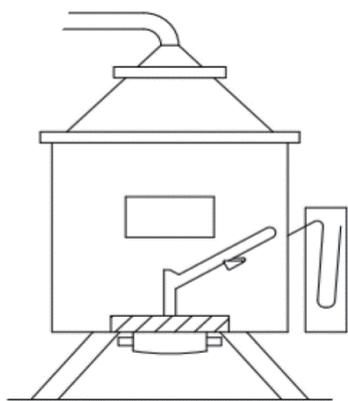


图 1 焊接烟尘捕集系统试验舱示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the test chamber for capturing welding fume.

25776—2010《焊接材料焊接工艺性能评定方法》中焊接发尘量试验方法不同之处在于该试验不需称量焊材的消耗质量,针对焊接时间进行试验,为增加测量结果的稳定统一性,不再使用脱脂棉擦取,减少人为影响, F_s 计算公式为:

$$F_s = \frac{\Delta g}{t} 1000 \quad (1)$$

式中: Δg 为滤纸集尘前后的质量差; t 为焊接时间。

对滤纸上的烟尘进行取样,通过 Bettersize3000Plus 型激光粒度分析仪测定焊接烟尘粒度分布及平均颗粒尺寸;采用 iCAP6300 Radial 型电感耦合等离子体原子发射光谱仪测定焊接烟尘成分;使用 ZEISS EVO 18 型扫描电子显微镜观察焊接烟尘形貌并分析其不同形貌下的化学成分。

2 试验结果及分析

2.1 焊接烟尘排放速率

焊接烟尘排放速率 F_s 和相对标准偏差(Relative standard deviation, RSD)结果见表 3。焊丝 4 的相对标准偏差为 3.0%,是 4 种焊丝中最低的,此焊丝焊接烟尘排放速率稳定性最高;比较不同制备工艺,焊丝 1 的烟尘排放速率要高于焊丝 3,焊丝 2 的烟尘排放速率低于焊丝 4;对于不同强度等级,焊丝 1 和焊丝 3 的烟尘排放速率分别高于焊丝 2 和焊丝 4。由此可知,焊丝 2 的烟尘排放速率最不稳定,在不同制备工艺生

表3 焊接烟尘排放速率

Tab. 3 Welding fume emission rate

焊丝编号	焊接烟尘排放速率 $F_s/(mg \cdot s^{-1})$						相对标准偏差 $R(\%)$
	试验 1	试验 2	试验 3	试验 4	试验 5	平均值	
焊丝 1	6.01	5.98	6.39	5.86	6.73	6.19	5.2
焊丝 2	4.52	4.77	4.89	4.15	5.10	4.68	6.9
焊丝 3	6.02	5.56	5.27	5.47	5.09	5.48	5.7
焊丝 4	5.05	4.89	4.88	5.31	5.08	5.04	3.0

产的 2 种强度级别实心焊丝中, 690 MPa 级别实心焊丝的烟尘排放速率均高于 830 MPa 级实心焊丝。

实心焊丝表面的镀铜及其他添加物质会影响其导电性、电弧稳定性和过渡形式, 同时也会对焊接烟尘排放速率的试验结果产生影响。

试验中, 无镀铜实心焊丝的排放速率相较于镀铜实心焊丝的排放速率没有明显变化趋势。一是为了保证无镀铜实心焊丝的送丝稳定性和良好的导电性, 在实心焊丝表面有添加其他物质; 二是为了环保要求并保持镀铜实心焊丝的良好工艺性, 对镀铜工艺进行改善, 镀铜实心焊丝表面镀铜的含量并不是特别高, 故试验中 2 种制备工艺的焊丝焊接烟尘排放速率没有太大差异。

2.2 焊接烟尘粒度

使用激光粒度分析仪对所得烟尘进行分析, 试验结果见表 4 和图 2。其中 D_{10} 表示在烟尘样品中累计占比达到 10% 时所对应的颗粒直径, 即为粒径; D_{50} 表示累计占比达到 50% 时所对应的粒径; D_{90} 表示累计占比达到 90% 时所对应的粒径。

