

# 中国球墨铸铁消失模铸造技术进展与生产应用

贺闻豪<sup>1</sup>, 叶升平<sup>1</sup>, 韩晓红<sup>2</sup>, 唐锁云<sup>2</sup>

(1 华中科技大学材料学院材料成形及模具技术国家重点实验室; 2 杭州凯斯特化工有限公司)

**摘要:** 文章重点介绍了发泡材料的选择和研制及浇注工艺的控制, 分析了球墨铸铁消失模铸造成功和失败的案例, 主要为如下四点: 1) 我国共聚物发泡珠粒性能稳定, 成型性良好, 接近日本共聚物性能, 已在全国 30 多家球墨铸铁企业使用。与 EPS 相比, 共聚物能显著降低球墨铸铁件的皱皮和碳夹杂缺陷, 从而提高了产品的合格率; 2) 球墨铸铁件在中小件的铁路铸件和汽车配件 (牌号 QT450-10) 上得到了成功应用, 尤其在小型的球铁铸件上采用了串浇工艺, 提高了工艺出品率 (达 80%) 和生产效率; 3) 我国球墨铸铁件球化级别偏低, 大多为 3 级, 1~2 级的较少, 延伸率偏低, 如牌号 QT400-18 的铸件生产难度很大。我国球墨铸铁消失模铸造仍存在一些问题, 如皱皮, 碳夹杂等等。

**关键词:** 消失模铸造; 球墨铸铁; 共聚料; 小件串浇; 球化率

## Ductile Iron Lost Foam Casting Technology Development and Production Application in China

He Wenhao<sup>1</sup>, Ye Shengping<sup>1</sup>, Han Xiaohong<sup>2</sup>, Tang Suoyun<sup>2</sup>

(1. State Key Laboratory Of Materials Processing and Die & Mould Technology School of Material Science and Engineering Huazhong University of Science and Technology, Wuhan ,Hubei, P.R. China;

2. CASTCHEM (HANGZHOU) ,INC)

**Abstract:** The article focuses on the selection and research & development of foam material and casting process, and analyzes the successful and failing cases in the application of lost foam casting of ductile iron, mainly for the following three points: first, Chinese STMMA with stable quality and excellent briquetability is close to Japan's in properties, and has been used in more than 30 companies of ductile iron. Compared with the EPS, foam material of STMMA can significantly reduce the ductile iron's carbon defects, thereby enhancing the product qualified rate; second, ductile iron parts in small and middle pieces of railway castings and auto parts (Brand QT450-10) have been successfully applied. Particularly in the small-scale ductile iron castings, string pouring process is used to improve the production yield (up to 80%) and production efficiency; third, spheroidization level of ductile iron parts is low, mostly Grade three, Grade one and two less, making ductile iron in China has a low-grade elongation. So, it is difficult to produce qualified products of Brand QT400-18. There are still some problems with ductile iron lost foam casting of China, such as flow mark, the carbon inclusions, and so on.

**Key words:** lost foam casting; ductile iron; STMMA; String pouring process; rate of spheroidizing

## 1 引言

消失模铸造是 21 世纪绿色铸造技术。近十年来, 我国消失模铸造得到超常规的发展, 而球墨铸铁

消失模铸造更是在近十年来发展迅速,在铸造设备、铸造原辅料、铸造工程师日益成熟的背景下球铁消失模铸造技术日臻完善,球铁产量不断增长,比例不断提高。我国从事球墨铸铁生产的有代表性的企业有 13 家,如下表 1。

