



任士远, 王云凤, 高春英, 等. 高氯酸辅助溶样-重铬酸钾滴定法测定含碳铁矿石中全铁[J]. 岩矿测试, 2025, 44(3): 488–493. DOI: [10.15898/j.ykcs.202412030250](https://doi.org/10.15898/j.ykcs.202412030250).

REN Shiyuan, WANG Yunfeng, GAO Chunying, et al. Determination of Total Iron in Carbon-Containing Iron Ore by Perchloric Acid-Assisted Digestion and Potassium Dichromate Titration[J]. Rock and Mineral Analysis, 2025, 44(3): 488–493. DOI: [10.15898/j.ykcs.202412030250](https://doi.org/10.15898/j.ykcs.202412030250).

## 高氯酸辅助溶样-重铬酸钾滴定法测定含碳铁矿石中全铁

任士远<sup>1</sup>, 王云凤<sup>2</sup>, 高春英<sup>1</sup>, 王楠<sup>1</sup>, 王琳<sup>1</sup>, 董再蒸<sup>3</sup>

(1. 东北大学分析测试中心, 辽宁 沈阳 110819;

2. 中国科学院金属研究所沈阳材料科学国家研究中心, 辽宁 沈阳 110016;

3. 东北大学资源与土木工程学院矿物工程系, 辽宁 沈阳 110819)

**摘要:** 快速、准确地测定铁矿石中的全铁含量, 对于选矿研究和提升炼铁效率至关重要。铁矿石在炼铁前需经过选矿处理, 采用磁选技术通常使用固态还原剂, 如烟煤、褐煤等高碳物质。铁矿石试样中的高碳成分在溶解试样过程中难以完全去除, 导致溶液浑浊甚至呈现深黑色, 当采用  $\text{SnCl}_2$ 、 $\text{TiCl}_3$  还原和重铬酸钾滴定法测定含固态还原剂铁矿石中的全铁时, 无法直接进行测定。尽管可以通过先焙烧除碳再分析的传统方法测定全铁含量, 但该方法误差大、分析周期长 (2~4h)、能耗高。本文提出了在硫磷混合酸溶解试样过程中滴加高氯酸, 去除试样中的碳, 通过条件实验, 确定了除碳最佳条件为在硫酸烟刚离开液面时滴加高氯酸。采用本方法测定由铁矿石标样和烟煤标样按不同比例配制的样品, 全铁测定结果的相对标准偏差 (RSD) 为 0.07%~0.43%, 相对误差为 0.10%~0.28%。对于固态还原剂为褐煤、焦炭、无烟煤、石墨分别与铁矿石标样按 1:1 配制的样品, 本方法有良好的除碳效果, RSD 为 0.25%~0.33%, 相对误差为 0.04%~0.19%。采用本方法和传统方法测定不同含碳量的实际样品, RSD 分别为 0.08%~0.40% 和 0.14%~0.68%, 单个样品分析时间分别为 30min 和 2~4h。与传统的焙烧法相比, 本方法省去了焙烧试样除碳的步骤, 降低了分析误差, 并以简便的操作流程提升了工作效率, 降低了能耗。

**关键词:** 重铬酸钾滴定法; 铁矿石; 除碳; 高氯酸; 固态还原剂

**要点:**

(1) 含碳试样一般需焙烧除碳后再进行滴定分析, 本文采用高氯酸在溶样时除去试样中的碳, 操作简单, 效率高。

(2) 经高氯酸除碳后的溶液透明、澄清, 高氯酸的使用对全铁测试结果没有影响。

(3) 硫酸烟刚离开液面时滴加高氯酸, 除碳效果最佳。

**中图分类号:** O655.2; TF041

**文献标识码:** B

铁矿石作为钢铁工业的基石, 其品位直接关系到炼铁品质和冶炼成本。尽管中国铁矿资源总量庞大, 但其中不乏像鄂西鲕状赤铁矿这样的难选铁矿石, 其储量在中国铁矿石资源总量的占比较大<sup>[1]</sup>, 它们在传统选矿技术如重选、磁选、浮选等面前显得

