DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2021.05.014

新环保形势下对消失模铸造的再思考

宋安安
(合肥安知环境科技咨询有限公司,安徽 合肥 230022)

摘　要:当前我国环保工作已进入全新时期,挥发性有机化合物成为大气污染防治新的工作重点。消失模是一项新的铸造工艺,利用聚苯乙烯遇高温气化消失的特性生产铸件,简化了铸造流程、提高了效率,被认为是清洁绿色的工艺,但该过程的废气问题一直重视不够,消失模废气产生严重的挥发性有机化合物污染,其治理尚存一定困难,该工艺的环境影响和经济优势值得重新思考。

关键词:环境保护;消失模;挥发性有机物
中图分类号:TG249　　文献标识码:A　　文章编号:1000-8365(2021)05-0383-05

Reconsideration of Lost Foam Casting Under the View of Environmental Protection

SONG Anan
(Hefei Anzhi Environmental Science and Technology Consulting Co., Ltd., Hefei 230022, China)

Abstract: At present, the environmental protection work of China has entered a new period, and volatile organic compounds (VOCs) have become a new focus of air pollution control. Expendable casting (EPC) is a new casting process, which makes use of the characteristics of polystyrene vaporization vanishing at high temperature to produce castings. It simplifies the casting process and improves the efficiency. It is considered as a clean and green process, but the problem of exhaust gas in this process has been neglected. The control of volatile organic compounds is imperative under the new environment protection situation. It is difficult to treat the volatile organic compound pollution caused by the lost mode exhaust gas. The environmental impact and economic advantages of this process deserve to be reconsidered.

Key words: environment protection; lost foam casting; volatile organic compounds

1　新时期环保形式的变化

随着生态文明写入宪法、“两山理论”深入人心,全社会对环保工作都更加重视。2020 年发布的《中国生态环境状况公报》显示,我国生态环境状况整体向好,空气质量持续改善,但各类大气污染物当中只有臭氧指标近五年来呈持续上升态势。可见,造成臭氧污染的罪魁祸首——挥发性有机化合物(Volatile organic compounds,VOCs)的管控必将成为新时期的环保工作重中之重。VOCs 类物质参与大气光化学反应、生成臭氧污染并引发灾害性的光化学烟雾问题,能加速 PM2.5 的形成,还有很多种类本身对人体和环境都具有较大危害或有恶臭气味。2019 年《重点行业挥发性有机物综合治理方案》发布,2020 年“夏季臭氧专项治理攻坚”行动开展,VOCs 管控和治理工作将持续发力。

收稿日期:2021-03-12

作者简介:宋安安(1989—),女,四川内江人,硕士.主要从事工业污染防治、绿色管理规划、企业环境经营等方面的工作.电话:15121012914,
E-mail:annsong921@163.com

对我国铸造行业而言,环保工作刚刚起步就进入快速发展阶段。自 2013 年工信部《铸造行业准入条件》发布起,高污染、高能耗铸造企业持续被淘汰。2020 年《排污许可证申请与核发技术规范 金属铸造工业(HJ1115-2020)》发布,2021 年铸造行业第一份国家强制性环保标准《铸造工业大气污染排放标准(GB 39726-2020)》正式实施,标志着铸造行业的环保工作进入了全新的阶段,作为环保热点的 VOCs 污染问题也开始受到铸造行业的重视。

2　消失模铸造工艺的环境影响

2.1　消失模工艺流程及特点

铸造是指将熔融态的金属(或合金)浇注于特定型腔的铸型中凝固成形的金属材料成形方法,在我国拥有数千年历史,传统工艺先有模样,再以砂造型,撤出模样合型后获得待浇注的空腔。砂型(及型芯)的设计制作及与之有关的砂性能调整是传统砂型铸造的主要技术难点之一。新兴工艺“消失模铸造”颠覆了这一传统。消失模工艺使用的模样是聚苯乙烯(Expanded Polystyrene, EPS)等常温为固态、高温为气态的材料,造型时作为模样占据体积,在高温