表 1 我国球铁消失模铸造企业信息

	企业名称	企业所在地	生产状况
1	山西华恩(集团)公司	山西临猗县东外环路 28 号	球铁汽车配件 3000T/Y
2	桃江新兴管件有限公司	湖南桃江桃花江镇桃花西路	球铁铸管 20000T/Y
3	武汉钢铁公司轧辊厂综合厂	湖北武汉青山厂前,武钢 3 号门	球体消防栓 1000T/Y
4	盐城中宇铸造有限公司	盐城市阜宁县经济开发区城河	球铁 2 万 T/Y
5	马鞍山富创冶金有限公司	马鞍山当涂博望工业园	球铁汽车支架 3000 T/Y
6	福建中恒通机械制造有限公司	福建龙岩武平十方工业园 A3	球铁差壳减壳 5000 T/Y
7	阳城华王通用离心铸管厂	山西晋城市阳城县润城镇王村	球铁管件 2000T/Y
8	唐山丞起汽车零部件有限公司	河北唐山京唐港经济开发区	球铁 3000T/Y
9	佳鑫汽车配件铸造有限公司	湖南张家界科技工业园 A 区	球铁汽车壳体 1000T/Y
10	娄底现代精密铸造有限公司	湖南娄底经济技术开发区工业园	球铁管件 1000T/Y
11	河南兴阳机械制造有限公司	新乡市小店工业园区	球铁汽车壳体 1000T/Y
12	江西分宜驱动桥有限公司	江西省分宜县城安仁路 42 号	球铁支架壳体 1000T/Y
13	十堰知名实业发展有限公司	湖北十堰市汽配城广场物流中心	球铁差壳减壳 3000T/Y

不完全统计,我国消失模球铁年产量约为 77000t。从表 1 可以看出,13 家球铁生产企业代表了我国球铁消失模铸造的生产技术水平,企业的产量大多数在 1000~3000t/Y 之间,年产万吨铸件的只有桃江新兴管件有限公司,盐城中宇铸造有限公司。整体来说,我国球铁消失模铸造企业规模偏小,企业生产率偏低,平均每个铸造厂不足 3000t/Y。据作者对十多家球铁消失模铸造企业的走访调研得知,我国消失模球铁有了很大的发展,灰铁与球铁的比率达到 2:1。球铁比例在不断的增长,灰铁比例相对减少,我国球墨铸铁消失模铸造产量是世界第一。

## 2 消失模模样材料的选择

消失模铸造关键在于生产高质量的泡沫模样,高质量的泡沫模样关键在于高质量的泡沫珠粒。消失模铸造常用的模样材料是可发性聚苯乙烯(Expandable Polystyrene,简称 EPS)。可发性聚苯乙烯是应用最广泛的消失模铸造模样材料。可发性聚苯乙烯具有密度小、气化迅速、发气量小、在不高的蒸汽压要求下极易成形等优点。从经济方面讲,可发性聚苯乙烯原料资源丰富,相对来说比较廉价。但 EPS 缺点也很明显,EPS 分子式可表示为  $(C_6H_5 \cdot C_2H_3)_n$ ,含有大量热力学稳定的富碳苯环结构,含碳量高达 92%。不仅如此,可发性聚苯乙烯的裂解方式为无序断裂、裂解速度慢且容易形成固态碳残留物,使消失模铸件产生气孔和皱皮等缺陷。此外,EPS 高温分解产生大量黑烟(微小碳颗粒),严重恶化了消失模铸造生产车间的作业环境,危害人的健康。EPS 热解碳渣对于球铁铸件的碳渣缺陷影响很大。

我国消失模铸造起步较晚,刚开始没有自己的消失模铸造专用的泡沫模样珠粒。国外的消失模珠粒,

如日本的则价格高昂，非高附加值铸件不能用。国内也没有专用的 EPS，所以消失模铸造企业大多采用包装材料用的 EPS 珠粒，而且是包装材料用的 EPS 珠粒的下脚料。因此难于生产高质量的、质量稳定的泡沫模样，更不能用于球墨铸铁消失模铸造。

2001 年我国杭州凯斯特化工有限公司成功研发了消失模铸造专用共聚料，申请了美国和中国专利（US 6,770,681B<sub>2</sub>, CN 1422878A）。此共聚料为苯乙烯和甲基丙烯酸甲酯的共聚物，苯乙烯所占比例为 30%，甲基丙烯酸甲酯为 70%，含碳量为 69.6%。与 EPS 相比含碳量大大降低，且由于 StMMA 含有氧原子，氧原子能与碳原子结合，从而进一步降低残留的碳。近年来，该公司生产的共聚料性能日趋稳定，成型性良好，发气均匀，浇注平稳，已在国内球墨铸铁消失模铸造领域广泛应用，实现了 StMMA 的国产化，解决球铁铸件表面皱皮，表面碳缺陷，内部夹杂效果显著。如图 1、2 所示，图 1 为普通 EPS 生产的有严重皱皮缺陷的管件，图 2 为同样生产条件下的采用杭州凯斯特 StMMA 生产的管件。



