

“两步法”蠕化处理工艺在蠕墨铸铁玻璃模具中的应用

刘金海^{1, 2}, 赵雪勃¹, 薛海涛¹, 付彬国¹, 张桂显², 张胜德³, 刘长起⁴, 王立新⁴, 李寅国⁴

(1. 河北工业大学材料科学与工程学院, 天津 300401; 2. 河北省玻璃及橡塑模具材料研究与应用重点实验室, 河北沧州 061100; 3. 河北安迪模具有限公司, 河北沧州 061100; 4. 天津撒布浪斯探测仪器有限公司, 天津 300251)

摘要: 针对冲入法蠕化处理工艺在玻璃模具铸件应用中存在的技术问题, 提出了“两步法”蠕化处理工艺, 并介绍了其在玻璃模具铸件中的应用。生产实践证明, “两步法”蠕化处理工艺能够制备蠕化率稳定、收缩倾向小的蠕墨铸铁玻璃模具, 显著提高了模具的使用寿命。

关键词: 蠕墨铸铁; 玻璃模具; 蠕化工艺; 蠕化率; 收缩缺陷

在玻璃制品成形过程中, 玻璃模具对产品的外观以及品质的作用非常大。由于初成形模具频繁地与1 100 ℃左右的熔化玻璃液接触, 成形模的温度也在450~650 ℃之间变化, 另外模具开合过程中, 模具受到冷热的交变作用, 产生热应力、氧化和机械作用, 因此, 对模具材料性能所提出的要求极其苛刻。一般来讲, 玻璃模具材质应具备下列一些特质: 抗氧化生长、耐热冲击、耐热疲劳、导热性好、高温耐磨、线膨胀系数小、易于机械加工、组织致密均匀、粘附温度高、耐腐蚀性能好等^[1-2]。目前常用的模具材料有: 普通灰铸铁、D型石墨铸铁、球墨铸铁、蠕墨铸铁、铜合金、镍基高温合金、不锈钢等, 其中, 铸铁模具材料的消耗量最大, 大约占90%左右^[3]。与灰铸铁相比, 蠕墨铸铁具有较好的强度、抗氧化生长、抗热疲劳、耐磨性好等优点, 与球墨铸铁相比, 蠕墨铸铁具有较好的导热性和抗变形能力^[4], 因此, 蠕墨铸铁更适用于制作玻璃模具^[5-6]。但是, 蠕墨铸铁在生产过程中, 蠕化率稳定性差, 且铸件容易产生缩孔和缩松等缺陷^[7-8]。而蠕化率又是影响玻璃模具物理性能和使用性能的主要因素。因此, 多年来, 蠕墨铸铁在玻璃模具中的应用一直没有很好的推广开来。目前, 国内铸造企业处理蠕墨铸铁基本上采用传统的“一步法”, 即冲入法或者喂丝法。由于影响蠕墨铸铁蠕化率等冶金质量的因素非常多, 譬如, 炉料种类、熔炼工艺与过程、炉前蠕化处理过程、出铁过程、工人操作水平、铁液的运输与浇注过程等。在蠕化处理过程中, 有些因素不能够做到很好地人为控制^[9]。所以, “一步法”蠕化处理工艺很难稳定蠕墨铸铁的冶金质量。

因此, 国外许多铸造企业采用以Sintercast技术为代表的“两步法”蠕化处理工艺生产汽车缸盖和缸体^[10]。近年来, 国内有多家大型汽车发动机铸件制造企业也引进了该技术^[11]。另外, 国外企业也有采用以OCC热分析技术为代表的蠕化处理工艺。近几年, 国内也引进了约10台套OCC蠕墨铸铁生产技术系统^[12-13]。但是, 由于国外技术对生产过程的参数控制要求范围很窄, 操作严格, 且设备价格昂贵, 生产过程中的耗材成本高, 所以, 这限制了该技术在我国中小铸造企业的推广应用。

本文根据蠕墨铸铁传统蠕化处理工艺过程中存在的质量稳定性差的问题, 利用国内独立成功开发的“两步法”蠕化处理工艺与智能调控系统来控制蠕化铁液的冶金质量, 保证铸造玻璃模具铸件的蠕化率稳定性, 并消除了铸件收缩缺陷。应用实践证明, “两步法”蠕化处理蠕墨铸铁玻璃模具质量稳定, 使用寿命长, 具有非常好的应用前景。