焊接烟尘的形核机制主要有 2 种, 为均质形核和非均质形核^[12]。烟尘粒子的长大过程主要有 2 种形式: 一种是熔合过程, 由几个焊接烟尘的一次粒子熔合成单个大粒子, 一次粒子之间无明显边界, 这种熔合后的单个大粒子的总表面积小于一次粒子的表面

表 4 焊接烟尘粒度分布

Tab. 4 Welding fume particle size distribution

焊丝种类	粒径 $D/\mu\text{m}$	$D_{10}/\mu\text{m}$	$D_{50}/\mu\text{m}$	$D_{90}/\mu\text{m}$
焊丝 1	0.013 ~ 100.8	0.027	0.224	7.432
焊丝 2	0.013 ~ 100.8	0.026	0.105	4.726
焊丝 3	0.017 ~ 464.1	0.105	2.056	61.47
焊丝 4	0.013 ~ 88.83	0.024	0.125	3.832

积之和; 另一种是聚集过程, 它是由几十个甚至几百个一次粒子聚集在一起的过程, 一次粒子靠表面粘连在一起, 有明显的边界^[13]。

从图 2 的粒度分布图可以看到, 试验条件下测得的烟尘粒度分布均为多峰分布, 总体呈现 0.01 ~ 0.1 μm 区间内存在 1 个分布峰, 0.1 ~ 1 μm 区间内存在一个分布峰, 大于 1 μm 区间内存在 1 个或多个分布峰的规律。焊丝 1 的焊接烟尘粒度在 0.01 ~ 0.1 μm 区间约 45%, 0.1 ~ 1 μm 区间约 20%, 大于 1 μm 的区间约 35%; 焊丝 2 的焊接烟尘粒度在 0.01 ~ 0.1 μm 区间约 50%, 0.1 ~ 1 μm 区间约 28%, 大于 1 μm 的区间约 22%; 焊丝 3 的焊接烟尘粒度在 0.01 ~ 0.1 μm 区间约 10%, 0.1 ~ 1 μm 区间约 32%, 1 ~ 20 μm 区间约 42%, 100 ~ 450 μm 区间约 8%; 焊丝 4 的焊接烟尘粒度在 0.01 ~ 0.1 μm 区间约 47%, 0.1 ~ 1 μm 区间约 30%, 大

