



DOI: 10.7512/j.issn.1001-2303.2024.04.13

承压设备用 E5015-N1 焊条焊接烟尘物相及 微观形态分析

魏玉顺¹, 马青军^{1*}, 韦 晨¹, 党丽华¹, 孙明辉², 武鹏博³

1. 天津市特种设备监督检验技术研究院, 天津 300192

2. 福建省特种设备检验研究院, 福建 福州 352100

3. 中国机械总院集团哈尔滨焊接研究所有限公司, 黑龙江 哈尔滨 150028

摘 要: 针对承压设备用 E5015-N1 焊条焊接产生的烟尘进行了全面研究。利用自主研发的焊接材料施焊过程中毒害物质测定设备, 使用沉淀与滤纸收集法收集了不同焊接电流条件下的烟尘样本, 采用 XRD 及扫描电镜等技术对烟尘的物相及微观形态进行了分析。结果表明, 过小或过大的焊接电流均会导致烟尘增加, 渣壁过渡时会在熔滴表面产生大量烟尘, 飞溅也是烟尘的产生源之一。E5015-N1 焊条烟尘的主要物相是氟化物和氧化物, 具有磁性的烟尘粒子在磁极偶作用力的驱动下形成链状聚集, 单个或多个一次烟尘粒子会聚集形成具有“壳-核”形态的二次粒子。研究结果为焊接烟尘的控制提供了科学依据, 并对焊接健康危害的评估提供了重要信息。

关键词: 焊接烟尘; 焊接电流; 物相; 形态

中图分类号: TG422 文献标识码: A 文章编号: 1001-2303(2024)04-0091-07

Phase and Micro Morphology Analysis of Welding Fume of E5015-N1 Covered Electrode for Pressure Equipment

WEI Yushun¹, MA Qingjun^{1*}, WEI Chen¹, DANG Lihua¹, SUN Minghui², WU Pengbo³

1. Tianjin Special Equipment Inspection Institute of Technology, Tianjin 300192, China

2. Fujian Special Equipment Inspection and Research Institute, Fuzhou 352100, China

3. Harbin Welding Institute Limited Company, CAM, Harbin 150028, China

Abstract: The welding fume of E5015-N1 covered electrode for pressure equipment was collected by precipitation and filter paper collection method. The phase and microstructure of the fume were analyzed by XRD and SEM. The results show that too small or too large welding current will lead to the increase of welding fume. During the slag wall transition, a large amount of fume will be generated on the droplet surface, and the spatter is one of the source of fume. The main phase of E5015-N1 covered electrode fume is fluoride and oxide. The magnetic fume particles form a chain driven by the force of magnetic pole couple, and single or multiple primary fume particles will gather to form secondary particles with "shell-core" shape.

Keywords: welding fume; welding current; phase; morphology

收稿日期: 2023-11-27 修回日期: 2023-12-14

基金项目: 天津市市场监督管理委员会科技计划项目(2019-W13)

作者简介: 魏玉顺(1979—), 学士, 工程师, 主要从事有色金属材料焊接工艺及检验检测工作。E-mail: yswwei7964@163.com。

通讯作者: 马青军(1990—), 硕士, 工程师, 主要从事焊接工艺及焊接材料的研发与检测, 与焊接相关的国家、行业、地方和团体标准的制修订等。
E-mail: hwimqj@163.com。

引用格式:魏玉顺,马青军,韦晨,等.承压设备用E5015-N1焊条焊接烟尘物相及微观形态分析[J].电焊机,2024,54(4):91-97.

Citation:WEI Yushun, MA Qingjun, WEI Chen, et al. Phase and Micro Morphology Analysis of Welding Fume of E5015-N1 Covered Electrode for Pressure Equipment[J]. Electric Welding Machine, 2024, 54(4): 91-97.

0 引言

随着科学技术、经济、民生的高速发展,焊接作为一种极其重要的材料连接方法广泛应用于各个生产制造领域。由于工程领域设备向高参数化发展,新材料与新工艺的不断涌现与使用促进了焊接技术发展,传统的焊接技术与计算机技术、人工智能相互结合提高了焊接质量及焊接效率。2020年中国焊接材料总产量高达455万吨,随着焊接材料使用量的增加,焊接过程中产生的毒害物质也越发的引起关注。国际标准化技术委员会ISO TC44 SC9 Health and safety 共计发布了19个标准或相关文件用于检测焊接过程中产生的烟尘及气体,美国焊接协会于2003年发布了AWS F1.5M: 2003《Methods for Sampling and Analyzing Gases from Welding and Allied Processes》,并于2013年发布了AWS F1.2: 2013《Laboratory Method for Measuring Fume Generation Rates and Total Fume Emission of Welding and Allied》^[1-2]。中国机械工程学会焊接学会第IX委员会EHS于2017年在北京工业大学召开的会议上明确指出要编写和完善国内的焊接健康与安全标准,中国焊接协会于2017年发布实施了T/CWAN 0002—2017《焊接车间烟尘卫生标准》^[3]。

