铸铁孕育剂中 Al 和 Ca 元素检测误差的分析

刘　旭[1, 4]，赵益锋[2]，闫雪华[3]，武炳焕[1]

（1. 上海铸米科技有限公司，上海 201210；2. 宁波日星铸业有限公司，浙江宁波 315113；
3. 上汽通用五菱汽车股份有限公司，广西柳州 545007；4. 上海大学材料科学与工程学院，上海 200444）

摘要：铸铁孕育剂中的Al、Ca元素检测经常出现较大的差异。带来这些差异的因素不仅包括设备与检测方法的不同，还包括是否将Fe元素作为基体合金，以及选用合适相关元素的特征谱线。同时，由于孕育剂中的Si/O、Al/O和Si等颗粒不会被溶解，使用ICP发射光谱仪检测时，这些颗粒会被过滤掉，不会被检测到，更益于检测孕育剂的真实有效成分。铸铁孕育剂和硅铁合金类似，主要都是Si和FeSi两相组织，其中FeSi相的比例相对更少。检测发现，Al和Ca元素主要存在于FeSi相中。样品制备过程中要做成细粉末，由于含Al和Ca元素的FeSi相的颗粒更大，尤其是含Al元素的FeSi相，因此在筛分过程中，富集Al和Ca元素的颗粒就容易被过滤掉，从而导致检测结果中Al、Ca含量偏低。

关键词：铸铁孕育剂；Al和Ca元素检测；Al元素偏析；ICP分析；XRF分析

中国铸造产品产量巨大，世界排名第一。据中国铸协官方发布的数据[1]，2023年中国总铸件产量是5 190万吨，即使在当今萧条的经济环境下，依然同比增长0.4%。其中，黑色铸件占比82.5%，铸铁件占比70.3%，灰铸铁占比40.3%，球墨铸铁占比29%。换算下来，2023年全年生产灰铸铁、球墨铸铁总量接近3 600万吨，年产值超过3 000亿。灰铸铁、球墨铸铁铸件的产量产值巨大，并且随着机械工业技术的发展，材质性能要求不断提高，迫切需要其工业生产的细节技术提升。

孕育剂是铸铁生产工艺中使用的添加剂，虽然其加入质量只有千分之几，但却是决定铸件性能的关键原材料。随着社会的发展及技术的进步，人们对铸件性能的要求越来越高。这就需要精细化研究铸铁用孕育剂，包括研究孕育剂中元素的检测与分析。

近20年来，研究铸造用孕育剂中元素检测的文献不多。即使放宽范围来看，文献资料中更多的是研究硅铁或者金属硅中的元素检测。实际上铸铁用孕育剂不能简单地归类于硅铁。随着铸铁铸造工艺和铸造用孕育剂研发进展，部分孕育剂已经不能简单地称之为“硅铁合金”了。因为其第二大组元素已经不是铁了，或者第一大组元素已经不是硅了。即使是在有限的文献、标准和分析方法中，涉及到元素检测的研究也仅仅是就方法本身来分析，没有涉及到材料、材质和相等变化因素及其影响，也没有涉及不同检测方法之间横向比较以及同材质不同成分对检测结果的影响。以上这些对元素检测结果都有影响，进而对铸造孕育剂的使用效果也有影响。例如，砂子和金属硅不能直接加在铸铁铁液中使用，被认为是杂质。但$FeSi_2$相、SiO_2相和Si相中含有的硅，分别能被不同的检测方法检测到。SiO_2相和Si相混到孕育剂（或者硅铁）中就不能被区分和察觉，进而被误使用了。

铸铁市场巨大，孕育剂检测技术需求真实而且迫切。现今的铸造领域的材料科研工作者，大多关注铸件或者孕育剂本身的性能，却漏掉了这个实际的领域。因此，结合检测方法与材质分析，做一些精细化的、更贴近时代需求的研究是有意义的。

作者简介：
刘 旭（1982–），男，博士生，研究方向为高性能铸铁材料及高熵合金。电话：15216759018，E-mail：xliu@xiaozhuchong.com。

中图分类号：TG115.3
文献标识码：A
文章编号：1001-4977（2025）11-1508-10

基金项目：
上海市科学技术委员会：高强度高韧性材料的开发。
收稿日期：
2025–03–31 收到初稿，
2025–05–18 收到修订稿。

1 制备与检测

1.1 样品的制备

铸铁生产使用的孕育剂，大部分是硅铁基合金。虽然目前已经出现部分特殊合金，例如某种孕育剂质量分数为40%~80% Si，0~5% Ba，0.5%~5% Ca，0~5% Al，0~5% RE，0~5%Bi，0~5% S，剩余为Fe[2]。其基体合金相已经不是FeSi相或者$FeSi_2$相了。但是考虑到当前铸铁行业大部分单位依然是以硅铁基为基体做成分检测，本文依然从硅铁基的角度来展开研究，同时会参考部分其他方法。我们选择的样品的设计成分是，质量分数为72% Si，3.5% Al，0.7% Ca，其余质量是Fe和杂质元素。取同一批孕育剂，制备6份样品，分别送到5家不同的机构进行盲样检测，然后做对比分析。5家机构介绍如下：一家用户（User），即国内某大型铸造厂；一家供应商（Supplier），即孕育剂生产厂家；两家有资质的第三方检测机构（TPI），南方北方各一家，是业内知名检测机构；一家材料研究院（MRI），具备CNAS国家认可认证实验室。

按照GB/T 13247—2019《铁合金产品粒度的取样和检测方法》来制备和取样[3]。首先取出上述孕育剂样品5 kg，产品粒度为0.2~0.7 mm。充分振动均匀后，约取出其中600 g，其余留样保存，用于复检或者新的研究和检测需求。然后，使用破碎机将600 g样品粉碎至150 μm粒度以下，不过筛，然后按照标准6.2中建议的缩分法均匀分出6份样[3]，以盲样方式分别寄送到以上5家单位进行检测。其中，用户、供应商、两家第三方检测机构这四家单位分别寄送1份样品，仅做孕育剂中的Ca元素和Al元素的成分检测。这四份样品在寄出时均为盲样，样品描述都一样，由各检测机构自行决定选用的国标或者方法，这样更能真实反应工业界实际的检测情况和水平。材料研究院送样两份，所做检测包括：孕育剂中的Ca元素和Al元素的成分检测，孕育剂材质分析，成分检测过程中的影响因素等。