作者简介:

刘金海(1957-), 男, 教授, 博士, 主要从事铸铁的冶金质量智能化在线检测与调控技术、蠕墨铸铁、ADI和CADI的研究与开发。
E-mail: jhliu57@126.com
通讯作者:
付彬国, 男, 副教授, 博士。
E-mail: fubinguohao@163.com

中图分类号: TG143.49
文献标识码: A
文章编号: 1001-4977(2022)08-1021-06

基金项目:

中央引导地方科技发展资金项目(206Z1005G)。
收稿日期:
2022-01-26 收到初稿,
2022-02-24 收到修订稿。

1 冲入法蠕化处理玻璃模具存在的问题

根据玻璃模具的使用工况条件，蠕墨铸铁玻璃模具要求含有一定数量的合金元素，控制蠕化率在80%~90%范围内，基体组织为单一的铁素体。河北安迪模具有限公司原来采用冲入法蠕化处理工艺制作玻璃模具铸件，化学成分（质量分数）为：3.5%~3.7% C、2.5%~2.8% Si、0.3%~0.6% Mn、0.2%~0.5% Cr、0.25%~0.4% Mo、0.2%~0.5% Ni、 $P < 0.06\%$ ，原铁液的含硫量在0.015%~0.02%，稀土镁蠕化剂的主要成分为9% RE、4% Mg和44% Si，根据原铁液硫含量，蠕化剂加入量在0.35%~0.4%范围内变化，一次包内孕育量：0.7%，出铁温度：1530~1560℃。由于蠕化处理过程中的变化因素比较多，蠕化率的稳定性非常差。图1为连续统计的28包次的蠕化率分布，可以看到，蠕化率在61%~94%之间变化，平均值为75%，均方差为6.6%。其模具蠕化率波动范围如此之

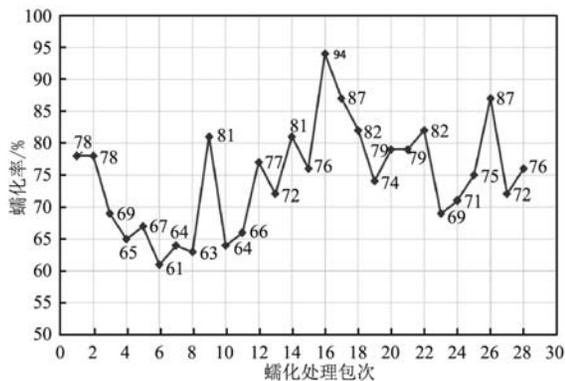
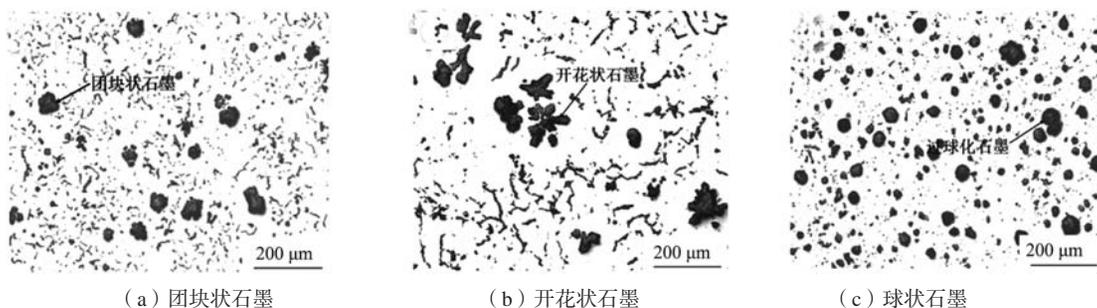


图1 冲入法蠕化处理铁液的蠕化率分布

Fig. 1 The vermicular rate distribution of the molten iron treated by sandwich method

大，将导致模具的铸造性能、力学性能、物理性能和使用性能极不稳定。另外，金相组织中还经常出现共晶的团块状石墨、开花状石墨，甚至出现了大量球状石墨，如图2所示。有时候还会出现石墨漂浮。这在很大程度上影响了玻璃模具的导热能力，也促使了模



