

电弧焊烟尘颗粒生成机理及其对焊工呼吸系统健康的影响研究

罗召鹏

华电伊犁煤电有限公司, 新疆伊犁哈萨克自治州, 835000;

摘要: 电弧焊作为一种广泛应用的金属连接技术, 在工业生产中扮演着至关重要的角色。然而, 其焊接过程中产生的烟尘, 特别是其中的细颗粒物 (PM_{2.5}), 对焊工的呼吸系统健康构成严重威胁。本文深入探讨电弧焊烟尘颗粒的生成机理, 分析这些颗粒物对焊工呼吸系统的潜在危害、作用机制, 并提出防护措施。以期为改善焊工职业健康、制定更有效的防护策略提供科学依据。

关键词: 电弧焊; 焊接烟尘; 颗粒物; 生成机理; 职业安全

DOI: 10. 64216/3080-1508. 25. 09. 096

电弧焊指以电弧为热源, 熔化焊条或焊丝与工件接触部分使其形成熔池, 冷却凝固后形成焊缝, 从而实现金属间连接的一种工艺^[1]。根据所用的电极类型及保护介质方式差异, 电弧焊分为手工电弧焊 (SMAW)、气体保护金属极电弧焊 (GMAW/MIG/MAG)、钨极惰性气体保护焊 (TIG/GTAW)、埋弧焊 (SAW) 等^[2]。其中, 手工电弧焊由于具有设备简单、投资少、维护简单、使用方便、可以用于各种位置焊接等特点, 被广泛应用于建筑、船舶、桥梁、机械制造、汽车、航天等领域, 是当前应用最广的焊接方法之一。电弧焊过程中物理、化学作用强烈, 对物体会引起挥发、氧化、还原、氮化、水解等反应产生大量气溶胶。有研究^[3]指出长期吸入焊接烟尘是焊工中多种职业病的根源, 其中对呼吸系统的损伤最为严重。

1 电弧焊烟尘颗粒的生成机理

1.1 蒸发、气化阶段

焊接烟尘颗粒的产生机理是高温下的蒸发和气化。电弧区中温度可以达到数百甚至数千摄氏度, 在这样强烈的作用下, 焊条/丝或母材熔池表面的母材金属大量升温, 达到其沸点甚至更高能量状态下发生强烈的物理挥发和气化, 从而形成金属蒸气, 出现焊接烟尘中金属及其氧化物/氮化物 (F4P) 等原始成粒形态^[4]。同时, 焊条药皮或埋弧焊焊剂中的有机物、碳酸盐、硅酸盐、氟化物等在电弧高温辐射热和热传导作用下也将发生热解、熔化和气化, 其非金属部分或作为气相释放或以细粒子和气体形式存在。焊接材料 (焊条/丝、焊剂) 的组成和尤其是药皮或焊剂的组成对所产生烟尘的化

学成分、物理形态甚至是毒性的成分起主要作用, 均是焊接烟尘发生的主要内因。

1.2 化学反应阶段

金属蒸气、非金属蒸气和周围气体 (O₂、N₂、H₂O) 产生化学反应。其中, 化学反应核心是氧化反应, 金属蒸气从高温电弧区扩散到温度较低的区域 (如电弧外围混杂区、熔池上方) 会快速与空气中的 O₂ 反应生成对应的金属氧化物, 例如, 铁蒸气与 O₂ 发生反应可生成 FeO、Fe₂O₃、Fe₃O₄; 锰蒸气生成 MnO、Mn₃O₄、MnO₂; 硅蒸气生成 SiO₂ 等^[5]。除了上述氧化反应外, 在高温环境下 (一般大于 300° C), 空气中的 N₂ 气可能会与活泼的金属蒸气 (Ti、Zr、Al、Mn 等) 反应生成金属氮化物 (TiN、ZrN、AlN、Mn₅N₂), 另外一些中间态氧化物 (例如 SiO、SnO、PbO 等) 可能会因为遇到空气中的水蒸气发生水解反应 (例如 SiO 在水蒸气中水解生成 SiO₂ · x H₂O)。另外, 当使用加有氟的焊条或焊剂时, 高温下氟化物 (例如 CaF₂) 分解出 F 并可与金属氧化物反应生成低熔点的金属氟化物 (例如 MnF₂)。上述氟化物易挥发扩散, 后期冷凝后以细小颗粒形式存在, 或者吸附到其他烟尘颗粒上共同组成烟尘, 虽然在一定条件下 (如 CO) 会还原, 但氧化反应是生成焊接烟尘的常态, 所生成的种类与程度与烟尘化学组成及其毒性密切相关。