焊接时母材及焊接材料在热源的高温作用下熔化并产生蒸汽,当蒸汽脱离热源与具有氧化性的保护气体或大气接触时被氧化并冷凝后产生烟尘。焊接烟尘的成分及浓度可因母材、焊接材料、焊接工艺及作业环境的不同而有所变化。焊接作业人员长期接触焊接烟尘,会导致肺部发生病理改变,严重时会引起尘肺病。GBZ 2.1—2019《工作场所所有害因素职业接触限值 第1部:化学有害因素》中明确规定电焊烟尘PC-TWA的接触限制为4 mg/m³,并将其列为G2B^[4]。

由于锅炉及压力容器的焊接场所及操作空间有限,行业自动化程度不高,因此焊条电弧焊是最常用的焊接方法,焊条药皮在保护熔池及提供化学

冶金反应所必须的合金元素的同时也会产生大量焊接烟尘。史建涛等人^[5]调研了34家压力容器制造企业,发现没有一家制造现场具有专业的整体或局部防护烟尘措施。因此为了研究焊接烟尘产生的机理与来源,本文使用自主研发的焊接材料施焊过程中毒害物质测定设备对E5015-N1焊条焊接产生的烟尘进行了物相及微观形态分析。

1 试验装置与收集方法

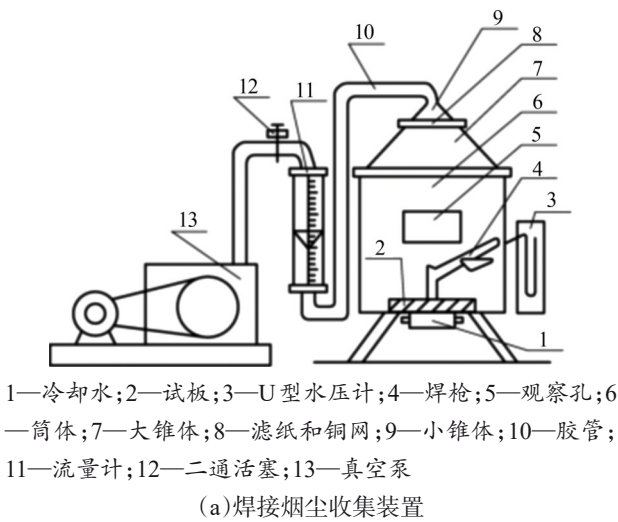
研究采用了2种方法收集烟尘样品,分别为沉积收集法和滤纸收集法。沉积收集法过程简单,获得的烟尘样品较少,烟尘颗粒之间堆积少,便于在扫描电镜下观察烟尘的微观形态;而滤纸收集法可获到大量烟尘,适用于烟尘的定量测量、EDS及XRD分析,但是该方法收集时烟尘粒子不断在滤纸上堆积重叠,相互碰撞,在一定程度上破坏了粒子的原始形貌,不利于观察微观形态。

1.1 沉积收集法

沉积收集法的装置示意如图1a所示。将导电胶带粘结在橡皮泥上并放置在距离焊条(试板中心)200 mm处,如图1b所示,然后使用焊条在试板上进行施焊10 s,焊接过程中尽量保证焊条与钢板垂直且不摆动。停止焊接后,通过观察孔确定烟尘完全沉积后取出导电胶带,将带有烟尘样品的导电胶带放入扫描电镜进行观察。

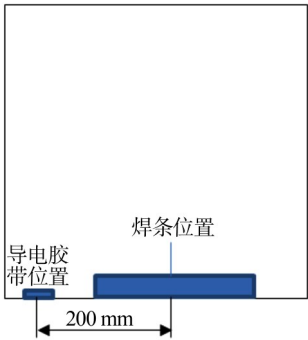
1.2 滤纸收集法

首先称量焊条、慢速定量滤纸及脱脂棉前重,分别记为 m_1 、 m_2 及 m_3 ,精确至0.000 1 g。将尺寸为300 mm×200 mm×10 mm的Q235B钢板放入焊接烟尘收集装置中(见图1a),把滤纸放在小锥体开口处的铜网下面并接通冷却水,打开真空泵及活塞,然后使用焊条在试板上施焊30 s,停止焊接后继续抽气5 min后关闭活塞,取下滤纸并使用脱脂棉擦拭小锥体及大筒体内壁(大筒体下部180 mm不擦)的尘,称量焊条、滤纸及脱脂棉后重分别记为 m_4 、 m_5 、