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

金属液体进入后成为气态自动“消失”，故命名为“消失模铸造(Lost Foam Casting, LFC)”。(当砂成分不同时又有称“实型铸造”的提法，本文统称“消失模”，且以讨论干砂负压消失模工艺为主。)

图 1 为消失模铸造的生产流程图。该工艺优势在于不需要制作和储存木质模具，不需要设计复杂的砂型，只需要将模具整体埋入砂箱(预留浇道)即可直接浇铸，节省了大量前期工作，也为铸造行业打开了生产更高精度、更复杂形状产品的可能性。同时，该工艺可实现无粘结剂干砂负压浇注，减轻了清理、砂处理等工部的工作，整体劳动量可减少30%~50%，生产现场更为整洁、扬尘更少，投资回收期短，被认为是易于实现清洁生产的先进技术和“绿色铸造”工艺，列入了 2003 年第二批《国家重点行业清洁生产技术导向目录》。因此一段时间以来，国内有大量铸造企业上马消失模工艺，该技术在我国得到了极大发展。

从生产流程来看，消失模工艺较传统砂型铸造多出了 EPS 发泡塑料模具(“白模”)生产和制作相关环节。但过去的消失模铸造企业生产流程中，并未意识到 EPS 所谓“消失”只是为气态的过程，持续投入的 EPS 持续产出 VOCs 污染。当充分考虑了由 EPS 转化而来的气态 VOCs 类物质对人类健康和生态环境造成的极大影响后，消失模工艺是否仍然“清洁”、“绿色”，值得重新思考。

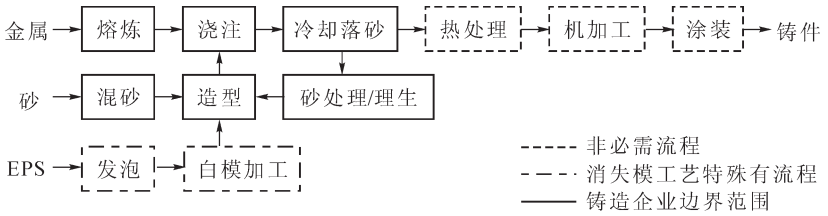


图 1 消失模工艺流程
Fig.1 Process flow of EPC

2.2 主要污染物 VOCs 的产生及排放

消失模工艺使用的可“消失”的模具为高分子有机聚合物。有机物在富氧条件下充分燃烧生成二氧化碳和水；但铸造生产浇注过程中白模与金属液接触，是一个高温缺氧的复杂过程，可能发生有机物的分解、氧化、还原等多种反应；当型砂中添加有机粘结剂时反应产物将更加复杂。固态白模受热气化，体积可能成百上千倍增长，导致大量的 VOCs 污染。当使用负压消失模技术时，真空泵排气即为重要的 VOCs 污染排放源；若无抽气、排气系统，则形成严重的无组织排放，同时对工位附近的工人健康构成巨大威胁。对铸造行业各工部 VOCs 污染情况调研结果表明[1]，消失模浇注的 VOCs 产生问题是最严重的，VOCs 浓度水平(以非甲烷总烃表示)平均为 204.6 mg/m^3，远高于国家标准《大气污染物综合排放标准(GB16297-1996)》中规定的限值 120 mg/m^3。

最常用的消失模原料 EPS 为苯乙烯单体的聚合物，受热产物中很大一部分为苯系物，多为高毒性或有致癌可能的有机物。图 2 为不同研究者报道的实测消失模铸造真空泵中的苯、甲苯、乙苯和苯乙烯浓度水平。可以看出，检出的浓度范围波动较大。苯浓度最大达到 7810 mg/m^3，最低为 45.5 mg/m^3；苯、甲苯、乙苯和苯乙烯浓度水平平均分别为 2 100.7、313.6、47.6 和 881.1 mg/m^3。而国家标准《大气污染物综合排放标准(GB 16297-1996)》中规定苯、甲苯