(a) 团块状石墨

(b) 开花状石墨

(c) 球状石墨

图2 蠕墨铸铁中的异态球状石墨

Fig. 2 Anomalous nodular graphite in the compacted graphite cast iron

具内腔表面在高温下容易出现凹坑和氧化（图3），耐磨性差，模具使用寿命缩短，玻璃制品的表面质量降低。经验表明，如果蠕墨铸铁玻璃模具的蠕化率和石墨形态控制不合格，它的使用寿命还不如D型石墨铸铁的玻璃模具寿命高。这也导致玻璃模具铸件容易出现缩松缺陷，如图4所示。如果出现过球化现象，铸件的缩孔和缩松缺陷将更加严重。铸件的缩松缺陷影响了模具机加工性能，常出现钻头刀具折断，冷却孔不垂

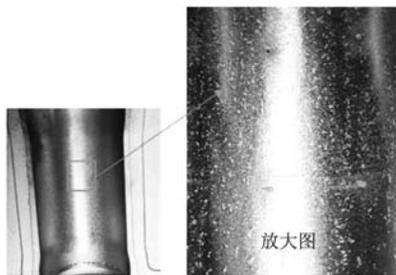


图3 玻璃模具表面的氧化凹坑

Fig. 3 Oxidation pits on the surface of the glass mold

直等问题。

分析冲入法蠕化处理玻璃模具存在的上述技术问题，其原因是影响蠕化处理稳定性的工艺参数较多，导致其冶金质量波动较大，如图5所示^[14]。

经过在现场蠕化处理观察和对照分析，安迪公司冲入法蠕化处理存在四个主要问题。一是原铁液的冶金质量控制不稳定：原来主要采用光谱分析控制原铁液的碳硅含量。碳和硅都是非金属元素，原铁液的碳



图4 玻璃模具铸件的缩松缺陷

Fig. 4 Shrinkage defects in the glass mold castings

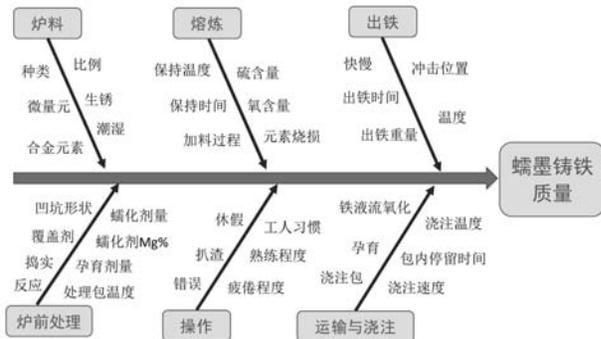


图5 影响蠕化处理过程稳定性的因素

Fig. 5 Factors affecting the stability during the vermicular treatment process

硅含量较高，光谱试样有时候不能获得全白口，导致碳硅含量检测不准确，特别是含碳量的变化比较大。二是即使采用了电子秤，有时候工人疏忽导致出铁量控制不准确，特别是对于中频炉熔炼出铁的最后一包出铁量更不好控制，这相当于蠕化剂的加入量发生波动。三是出铁和蠕化处理过程中，出铁冲入包内位置和出铁速度不稳定，蠕化处理反应时间波动较大，导致镁的吸收率不一致。四是仅仅依靠光谱分析控制稀土镁的残留量，导致活性镁含量误差大。由于光谱分析的是全镁，其中包括铁液中的氧化镁、硫化镁和活性镁，而真正影响蠕化率的是活性镁的含量。如果原铁液硫含量较高，或者光谱取样深度不够，试样中的镁和稀土的化合物含量高，结果是光谱分析的残留镁和稀土含量高，而活性镁不一定高。所以，有时候出现残留稀土镁含量在控制范围内，但是出现蠕化率偏高，或者蠕化失败的现象。实践证明，仅仅依靠光谱分析变质元素的含量来稳定控制蠕墨铸铁的蠕化率是有一定难度的。上述四个问题在我国“一步法”蠕化处理的铸造工厂都不同程度的存在。

2 “两步法”蠕化处理工艺

根据上述分析可知，冲入法蠕化处理过程的有些变化因素是不可控的，也就是说蠕化铁液的冶金质量波动不可避免。既然如此，如果能够在浇注前，对冲入法蠕化铁液冶金质量的波动性进行准确定量预测，然后，对蠕化铁液进行修正，以获得合格蠕化铁液，从而保证所浇注的蠕墨铸铁件的质量稳定性。人们将此蠕化处理定义为“两步法”蠕化处理工艺。“两步法”蠕化处理工艺主要步骤是在控制好原铁液化学成分的基础上，首先进行蠕化预处理，然后对冶金质量变化较大的铁液进行喂丝调质处理^[15]。图6为“两步法”蠕化处理工艺流程简图。