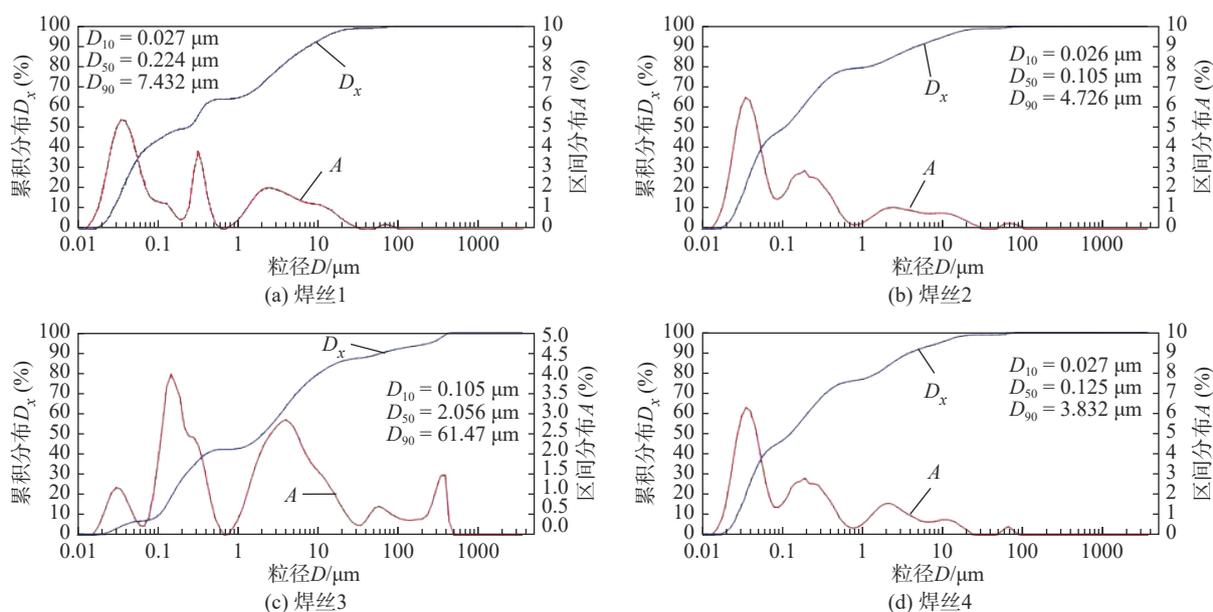


图 2 焊接烟尘粒度分布图

Fig. 2 Particle size distribution diagram of welding fume. (a) wire electrode 1; (b) wire electrode 2; (c) wire electrode 3; (d) wire electrode 4

于 $1\ \mu\text{m}$ 的区间约 23%。通过对粒度分布图形的观察可以看到,焊接烟尘的粒度分布均不属于常规的正态分布,实心焊丝进行 GMAW 焊接时,焊接烟尘整体的粒径分布并不平均,由于其成分不同和不同长大过程,其粒度分布可能呈现出多段式分布。同时,也要注意在焊接烟尘取样过程中,烟尘颗粒也可能发生聚集,进而影响焊接烟尘形貌。

当颗粒物粒径小于 $2.5\ \mu\text{m}$ 时,可以被吸入进肺的细支气管、肺囊泡和肺泡中。文献 [8] 中提到能通过人体上呼吸道进入肺部,对人体影响最大的粒径是 $0.1\sim 1\ \mu\text{m}$ 。有研究表明,在焊接烟尘中,随着粒径的增大,其 Mn 元素含量逐渐增多。在 $0.1\sim 1\ \mu\text{m}$ 的粒度区间内,焊丝 3 与焊丝 4 占比分别为 32% 和 30%,要高于焊丝 1 和焊丝 2 的 20% 和 28%。焊丝 3 的平均粒径 D_{50} 最大,为 $2.056\ \mu\text{m}$,从分布来看其出现的分布峰也最多。

2.3 焊接烟尘成分及形貌

表 5 为通过电感耦合等离子体原子发射光谱法 (Inductively coupled plasma atomic emission spectroscopy, ICP-AES) 所测得的焊接烟尘成分。

表 5 焊接烟尘化学成分 (质量分数, %)

Tab. 5 Chemical compositions of welding fume (wt.%)

焊丝编号	Fe	Mn	Si	Mo	Ti	其他
焊丝 1	54.64	6.15	—	8.46	0.88	29.87
焊丝 2	51.81	8.84	—	3.74	1.47	34.17
焊丝 3	55.24	8.82	2.68	—	—	33.26
焊丝 4	55.81	9.75	1.84	—	—	32.60

由表 5 可知,通过 ICP-AES 检测的无镀铜实心焊丝烟尘的化学成分主要有 Fe, Mn, Mo, Ti; 镀铜实心焊丝烟尘的化学成分主要为 Fe, Mn, Si 元素。

试验中,2 种制备工艺焊丝的焊接烟尘中都含有 Fe 元素和 Mn 元素,其中 Fe 元素含量均达到了 50% 以上;2 种焊丝焊接烟尘中均未检测出明显的 Cu 元素含量,一方面可能是改良工艺后镀铜实心焊丝 Cu 元素含量下降,另一方面可能是焊丝中 Cu 元素烧损后未大量进入烟尘中;在 2 种不同强度等级的无镀铜实心焊丝的焊接烟尘中都检测到了 Mo 元素,但在镀铜实心焊丝中未检测到 Mo 元素。

通过扫描电子显微镜和能谱仪对焊接烟尘形貌

及化学成分进一步分析,可以观察到除了均匀分布的烟尘之外还会存在一定形状的聚集烟尘,利用能谱仪对聚集烟尘的化学成分进行分析。针对扫描电子显微镜和能谱仪的特点,在分析元素时,不考虑 C 元素。