1.2 检测结果

这里主要展示的是孕育剂里面Ca元素和Al元素的成分检测结果。各家检测的结果差异较大。成分检测结果中最大值与最小值的差值（ΔC）分别是ΔC_{Al}=1.25%，ΔC_{Ca}=0.53%。Ca元素和Al元素检测结果的方差（S^2）和标准差（σ）分别是，S^2_{Al}=0.258，σ_{Al}=0.508，S^2_{Ca}=0.042，σ_{Ca}=0.204。如果仅就对比两家第三方检测机构，北方检测机构（TPI-N）比南方检测机构（TPI-S）检出值要低，两家的机构的差异比例（$\Delta_{Al}\%=\frac{C_{TPI-S}-C_{TPI-N}}{C_{TPI-N}}\times 100\%$）分别达到了$\Delta_{Al}$%=16.8%和$\Delta_{Ca}$%=36.84%。

供应商选用的检测仪器是XRF荧光光谱仪，其他四家使用的是ICP发射光谱仪。相对于ICP发射光谱仪，XRF荧光光谱仪检测速度要快得多，能够满足生产厂家的效率需求。

对于孕育剂中的Ca元素和Al元素的检测，五家单位选择了4种不同的检测方法[4-7]，如表1所示。后面会对这些方法及过程做部分对比和分析。

表1 分析结果与对应的方法
Tab. 1 Analysis results and corresponding methods

检测机构	检测设备	Al元素检测		Ca元素检测	
		含量/wt.%	检测方法	含量/wt. %	检测方法
铸造厂	ICP	2.59	GB/T 24194—2009	0.20	GB/T 16477.2—2010
孕育剂生产商	XRF	3.75	GB/T 4333.5—2016	0.61	GB/T 4333.5—2016
三方检测（北）	ICP	2.50	GB/T1 4849.4—2014	0.38	GB/T 14849.4—2014
三方检测（南）	ICP	2.92	GB/T 24194—2009	0.52	GB/T 24194—2009
材料研究院	ICP	3.21	GB/T 24194—2009	0.73	GB/T 24194—2009

2 检测方法分析

2.1 检测方法适用材质及范围

对于孕育剂中的Ca元素和Al元素的检测，上述的四种方法的差异列于表2。主要对比分析了制样过程中是否有化学反应（溶样），方法对应的检测目标的基体种类，Fe元素在基体中的定位，以及Al、Ca元素适用的检测范围。四点不同详述如下：

（1）样品制备过程中是否有化学反应。检测方法GB/T 4333.5—2016的样品制备过程不需要化学溶样，另外三种方法都需要经历化学反应，这既有优点也有限制。优点部分我们在下一小节会分析到，这里只讨论限制。从过往的研究[8-20]以及我们的经验来看，化学溶样的溶解、发烟过程都会影响到成分检测的结果。孕育剂并不是硅铁，里面有大量硅铁没有的元素，所

表2　不同检测方法的差异
Tab. 2 Differences of different detection methods

检测机构	差异			检测范围	
	制样化学反应	基体	Fe元素定位	Al含量/wt.%	Ca含量/wt.%
GB/T 4333.5—2016	无	硅铁	基体相元素	0.2~2.5	0.05~2.5
GB/T 24194—2009	有	硅铁	基体相元素	0.01~3.0	0.01~2.5
GB/T 14849.4—2014	有	金属硅	溶质元素	0.02~1.0	0.01~1.0
GB/T 16477.2—2010	有	镁硅铁合金	基体相元素	-	0.5~6.0

以在使用ICP发射光谱检测时，需要根据孕育剂不同来选择或者调整溶样过程和方法。

（2）不同检测方法默认的合金基体不同。方法GB/T 14849.4—2014默认的合金基体是金属硅，适用的孕育剂是Fe元素含量低，或者Ce/La/Bi/Zr/Bi/Sr/Ba/Ca/Al/Mn等孕育元素含量高的孕育剂。方法GB/T 4333.5—2016和GB/T 24194—2009默认的合金基体是硅铁，适合的孕育剂是Fe元素含量高，孕育元素含量低的情况。方法GB/T 16477.2—2010默认的合金基体是稀土镁硅铁合金（俗称球化剂），适合Si元素含量低于50%，同时Fe元素含量高于30%的孕育剂。就本文讨论的元素检测，方法GB/T 4333.5—2016和GB/T 24194—2009更合适一些。

（3）Fe元素在基体中的定位。方法GB/T 14849.4—2014中Fe元素被认为是溶质元素，其他三个方法中Fe元素被认为是基体的合金相。不同的定位带来的检测结果是有差异的，在检测过程中需要判定是否要做Fe元素的基体匹配。材料研究院的工作人员用GB/T 24194—2009方法做了横向对比，同一溶解好的试样分为两份，一份做Fe元素的基体匹配，另一份不做，检测结果如表3所示。

（4）元素检测含量范围。四种方法的检测范围差异较大。对于本文中Al元素的检测，范围都不适合。由于孕育剂属于非标产品，各单位只能找近似合适的标准和方法。这也是现在行业混乱和纠纷频发的原因之一。

表3　Fe元素基体匹配前后Al、Ca元素检测结果
Tab. 3 Detection results before and after Fe element matrix matching