当中频炉熔炼原铁液熔清并达到1 450 ℃左右时，调整好合金元素含量后，浇注原铁液热分析样杯，测

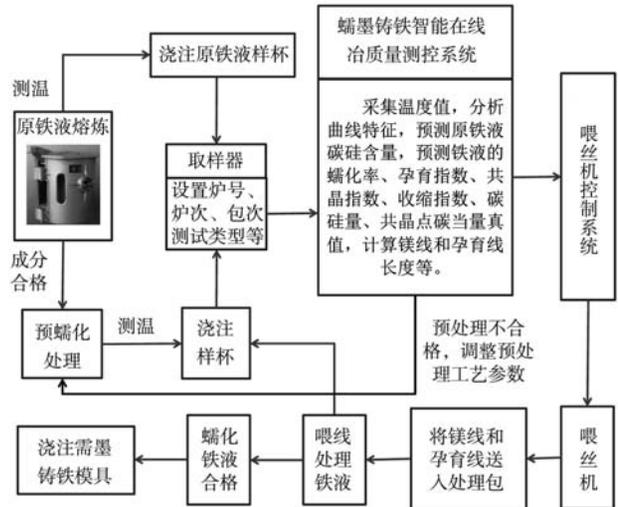


图6 “两步法”蠕化处理工艺流程图

Fig. 6 Flow chart of the “two-step” vermicularising treatment process

试原铁液的碳硅含量及液相线碳当量；当原铁液碳硅及其他化学成分满足要求后，出铁进行预蠕化处理，预处理采用冲入法，预处理剂为球化剂+少量稀土金属或者稀土基的蠕化剂。一般来讲，预蠕化处理铁液的蠕化率要高于铸件所要求的蠕化率，这也叫欠处理，一般控制预处理蠕化率在90%以上。利用蠕墨铸铁冶金质量在线智能分析系统对预蠕化处理后的铁液进行全面冶金质量技术指标分析，如蠕化率、孕育指数、共晶指数、收缩倾向、共晶点碳当量、奥氏体析出量、石墨化膨胀因子、石墨漂浮因子等。然后，根据所生产蠕墨铸铁玻璃模具铸件的蠕化率（80%~90%）等技术要求，智能系统自动计算对预处理后铁液的镁线和孕育线长度，并自动进行喂线处理，达到进一步修正预处理铁液的蠕化率和孕育效果等冶金质量指标的目的，以获得合格蠕化率的铁液。

在安迪模具公司生产条件下，蠕化镁线的直径为9 mm，孕育线的直径为13 mm。对于处理700 kg铁液，根据蠕化预处理的铁液蠕化率的波动状况，一般二次喂镁线长度在3~7 m，孕育线长度3~6 m。喂丝后，浇注铸件，从而保证玻璃模具铸件的蠕化率控制在80%~90%范围内，稳定了蠕墨铸铁玻璃模具铸件的性能。

理论和大量生产实践证明，“两步法”蠕化处理工艺彻底解决了冲入法蠕化处理铁液冶金质量技术指标一致性差的技术难题。

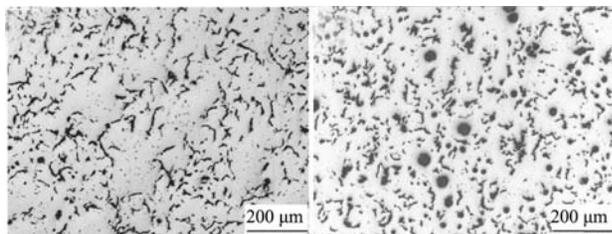
3 “两步法”蠕化处理玻璃模具的蠕化率

自2017年12月份，河北安迪模具有限公司采用了

“两步法”蠕化处理工艺来处理蠕墨铸铁玻璃模具铸件，至今，采用这种新的蠕化处理工艺已经有4年多时间了，处理了近10 000包次的蠕化铁液，没有出现一包蠕化处理失败的铁液。对于“两步法”蠕化处理工艺，即使蠕化预处理失败，即预处理的铁液为完全片状石墨，或者为蠕虫状石墨和片状石墨混合存在，智能系统也能够自动判断其蠕化效果，智能系统将自动计算额外的镁线长度，补偿石墨由片状转变为蠕虫状所需要的含镁量，通过二次喂丝能够将这包预处理失败的铁液纠正到蠕化率等冶金质量指标合格的状态。