尤为棘手<sup>[2-3]</sup>。为了应对这一挑战, 磁化焙烧-弱磁分选技术应运而生, 它能够根据矿石性质的不同, 灵活地采用还原焙烧、还原氧化焙烧、氧化焙烧等多种磁化焙烧方法, 有效地处理这些复杂难选的铁矿石<sup>[4-5]</sup>。在磁化焙烧过程中, 常见的还原剂既有固

收稿日期: 2024-12-03; 修回日期: 2025-01-20; 接受日期: 2025-01-29; 网络出版日期: 2025-03-01

基金项目: 辽宁省科技计划联合基金项目 (2023-MSBA-118); 中央高校基本科研业务费项目 (N2230003)

作者简介: 任士远, 硕士, 实验师, 主要从事化学分析及光谱分析工作。E-mail: [83862651@qq.com](mailto:83862651@qq.com)。

态的褐煤、烟煤、焦炭等,也有气态的 $\text{CO}$ 、 $\text{H}_2$ 等<sup>[5]</sup>。固态还原剂法由于铁的金属化率更高、脱硫效果更好而被广泛应用<sup>[6]</sup>。然而,这些固态还原剂的使用,不可避免地会在试样中引入高碳成分。

目前,全铁含量的测定方法包括重铬酸钾滴定法<sup>[7]</sup>、EDTA滴定法(GB/T 6730.73—2016)、硫代硫酸钠滴定法(YS/T 1047.3—2015)、原子吸收光谱法(AAS)<sup>[8]</sup>、电感耦合等离子体发射光谱法(ICP-OES)<sup>[9]</sup>等。AAS法和ICP-OES法适合低含量铁的测定,铁矿石中的全铁含量较高,一般采用滴定法。滴定法中,三氯化钛还原-重铬酸钾滴定法因其成本低、分析速度快且测定结果准确而备受青睐。张霞等<sup>[10]</sup>采用酸溶-氢氧化钠沉淀分离法或过氧化钠碱熔法处理钼铁,实现了钼与铁的分离,用氨水沉淀法去除镍或铜的干扰,建立了重铬酸钾滴定测定钼铁中全铁的方法。苗晓焕<sup>[11]</sup>采用氟化物-盐酸-硝酸-高氯酸-硫酸溶解试样,氢溴酸除去砷、锑的干扰,氨水沉淀分离铜、镍等杂质元素,建立了重铬酸钾滴定测定烟尘中全铁的方法。而固态碳对重铬酸钾滴定法测定全铁的影响有待开展研究。

由于铁矿石试样中的高碳成分在溶解试样的过程中难以完全去除,溶液浑浊甚至呈现深黑色,会严重干扰 $\text{SnCl}_2$ 、 $\text{TiCl}_3$ 还原和重铬酸钾滴定时的颜色判读,从而影响全铁含量测定结果的准确性<sup>[12]</sup>。采用先焙烧除碳再滴定的传统分析方法不仅增加了工作量,还可能引入新的误差,增大了结果的不确定度。本文以重铬酸钾滴定法为基础,在硫磷混合酸溶解过程中滴加高氯酸除去试样中的碳,对高氯酸的滴加时机进行了探讨。采用本方法测试了固态还原剂为烟煤、褐煤、焦炭、无烟煤、石墨的样品除碳效果,并采用本方法与传统方法分析实际样品,通过对比验证了方法的准确性和可靠性。

## 1 实验部分

### 1.1 仪器和主要试剂

电热板为TD345型(天津拓至明实验仪器设备有限公司),设定功率为2.14kW,对应温度为470℃;分析天平为BSA124S-CW型(德国赛多利斯公司)。

硫磷混合酸(体积比1:1);氯化亚锡溶液(150g/L):称取15g氯化亚锡( $\text{SnCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ )溶于30mL盐酸中,用水稀释至100mL;钨酸钠溶液(250g/L):称取25g钨酸钠溶于适量水中,加5mL磷酸,用水稀释至100mL;三氯化钛溶液(6.67%):取2mL三氯化钛溶液用盐酸(1:5)稀释至30mL;