1—冷却水;2—试板;3—U 型水压计;4—焊枪;5—观察孔;6—筒体;7—大锥体;8—滤纸和铜网;9—小锥体;10—胶管;11—流量计;12—二通活塞;13—真空泵

(a)焊接烟尘收集装置



(b)导电胶带放置位置

图 1 焊接烟尘定量测试装置及导电胶带放置位置

Fig. 1 Welding smoke and dust quantitative testing device and placement of conductive tape

$m_6^{[6]}$ 。根据式(1)、式(2)分别计算 F_t 、 F , F_t 为国际上常用的焊接材料烟尘表示方法,单位是 mg/min , F 为国内常用。

$$F_t = \frac{(m_5 - m_2) + (m_6 - m_3)}{0.5} \quad (1)$$

$$F = \frac{(m_5 - m_2) + (m_6 - m_3)}{m_4 - m_1} \times 1000 \quad (2)$$

2 焊接材料

焊接材料采用承压设备常用的直径 4.0 mm 的 E5015-N1 焊条,推荐焊接电流为 140~180 A,其渣系为 $\text{CaO-SiO}_2\text{-CaF}_2$ 。焊条药皮的主要组成为大理石(CaCO_3)、萤石(CaF_2)、钛白粉(TiO_2)、 Na_2CO_3 、锰铁粉(Mn, Fe)、硅铁(Si, Fe)、钛铁(Ti, Fe)及石英(SiO_2)等,其药皮的粘结剂为钾钠水玻璃($x\text{Na}_2\text{O} \cdot y\text{K}_2\text{O} \cdot z\text{SiO}_2$)。焊条熔敷金属化学成分与力学性能

见表 1、表 2,符合 NB/T 47018.2—2017《承压设备用焊接材料订货技术条件 第 2 部分:钢焊条》中 E5015-N1 要求^[7]。

表 1 E5015-N1 焊条熔敷金属化学成分(质量分数,%)

Table 1 Chemical composition of E5015-N1 welding rod deposited metal(wt. %)

C	Mn	Si	S	P	Mo	Ni	V
0.063	1.12	0.53	0.007	0.015	0.010	0.55	0.005

表 2 E5015-N1 焊条熔敷金属力学性能

Table 2 Mechanical properties of E5015-N1 welding rod deposited metal

抗拉强度 R_m/MPa	规定塑性延伸强度 $R_{p0.2}/\text{MPa}$	断后伸长率 $A/\%$	冲击吸收能量 ($-40\text{ }^\circ\text{C}$) KV_2/J
564	439	29	130

3 结果与分析

3.1 焊接电流对烟尘的影响

使用沉积收集法研究了焊接电流大小对烟尘量的影响,焊接过程中保持短弧操作,电弧电压为 22~24 V,焊接速度为 3.5 mm/s。图 2 是在扫描电镜下观察到的焊接电流分别为 100 A、125 A、150 A、175 A、200 A、225 A 时导电胶带中心位置的烟尘(白色物质)。