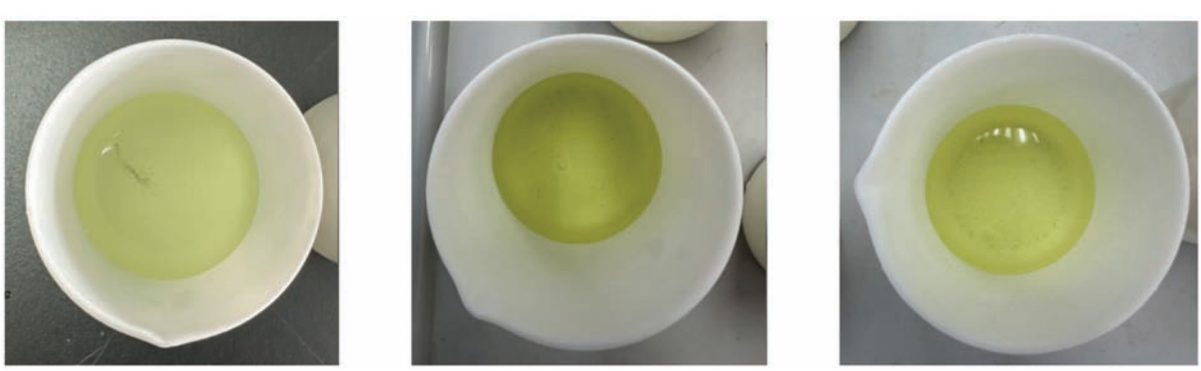
项目	Al元素含量/%	Ca元素含量/%
做Fe元素基体匹配前	3.05	0.69
做Fe元素基体匹配后	3.21	0.73
差值	0.16	0.04
增加比例	4.98%	4.96%

2.2　操作过程中的影响因素

2.2.1　不溶颗粒

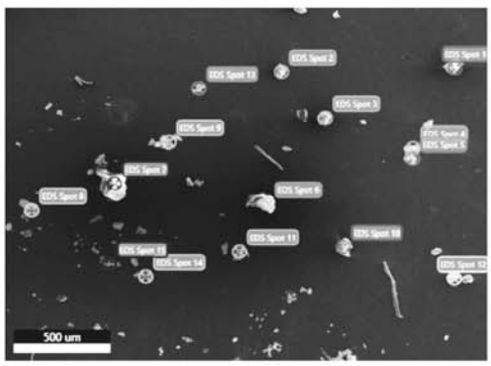
图1是孕育剂和两个国家标样（National Standard Samples，NSS）完成溶样后的实拍图。两个标样的编号分别是：NSS 1：GBW（E）010249和NSS 2：YSBC37642 B-09。可以发现三个样品溶液中都有不溶的残渣，即使增加溶解的时间也无法溶解。

将溶液中的残渣取出烘干后，在扫描电镜下观察，并做能谱检测，如图2所示。可以发现不溶残余物主要是四种颗粒，主要成分分别是Si/O，Al/O，Si，C/O。各颗粒统计结果见表4。其中Si/O和Al/O颗粒最多，分别占40%；单质Si颗粒约占13%。

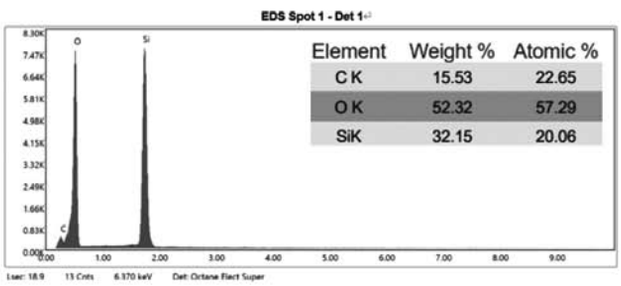


（a）待检孕育剂　（b）硅铁国家标样1　（c）硅铁国家标样2

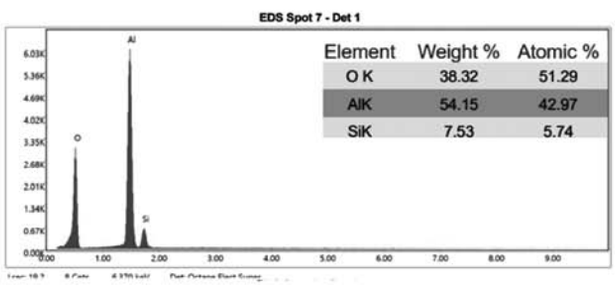
图1　溶样后残余的不溶物
Fig. 1 Residual insoluble substances after sample dissolving



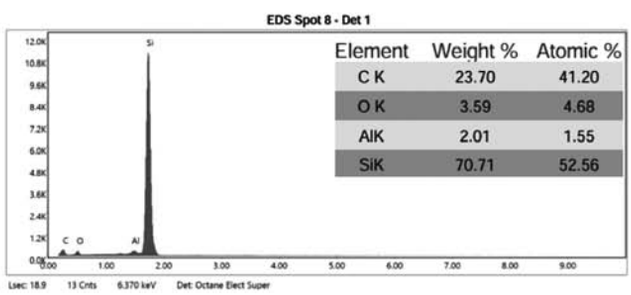
（a）被测颗粒电镜图像



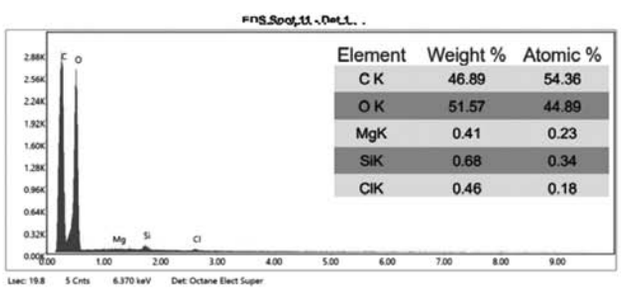
（b）标记1颗粒能谱结果



（c）标记7颗粒能谱结果



（d）标记8颗粒能谱结果



（e）标记11颗粒能谱结果

图2 残余不溶物的能谱检测结果

Fig. 2 EDX analysis results of residual insoluble substances

表4 溶样后残余不溶物的统计

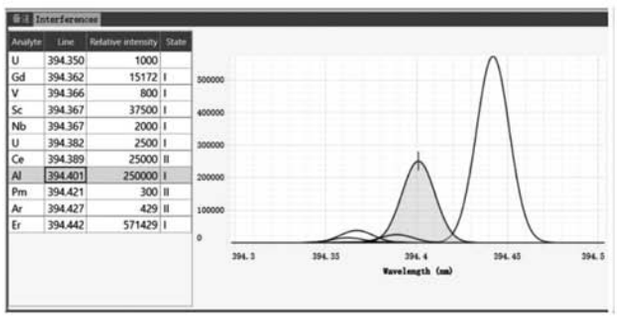
Tab. 4 Statistics of residual insoluble substances after sample dissolving