二苯胺磺酸钠指示剂(5g/L);重铬酸钾标准溶液:称取3.5119g预先在150℃烘干1h的重铬酸钾基准于250mL烧杯中,用水溶解并移入2000mL容量瓶中,用水定容,此溶液的滴定度为0.002000g/mL;盐酸、硫酸、磷酸、高氯酸均为分析纯;实验用水为二次过滤蒸馏水。

实验所选用的铁矿石标样为:GSB H 30004-97(钢铁研究总院和鄂城钢铁厂),其中全铁含量为52.20%(标准偏差为0.05%)。实验所使用的还原剂烟煤标样为GBW11101(山东省冶金科学研究院),灰分含量为10.54%,挥发份为19.68%,碳为79.50%,全铁(TFe)为0.35%,其中TFe含量由AAS法测得;无烟煤为ZBM116(济南众标科技有限公司研制);焦炭为GBW(E)110012(济南高新开发区泉东标准物质研究所研制);石墨灰为GSB06-3220—2014(济南众标科技有限公司);褐煤为内蒙古胜利褐煤:按《煤炭、褐煤和煤粉性能测定规程》(GB/T 474—2008)中规定的方法研磨成粉末。

### 1.2 实验方法

样品测试:①称取0.1g试样(精确到0.0001g)于300mL锥形瓶中,加2mL水润湿,加10mL硫磷混合酸(1:1),置于电热板上高温分解试样。硫酸烟刚离开液面时滴加5滴高氯酸去除试样中的碳,摇晃锥形瓶2~3次。如溶液仍呈黑灰色或灰色,待浓高氯酸烟消失,再补加5滴高氯酸,可重复补加高氯酸至溶液澄清。②待硫酸烟离开液面5~6cm,取下,冷却,用少量水冲洗瓶壁,加入10mL浓盐酸,放在电热板上稍热,滴加 $\text{SnCl}_2$ 还原至淡黄色。③加入90mL水、1mL钨酸钠溶液,滴加 $\text{TiCl}_3$ 还原至溶液呈蓝色,待蓝色褪去,加5滴二苯胺磺酸钠指示剂。用重铬酸钾标准溶液滴定至溶液变紫色为终点,根据重铬酸钾标准溶液的消耗量计算出全铁的含量。

空白试验:随同试样进行空白试验,采用与试样分析相同步骤。但不滴加 $\text{SnCl}_2$ 溶液还原,并在加二苯胺磺酸钠指示剂溶液之前,加5mL硫酸亚铁铵溶液,用重铬酸钾标准溶液滴定至终点,再加5mL硫酸亚铁铵溶液,再以重铬酸钾标准溶液滴定至终点,前后滴定消耗重铬酸钾标准溶液体积之差即为空白值( $V_0$ )。

$$w(\text{TFe}) = T \times (V_1 - V_0) / m \times 100\%$$

式中: $w(\text{TFe})$ —全铁的质量分数(%); $T$ —重铬酸钾标准溶液对铁的滴定度(g/mL); $V_1$ —滴定试样溶液消耗重铬酸钾标准溶液的体积(mL); $V_0$ —滴定试样