1.3 成核生长阶段

当气相中的金属蒸气、金属氧化物蒸气或其他反应物质超过其饱和蒸汽压的时候出现成核现象。其中, 均相成核是气相物质在纯粹的气相环境中而产生的第一

级固体粒子核的自发形成的过程（范围 2nm 以下）。异相成核是气相物质附在已经存在的微粒子（空气中的气溶胶、烟尘中惰性颗粒）或蒸汽凝结核心（SO₂, NO_x 等）而形成新的粒子或进一步增大已经存在的粒子。其成核一生长机制对焊烟的粒度分布产生影响，最终决定焊烟粒径范围大和形状不规则及大量细颗粒、超细颗粒存在与否。

1.4 影响因素

焊接烟尘包含的组分非常复杂（见表 1）。焊接烟尘的生成量、粒径特征及化学成分受多种因素交互作用：

表 1 焊接烟尘成分

组分类别	具体物质/形态示例
金属及其氧化物	铁、锰、铬、镍、铝、硅、铜、锌、铅及其氧化物
非晶态硅(a-SiO ₂)	由 SiO 或 Si 蒸气水解冷凝形成
氟化物	氟化锰、氟化钠等
碳颗粒	来自焊接材料或有机物的热解产物
吸附物（气态）	臭氧、氮氧化物、一氧化碳、二噁英、多环芳烃等

2 焊接烟尘对焊工呼吸系统健康的影响

2.1 急性影响

焊接烟尘的急性接触会引起以刺激征状为主的急性呼吸道反应。吸入细小颗粒物和气溶胶成分，先作用于呼吸系统的上呼吸道，造成上呼吸道的直接物理、化学刺激，进而发生咳嗽、咽异感、咽痛、流涕、打喷嚏等症状。且接触浓度越高、刺激性越大，可能伴眼刺痛、畏光、流眼泪，还可有更广的全身反应症状，如头晕、头痛、恶心、疲倦等^[6]。更为严重的是，烟尘中一些活性因素（如臭氧、NO_x 和潜在的刺激物质金属离子）可直接造成对气道黏膜的损害，或者通过激发炎症介质导致气道平滑肌的收缩和平滑肌周围黏膜的水肿，进而引起气道异常痉挛以及哮喘、慢支等呼吸系统疾病急性发作的喘、咳、气促等症状。急性反应影响工作效率和生活、是慢性病变早期警示的信号。

2.2 慢性影响

焊接烟尘长期吸入为焊工呼吸系统的慢性损伤的主要暴露条件。长期吸入烟尘首先形成慢性呼吸系统炎症，即烟尘对呼吸上皮的慢性刺激及损害。慢性炎症导致呼吸系统黏膜充血，水肿，粘液腺肥大、增生、分泌增多，并且分泌物不易排出（纤毛功能受损），主要为

焊接方法以及工艺条件（焊接电流、电压、焊接速度、保护气体的种类和比例等）是关键控制因素，它们通过控制电弧物理条件、电弧能量输入和熔池冶金行为，进而影响金属蒸发、气化、熔敷效率和化学反应的路径，决定着烟尘的生成量及其化学成分。焊接材料（包括焊条、焊丝、焊剂）和母材的化学成分类别决定烟尘所包含的金属或金属化合物种类及其浓度。环境条件（包括氧和水蒸气浓度，温度，湿度，通风条件等）影响了化学反应动力学，化学反应过程颗粒的沉降和扩散，最终决定焊工在环境中所接触到的烟尘特征。