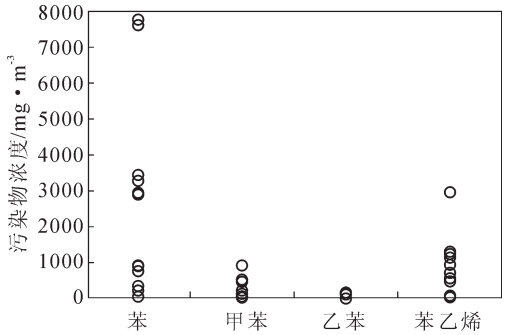


图 2 消失模浇注工部真空泵中检出的污染物浓度水平分布(根据文献[2-6]整理)
Fig.2 Pollutant level detected in vacuum pumps of in LFC pouring

的排放限值分别为 12 mg/m^3 和 40 mg/m^3，可见消失模废气已远远超过相关标准。此外，有研究[2]还在消失模废气中还检出了 1.47 mg/m^3 的苯酚和 157.4 mg/m^3 的二甲苯。一项对不同浇注条件下消失模废气的成分研究显示(见图 3)，除苯、甲苯、乙苯和苯乙烯四种物质外，还检出了一部分未能定性的小分子有机物；上述 4 种物质的重量百分比总和平均为 69.1%，可见余下约三成都是成分未知的有机气体。EPS 热解产物可能很复杂，不同温度下的 EPS 热解气体中不仅检出了苯、甲苯、苯乙烷、苯乙烯等苯系物，也检出了大量的甲烷，以及戊烷、丙烯、乙烷、乙烯、乙炔等非甲烷烃类(见图 4)。此外，工业用 EPS 成分本身并不纯净，其中的杂质在浇注中发生的变化尚缺乏研究。EPS 也是白色垃圾的主要成分之一，在复杂条

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

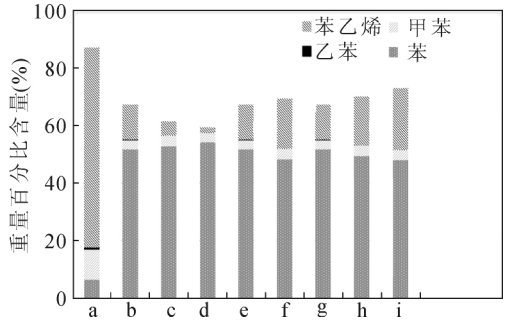


图 3 消失模浇注废气中各类污染物成分的比例(a~i 为不同浇注条件;根据文献报道[3]整理)

Fig.3 Percentage of different VOCs species in LFC waste gas

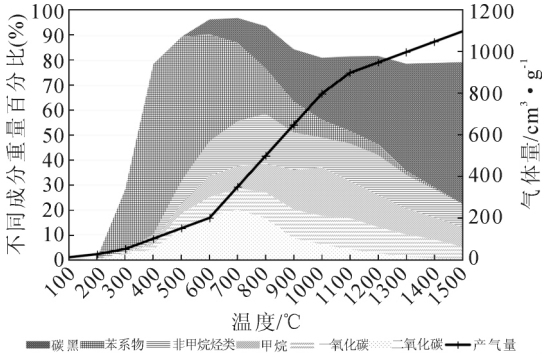


图 4 不同温度下 EPS 热解产气量及产物成分重量百分比(根据文献报道[7]整理)

Fig.4 Volume and weight percentage of pyrolysis products of EPS under different temperature (reorganized according to reference 7)

件下的焚烧过程有可能有二噁英等持久性有机污染物(Persistent Organic Pollutants, POPs)产生。而铸造用 EPS 在高温浇注过程中是否会发生类似反应,目前还缺乏相关研究。

2.3 消失模浇注废气的治理

在实际生产中,消失模废气中除了大量以苯系物为首的 VOCs 外,还含有大量单质碳和未热解的细小 EPS 颗粒,通常表征为有刺激性气味的黑烟。当前消失模浇注过程大多为负压抽气,废气收集效果较好,因此通常只需重点考虑真空泵尾气治理。过去 VOCs 污染问题尚未受到重视,早期部分企业将消失模浇注废气通入洗气罐后排放,以改善黑烟现象,此方法去除颗粒物效果有限,且对 VOCs 几乎没有去除效果,已逐步淘汰;铸造行业大气污染治理刚刚开展时,只重视颗粒物指标,部分企业为消失模浇注废气配备了除尘设备,实现颗粒物达标排放,这对 VOCs 同样几乎没有去除效果;近年来 VOCs 污染治理工作逐步开展,消失模铸造企业才开始使用 VOCs 治理设备。