图 3、图 4 为焊丝 1 的烟尘形貌和能谱图,其中可以观察到圆点、片状与长条状聚集形貌。圆点形貌中,Fe 元素含量占比约 50%,O 元素约 25%,Mn 元素约 9%;片状形貌中,O 元素含量与圆点形貌相差不多,但 Fe 元素下降至 10%,Mn 元素上升至 20%,同时检测到了 12% 左右的 Si 元素和 Ti 元素;长条状形貌中,Fe 元素与 O 元素均占比 35% 左右,也可检测到一部分 Mn 元素,整体化学成分与原点状形貌成分相似。

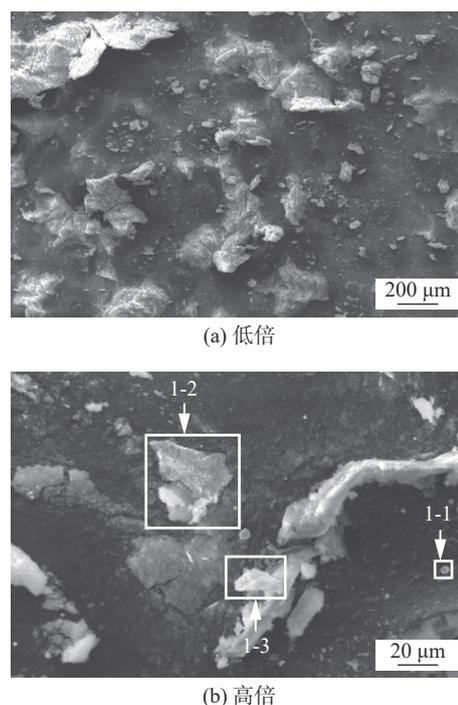


图 3 焊丝 1 焊接烟尘形貌

Fig. 3 Welding fume appearance of wire electrode 1. (a) high multiples; (b) low multiples

图 5、图 6 为焊丝 2 的烟尘形貌和能谱图,其中可观察到大面积的片状、圆点状与较小的条状聚集形貌。多量元素为 O, Fe, 不同形貌之间含量有所差异。

图 7、图 8 为焊丝 3 的烟尘形貌和能谱图,其中可以观察到圆点与条状烟尘的聚集形貌;通过分析圆点形貌的成分,可知其以 Fe 的氧化物为主,约占比 65%;条状形貌中 Fe, O 含量相当,各占约 30%,占