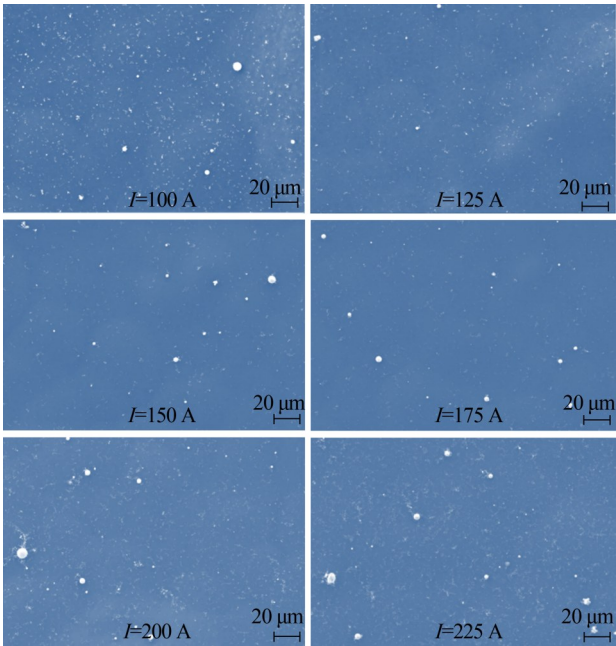


图 2 焊接电流对烟尘量的影响

Fig. 2 Effect of welding current on smoke and dust content

当焊接电流为 100 A 时,由于电流小导致电弧稳定性差,存在弧喘息现象,电弧的不稳定燃烧减弱了药皮对焊接区域的保护作用,促使高温蒸汽与大气接触形成大量烟尘。随着焊接电流增至 150 A、175 A,该方法收集的烟尘量显著减少,但随着焊接电流的继续增加,尤其是当电流达到 225 A 时,过大的焊接电流使电弧能量增加,促使焊芯及药皮蒸发加快进入空气导致烟尘量急剧增加。

任杰亮等人^[8]基于烟尘检测的相对灰度理论,使用背光拍摄方法研究了焊条电弧焊产生的烟尘并进行了动态检测,结果表明金属蒸汽扩散到电弧外部后形成颗粒及团絮状烟尘,烟尘在电弧等离子流与气流冲击试板及熔池形成的反作用流下向两侧及上部移动,如图 3 所示,图中虚线标出了电弧周围的烟尘浓度较高区域。图 3a、3b 表明当熔渣及熔滴沿套筒过渡时会在其表面形成大量烟尘,这说明熔滴过渡形式、熔滴尺寸及过渡时间均对烟尘量有所影响。

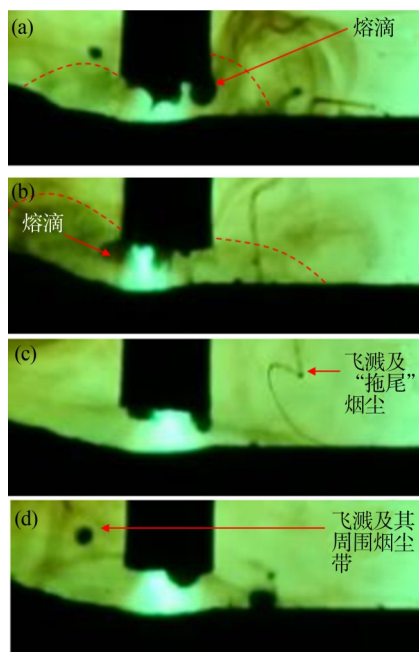


图 3 焊接烟尘高速摄像

Fig. 3 High speed camera for welding smoke and dust

由图 3c、3d 可知,焊接飞溅也是烟尘的产生源之一。图 3c 中飞溅颗粒形成了“线条”式烟尘,这是由于飞溅颗粒飞出电弧区域时速度较快,其高温表面与大气接触瞬时氧化形成类似“拖尾”的烟尘,当其速度减缓时,形成的烟尘则向其上方移动。另

外,当飞溅飞行速度慢时也会形成图 3d 所出现“烟尘带”围绕在飞溅周边。综上可知,使用小电流与大电流焊接时飞溅的增加也是烟尘增多的主要原因之一,小电流焊接出现飞溅增多现象主要是弧喘息时电弧再引燃导致,大电流时药皮中的造气剂在短时间内剧烈燃烧产生大量气体引起飞溅增加,另一方面焊接电流过大使熔滴在渣壁过渡时电流通过短路桥产生的电阻热增加,短路桥的过热汽化使其膨胀爆炸引起飞溅。

使用扫描电镜观察焊接电流为 225 A 时的飞溅,发现飞溅存在实心 and 空心两种,如图 4 所示。图 4 中的实心飞溅以柱状晶方式生长,空心飞溅则以树枝状等轴晶生长,这是由于空心飞溅内部的高温气体降低其冷却速度,抑制了柱状晶的生成,利于其形成等轴晶。EDS 分析表明该实心飞溅主要成分是 Fe 与 O,其比例接近 3:4,而空心飞溅除了含有 Fe、O 外,还含有 Ca、Si、Ti、Na。