颗粒元素	颗粒标记	统计数量	颗粒占比/%
Si/O	1/2/3/4/6/10	6	40.00
Al/O	5/7/9/12/14/15	6	40.00
Si	8/13	2	13.33
C/O	11	1	6.67

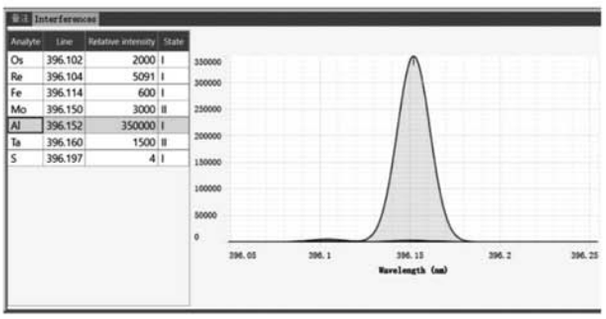
这些残余物颗粒是无法溶解，用ICP发射光谱仪检测时，溶液要进行过滤，这些颗粒所含元素是不会被检测到的。但用XRF仪器测试时，这些颗粒里面的元素是都会被检测到的。在实际的铸件生产过程中，Si/O，Al/O，Si等颗粒，都是高熔点且化学性能稳定的物质，C/O颗粒在高温下易分解，这些颗粒都很难被铁液吸收，其所含元素不能成为有效的孕育元素。实际上，这些颗粒属于渣和杂质。从这个角度来看，有化学溶解反应的制备过程，部分渣和杂质不会被检测到，这对孕育剂有效成分检测更为有益。

2.2.2 杂峰干扰

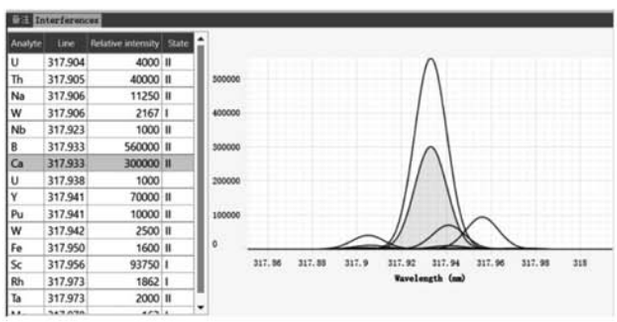
使用ICP发射光谱仪检测时，不同元素可选择的特征谱线不止一个。按照国标方法上的推荐，每个元素至少有两个特征谱线可以选择[5-7]。以往的研究也有类似发现[5]，但没有分析Ca元素的谱线影响。在实际检测中，由于不同的孕育剂所含元素不同，其干扰峰也不一样。如图3所示，在本文研究样本的孕育剂检测中，Al元素的394.401谱线（图3（a））和Ca元素的317.933谱线（图3（c））都有严重的干扰峰，尤其是后者。从实际检测结果来看，也是如此。Ca元素的两个特征谱线检测出来的成分差异较大，如表5所示。



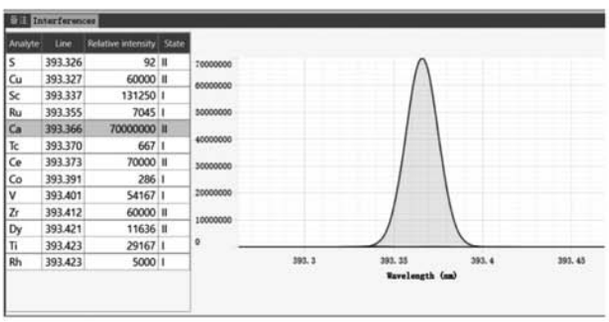
（a）Al元素394.401谱线



（b）Al元素396.152谱线



（c）Ca元素317.933谱线



（d）Ca元素393.366谱线

图3　不同特征峰中的干扰峰

Fig. 3 Interference peaks in different spectral lines

表5　ICP检测结果中的不同特征峰

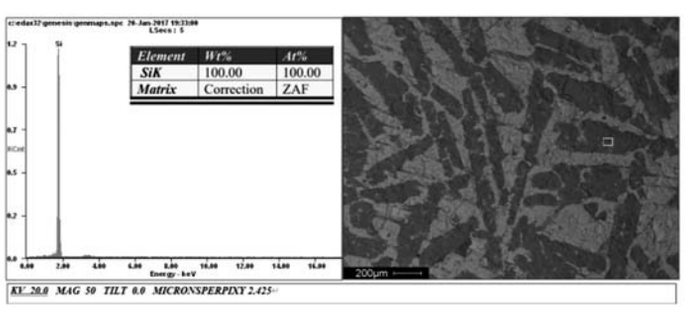
Tab. 5 Different characteristic peaks in the ICP test results

w_B/%

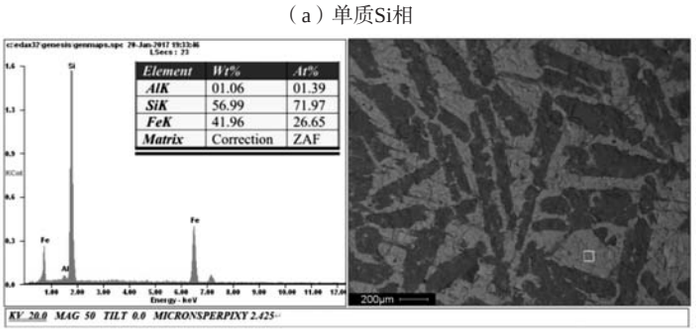
Al 394.401	Al 396.152	Ca 393.366	Ca 317.933
3.216 3	3.211 8	0.726 0	0.648 8