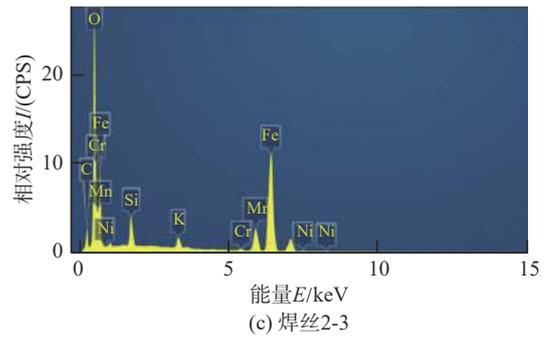
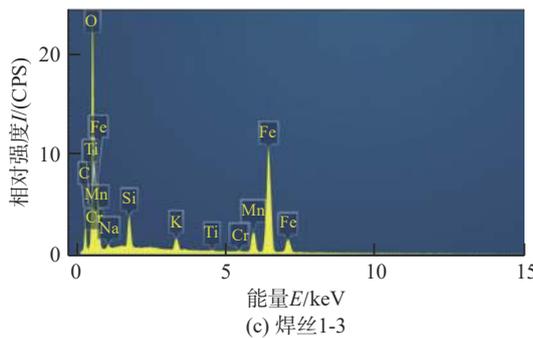
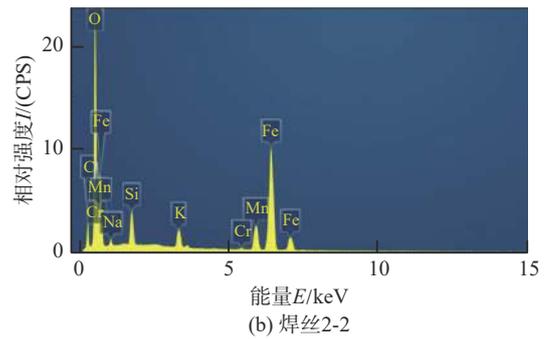
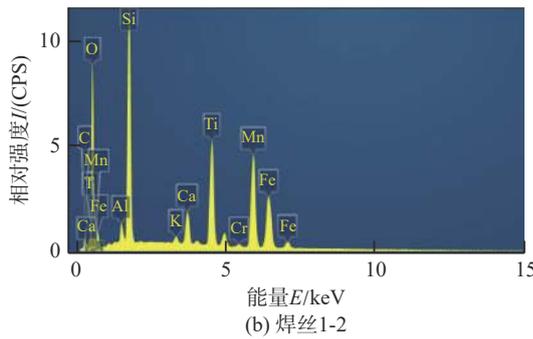
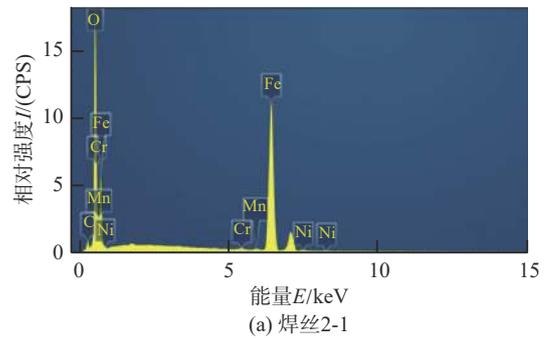
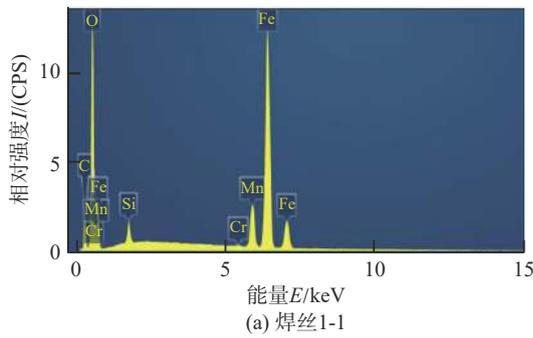


图4 焊丝1焊接烟尘能谱图

图6 焊丝2焊接烟尘能谱图

Fig. 4 Welding fume characterization of wire electrode 1 by EDS. (a) location 1-1; (b) location 1-2; (c) location 1-3

Fig. 6 Welding fume characterization of wire electrode 2 by EDS. (a) location 2-1; (b) location 2-2; (c) location 2-3

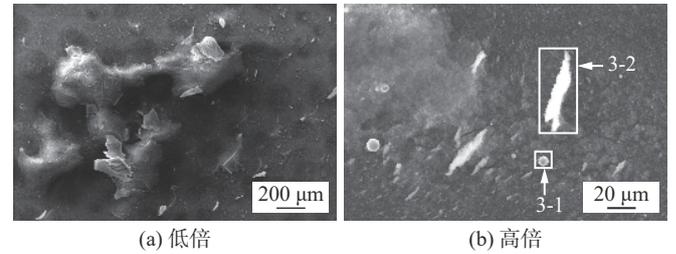
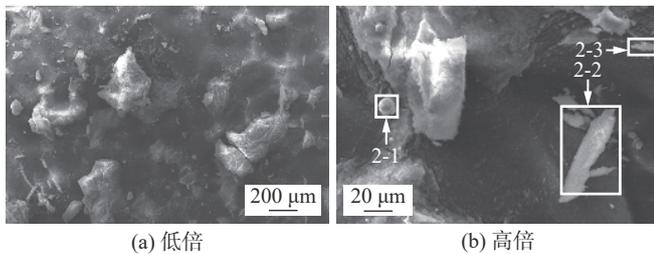