空白溶液消耗重铬酸钾标准溶液的体积 (mL);  
 $m$ —试样的质量 (g)。

2 结果与讨论

2.1 高氯酸滴加时间的选择

实验发现, 高氯酸的滴加时机对除碳效果有很大的影响。称取 0.05g 烟煤标样 (GBW11101)4 份, 分别为试样 a、b、c、d 置于 4 支 300mL 锥形瓶中, 加入 10mL 硫磷混合酸, 置于电热板上加热, 4 份试样分别在 0min(即刚放到电热板时), 加热 5min、10min 时(在硫酸烟即将离开液面时) 加入高氯酸及不滴加高氯酸。如图 1 所示, 可以发现试样 a、b 的溶液颜色都较深, 虽然这些溶液仍可用于后续的分析, 但颜色过深可能会影响测试结果的准确度。相比之下, 试样 c 的溶液则呈现出清澈透明的状态, 这表明其除碳效果良好。而未经高氯酸除碳处理的试样 d 在硫磷混合酸溶解过程中的情况如图 1d 所示, 该溶液的颜色漆黑, 无法在接下来的还原和滴定过程中通过颜色判断反应进程, 因此已经不能继续用于滴定分析。实验结果表明, 在适当的时间点(硫酸烟刚刚离开液面时) 向锥形瓶中滴加高氯酸, 能更有效地去除试样中的碳, 从而可以提高后续还原滴定分析的准确性和可靠性。

2.2 方法精密度和准确度

含碳试样由铁矿石标样 (GSB H 30004-97) 和烟煤标样 (GBW11101) 配制而成。试样质量配比列于表 1。

由 2.1 节可知, 硫酸烟刚离开液面时滴加高氯酸除碳效果最好, 对表 1 中的 4 个试样分别独立测定 6 次, 4 组试样的测定结果如表 2 所示。试样 1(即标样)测定全铁的含量为 52.15% 与标样标定值 52.20% 极为接近, 这一结果证明了滴加高氯酸对分析结果无显著不利影响。4 个试样全铁含量测定结果的相对标准偏差 (RSD) 分别为 0.08%、0.07%、0.16%、0.43%, 皆小于 GB/T 27417 规定的不大于

2.0% 的要求, 由此判断方法的精密度满足要求。试样测定值的相对误差分别为 0.10%、0.10%、0.23%、0.28% 都比较小, 所以, 在试样溶解过程中滴加滴高氯酸除碳, 完全可以满足选矿试验对测试结果的要求。

2.3 其他固态还原剂的全铁测定

在评估不同固态还原剂对铁矿石中全铁含量测定的影响时, 选择了褐煤、焦炭、无烟煤和石墨作为

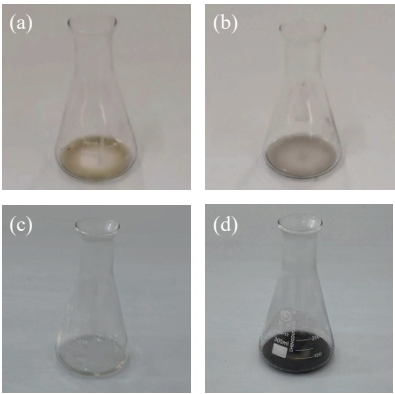


图1 试样溶解后的溶液: (a) 置于电热板后立刻滴加高氯酸; (b) 加热 5min 后滴加高氯酸; (c) 硫酸烟即将离开液面时滴加高氯酸; (d) 不滴加高氯酸

Fig. 1 Solution after sample dissolution: (a) Drip perchloric acid after placing sample on the electric heating plate; (b) Drip perchloric acid after heating for 5min; (c) Drip perchloric acid as soon as the sulfuric acid smoke leaves the liquid surface; (d) No perchloric acid addition.

表 1 试样质量配比

Table 1 The mass ratio of samples.

| 样品编号 | 质量配比 (铁矿-煤) |
|------|-------------|
| 试样 1 | 1 : 0       |
| 试样 2 | 4 : 1       |
| 试样 3 | 1 : 1       |
| 试样 4 | 1 : 4       |

表 2 不同质量配比烟煤存在下铁矿石全铁含量测试结果

Table 2 Analytical results of total iron content in iron ore in the presence of bituminous coal with different mass ratios.