长期、慢性咳嗽、咳痰，从而形成慢性支气管炎。更危险的是，持续的炎症、氧化应激和某些矿物质粉尘（例如金属氧化物）的直接沉积和纤维化可慢慢损害肺泡及肺的间质，从而使肺泡扩大并融合，导致肺泡弹性降低和毛细血管床减少而形成肺气肿。肺气肿的典型临床表现是出现进行性活动后呼吸困难，气体交换效率降低^[7]。长期大量吸入焊接烟尘中的无机粉尘如金属氧化物颗粒在肺泡、肺间质内沉积，并可引发异物的刺激及纤维化，最终形成一种职业性尘肺病，其病变严重程度与其吸入粉尘总量、粉尘的成分（如氧化铁、氧化锰等）、暴露时间长短等因素密切相关^[8]；而且，长期吸入大量的锰尘是锰中毒最重要的吸收入路，也可能直接作用与加剧肺组织中的纤维化，从而形成“锰尘肺”。长期暴露还可导致肺功能进行性下降，表现为用力肺活量（FVC）和第一秒用力呼气容积（FEV₁）等指标的降低，以及气道反应性的增高，部分焊工可能发展为职业性哮喘或慢性阻塞性肺疾病（COPD）。同时，烟尘易经鼻腔吸入，长期刺激和损伤鼻窦黏膜，也容易并发慢性鼻窦炎。

2.3 特定成分疾病影响

除上述，以外焊接烟尘中含有多种特定有害成分，对焊工健康构成针对性疾病威胁。具体见表 2。

表 2 焊接烟尘成分影响

有害成分	主要健康影响
锰(Mn)	中枢神经损伤（锰中毒，类帕金森病）
铬(Cr)	增加肺癌风险(Cr(VI)致癌)
镍(Ni)	增加肺癌风险（致癌物）
非晶态硅(α -SiO ₂)	可能引起肺纤维化
氟化物	骨骼/牙齿病变（氟骨症），神经系统损害
臭氧(O ₃)	刺激呼吸道（气态）
氮氧化物(NO _x)	刺激呼吸道（气态）
一氧化碳(CO)	影响血液输氧，导致缺氧（气态）
紫外线	皮肤癌，眼部损伤（物理因素）
二噁英类物质	强致癌性

3 防护措施

3.1 工程技术控制

工程技术控制是减少焊接烟尘暴露最根本、最有效的策略，该策略旨在从源头上减少或消除烟尘的产生，或通过物理手段将其移出作业人员呼吸带。源头控制方面，可通过优化焊接工艺参数、选用产生烟尘量更低的焊接方法（如考虑采用激光焊、电子束焊等替代技术，或在 GMAW 中优化参数减少飞溅和烟尘），以及使用低烟尘或低毒成分（如低锰）的焊接材料（焊条、焊丝、焊剂）来实现。通风控制包括全面通风和局部排风（LEV）。全面通风通过改善整个工作区域的空气交换，稀释并降低整体烟尘浓度，适用于固定工位或空间较大的场合。而局部排风系统则通过在焊接烟尘产生的源头附近直接捕获、控制和排放污染物，具有最高的控制效率，是焊接烟尘控制的首选技术。常见的局部排风装置包括移动式吸烟臂、固定式吸烟罩、槽边抽风等。