图5 焊丝2焊接烟尘形貌

图7 焊丝3焊接烟尘形貌

Fig. 5 Welding fume appearance of wire electrode 2. (a) high multiples; (b) low multiples

Fig. 7 Welding fume appearance of wire electrode 3. (a) high multiples; (b) low multiples

大部分比例, Mn 元素约占 5%, Si 也占有一定比例。

图9、图10为焊丝4的烟尘形貌和能谱图,其聚集形貌、元素种类与焊丝3类似,但值得注意的是在

焊丝4烟尘的条状和片状形貌组织中 Fe 元素含量占比有所增加。

通过能谱图与元素含量可以看出无镀铜实心焊

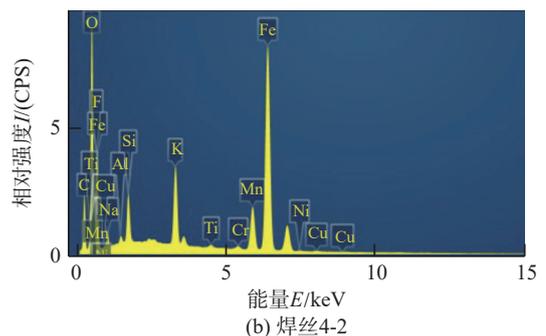
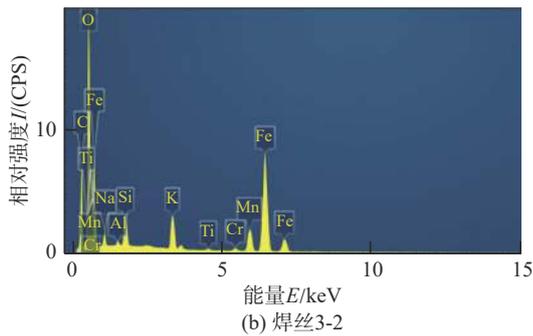
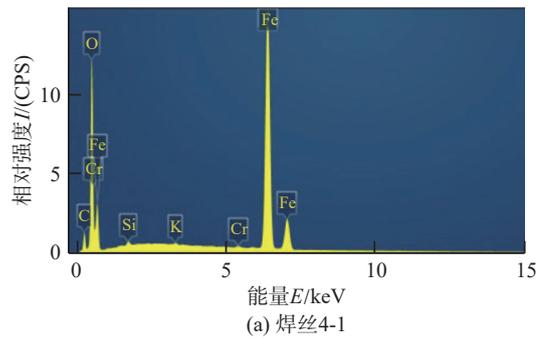
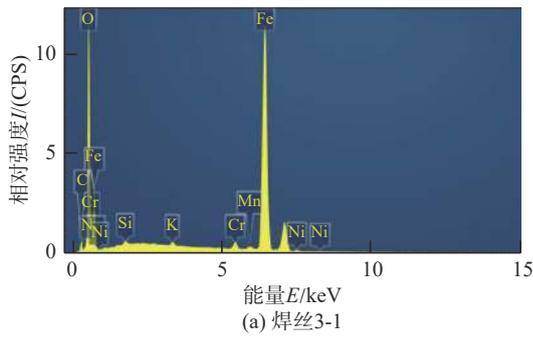


图8 焊丝3焊接烟尘能谱图

Fig. 8 Welding fume characterization of wire electrode 3 by EDS. (a) location 3-1; (b) location 3-2

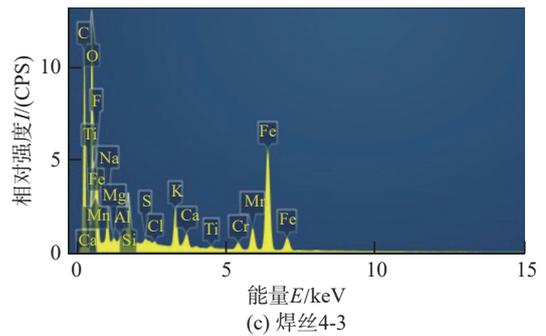


图10 焊丝4焊接烟尘能谱图

Fig. 10 Welding fume characterization of wire electrode 4 by EDS. (a) location 4-1; (b) location 4-2; (c) location 4-3