VOCs 的处理思路有两类,其一是将 VOCs 物质破坏、彻底氧化为二氧化碳和水,如催化氧化、燃烧(或蓄热燃烧、催化燃烧、吸附–脱附燃烧等)、等离子等;其二是将 VOCs 自废气中分离,如使用活性炭或有机溶剂吸收等。破坏法通常能耗高、设备复杂且造价高,但处理彻底;分离法可使用低能耗、简易设备实现,但用于吸收 VOCs 的活性炭或吸收液必需定期更换,需要持续的耗材投入,且用后的耗材形成二次污染,必须作为危险固体废物处理。目前我国消失模浇注废气多套用其他行业现有设备。但消失模浇注废气 VOCs 成分未知且复杂多变,污染物浓度水平相对其他行业较低,且废气为间歇产生,这些都为消失模废气 VOCs 污染的治理造成了客观困难。当前我国消失模浇注废气治理技术使用情况见表 1。有调研表明[8],目前我国铸造企业使用的 VOCs 治理设备中,消失模浇注废气的 VOCs 处理效率平均为 70.9%,但范围在 97.1%～7.3%,可见不同企业的实际处理效果差异极大。开展 VOCs 治理的铸造企业当中有约一半企业选择了 UV 光催化氧化设备,主要是因为其成本低、易维护。但 UV 光催化氧化技术作用于消失模废气中 VOCs 的实际效果、反应机理和最佳工艺参数等均缺乏研究,难以实现 VOCs 的彻底降解,无法确保处理效果。此外,UV 光催化氧化无异于提前引发了 VOCs 在大气中的光化学过程,即使非甲烷总烃指标下降,也可能有毒性、危害性更大的化学成分生成,存在较大隐患。

表 1 我国消失模浇注 VOCs 废气治理技术使用情况

Tab.1 The use of VOCs treatment technologies in LFC

	技术种类	使用企业数	处理效果	优缺点
1	UV 光催化氧化	最多	一般	成本低。处理效果存疑,有处理不彻底、生成新污染物的隐患。
2	活性炭吸附	多	好	成本低,处理效果好。但持续消耗活性炭耗材,且产生危废。
3	等离子	少	一般	成本低。处理效果存疑,有处理不彻底、生成新污染物的隐患。存在安全风险。
4	燃烧(或蓄热燃烧、催化燃烧、吸附–脱附燃烧)	极少	好	处理彻底。但成本高、能耗高。废气浓度过低时可能效果不佳。
5	乳化液吸收	少	好	成本低,处理效果好。但持续消耗乳化液,产生危废和废水。

2.4 消失模工艺全流程环境影响分析

工业生产活动对环境的影响,主要包括污染及废弃物产生和排放、资源消耗、能源消耗和生态破坏等。消失模铸造对环境最主要的影响是浇注环节 VOCs 污染的排放;发泡及白模制作加工过程也有

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

少量 VOCs 产生，当前实际生产中多为无组织排放形式。其次是大气颗粒物污染，各生产环节均可能产生。当配备洗气罐、乳化液吸收、湿法除尘、水帘或水幕等污染治理技术时，还有水污染产生。消失模铸造产生的主要固体废弃物是废砂和废弃白模边角料(一般工业固废)及少量危废。消失模铸造生产消耗的主要资源是 EPS，源头来自不可再生的石油资源；此外消耗少量硅砂资源和水资源。消耗的能源主要是电能(部分企业还使用少量天然气)，并产生碳排放，间接破坏生态。