图 1 皱皮管件（EPS）



图 2 完好管件（StMMA）

杭州凯斯特化工有限公司共聚料 3#料（简称杭州料）和日本三菱公司共聚料 CL600A（简称日本料）性能对比：

（1）两者基本性能指标对比。

表 2 杭州料与日本料性能指标对比

	发泡剂（%）	水份（%）	最大倍率	表观密度（g/cm <sup>3</sup> ）	重均分子量（万）
杭州料	9	0.3~0.6	90	0.540	20~25
日本料	8	0.85	89	0.625	28~29

（2）两者原始珠粒颗粒大小均匀，有利于制得内部结构均匀一致的泡沫模样，见图 3～图 6。

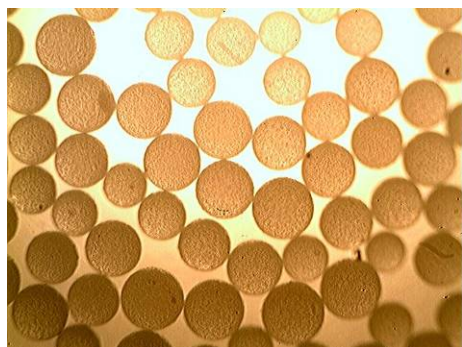


图 3 日本料原始珠粒

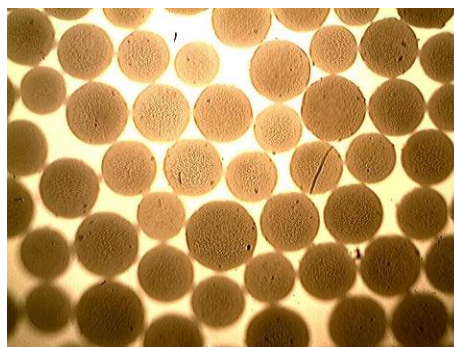


图 4 杭州料原始珠粒

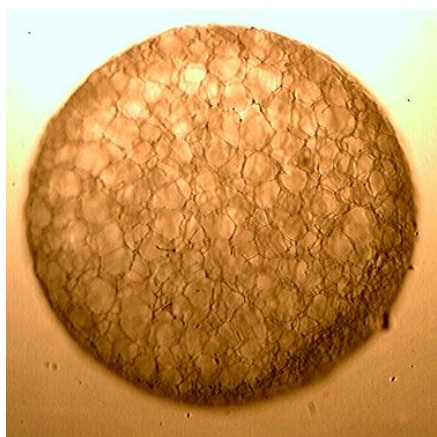


图 5 预发珠粒表面（日本料）

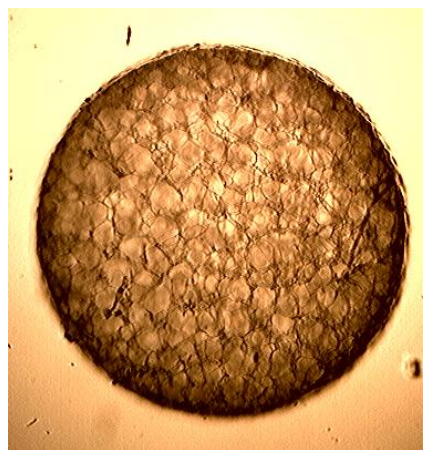


图 6 预发珠粒表面（杭州料）

(3) 日本料原始珠粒外观润泽透明，手感滑腻，预发后的球体手感很软，稍一捏就瘪了，弹性较差，所以成型密度相近时，比杭州料强度差，但杭州料表面光洁度不如日本料，日本料表面质量接近 EPS，日本料比杭州料融合性更好，见图 7、图 8。