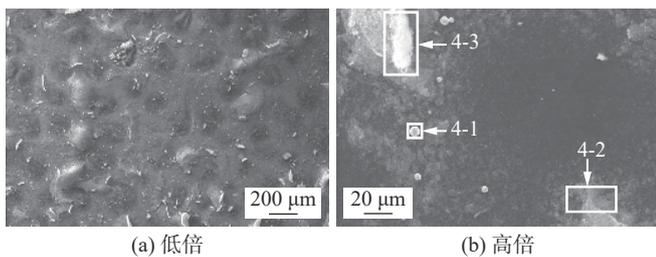


图9 焊丝4焊接烟尘形貌

Fig. 9 Welding fume appearance of wire electrode 4. (a) high multiples; (b) low multiples

丝的烟尘中主要包含 Fe, Mn, O 3 种元素, 而镀铜实心焊丝的烟尘中 Fe, Mn, Si, O 为主要元素, 元素种类基本相同, 但元素的含量存在一定差异。从形貌上来看圆点状形貌在每个烟尘样品中都是最基础的组成形貌, 主要为 Fe 的氧化物, 其成分 Fe 元素占比最多, 可达 50% ~ 60%; 随着烟尘颗粒的长大以及烟尘颗粒之间的聚集而形成条状或片状形貌, 该形貌烟尘中 Fe 元素含量占比相对下降, 但是 Mn, Si 元素有所增加, Mn 与 Si 这 2 种元素的氧化物在焊接烟尘会对人体产生不利的影 响, 而这部分烟尘的粒度也相对更大一些。试验选用的实心焊丝的 Cu 含量均小

于 0.10%, 在烟尘成分中的 Cu 元素含量占比很低; 对于烟尘中出现的 Al 元素不排除为导电胶带中铝芯的干扰。通过观察发现, 烟尘中主要由 Fe, Mn, Si 的氧化物组成, 在形貌上存在差异, 还可通过不同的方式聚集连接在一起。

3 结论

(1) 通过对高强度用无镀铜实心焊丝与镀铜实心焊丝的焊接烟尘进行收集和分析, 焊丝 2 焊接烟尘排放速率是试验中最小的; 焊丝 4 是试验中整体焊接烟尘排放速率最为稳定的。

(2) 无镀铜实心焊丝与镀铜实心焊丝的焊接烟尘在粒度分布上有所差异, 无镀铜实心焊丝在 0.01 ~

0.1 μm 区间占比最高, 镀铜实心焊丝则在 0.1 ~ 1 μm 区间占比最高, 由此推断镀铜实心焊丝的焊接烟尘对人体影响更大。结合焊丝制备时镀铜工艺的影响, 无镀铜实心焊丝的研发推广对于绿色环保来说是必要的。

(3) 无镀铜与镀铜高强钢实心焊丝的焊接烟尘形貌均为圆点状和条片状颗粒聚集并长大所形成的团簇; 2 种工艺的实心焊丝元素种类基本一致, 且以氧化物的形式存在, 其中, Fe 含量占比在 50% 以上, Mn 含量次之, 并发现了少量的 Si。