| 样品编号 | TFe 含量计算值 (%) | TFe 含量 6 次测定值 (%) |       |       |       |       |       | TFe 含量平均值 (%) | RSD (%) | 相对误差 (%) |
|------|---------------|-------------------|-------|-------|-------|-------|-------|---------------|---------|----------|
| 试样 1 | 52.20         | 52.15             | 52.18 | 52.10 | 52.11 | 52.20 | 52.15 | 52.15         | 0.08    | 0.10     |
| 试样 2 | 41.83         | 41.82             | 41.80 | 41.75 | 41.78 | 41.77 | 41.75 | 41.79         | 0.07    | 0.10     |
| 试样 3 | 26.28         | 26.20             | 26.22 | 26.18 | 26.24 | 26.28 | 26.17 | 26.22         | 0.16    | 0.23     |
| 试样 4 | 10.72         | 10.67             | 10.73 | 10.75 | 10.62 | 10.69 | 10.68 | 10.69         | 0.43    | 0.28     |



测试对象,全铁含量分别为 0.48%、0.64%、0.42%、0.18%,由 AAS 法测得。这些固态还原剂与铁矿石标样按照 1 : 1 的质量比进行混合,形成混合铁矿石试样,并按质量比计算混合铁矿石中全铁含量,以最佳除碳条件处理试样。测定结果列于表 3,褐煤、焦炭、无烟煤和石墨试样测定值的相对误差分别为 0.19%、0.08%、0.19% 和 0.04%,且 RSD 分别为 0.27%、0.27%、0.33% 和 0.25%,均满足选矿试验对测试结果的要求。这一结果表明,该除碳方法对于褐煤、焦炭、无烟煤和石墨等固态还原剂均展现出良好的除碳效果。

2.4 不同测定方法对比分析

采用本方法和传统方法 (在马弗炉 1000℃ 焙烧 2 ~ 4h 除碳后再滴定分析) 对湖北官店地区的高磷鲕状赤铁矿石配入适量的烟煤标样 GBW11101 进行方法对照实验,样品编号为 S1、S2、S3、S4、S5,分别独立测定 6 次,测定结果列于表 4。相较于传统的焙烧除碳技术,该方法在多个关键指标上均表现出一定优势。在精密度方面,高氯酸除碳的 RSD 值低于 0.40%,优于传统方法的 0.68%,显示出更高的准确性和可靠性。在效率上,单个样品的分析时间仅需 30min,少于传统方法所需的 2 ~ 4h<sup>[13]</sup>,提高了工作效率。而且,该方法的能耗更低,同时检测人员的工作量也相对较少,仅需多一步滴加高氯酸的操作,

而传统方法则涉及多次称量和计算,以及再次研磨试样的繁琐步骤。此外,高氯酸除碳方法不需要额外增加检测设备,而传统方法需要马弗炉和坩埚等专用设备。这些优势使得高氯酸除碳方法可以作为一种更高效、便捷、节能的除碳选择。

3 结论

基于 SnCl<sub>2</sub>、TiCl<sub>3</sub> 还原和重铬酸钾滴定法,建立了快速测定含固态还原剂铁矿石中全铁的方法,该方法在前处理过程中通过滴加高氯酸可以有效地去除试样中的碳。除碳最佳条件为硫酸烟刚离开液面时滴加高氯酸。采用本方法和传统方法测定不同含碳量试样,相对标准偏差 (RSD) 分别为 0.08% ~ 0.40% 和 0.14% ~ 0.68%。相较于传统的焙烧方法,本方法不仅操作简便、能耗低,而且在准确性与稳定性方面均展现出优势。

本方法解决了含碳铁矿石不能直接用滴定法测定全铁的问题,省去了焙烧试样除碳的步骤,对于固态还原剂为烟煤、褐煤、焦炭、无烟煤、石墨等均有良好的除碳效果。由于高氯酸沸点较高,所以溶解样品时用硫磷混合酸溶解除碳效果较好,而用盐酸溶解除碳效果不佳。此外,本方法也可对其他测试前处理过程中去除试样中的碳 (或其他有机物) 提供有价值的参考。