需要注意的是，如果预蠕化处理的铁液过球了，即蠕化率远低于80%，蠕墨铸铁冶金质量智能在线测控系统也能够准确预测这种情况。此时，智能系统是不计算镁线加入量的。在这种情况下，如果预处理的铁液温度高于浇注温度，可以等待蠕化衰退，但是等待的过程也存在着孕育衰退。否则，过球化的预处理铁液就要回炉，或者再补充加入适量的原铁液，或者加入适量的硫粉或FeS以中和过多的活性镁。但是，这需要进行大量的试验才能确定硫粉或FeS的加入量。一般情况下，由于浇注温度的限制，不允许预处理过球化的铁液等待。所以，在预处理的过程中，一定要尽量避免过球化预处理。

图7为预蠕化处理和喂镁线5.2 m铁液凝固后的石墨形态。由图7可见，预处理后的蠕化率约为95%，喂丝后铁液的活性镁含量提高，石墨球数量增多，蠕化率降到约83%。



(a) 预蠕化处理 (b) 喂丝处理后

图7 不同蠕化处理蠕墨铸铁中的石墨形貌

Fig. 7 Graphite morphologies in the compacted graphite cast iron with different vermicularising treatments

生产实践表明：“两步法”蠕化处理的玻璃模具铸件的蠕化率稳定，且有效地防止蠕化衰退。图8为连续统计的750包次的“两步法”蠕化处理铁液蠕化率分布情况。

由图8可见，蠕化率在80%至90%之间变化，蠕化率平均值为84%。蠕化率的分布符合正态函数分布，如图9所示，其均方差为1.3%，它仅是冲入法蠕化处理蠕化率均方差的20%。这说明，“两步法”蠕化处理工艺获得的蠕化率非常稳定，波动范围较小。同时，控制蠕化铁液的动态共晶指数在1~2.5之间，在非平衡凝固

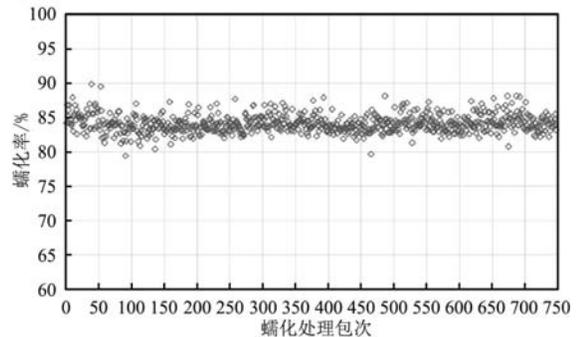


图8 “两步法”蠕化处理的玻璃模具蠕化率分布

Fig. 8 The vermicular rate distribution of the glass molds treated by the “two-step” vermicularising process

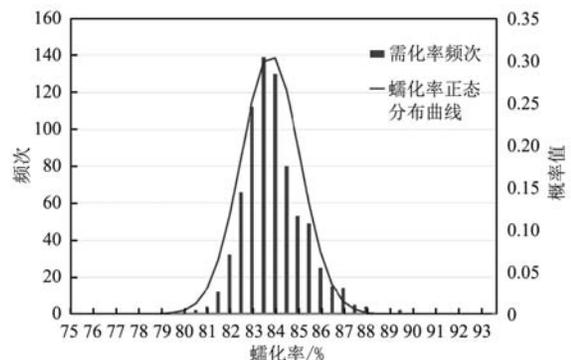


图9 “两步法”蠕化处理的蠕化率正态分布图

Fig. 9 Normal distribution of the vermicular rate of the “two-step” vermicularising treatment process

条件下，属于近过共晶的凝固模式。动态共晶指数在此范围内，大量共晶凝固开始前，液相中首先析出一定数量的过共晶石墨，这部分石墨产生的石墨化膨胀可以抵消一部分液态收缩和奥氏体凝固收缩，消除了模具铸件的缩松缺陷（图10）。由图10可见，“两步法”蠕化处理的玻璃模具铸件内部无缩松缺陷。同时实践证明，在此共晶指数范围内，铁液也不会产生石墨漂浮，组织中没有粗大的过共晶石墨析出，这有利



图10 “两步法”蠕化处理的玻璃模具铸件解剖面

Fig. 10 Cross section of the glass mold castings after two-step vermicularising treatment