图 7 泡沫模样表面质量（日本料）



图 8 泡沫模样表面质量（杭州料）

#### (4) 发泡倍率对比（发泡温度 120℃）及热失重分析

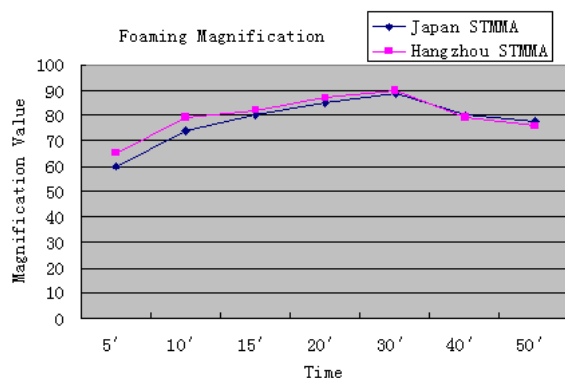


图 9 杭州料和日本料发泡倍率对比

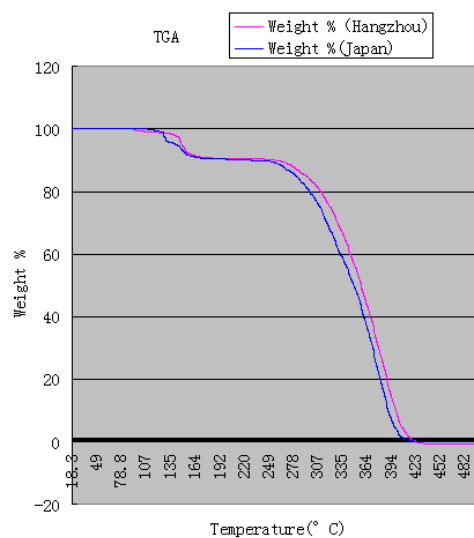


图 10 杭州料和日本料热失重分析对比



由表 2 和图 9 可以看出, 杭州料和日本料发泡剂含量相近, 最大发泡倍率相近, 前者发泡膨胀速度稍快, 而衰减速度相当, 因此预发泡和成型发泡特性相近。从图 10 可以看出, 杭州料和日本料热分解特性几乎一样, 起始分解温度和终了分解温度相近, 各个温度区间的分解速度也相近, 只是在约  $300^{\circ}\text{C}\sim 400^{\circ}\text{C}$  的高速分解区间, 在相同的温度下, 杭州料比日本料稍大。因此杭州凯斯特化工有限公司生产的共聚料性能与日本三菱的共聚料性能相近。

### 3 中小件球铁消失模铸造案例

消失模铸造适合生产结构较复杂的中型铸件和结构简单的小件。我国消失模铸造已成功大量生产汽车减速器壳和差速器壳 (QT450-10)。球铁铸件强度高和延伸率好, 而且耐腐蚀, 能抵抗汽车减速器壳和差速器壳的震动和机油腐蚀, 见图 11~图 14。



图 11 差速器泡沫模样



图 12 差速器铸件



图 13 减速器壳泡沫模样



图 14 减速器壳铸件

消失模铸造特别适合生产球墨铸铁小件。铸件的生产率高, 工艺出品率高, 如应用于高速铁路上的预埋铁座和道岔盖板 (见图 15~图 18)。此二者对铸件表面要求高, 以增加抗腐蚀能力。普通砂型铸件难以胜任, 而熔模铸造虽能满足表面质量, 但要考虑球铁的膨胀给铸型带来的破坏, 而且成本高昂。预埋铁座和道岔盖板要求牌号 QT450-10, 前者重 1kg, 后者重 0.65 kg。对于这种小件, 采用普通砂型铸造势必生产效率很低, 工艺出品率也很低。而采用消失模铸造, 则可以应用小件串浇工艺, 大大提高生产效率和工艺出品率。道岔盖板可以一箱组装 208 个, 可见生产效率之高, 同时工艺出品率可以达到 79%。预埋铁座一箱可以组装 60 个, 工艺出品率高达 75%。



图 15 道岔盖板小件组装



图 16 道岔盖板铸件



图 17 预埋铁座泡沫模样



图 18 预埋铁座

## 4 我国球铁消失模铸造存在的问题

### 4.1 球化级别偏低

2008 年,我国球墨铸铁产量近 800 万吨,产量已居世界第一。球墨铸铁生产技术不断提高。对于消失模铸造球墨铸铁生产企业,球墨铸铁生产技术已不是难题。生产企业一般能稳定控制球化工艺,绝大多数企业的球化级别达到 3 级(如图 20),能满足普通牌号要求,达到 1~2 级的较少,和工业发达国家相比,球化水平偏低(如图 19)。通过强化孕育,能控制得到细小的石墨,石墨大小级别一般能达到 5~6 级,甚至 7~8 级。但对于高延伸率要求的球铁,仍存在一定的难度,如 QT400-18,国内仅有几家消失模铸造企业能生产,主要是球化级别偏低,石墨球数量少,石墨球不够圆整,使得延伸率达不到要求。大多数企业球化工艺采用冲入法。虽然简单快捷,但镁吸收率较低。如图 20,即为湖北宜都长鹏机械制造有限公司消失模铸造生产牌号 QT400-18 球化金相照片,球化级别为 3 级,差的为 4 级,因此远远达不到牌号所要求的 18%的延伸率。