表 3 不同质量配比固态碳存在下铁矿石全铁含量测试结果

Table 3 Analytical results of total iron content in iron ore in the presence of solid reductant with different mass ratios.

| 样品名称            | TFe 含量计算值 (%) | TFe 含量 6 次测定值 (%) |       |       |       |       |       | TFe 含量测定平均值 (%) | RSD (%) | 相对误差 (%) |
|-----------------|---------------|-------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-----------------|---------|----------|
| 铁矿石-褐煤 (1 : 1)  | 26.34         | 26.30             | 26.39 | 26.33 | 26.19 | 26.22 | 26.29 | 26.29           | 0.27    | 0.19     |
| 铁矿石-焦炭 (1 : 1)  | 26.42         | 26.35             | 26.37 | 26.42 | 26.48 | 26.29 | 26.46 | 26.40           | 0.27    | 0.08     |
| 铁矿石-无烟煤 (1 : 1) | 26.31         | 26.42             | 26.16 | 26.33 | 26.46 | 26.28 | 26.18 | 26.26           | 0.33    | 0.19     |
| 铁矿石-石墨 (1 : 1)  | 26.19         | 26.18             | 26.29 | 26.10 | 26.19 | 26.25 | 26.17 | 26.20           | 0.25    | 0.04     |

表 4 不同方法测定全铁含量结果对比

Table 4 Comparison of analytical results of total iron content determined by different methods.

| 样品编号 | 本方法测定 TFe 含量 |       |       |       |       |       |         |         | 传统焙烧法测定 TFe 含量 |       |       |       |       |       |         |         |
|------|--------------|-------|-------|-------|-------|-------|---------|---------|----------------|-------|-------|-------|-------|-------|---------|---------|
|      | 6 次测定值 (%)   |       |       |       |       |       | 平均值 (%) | RSD (%) | 6 次测定值 (%)     |       |       |       |       |       | 平均值 (%) | RSD (%) |
| S1   | 31.22        | 31.28 | 31.19 | 31.29 | 31.17 | 31.24 | 31.23   | 0.15    | 31.29          | 31.17 | 31.10 | 31.31 | 31.14 | 31.18 | 31.20   | 0.26    |
| S2   | 40.65        | 40.60 | 40.67 | 40.58 | 40.62 | 40.64 | 40.63   | 0.08    | 40.69          | 40.60 | 40.74 | 40.71 | 40.60 | 40.68 | 40.67   | 0.14    |
| S3   | 25.53        | 25.49 | 25.40 | 25.44 | 25.47 | 25.52 | 25.48   | 0.19    | 25.59          | 25.45 | 25.42 | 25.48 | 25.58 | 25.57 | 25.52   | 0.29    |
| S4   | 20.26        | 20.31 | 20.34 | 20.28 | 20.37 | 20.30 | 20.31   | 0.20    | 20.20          | 20.31 | 20.14 | 20.20 | 20.35 | 20.27 | 20.25   | 0.39    |
| S5   | 11.13        | 11.18 | 11.16 | 11.23 | 11.20 | 11.11 | 11.17   | 0.40    | 11.10          | 11.22 | 11.19 | 11.29 | 11.20 | 11.09 | 11.18   | 0.68    |

# Determination of Total Iron in Carbon-Containing Iron Ore by Perchloric Acid-Assisted Digestion and Potassium Dichromate Titration

REN Shiyuan<sup>1</sup>, WANG Yunfeng<sup>2</sup>, GAO Chunying<sup>1</sup>, WANG Nan<sup>1</sup>, WANG Lin<sup>1</sup>,  
DONG Zaizheng<sup>3</sup>

(1. Analysis and Testing Center, Northeastern University, Shenyang 110819, China;

2. Shenyang National Laboratory for Materials Science, Institute of Metal Research, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China;

3. Department of Mineral Engineering, School of Resources & Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China)

## HIGHLIGHTS

- (1) Carbon containing samples generally require roasting to remove carbon before titration analysis. Perchloric acid was used to remove carbon from the sample during dissolution, which was simple to operate and highly efficient.
- (2) The solution after carbon removal with perchloric acid was transparent and clear, and the use of perchloric acid had no effect on the test results.
- (3) Perchloric acid needs to be added as soon as the sulfuric acid smoke leaves the surface of the liquid, to achieve the optimal condition for carbon removal.