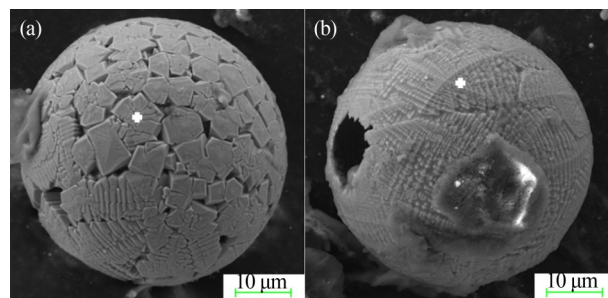


图 4 焊接飞溅形貌

Fig. 4 Welding spatter morphology

3.2 烟尘物相分析

使用滤纸收集法收集了电流为 150 A 时的烟尘,经计算 F_t 为 327.41 mg/min, F 为 18.14,对烟尘的 EDS 分析结果表明,焊接烟尘中主要的元素为 O、F、Fe、Na、Si、K、Ca、Mn,其中元素含量最高的是 Fe,其次为 O。使用 XRD (Cu 靶、电压 40 kV、电流 40 mA、扫描步长为 0.01°/min、扫描角度为 10°~120°) 对烟尘的物相进行了分析,其可能存在的物相如图 5 所示,主要为氟化物和氧化物 2 种。烟尘中的氟化物会刺激焊接作业人员胃粘膜,并引起骨损伤,焊接作业人员长期吸入氧化铁会导致铁尘肺或铁沉积病,而氧化锰对呼吸道有刺激作用引发肺炎,长期接触会损害神经系统,尺寸越细小的烟尘颗粒的穿透性越强,越难以被排出体外,同时烟尘团聚体在

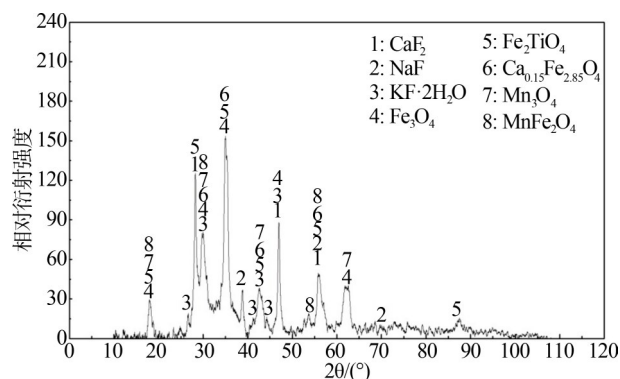


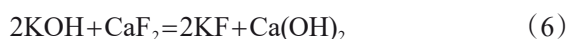
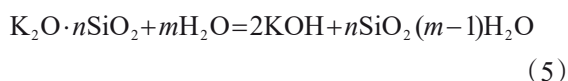
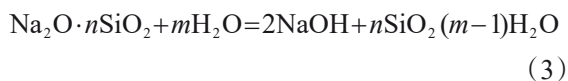
图5 焊接烟尘的XRD分析结果

Fig. 5 XRD analysis results of welding smoke and dust

人肺泡内会分散形成更细小的初级颗粒,加剧对人体的伤害^[9]。

3.2.1 氟化物的形成原因

由图5可知烟尘中的氟化物主要有 CaF_2 、 NaF 、 $\text{KF} \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 三种,其中 CaF_2 主要是由于药皮中萤石在电弧的高温作用下部分变成气态的 CaF_2 ,气态 CaF_2 离开高温区域则凝华成细颗粒 CaF_2 烟尘。另外 CaF_2 会与药皮中的钾钠水玻璃相互作用从而降低焊缝中的氢含量,其作用机理为^[10]



上述生成的 NaF 、 KF 进入烟尘中,而 Ca(OH)_2 则分解成 CaO 与 H_2O 。 CaO 进入熔渣, H_2O 则与 CaF_2 相互作用生成高温下稳定的 HF ,从而达到降低焊缝氢含量的目的。由于 KF 极易潮解,因此在烟尘收集与分析过程中其与大气中 H_2O 结合生成了 $\text{KF} \cdot 2\text{H}_2\text{O}$,所以XRD分析得到的物相为 $\text{KF} \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 。

3.2.2 氧化物形成原因

施雨湘等人^[11]提出了焊接烟尘中的 Fe_3O_4 晶体的形核机制为均质形核,其原因是焊接时液态 Fe 与 O_2 结合生成液态 FeO ,随着冷却进行液态 FeO 再次与更多的 O_2 反应生成 Fe_3O_4 。

药皮中锰铁主要作用是先期脱氧与沉淀脱氧,即 Mn 与 O 反应生成 MnO 、 Mn_2O_3 、 MnO_2 及 Mn_3O_4 中的一种或者多种,本试验条件下得到的烟尘中为