3　材质分析

图4是硅铁基合金的扫描电镜分析图，包括EDX能谱检测。硅铁合金在微观上不是均匀结构，主要由两相组成。图中深灰色的相，为单质Si相，浅灰色的相是Fe-Si相。Al元素只存在于Fe-Si相中。



（a）单质Si相



（b）Fe-Si相

图4　硅铁的能谱检测

Fig. 4 EDX analysis of ferrosilicon

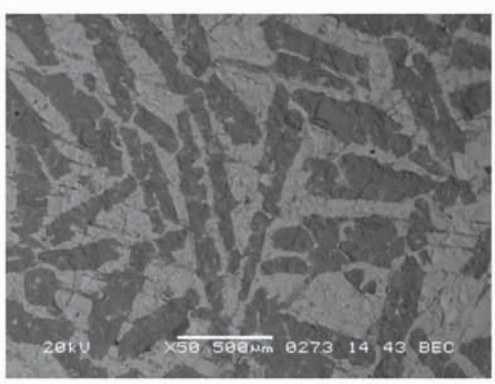
图5为对比三种合金的微观金相图。三种合金分别简称为样品1、2和3，分别是硅铁合金，高硅孕育剂，低硅孕育剂。三种合金的Si、Al和Ca三种元素的质量分数如表6所示。虽然样品1和样品2的硅的质量分数相近，但是由于所含Al元素含量不同，实际在铁硅双相中的质量分数是不同的，样品2要高于样品1。如图5（b）中所引用的铁硅双相相图所示[21]，理论上硅的质量分数在72%合金，如图中红线所示。但是如表6中所示，合金中的硅在铁硅双相中的质量分数高于72%，如图中蓝线所示。从相图中可以看到，当硅的质量分数大于50.14%时，室温下硅铁合金由$FeSi_2$和Si两相组成，实际金相也是如此。当硅含量越高，$FeSi_2$相和Si相两相中的单质Si相比例就越高。所以就形成了图5（c）和图5（d）所示的金相组织。可以清晰看到

表6 不同合金的化学成分

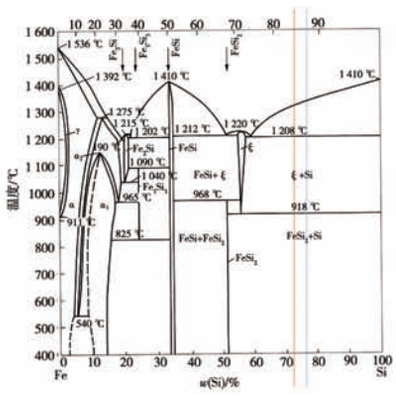
Tab. 6 Chemical compositions of different alloys

w_B/%

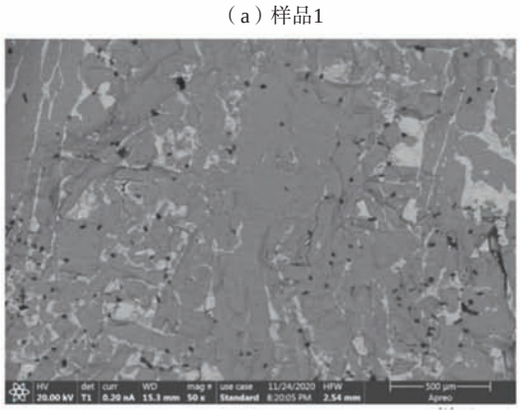
合金种类	Si	Al	Ca	Fe	FeSi二元相中Si
硅铁	72.20	1.00	0.70	25.80	73.67
高硅孕育剂	72.36	3.75	0.61	22.78	76.06
低硅孕育剂	51.60	3.52	0.73	43.37	54.33