**ABSTRACT:** Rapid and accurate determination of total iron content in iron ore is crucial for mineral processing research and improving iron-making efficiency. Iron ore needs to undergo beneficiation treatment before iron-making. Solid reducing agents, such as coal and brown coal, are commonly used in magnetic separation technology. However, the high carbon component in iron ore samples is difficult to completely remove during the dissolution process, resulting in cloudy or even black solutions. When  $\text{SnCl}_2$ ,  $\text{TiCl}_3$  reduction and potassium dichromate titration are used to determine total iron in iron ore containing solid reducing agents, direct determination of total iron becomes impossible. Although the traditional method of roasting to remove carbon before analysis can be used to determine the total iron content in iron ore, this method has large errors, a long analysis cycle (2–4h), and high energy consumption. A method is proposed here for removing carbon from the sample by adding perchloric acid during the dissolution process of sulfur phosphorus mixed acid, which has achieved good results. Through conditional experiments, the optimal condition for carbon removal was determined to be the drop-wise addition of perchloric acid when sulfuric acid smoke just left the liquid surface. This method was used to determine samples prepared from iron ore standard samples and bituminous coal standard samples in different proportions, with relative standard deviation (RSD) of 0.07%–0.43%, and relative error of 0.10%–0.28%. For samples prepared with solid reducing agents of lignite, coke, anthracite, and graphite in a 1 : 1 ratio with iron ore standard samples, this method had good decarbonization effects, with RSD of 0.25%–0.33%, and relative error of 0.04%–0.19%. Using this method and the traditional method to determine actual samples with different carbon contents, the RSD ranged from 0.08%–0.40% and 0.14%–0.68%, respectively, and the analysis times for a single sample were 30min and 2–4h, respectively. Compared with the traditional roasting method, this method eliminates the step of removing carbon from roasted samples. It reduces the error of analysis results, improves work efficiency and reduces energy consumption with its simple operation process.