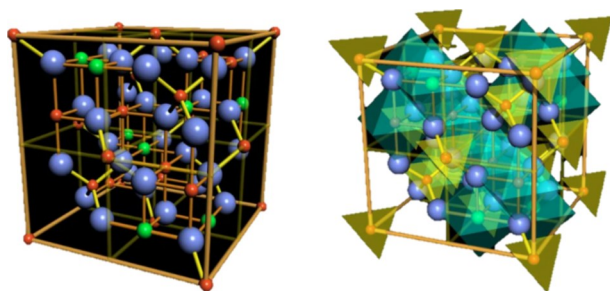
Mn_3O_4 。

Nicolas Floros^[12]认为焊接钢材所产生烟尘的主要是铁基尖晶石氧化物,也就是 $\text{M}_x\text{Fe}_{3-x}\text{O}_4$,这些尖晶石的组分主要取决于烟尘其他合金元素, M 可为 Cr^{3+} 、 Ni^{2+} 、 Mn^{2+} 、 Co^{2+} 、 Cu^{2+} 、 Ti^{4+} 等。Nakamura和Fuwa^[13]使用 $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 与 TiO_2 粉末在1573 K温度下制备了具有尖晶石结构的 Fe_2TiO_4 ,其 Fe^{2+} 占据A点位, Fe^{2+} 与 Ti^{4+} 共同占据B点位。Guillemet-Fritsch S等人^[14]在使用氧化物熔体量热法研究了高温下的铁锰型尖晶石氧化物,研究表明 Mn_3O_4 与 Fe_3O_4 在一定条件下发生反应生成了 $(\text{Mn}_x\text{Fe}_{1-x})_3\text{O}_4$,化学反应能主要来源于氧化还原反应,即 $\text{Mn}^{3+} + \text{Fe}^{2+} = \text{Mn}^{2+} + \text{Fe}^{3+}$ 。Cieslak^[15]通过坩埚下降法合成了 $\text{Ca}_x\text{Fe}_{3-x}\text{O}_4$ ($x \leq 0.28$)并表明 Ca^{2+} 占据了A位置。综上所述可知,药皮中添加的大理石(CaCO_3)、萤石(CaF_2)、钛白粉(TiO_2)、锰铁粉(Mn 、 Fe)及钛铁(Ti 、 Fe)为 Fe_2TiO_4 、 $\text{Ca}_{0.15}\text{Fe}_{2.85}\text{O}_4$ 及 MnFe_2O_4 的形成提供可能性。

4 烟尘形貌分析

烟尘中的 Fe_3O_4 是典型的反尖晶石结构,XRD给出的晶体结构如图6所示,其空间群为 $\text{Fd-}3\text{m}$,即包含了四面体和八面体结构,故其分子式可写成: $\text{Fe}^{3+}[\text{Fe}^{2+}\text{Fe}^{3+}]\text{O}_4$, Fe^{2+} 在八面体位置, Fe^{3+} 平均地出现在八面体位置和四面体位置上^[16]。正因为 Fe^{2+} 与 Fe^{3+} 在八面体位置上的无序排列,电子可在铁的两种氧化态间迅速发生转移,所以 Fe_3O_4 固体具有优良的导电性且有磁性。另外,具有尖晶石结构的 $\text{M}_x\text{Fe}_{3-x}\text{O}_4$ 由于其四面体位置上的自旋 Fe^{2+} 离子是Jahn-Teller活性离子,在低温下诱导发生立方-四方相变,随着温度的进一步降低,自旋或轨道的有序化会获得正交相,因此铁基尖晶石结构出现了丰富的磁相,表现出铁磁性、螺旋磁性或非共线磁性。

因此具有磁性的一次烟尘 Fe_3O_4 与 $\text{M}_x\text{Fe}_{3-x}\text{O}_4$ 粒子扩散过程中在磁极偶作用力的驱动下聚集在一起形成“链状”烟尘粒子,如图7a所示。进一步发现多个或单个一次烟尘粒子会被某种物质包裹形成二次烟尘粒子,图7b可明显看见被包裹的一次烟尘粒子。施雨湘等人^[17]对单组分焊条烟尘的研究表明在金红石、萤石焊条中非晶态物质会以层壳状包