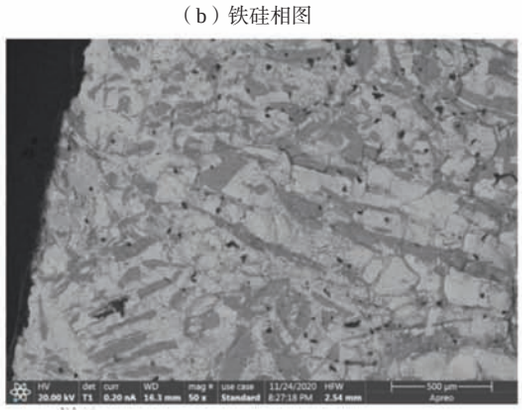
（a）样品1



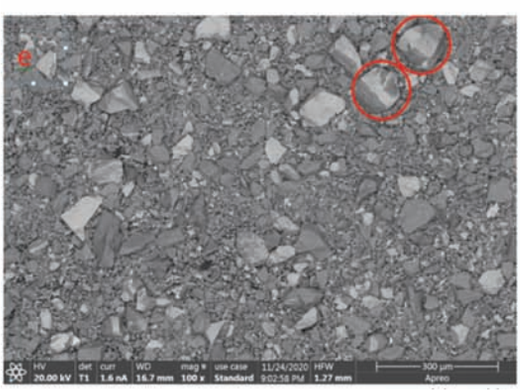
（b）铁硅相图



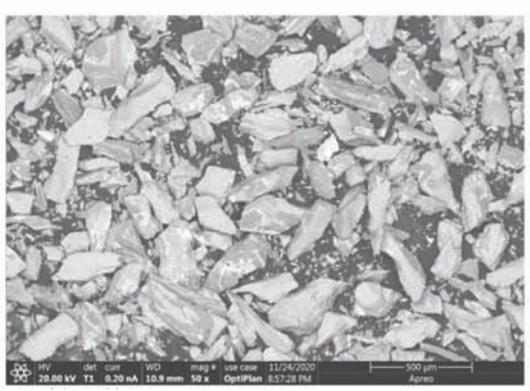
（c）样品2



（d）样品3



（e）样品2粉



（f）样品3粉

图5 不同硅含量合金的SEM图片

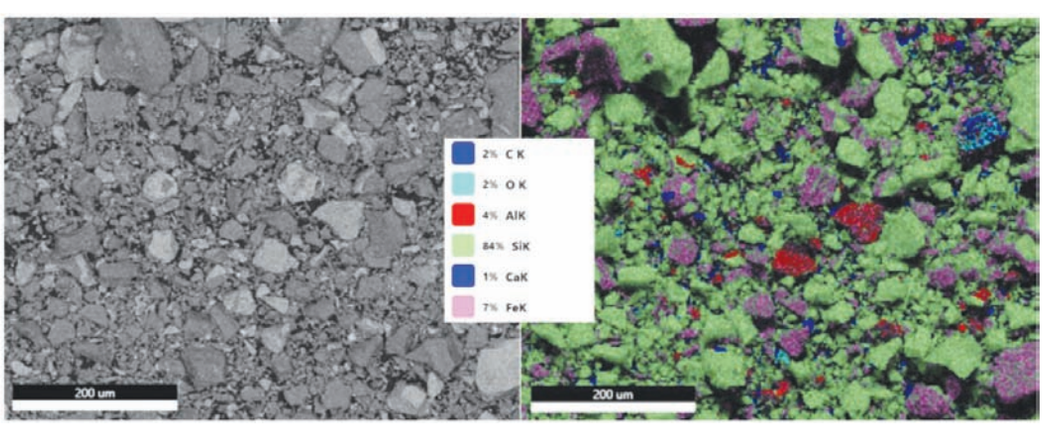
Fig. 5 SEM images of the alloys with different Si contents

样品1、2和3金相中，单质Si相比例是样品2>样品1>样品3。图5（e）和图5（f）分别是样品2、3的粉末样的SEM背散射电子图。图5（e）粉末样类似于送到材料研究院做检测分析的样品。

从图5（e）中红圈位置可以看到有部分颗粒较大，尺寸大于150 μm。从前文中使用的国标GB/T 14849.4—2014和GB/T 24194—2009中制样要求来看，粉碎后的样，要用125 μm或149 μm的筛网过筛。这种情况下类似图中红圈中的颗粒就有概率不能通过筛网。从图5（e）中红圈位置的颗粒来看，像是Fe-Si相。而前文中讨论过，Al元素和Ca元素只能存在于Fe-Si相中，而不是单质Si相。这样的话，如果有大尺寸的Fe-Si相颗粒不能通过筛网，那么ICP发射光谱仪检测出来的Al和Ca含量就会低于实际值。针对这个问题，我们进一步做相分析。

图6（a）是送材料研究院待检的孕育剂粉末样。图6（b）是粉末样品的元素面扫描分析。从图6（b）中可以看出，Al元素富集的颗粒尺寸偏大，Ca元素富集的颗粒有大有小。

对图6（a）中的样品进行相扫描，如图7所示。从各相的分布来看，相分布是很不均匀的，偏析严重。含Al的相主要有三种，分别是：Si/Ca/O/Al/C相，占比1%，如图7中紫色部分所示；Al/Si/Fe相，占比2%，如图7中褐色部分所示；Si/Al/Fe相，占比2%，如图中橙色部分所示；后面两种相中主要元素种类相同，但Al含量有差异。含Ca的相主要也是分布在以上含Al的三种相中。对应图7的分布图，具体各相能谱结果如图8所示。图8（a）是图7中所有相综合的能谱结果；图8（b）至图8（i）分别依次对应图7中从上往下8种不同相的能谱结果，颜色也是一一对应。由于三种含Al相的不同，在使用ICP发射光谱仪检测时，溶样顺序选择和试剂的选择，是否会影响检测结果。值得进一步研究。