3.2 行政管理措施

行政管理是通过管理焊工的合理行为，来降低焊工的烟尘接触时间和接触强度。包括但不限于优化作业时间，调整焊接作业时间，人员轮换，严格限制单人连续工作时长，减少单次接触时间及接触总量；制定并严格执行焊接作业区域制度；定时监控作业环境空气中焊接烟尘浓度是否符合国家职业接触限值要求，根据结果评估调整控制措施；定期开展职业健康监护，开展焊工上岗前、岗中、离岗的职业健康检查，建立健康监护档案，早发现、早诊断、早治疗职业性健康损害；开展相关的职业卫生安全教育及培训，提高焊工对焊接烟尘危

害认知、掌握焊接烟尘防护知识、熟练掌握防护设施和防护用品的正确使用及个人良好的卫生习惯。

3.3 个体防护装备

个体防护装备（PPE）是无法将焊接作业场所中的烟尘浓度控制至接触限值以下时，保护焊工呼吸系统的最后一道防线。其中最重要的就是呼吸防护装备的选择使用。需要严格符合国家相关职业安全卫生标准和规范。一般低浓度烟尘用过滤效率高、呼吸阻力适中的自吸过滤式防颗粒物呼吸器。如符合 GB2626 标准中规定的 KN 95 以上级别防尘口罩进行防护。高浓度、特殊有毒有害烟尘防护及过滤式呼吸防护设备防护量不足时，推荐使用供气式呼吸防护装备。如长管呼吸器、自给式空气呼吸器，保障提供清洁、安全的呼吸空气。需要注意，呼吸防护装备选择和使用需结合呼吸器与面部密合良好，并经过专业的合适性检验和使用培训，同时要考虑其指定的保护因数（APF，Assigned Protection Factor），能够提供足够防护的程度。

4 结论

电弧焊作为现代工业不可或缺的技术，焊接作业场所中产生的焊接烟尘作为一种混合物的气溶胶，其吸入职业暴露对焊工呼吸道具有较大的健康危害性。因此必须坚持“预防为主、综合治理”的原则，严格控制职业暴露限值的要求，全面做好施工中施工环境的职业病防护，优先采用有效的工程技术防控措施（尤其是局部排风技术），辅助进行科学规范的行政管理及防护。继续深入开展有关焊接烟尘产生的研究，尤其是产生超细微粒和非典型成分及其健康效应的研究，不断开拓焊接烟

尘防护与评价新方法, 能够在技术的进步、管理的提高以及个体防护措施之间形成合力来最大限度地降低焊接烟尘的危害程度, 维护广大焊接工作者的健康权益。

参考文献

- [1] 路浩, 巩照坤, 邢立伟, 等. 300M 超高强钢电弧焊修复试验研究[J]. 焊管, 2025, 48(04): 47-53.
- [2] 徐国敏. 旁路耦合三丝间接电弧焊特性及中厚板高效焊接工艺研究[D]. 大连理工大学, 2024.
- [3] 栗卓新, 张玉林, 李红, 等. 焊接烟尘及其对呼吸系统颗粒沉积影响的研究进展[J]. 北京工业大学学报, 2023, 49(05): 597-608.
- [4] 张磊, 许学兵, 陈亚. 工厂企业电弧危险分析方法和实施步骤[J]. 工业安全与环保, 2021, 47(11): 40-44.

[5] 王伟民. 近似密闭空间焊接的危害分析[J]. 四川化工, 2020, 23(01): 30-33.

[6] 郭笑笑, 张慧庆, 马红星, 等. 5 种职业健康风险评估方法在汽车整车制造业电焊烟尘暴露中的应用[J]. 职业与健康, 2023, 39(19): 2607-2611.

[7] 刘萱, 陈慧婷, 曾强. 电焊烟尘暴露与心血管系统早期损伤的研究进展[J]. 环境与职业医学, 2025, 42(1): 115-119.

[8] 邓蕾, 陈桢, 青玲, 等. 宜宾市聚合釜制造业焊接工人肺功能影响因素分析[J]. 安徽预防医学杂志, 2023, 29(3): 250-253.

作者简介: 罗召鹏, 1984.2, 男, 汉, 山东省日照市人, 本科, 工程师, 研究方向: 锅炉。