整体而言，消失模铸造生产过程以金属、砂、EPS 为主要原料，生产的产品为铸件，“副产品”为污染和废弃物排放。其中，铸造用砂可实现循环使用；金属原料除少量直接来源于矿产外，多数为来自社会循环的废弃金属制品。传统砂型铸造是借助可重复利用的硅砂改变金属材料形状和性质的过程，没有重大自然资源消耗，具有一定的循环经济属性，且部分参与了社会循环的静脉产业。消失模工艺的使用能够减少部分颗粒物污染，但新增了大量的 VOCs 污染，同时新增了 EPS 资源的持续消耗，与传统砂型铸造相比整体具有更高的环境负荷。

3 新形势下消失模工艺与传统砂型铸造对比

表 2 为消失模与传统砂型铸造工艺的对比。可以看出，在资源消耗、污染产生、治理难度和二次污染方面，消失模工艺较传统砂型铸造都处于劣势；能源消耗方面，消失模工艺(干砂负压)虽然节省了部分砂再生和砂处理设备，但新增了能耗较高的真空负压设备，整体未必能取得降耗效果；固废产生方面，当消失模使用干砂时，能够降低废砂的产生量，但增加了白模边角料这一新种类固废，因此也未必能取得优势。总体而言，消失模工艺的环境成本高于传统砂型铸造。

但由于一段时间以来对 VOCs 污染认识和管控的缺失，导致这一部分环境成本并未在经济成本中得以体现。消失模工艺所谓的经济优势很大部分是来自环境外部性的“红利”，污染的后果是由全社会“买单”的。当前生态环境保护工作进入了全新的时期，对 VOCs 污染的控制和治理工作上升到了前所

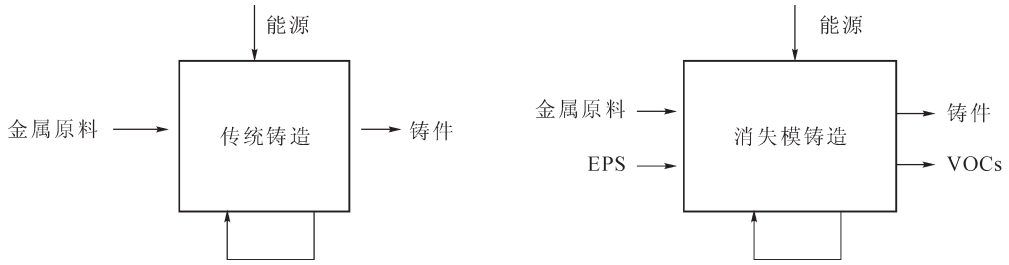


图 5 传统铸造与消失模铸造主要的资源投入和产出
Fig.5 Resource In&Out of traditional casting and LFC

表 2 消失模工艺与传统砂型铸造对比
Tab.2. Comparison between LFC and traditional sand casting

		主要特征对比		优势方
		传统砂型铸造	消失模铸造	
环境成本	资源消耗	型砂	型砂、EPS	传统砂型
	能源消耗	熔炼、砂再生(部分)	熔炼、负压设备	视情况
	污染产生	主要为颗粒物	颗粒物、VOCs	传统砂型
	固废产生	废砂	废砂、EPS 边角料	视情况
	治理难度	一般	高	传统砂型
	二次污染	除尘器集尘	除尘器集尘、VOCs 治理设备耗材(部分)	传统砂型
	事故风险	一般	高	传统砂型
经济成本	生产原料	金属原料、型砂等	金属原料、型砂、EPS 等	视情况
	工艺设计	可能需要复杂设计	不需设计或只需简单设计	消失模
	生产设备	一般设备	额外白模处理相关设备，节约砂处理或再生设备(部分)	视情况
	治污设备	主要为除尘设备	除尘设备、VOCs 治理设备	传统砂型
	固废处置	一般固废、少量危废	一般固废、少量危废	视情况
	风险成本	一般	较高	传统砂型