于提高玻璃模具的高温抗氧化性能，模具内腔表面没有凹坑的产生，耐磨性提高，有利于提高玻璃模具的使用寿命。

4 蠕墨铸铁玻璃模具的装机应用

蠕墨铸铁玻璃模具铸件在加工前需在950℃条件下进行高温石墨化退火处理，以消除碳化物，均匀化学成分。铸件在高温保温3~5 h后于热处理炉内缓慢冷却，通过共析三相区，使得奥氏体完全按照稳定系进行共析转变，以获得100%的铁素体基体。图11为退火后的金相组织，由图11可见，蠕墨铸铁玻璃模具铸件在高温退火过程中，细小石墨有溶解、合并的趋势，基体为铁素体。这样，蠕墨铸铁玻璃成形模具在使用过程中，不会由于加热和冷却导致基体组织发生相变而产生微孔洞，同时没有相变应力的产生，有利于提高玻璃模具的使用寿命。

表1为“两步法”蠕化处理玻璃模具的实际使用情况。可以看到，在4家玻璃制品公司原来使用D型

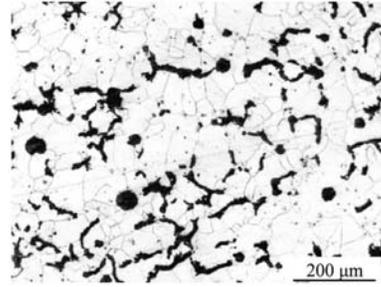


图11 退火后的蠕墨铸铁金相组织

Fig. 11 Optical microstructure of the compacted graphite cast iron after annealing

石墨铸铁的玻璃模具，最高使用寿命达到60万次，最低使用寿命45万次，平均使用寿命为53万次。在相同生产条件下，“两步法”蠕墨铸铁玻璃模具的最高使用寿命为74万次，最低使用寿命为62万次，平均使用寿命为66万次，比D型石墨铸铁玻璃模具平均使用寿命提高了27%。由此可见，当蠕墨铸铁玻璃模具的蠕化率等冶金质量技术指标稳定之后，其模具使用寿命获得

表1 蠕墨铸铁玻璃模具与D型石墨铸铁模具的使用效果对比

Table 1 Comparison of the use effect of the compacted graphite cast iron glass mold and D-type graphite grey cast iron glass mold

| 客户名称 | 产品名称 | 设备类型 | 喷焊方式 | D型石墨铸铁模具使用寿命/万次 | 蠕墨铸铁模具使用寿命/万次 | 使用寿命提高/% | 产品外观改善 | 方便客户调整方面 |
|--------|------------------|----------|---------|-----------------|---------------|----------|---------------|----------|
| 南宁某公司 | 410 mL异型玻璃瓶，小口压吹 | 三金8组双滴 | 上下口 | 60 | 74 | 23 | 合缝线小，瓶身外表光洁度高 | 节省吹冷风 |
| 河北某公司 | 9004#500燕京啤酒瓶 | 嘉丰6组三滴 | 上下口，合缝线 | 55 | 65 | 18 | 合缝线小，椭圆度小 | 外观尺寸稳定 |
| 秦皇岛某公司 | B0131百威330 mL啤酒瓶 | 保太罗10组双滴 | 上下口，合缝线 | 45 | 64.5 | 43 | 口部尺寸稳定，瓶唇椭圆度好 | 重量调整小 |
| 青岛某公司 | 500 mL青岛啤酒瓶 | 三金10组三滴 | 上下口，合缝线 | 50 | 62 | 24 | 模具变形量小，外观无氧化 | 模具光洁度高 |
| 均值 | | | | 53 | 66 | 27 | | |

了大幅度提高。另外，模具的尺寸稳定，抗氧化能力强，修整工作量小，耐磨性高，玻璃制品的表面质量也同时得到了提高。

5 结论

(1) 冲入法蠕化处理过程中的变化因素比较多，控制难度大，蠕墨铸铁的冶金质量波动大，铸件质量不稳定。

(2) “两步法”蠕化处理工艺可以获得稳定的蠕墨铸铁铁液的冶金质量，克服了冲入法蠕化处理工艺

因素变化大导致的冶金质量一致性差的问题，提高了玻璃模具铸件的内在质量。

(3) “两步法”蠕化处理的玻璃模具抗氧化性好、耐磨性高，使用寿命长，玻璃制品的表面质量好，有利于提高生产效率，降低玻璃制品的生产成本。

(4) “两步法”蠕化处理工艺获得成功的关键是采用蠕墨铸铁智能在线测控系统对预处理蠕化铁液的冶金质量关键技术参数进行准确的预测。

参考文献:

- [1] 韦玉屏, 陈勇. 玻璃模具材料的发展和应用 [J]. 机械设计与制造, 2008 (3): 201-203.
- [2] 吴进线, 黄新民, 杨明, 等. V、Ti合金化对玻璃模具材料抗氧化及耐热疲劳性的影响 [J]. 铸造, 2011, 60 (7): 697-699.
- [3] 岳旭东, 余光达, 吴春京, 等. 合金铸铁玻璃模具的研究现状 [J]. 材料导报, 2004 (12): 34-36, 40.
- [4] MASHLOOSH K M. Wear resistance of different types of cast iron used in glass blow mould [J]. Diyala Journal of Engineering Sciences, 2015, 8 (3): 1-21.
- [5] 肖明. 新玻璃模具材料的开发和应用 [J]. 玻璃与搪瓷, 2006 (2): 19-21.
- [6] 王琥, 张兆云, 彭贵良, 等. V-Ti-Cu-Cr蠕墨铸铁玻璃模具试验小结 [J]. 铸造, 1983 (4): 34-39.
- [7] 方朝辉, 苏秋君, 姚兴田. 铸铁玻璃模具单箱无冒口铸造工艺研究 [J]. 中国铸造装备与技术, 2015 (1): 18-20.
- [8] 邱汉泉, 翟志军, 傅现强, 等. 突破蠕墨铸铁生产技术瓶颈的研究与实践 [J]. 铸造, 2019, 68 (10): 1077-1086.
- [9] STEFANESCU D M, SUAREZ R, KIM S B. 90 years of thermal analysis as a control tool in the melting of cast iron [J]. China Foundry, 2020, 17 (2): 69-84.
- [10] 刘金城. 瑞典SinterCast蠕墨铸铁发动机生产持续增长 [J]. 铸造, 2016, 65 (11): 1059.
- [11] 李克锐, 李增利, 崔宇, 等. 我国铸铁生产技术现状与发展趋势 [J]. 铸造, 2022, 71 (2): 123-135.
- [12] 王超, 孙帆, 季托, 等. OCC蠕墨铸铁热分析技术介绍与案例分析 [J]. 现代铸铁, 2020 (1): 22-27.
- [13] 杨磊. 发动机缸盖蠕墨材料开发及生产控制 [C]//2021年中国铸造活动周论文集, 沈阳, 2021.
- [14] 李卫主编. 铸造手册第1卷: 铸铁 [M]. 第4版, 北京: 机械工业出版社, 2021.
- [15] 刘金海, 薛海涛, 付彬国, 等. 蠕墨铸铁蠕化处理智能在线测控技术的研究 [C]//第17届中国铸造协会年会暨第六届全国铸造行业创新发展论坛论文集, 2021: 9-12.

Application of “Two Step” Vermicularizing Treatment Process in Glass Mold of Compacted Graphite Cast Iron

LIU Jin-hai^{1,2}, ZHAO Xue-bo¹, XUE Hai-tao¹, FU Bin-guo¹, ZHANG Gui-xian², ZHANG Sheng-de³, LIU Chang-qi⁴, WANG Li-xin⁴, LI Yin-guo⁴

(1. School of Materials Science and Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China; 2. Key Laboratory of Research and Application of Mould Materials for Glass and Rubber in Hebei Province, Cangzhou 061100, Hebei, China; 3. Hebei Andi Mould Co., Ltd., Cangzhou 061100, Hebei, China; 4. Tianjin Sabulance Probe Engineering Co., Ltd., Tianjin 300251, China)

Abstract:

Aiming at the technical problems existing in the application of sandwich method of vermicularising for glass mold castings, a “two-step” vermicularising treatment process was proposed, and its application in the glass mold castings was introduced. The practice proved that the “two-step” vermicularising method could stabilize the vermicular graphite rate and reduced the shrinkage defects of the glass mold castings. This new vermicularizing method could increase the life span of the glass mold remarkably.

Key words:

compacted graphite cast iron; glass mold; vermicularising treatment; percent of vermiculation; shrinkage defect