**KEY WORDS:** potassium dichromate titration; iron ore; removing carbon; perchloric acid; solid reducing agents

## 参考文献

- [1] 杨双平, 刘雅辰, 王苗, 等. 高磷鲕状赤铁矿气基还原及脱磷剂对除磷效果影响[J]. *钢铁*, 2024, 59(4): 25–33.  
Yang S P, Liu Y C, Wang M, et al. Effect of gas-based reduction of high-phosphorus oolitic hematite and dephosphorization agent on phosphorus removal effect[J]. *Iron & Steel*, 2024, 59(4): 25–33.
- [2] 白春霞, 李宏静. 高磷鲕状赤铁矿脱磷选矿工艺现状分析[J]. *现代矿业*, 2021, 37(1): 117–119, 125.  
Bai C X, Li H J. Research status analysis of dephosphorization mineral processing of high phosphorus oolitic hematite[J]. *Modern Mining*, 2021, 37(1): 117–119, 125.
- [3] 杨双平, 刘海金, 王苗, 等. 高磷鲕状赤铁矿磷的存在形态及脱磷机理[J]. *钢铁*, 2021, 56(10): 65–73, 90.  
Yang S P, Liu H J, Wang M, et al. Existing forms of phosphorus in high phosphorus oolitic hematite and its dephosphorization mechanism[J]. *Iron & Steel*, 2021, 56(10): 65–73, 90.
- [4] 连宵宵, 孙体昌, 寇珏, 等. 高磷鲕状赤铁矿还原焙烧中脱磷剂  $\text{CaCO}_3$  作用影响因素研究[J]. *金属矿山*, 2023(3): 120–126.  
Lian X X, Sun T C, Guan J, et al. Study on influencing factors of dephosphorization agent  $\text{CaCO}_3$  in reduction roasting of high phosphorus oolitic hematite[J]. *Metal Mine*, 2023(3): 120–126.
- [5] 王普蓉, 徐国印. 云南某低品位难选鲕状赤铁矿选矿工艺研究[J]. *矿业研究与开发*, 2023, 43(6): 197–201.  
Wang P R, Xu G Y. Study on beneficiation process of a low-grade refractory oolitic hematite ore in Yunnan[J]. *Mining Research and Development*, 2023, 43(6): 197–201.
- [6] 吴德印, 赵连达, 王广, 等. 高磷铁矿处理工艺研究[J]. *冶金能源*, 2022, 41(6): 24–28, 61.  
Wu D Y, Zhao B D, Wang G, et al. Study on treatment technology of high-phosphorus iron ore[J]. *Energy for Metallurgical Industry*, 2022, 41(6): 24–28, 61.
- [7] 邓文芳, 李海, 马铭, 等. 重铬酸钾法测定全铁含量的实验改进[J]. *化学教育*, 2023, 44(22): 52–56.  
Deng W F, Li H, Ma M, et al. Experimental improvement on determination of total iron content by potassium dichromate method[J]. *Chinese Journal of Chemical Education*, 2023, 44(22): 52–56.
- [8] 张随安, 杨中瑞, 段玉宇, 等. 火焰原子吸收光谱法测定土壤中游离铁含量[J]. *岩矿测试*, 2024, 43(4): 614–621.  
Zhang S A, Yang Z R, Duan Y Y, et al. Free iron determination in soil by flame atomic absorption spectrometry[J]. *Rock and Mineral Analysis*, 2024, 43(4): 614–621.
- [9] 窦向丽, 张旺强, 黑文龙, 等. 敞开酸溶-电感耦合等离子体发射光谱法测定石煤钒矿中钒铁铝磷[J]. *岩矿测试*, 2022, 41(4): 673–679.  
Dou X L, Zhang W Q, Hei W L, et al. Determination of vanadium, iron, aluminum and phosphorus in stone coal vanadium ore by ICP-OES with open acid dissolution[J]. *Rock and Mineral Analysis*, 2022, 41(4): 673–679.
- [10] 张霞, 马超, 李美慧, 等. 重铬酸钾滴定法测定钼铁中铁[J]. *冶金分析*, 2022, 42(9): 82–89.  
Zhang X, Ma C, Li M H, et al. Determination of iron in ferromolybdenum by potassium dichromate titration[J]. *Metallurgical Analysis*, 2022, 42(9): 82–89.
- [11] 苗晓焕. 三氯化钛还原-重铬酸钾滴定法测定铜冶炼烟尘中铁[J]. *冶金分析*, 2024, 44(6): 86–93.  
Mao X H. Determination of iron in copper smelting dust by titanium trichloride reduction-potassium dichromate titration method[J]. *Metallurgical Analysis*, 2024, 44(6): 86–93.
- [12] 施玉娟. 三氯化钛-重铬酸钾容量法测定铁精矿中全铁含量还原过程最优条件探索[J]. *化工管理*, 2020(5): 40.  
Shi Y J. Exploration of the optimal conditions for the reduction process of total iron content in iron concentrate determined by titanium trichloride potassium dichromate volumetric method[J]. *Chemical Enterprise Management*, 2020(5): 40.
- [13] 王德全, 于青. 粉末压片-X射线荧光光谱法测定高炉除尘灰中钾铅锌砷[J]. *冶金分析*, 2014, 34(9): 34–38.  
Wang D Q, Yu Q. Determination of potassium, lead, zinc and arsenic in blast furnace dust by X-ray fluorescence spectrometry with pressed powder pellet[J]. *Metallurgical Analysis*, 2014, 34(9): 34–38.