参考文献

- [1] 马丽. 焊接场所环境污染分析及控制技术 [J]. 太原科技, 2006(12): 61 - 63.
Ma Li. Analysis on environment pollution and its countermeasures in jointing ground[J]. Taiyuan Science & Technology, 2006(12): 61 - 63.
- [2] 朱珍文, 石玕, 顾玉芬, 等. 焊接烟尘的危害及综合治理研究现状 [J]. 电焊机, 2022, 52(5): 1 - 12.
Zhu Zhenwen, Shi Yu, Gu Yufen, et al. Research status of harm and comprehensive treatment of welding fume[J]. *Electric Welding Machine*, 2022, 52(5): 1 - 12.
- [3] 王仲焕, 陆勇, 孔兆财. 浅析治理焊接烟尘的措施 [J]. 焊接, 2011(6): 41 - 45.
Wang Zhonghuan, Lu Yong, Kong Zhaocai. Analysis of measures to control welding fume[J]. *Welding & Joining*, 2011(6): 41 - 45.
- [4] 黄幼仙, 郑燕, 贾军, 等. GMAW 无镀铜实心焊丝及其应用 [J]. 电焊机, 2012, 42(10): 70 - 72.
Huang Youxian, Zheng Yan, Jia Jun, et al. GMAW copper-free solid wire and its application[J]. *Electric Welding Machine*, 2012, 42(10): 70 - 72.
- [5] 宋月, 陈朝晖, 杜春雨, 等. 无镀铜焊丝生产工艺装备及未来发展趋势 [J]. 金属制品, 2020, 46(5): 1 - 3.
Song Yue, Cheng Zhaohui, Du Chunyu, et al. Production process equipment and future development trend of copper-free welding wire[J]. *Metal Products*, 2020, 46(5): 1 - 3.
- [6] 卜智翔, 鲍升凯, 王立世, 等. 熔化极气体保护焊发尘率研究进展 [J]. 焊接, 2016(7): 17 - 21.
Piao Zhixiang, Bao Shengkai, Wang Lishi, et al. Research

- progress on dust generation rate of fusion electrode gas shielded welding[J]. *Welding & Joining*, 2016(7): 17 - 21.
- [7] 鲍升凯, 卜智翔, 王若玺, 等. 焊接材料对形成焊接烟尘影响的研究进展 [J]. 焊接, 2018(10): 20 - 25.
Bao Shengkai, Bu Zhixiang, Wang Ruoxi, et al. Research progress on the influence of welding materials on the formation of welding fume[J]. *Welding & Joining*, 2018(10): 20 - 25.
- [8] Scotti A, Meneses A V . Governing parameters affecting fume generation in short-circuit MAG welding[J]. *Welding in the World: Journal of the International Institute of Welding*, 2014, 58(3): 367 - 376.
- [9] Carpenter K R, Monaghan B J, Norrish J . Influence of shielding gas on fume formation rate for gas metal arc welding (GMAW) of plain carbon steel[J]. *ISIJ International*, 2009, 49(3): 416 - 420.
- [10] Carpenter K R, Monaghan B J, Cuiuri D, et al. Optimising the welding conditions to determine the influence of shielding gas on fume formation rate and particle size distribution for gas metal arc welding[J]. *Welding in the World*, 2017, 61(3): 473 - 481.
- [11] Srinivasan K, Balasubramanian V. Effect of heat input on fume generation and joint properties of gas metal arc welded austenitic stainless steel[J]. *Journal of Iron and Steel Research (International)*, 2011, 18(10): 72 - 79.
- [12] 许芙蓉. GMA 焊接工艺参数对焊接烟尘产生影响的研究 [D]. 天津: 天津大学, 2008.
Xu Furong. Research on the effect of GMA welding process parameters on welding fume generation[D]. Tianjin, China: Tianjin University, 2008.
- [13] 肖诗祥, 施雨湘, 杨世柏. 焊后焊接烟尘粒子的凝并 [J]. 武汉交通科技大学学报, 1997(4): 68 - 73.
Xiao Shixiang, Shi Yuxiang, Yang Shibai. Coagulation of welding fume particles after welding[J]. *Journal of Wuhan University of Transportation Science and Technology*, 1997(4): 68 - 73.

第一作者: 石柏成, 学士, 助理工程师; 主要从事焊接材料检验和标准化相关工作; shibc13812952347@126.com。

(编辑: 王盈盈)

本文引用格式:

石柏成, 杨子佳, 马一鸣, 等. 高强钢用无镀铜与镀铜实心焊丝焊接烟尘的分析[J]. 焊接, 2024(9): 15 - 22.
Shi Baicheng, Yang Zijia, Ma Yiming, et al. Welding fume for uncoated and coated copper wire electrodes of high-strength steels[J]. *Welding & Joining*, 2024(9): 15 - 22.