蓝色球: O^{2-} ; 绿色球: Fe^{2+} ; 红色球: Fe^{3+}

图6 Fe_3O_4 反尖晶石结构

Fig. 6 Structure of Fe_3O_4 anti spinel

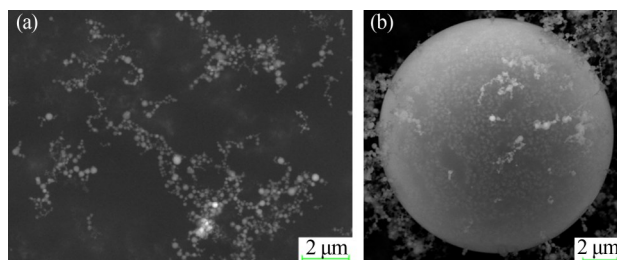


图7 烟尘形貌

Fig. 7 Smoke and Dust Morphology

裹在晶体粒子的周围。Konarski 等人^[18]提出了焊条烟尘的“壳-核”形态,壳主要是O、K及F元素,核主要是Fe、Cr、Mn、 MnO^- 及 FeO^- 。

5 结论与展望

(1)焊接电流为100 A时,电弧稳定性差及弧喘息现象会导致烟尘增加,当电流增加至225 A时,单位时间内焊条熔化量增加,气体急剧膨胀导致飞溅增加从而增加烟尘。

(2)使用高速摄像捕捉到焊条电弧焊渣壁过渡时熔滴表面产生大量的烟尘,同时焊接飞溅也是烟尘的产生源之一。

(3)E5015-N1焊条产生的烟尘主要相分为氟化物及氧化物,具有磁性的烟尘粒子在磁极偶作用力的驱动下形成链状。另外,研究发现单个或多次烟尘粒子会聚集形成具有“壳-核”形态的二次粒子。

世界卫生组织(WHO)将焊接烟尘重新归类为第一类致癌物,从事焊接相关的工作人员患肺癌风险增加30%~40%。为改善焊接作业人员作业环境,保证人员身心健康,未来可以从以下方面开展研究

工作:(1)不同焊接工艺参数及模式对焊接烟尘量及微观形态的影响;(2)研究低烟尘低毒绿色环保型焊接材料,重点关注焊材涂层的影响机理,从根本上有效控制焊接烟尘量及有害成分;(3)构建国内焊接烟尘收集与检测方法标准体系,为科学合理的评估焊接烟尘提供依据;(4)与医学领域的相关学者联合开展焊接烟尘对呼吸系统的影响研究。

参考文献:

- [1] AWS F1.5M: 2003, Methods for Sampling and Analyzing Gases from Welding and Allied Processes [S]. American Welding Society, 2003.
- [2] AWS F1.2: 2013, Laboratory Method for Measuring Fume Generation Rates and Total Fume Emission of Welding and Allied [S]. American Welding Society, 2013.
- [3] T/CWAN 0002-2017, 焊接车间烟尘卫生标准[S]. 中国焊接协会, 2017.
- [4] GBZ 2.1-2019, 工作场所有害因素职业接触限值 第1部: 化学有害因素[S]. 中华人民共和国国家卫生健康委员会, 2019.
- [5] 史建涛, 王利, 潘鸿. 基于HSE的压力容器焊接工艺优化与探究[J]. 中国特种设备安全. 2021.37(04): 80-86.
- SHI J T, WANG L, P H. Optimization and research of pressure vessel welding process based on EHS [J]. China Special Equipment Safety, 2021, 37(04): 80-86.
- [6] 中国国家标准化管理委员会. GB/T 25776—2010, 焊接材料工艺性能评定方法[S]. 中国标准出版社, 2010.
- [7] 国家能源局. NB/T 47018.2—2017, 承压设备用焊接材料订货技术条件 第2部分: 钢焊条[S]. 中国标准出版社, 2017.
- [8] 任杰亮, 李志勇, 任思蒙, 等. 基于图像分域的焊接烟尘动态检测方法[C]//中国机械工程学会第二十次全国焊接学术会议文集, 2015: 750-754.
- [9] 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 Z W, SHI Y, GU Y F, et al. Research Status of Harm and Comprehensive Treatment of Welding Fume [J]. Electric Welding Machine, 2022, 52(5): 1-12.
- [10] 张文钺. 焊接冶金学(基本原理)[M]. 北京: 机械工业出版社. 1996.
- [11] 施雨湘, 熊玉峰, 杨世柏. 单组分焊条气溶胶中非晶态物质的形态特征研究[J]. 武汉交通科技大学学报,