（a）孕育剂粉末　　（b）全元素分布

图6　待检孕育剂能谱面扫描结果

Fig. 6 EDX map scanning results of the inoculants waiting for inspection

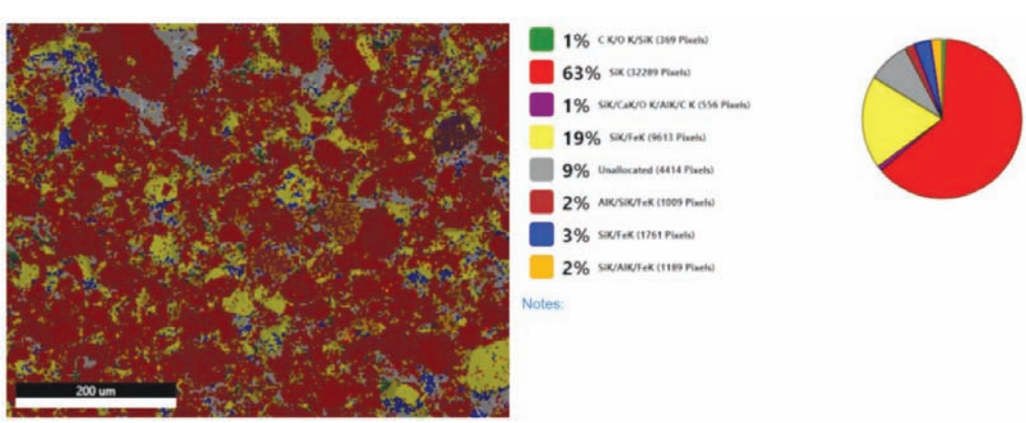
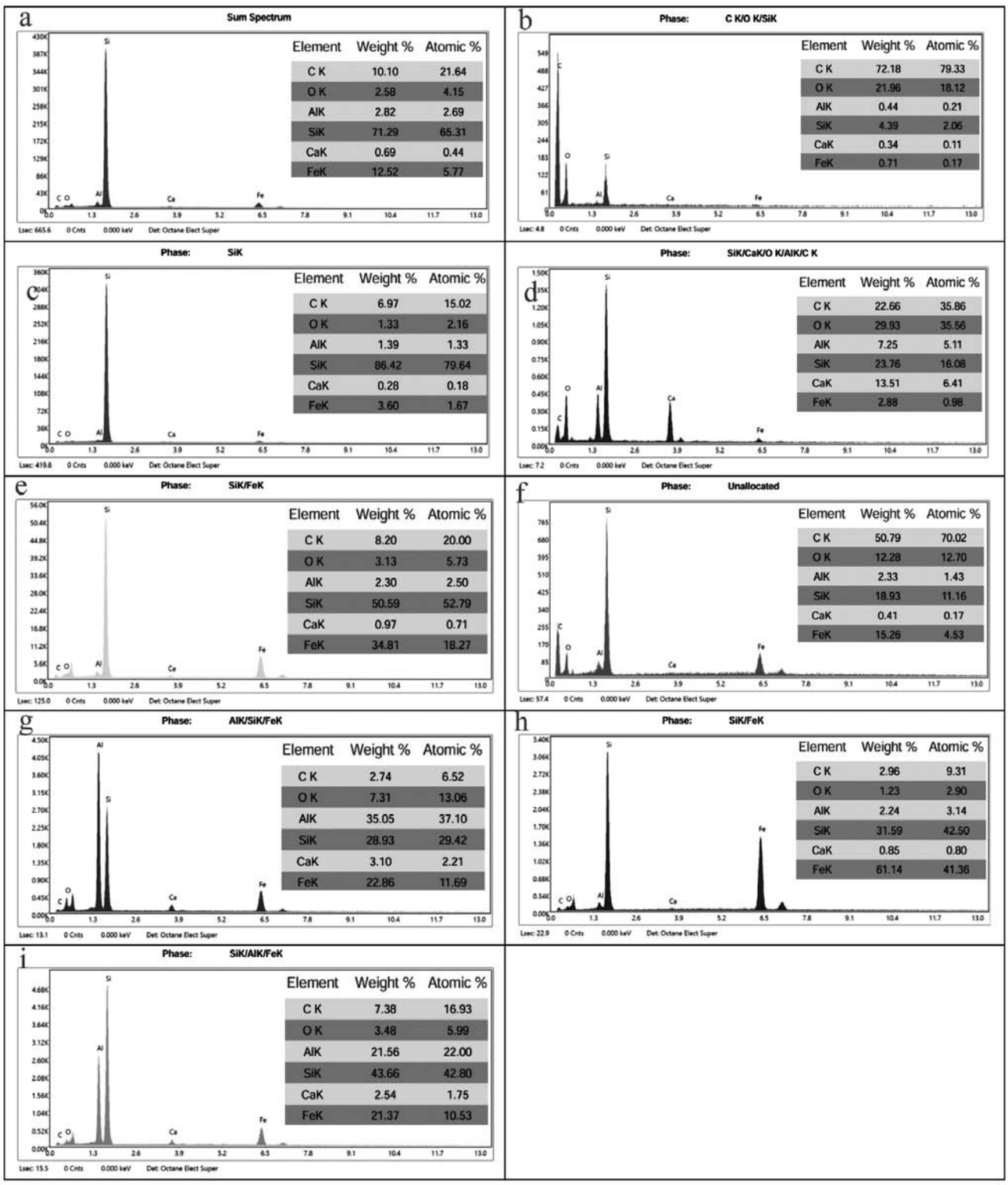


图7　待检孕育剂粉相扫描结果

Fig. 7 Phase map scanning results of the inoculant powders waiting for inspection



（a）所有相综合能谱结果；（b）C/O/Si相；（c）Si相；（d）Si/Ca/O/Al/C相；（e）Si/Fe相；（f）未划分相；（g）Al/Si/Fe相；（h）Si/Fe相；（i）Si/Al/Fe相

图8 待检孕育剂不同相的能谱检测

Fig. 8 EDX analysis of different phases

4 结论

（1）检测同一批次制备的孕育剂盲样，5家检测机构检测出来的Al和Ca含量差异很大。即使在两家具备资质的第三方检测机构，检测出来的Al和Ca结果差异幅度也分别达到了16.8%和36.84%。带来这些差异的因素包括设备的不同，检测方法的不同。是否将Fe元素当做基体合金，做Fe元素的基体匹配，是否摒弃有干扰峰的特征谱线，选用合适孕育剂元素的特征谱线，这些都会直接带来检测结果的影响。同时，由于孕育剂中的Si/O，Al/O，Si等颗粒不会被溶解，使用ICP发射光谱仪检测时不会检测到这些杂质元素，更有益于检测孕育剂的真实有效成分。

（2）本研究的孕育剂和硅铁合金类似，都是Si、FeSi两相组织。由于含有较高的孕育元素Al，孕育剂中Si元素在Si和FeSi双相中实际占比更高，形成的双相中，单质Si相比例也更高，FeSi相的比例就相对更少。Al、Ca元素主要存在于FeSi相中。样品制备过程中要做成细粉末，其中含FeSi相的颗粒更大，尤其是含Al元素的FeSi相。这可能是由于单质Si相更脆更易破碎，含Fe和Al金属元素的颗粒相对韧性更高，不易破碎。在筛分过程中，富集Al元素的颗粒就更容易被过滤掉，从而导致检测结果中Al、Ca含量偏低。

（3）制备的样品粉末中，相的分布不均匀，偏析严重，本身就会带来检测的不确定性和差异。此外，由于Al含量不同的相，在使用ICP发射光谱仪检测时，溶样顺序选择和试剂的选择，是否会影响检测结果，值得进一步研究。

（4）期望有更多关于铸造孕育剂检测的研究，包括对不同基体和不同元素的研究，例如孕育剂中的B、Ti、H和N元素，这些都是对铸件不同性能有关键影响的元素，还包括对不同研究方法的研究。期望在国标检测方法中，研究出更精确同时又更高效快捷符合工业生产应用的方法。

参考文献：

[1] 中国铸造协会. 2023 年中国铸造行业数据发布 [R]. 上海：第二十届中国铸造协会年会，2024-07-02.