图 19 美国 citation 1 级球化金相

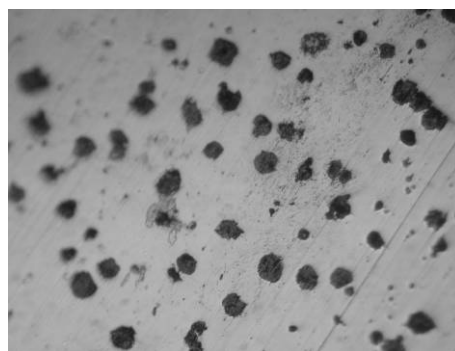


图 20 我国 3 级球化金相

## 4.2 铸件典型缺陷

球墨铸铁消失模铸造普遍存在的问题是皱皮和碳夹杂。消失模铸造由于始终要用到泡沫模样，而泡沫模样总是要含碳的，不管是 EPS 料还是共聚料。碳的存在给球墨铸铁消失模铸造带来很大的障碍，浇注过程中裂解的泡沫大部分在真空作用下被抽成型腔，而有少量泡沫产物残留在铸型之中。球铁消失模铸造浇注温度不能像铸钢件那么高，否则球化衰退严重，因此泡沫产物也就不能像铸钢件气化得彻底。同时球铁含碳量高，一般 3.6% 以上，多余的碳无法全部被铸件吸收，最后只能炭化残留在铸件的表面，形成皱皮，如图 21。同理，碳夹杂也是由于被卷入的泡沫产物无法顺利排出型腔，残留在铸件内部而又无法被高含碳量的球铁所吸收，最后泡沫产物炭化残留在铸件内部形成碳夹杂缺陷，如图 22。图 21、图 22 中两个存在缺陷铸件均是 StMMA 生产的。



图 21 皱皮缺陷



图 22 碳夹杂缺陷

## 5 结论

(1) 我国共聚物发泡珠粒性能稳定，成型性良好，发泡倍率高，衰减速度慢，与日本共聚物的热分解特性几乎一样，接近日本共聚物性能；与 EPS 相比，共聚物能显著降低球墨铸铁件的皱皮和碳夹杂缺陷，从而提高了产品的合格率。

(2) 球墨铸铁件在中小件的铁路铸件和汽车配件（牌号 QT450-10）上得到了成功应用，尤其在小型的球铁铸件上采用了串浇工艺，提高了工艺出品率和生产效率，如道岔盖板的工艺出品率高达 79%。

(3) 我国球墨铸铁件球化级别偏低，大多为 3 级，1~2 级的较少，延伸率偏低，如牌号 QT400-18 的铸件生产难度很大。

(4) 我国球墨铸铁消失模铸造仍存在一些问題，如皱皮，碳夹杂等等。

### 参考文献：

- [1] 黄乃瑜，叶升平，樊自田. 消失模铸造成型原理及质量控制. 武汉：华中科技大学出版社，2004. 4.
- [2] 周冰. 消失模铸造模样聚合物的 ATRP 悬浮聚合和热解改性：[硕士学位论文]. 南京：南京航空航天大学，2008.
- [3] Ye Sheng-ping, Wu Zhi-chao. Lost Foam Casting in China. China Foundry[J]. (2006).
- [4] Li Ke-rui, Zeng Yi-cheng, Zhang Zhong-chou. The Development of Ductile Iron Casting Production Application in China. Foundry World Report. 2008, 10.

- [5] S.Gupta,V.LRichards,A.Singh.Lost Foam Casting of Steel:Carbon Pick-up and Horizontal Flow Fronts.AFS Transactions 2008,paper 08-068.
- [6] H.E.Littleton,J.A.Griffin.Understanding and Improving Bead Filling Parameters that Affect Lost Foam Pattern Quality. AFS Transactions 2008,paper 08-150.
- [7] Jian Li,Wang Yi-bing,etc.The Preparation and Mould Performance Study of StMMA.Fine Chemicals,Nov.2003.
- [8] Zhu Yi-song,Tang Suo-yun.Beads Choice and Pattern Moulding in Lost Foam Casting.Casting(China),2002.