- 1997, 21(4):458-460.
- SHI Y X, XIONG Y F, YANG S B. Investigation on the shape characteristics of non-crystal material in welding aerosol for one-composition electrode [J]. Journal of Wuhan Transportation University, 1997, 21(4):458-460.
- [12] Nicolas Floros. Welding fume main compounds and structure[J]. Welding in the World, 2018(62):311-316.
- [13] Nakamura S, Fuwa A. Local and dynamic Jahn-Teller distortion in ulvöspinel Fe_2TiO_4 [C]//The 32nd International Conference on the Applications of the Mössbauer Effect, 2013:1-6.
- [14] Guillemet-Fritsch S, Navrotsky A, Tailhades P, et al. Thermochemistry of iron manganese oxide spinels [J]. J. Solid. State. Chem., 2005, 178:106-113.
- [15] Cieslak J, Dubiel S M, Orewczyk J, et al. Mössbauer Effect study on Ca-substituted magnetites [J]. Journal De Physique IV, 1997, 7(1):589-590.
- [16] 董斌斌, 黎广荣, 郭福生, 等. 磁铁矿中硅的赋存状态研究进展:兼论新疆雅满苏铁矿床中磁铁矿晶体化学特征[J]. 高校地质学报, 2017, 23(2):213-226.
- DONG B B, LI G R, GUO F S, et al. Recent progress on occurrence of silicon in magnetite: crystal characteristics of magnetite from Yanmansu Skarn-type iron deposit in Xinjiang Province [J]. Geological Journal of China Universities, 2017, 23(2):213-226.
- [17] 施雨湘, 肖诗祥, 杨世柏. 焊接气溶胶粒子非均质形核机制研究[J]. 武汉交通科技大学学报, 1997, 21(4):396-400.
- SHI Y X, XIAO S X, YANG S B. On Homogeneous nucleation mechanism of welding aerosol particle [J]. Journal of Wuhan Transportation University, 1997, 21(4):458-460.
- [18] Konarski P, Iwanejko I, Cwil M. Core-shell morphology of welding fume micro- and nanoparticles [J]. Vacuum, 2003, 70:385-389.

编辑部网址: <http://www.71dhj.com>

☞ 上接第76页

- superheater of USC boiler [J]. Hot Working Technology, 2023(07):142-145.
- [7] 蔡文河, 赵卫东, 杨富, 等. TP347H 与 12Cr1MoV 异种钢焊接接头早期失效研究 [J]. 中国电力, 2009, 42(04):22-24.
- CAI W H, ZHAO W D, YANG F, et al. Researches on the early failure of TP347H and 12Cr1MoV dissimilar steel welded joints [J]. Electric Power, 2009, 42(04):22-24.
- [8] 孙咸. 异种钢焊缝中的 II 型边界组织及其影响 [J]. 电焊机, 2017, 47(06):1-6.
- SUN X. Type II boundary microstructure and its influence of dissimilar steel weld [J]. Electric Welding Machine, 2017, 47(06):1-6.
- [9] 郑韶先, 曾道平, 孟倩, 等. 填充 ER309 焊丝的异种钢接头 II 型边界形成机理 [J]. 焊接学报, 2021, 42(04):56-61.
- ZHENG S X, ZENG D P, MENG Q, et al. Formation mechanism analysis of the type-II boundary of dissimilar steel joint with the filler metal of ER309 [J]. Transactions of the China Welding institution, 2021, 42(04):56-61.
- [10] Nelson T W, Lippold J C, Mills M J. Nature and evolution of the fusion boundary in ferritic-austenitic dissimilar metal welds-Part 2: on-cooling transformations [J]. Welding Journal, 2000, 79(10):267-277.
- [11] 席特, 蒋勇, 杨飞, 等. SA508-3/690 异种金属焊接接头显微组织及裂纹形成机理 [J]. 热加工工艺: 1-5 [2023-03-09].
- XI T, JIANG Y, YANG F, et al. Microstructure and crack formation mechanism of SA508-3/690 dissimilar metal welded joints [J]. Hot Working Technology: 1-5 [2023-03-09].
- [12] Trindade V B, Rodrigo B, Zandi H B, et al. High-temperature oxidation of pure Fe and the ferritic steel 2.25Cr1Mo [J]. Materials Research, 2005, 8(4):365-369.
- [13] 赵彦芬, 周江, 赵林松, 等. TP304H/SA213T22 异种钢焊口的状态检测与寿命评估 [J]. 热力发电, 2005(10):79-82.
- ZHAO Y F, ZHOU J, ZHAO L S, et al. Status inspection and service life assessment of welded joints between TP304H/SA213T22 steels of different sort [J]. Thermal Power Generation, 2005(10):79-82.

编辑部网址: <http://www.71dhj.com>