[2] 上海铸米科技有限公司. 一种铸铁用孕育剂及该孕育剂的制备方法：ZL 202210601925.6 [P]. 2025-03-25.

[3] 中国国家标准化管理委员会. 铁合金产品粒度的取样和检测方法：GB/T 13247—2019 [S]. 北京：中国标准出版社，2019.

[4] 中国国家标准化管理委员会. 硅铁 硅、锰、铝、钙、铬和铁含量的测定 波长色散X射线荧光光谱法：GB/T 4333.5—2016 [S]. 北京：中国标准出版社，2016.

[5] 中国国家标准化管理委员会. 硅铁 铝、钙、锰、铬、钛、铜、磷和镍含量的测定 电感耦合等离子体原子发射光谱法：GB/T 24194—2009 [S]. 北京：中国标准出版社，2009.

[6] 中国国家标准化管理委员会. 工业硅化学分析方法 第4部分：杂质元素含量的测定 电感耦合等离子体原子发射光谱法：GB/T 14849.4—2014 [S]. 北京：中国标准出版社，2014.

[7] 中国国家标准化管理委员会. 稀土硅铁合金及镁硅铁合金 化学分析方法 第2部分：钙、镁、锰量的测定 电感耦合等离子体原子发射光谱法：GB/T 16477.2—2010 [S]. 北京：中国标准出版社，2010.

[8] 杨淑贤. 快速溶解法在测定硅铁及其合金元素中的应用 [J]. 化学分析计量，2011，20（增刊）：87–89.

[9] 郭英英，焦凤菊. 硅钡孕育剂中硅钙钡铝的测定 [J]. 铸造技术，2014，35（12）：3066–3068.

[10] 聂艳莉. 电感藕合等离子体发射光谱法（ICP）测定工业硅中铁铝钙等微量元素方法研究 [J]. 企业技术开发，2012，32（3）：177–178.

[11] 宋武元. 电感耦合等离子体原子发射光谱同时测定金属硅中微量和痕量杂质元素 [J]. 检验检疫科学，2004，14（3）：58–60.

[12] 亢德华. 电感耦合等离子体质谱法测定硅铁和硅锰合金中痕量硼 [J]. 理化检验，2011，47（7）：837–838.

[13] 杨海娇. 电感耦合等离子体原子发射光谱法（ICP-AES）测定高效复合孕育剂中铝、钙、钡 [J]. 中国无机分析化学，2015，6（3）：77–79.

[14] 程慧清. ICP-AES法在分析长效孕育剂化学成分中的应用 [J]. 现代铸铁，2015（2）：79–81.

[15] 吴增升. ICP–AES 法测定稀土硅铁球化剂和孕育剂中 钙、镁、铝、锰、镧、铈 [J]. 化学分析计量，2014，23（6）：68–70.

[16] 张穗忠. ICP-AES法测定硅铁中的多元素含量 [J]. 武钢技术，2016，54（6）：15–19.
[17] 霍红英. ICP-OES测定硅铁中铝、钙、锰、铬、钛、铜、磷和镍测量不确定度简化评定 [J]. 攀枝花学院学报，2016，33（5）：4–6.
[18] 聂富强. X射线荧光光谱分析铁合金样品的制备方法进展 [J]. 化学工程与装备，2010（11）：132–134.
[19] 杨振华. X射线荧光光谱分析法测定工业硅中钙、铁、铝的研讨 [J]. 现代测量与实验室管理，2013（2）：10–11.
[20] 胡桂花. X射线荧光光谱法测定硅铁中硅铝钙 [J]. 理化检验，2009，45（10）：1239，1244.
[21] 谢刚. 工业硅及硅铁生产 [M]. 北京：冶金工业出版社，2016.

Detection Error Analysis of Al and Ca Elements in Cast Iron Inoculant

LIU Xu[1, 4], ZHAO Yi-feng[2], YAN Xue-hua[3], WU Bing-huan[1]
(1. Shanghai Zhumi Technology Co., Ltd., Shanghai 201210, China; 2.Ningbo Rixing Casting Co., Ltd., Ningbo 315113, Zhejiang, China; 3.SAIC General Wuling Automobile Co., Ltd., Liuzhou 545007, Guangxi, China; 4.School of Materials Science and Engineering, Shanghai University, Shanghai 200444, China)

Abstract:
There are large differences in the detection of Al and Ca elements in cast iron inoculants. The factors that bring about these differences include not only the differences in equipment and detection methods, but also whether the Fe element is used as the matrix alloy, and the selection of the characteristic lines of the appropriate elements. At the same time, because the Si/O, Al/O, Si and other particles in the inoculant will not be dissolved and be filtered out, these impurity elements will not be detected by ICP emission spectrometer, which is more beneficial to the detection of the real and effective components of the inoculant. Cast iron inoculants are similar to ferrosilicon alloys, both of them are Si and FeSi two-phase structures, and the proportion of FeSi phase is relatively more less. It is found through detection that the Al and Ca elements mainly exist in FeSi phase. In the process of sample preparation, fine powder should be made, due to the particles containing FeSi phase are larger, especially the FeSi phase containing Al element, so, during the screening process, the particles enriched with Al and Ca elements are more easily filtered out, resulting in a low Al and Ca contents in the test results.

Key words:
cast iron inoculant; Al and Ca element detection; Al element segregation; ICP analysis; XRF analysis

（编辑：潘继勇，pjy@foundryworld.com）