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

未有的高度,这一优势已不复存在。对比消失模铸造和传统砂型铸造的经济成本可见，只在工艺设计方面消失模具有明确的优势。在生产原料、生产设备、固废处置方面,根据不同产品、不同企业情况,不一定能取得经济优势。在污染治理方面,考虑了 VOCs 治理之后,消失模的治污成本远高于传统砂型铸造。且由于消失模浇注废气 VOCs 污染本身的复杂性和波动性，消失模工艺还具有更高的污染和安全事故风险,也构成了潜在的经济成本。此外,由于 VOCs 这一新污染物种类的产生,还带来了内部检测、环境管理、排污申报、落实相关政策文件接受监管等方面工作量的增加,最终也会在经济成本上有所反映。

4　建议与展望

相对数千年铸造发展史，消失模铸造是一项新兴的技术，在工艺上具有独特的优势。但由于新增生产原料 EPS 的引入，新的污染物 VOCs 大量产生，使这一技术不可避免地增加了生产过程的环境负荷。当环保管控越加严格、排污的外部性逐渐内部化、经济成本逐步与环境成本同步后,消失模铸造工艺较传统砂型铸造的经济优势很可能已不复存在。因此，建议当前及未来时期对消失模工艺的选择持审慎态度:第一,在考虑新购置消失模工艺和设备的同时,应同步考虑 VOCs 治理设备的投入,及治污设备后期运行的投入。第二，出于源头减量的污染控制考虑,建议同样满足工艺需求的条件下,优先选择传统砂型铸造,或寻求 3D 打印等新兴技术。第三,杜绝消失模工艺的滥用，不建议使用消失模工艺生产大型铸件；对单纯为节约制木模成本或无制模能力而采用消失模工艺的小型企业，或以消失模技术争取非稳定、非连续性低价订单的小型企业,建议予以淘汰。第四,对现有消失模企业,应做好废气的收集和治理，并主动开展污染排放水平和车间内污染物浓度水平的持续监测,并关注工人安全和健康。

目前，国内对于消失模铸造环境影响的研究还相对较少。尤其是关于金属液与 EPS 接触时 EPS 的变化过程、反应机理,产生的气体中 VOCs 的具体成分、是否有 POPs 物质生成、与浇注工艺条件的关系等基础研究工作少有报道,仍有大量问题有待解答,这对污染治理工作的开展是极为不利的，也导致了缺少有针对性的、高效高性价比消失模浇注废气治理设备的现状。期待相关研究工作能有所推进,也期待环保设备生产企业关注消失模浇注废气，加强相关研发，共同促进消失模铸造技术在不以牺牲环境为代价的前提下良性发展。

参考文献:

[1] 刘树生,曹林锋,乔世杰，等. 我国铸造行业 VOCs 污染的现状[J]. 铸造工程,2019,43(2):1-4.
[2] 董庆安.消失模工艺系统环境治理[J].中国铸造装备与技术.2016(2):44-47.
[3] 杨家宽. 消失模热解特性及其废气净化的研究[D]. 武汉:华中理工大学,1999.
[4] 靖军,谭建波,李增民，等. 消失模铸造尾气净化装置的设计[J]. 铸造技术,2009,30(1):102-105.
[5] 靖军. 消失模铸造尾气净化装置的设计 [D]. 唐山: 河北科技大学,2009.
[6] 唐东羚,李焰,杨家宽，等. 用气相色谱法检测消失模铸造车间的环境卫生状况[J]. 铸造技术,1999(4):32.
[7] 李英，郭志明. EPS 铸造行业浇注过程有机废气产生量估算及处置措施[J]. 山西煤炭管理干部学院学报,2012,25(2):111-113.
[8] 刘树生,乔世杰,曹林锋，等. 大气污染治理设备在我国铸造行业的应用[J]. 铸造工程,2019,43(4):54-59.

技术资料邮购

《铸造实用生产技术集锦》

《铸造实用生产技术集锦》本书由李德臣教授级高工编著。共七章：1 重大铸件生产技术；2 耐热耐磨产品生产技术；3 耐蚀耐磨产品生产技术；4 耐磨产品生产技术；5 铸造工艺设计；6 铸造用辅助产品生产技术；7 铸造与哲学。特快专递邮购价：97元。

邮购咨询：李巧凤　　电话/传真：029-83222071

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net