高纯锆化学分析方法

痕量杂质元素含量的测定

辉光放电质谱法

**编 制 说 明**

（征求意见稿）

国标（北京）检验认证有限公司

2021年6月

《**高纯锆化学分析方法 痕量杂质元素含量的测定 辉光放电质谱法**》

**行业标准编制说明**

一、工作简况

1、项目的必要性简述

锆作为重要的稀有金属，由于具有惊人的抗腐蚀性能，极高的熔点，超高的硬度和强度。由于锆的热中子俘获截面小，有突出的核性能，是发展原子能工业不可缺少的材料，可作反应堆芯结构材料。金属锆在化工、农药、印染等行业中可用来制造耐腐蚀的反应塔、泵、热交换器等，它还可作为炼钢过程中的脱氧、脱氮剂。目前，我国锆产业发展主要是兼顾民用锆和高纯锆的需求，建立高纯锆材的检测、评估及质保体系，为此国内相关单位已经开始着手制订高纯锆的产品标准。产品标准的建立必然涉及化学成分的检测，而针对高纯锆中痕量杂质元素的测定，辉光放电质谱表现出独特的优势。

辉光放电质谱（GDMS）具有优越的检测限和宽动态线性范围，且样品制备简单、基体效应低，近20年来得到了快速发展，是高纯金属、半导体材料痕量杂质元素分析的最有效的手段之一。目前采用辉光放电质谱法分析样品中痕量杂质已经具有成熟的经验，国内外均有GDMS分析方法标准的颁布。因此，为了配合高纯锆产业的发展，使高纯锆的检测做到有标准可依，亟需建立高纯锆（纯度≥99.99%）样品中痕量杂质元素的辉光放电质谱分析方法。

2、适用范围

本标准适用于采用辉光放电质谱法对高纯锆中痕量杂质元素含量的测定。元素测定范围为：50 µg/kg～50 mg/kg。这里的高纯锆是指纯度≥99.99%或者满足《高纯锆》标准相关规定的锆产品。

3、任务来源

根据中华人民共和国工业和信息化部2020年8月下发的工信厅科函﹝2020﹞181号《工业和信息化部2020年第二批行业标准制修订和外文版项目计划》的文件精神，行业标准《高纯锆化学分析方法 痕量杂质元素含量的测定 辉光放电质谱法》的制定工作由国合通用测试评价认证股份公司负责起草，项目计划编号为[2020-0713T-YS](http://219.239.107.155:8080/TaskBook.aspx?id=YSCPZT06832020)，计划完成年限2022年。

4、起草单位、起草人情况

国标（北京）检验认证有限公司是中国权威的第三方检验认证服务机构，隶属于北京有色金属研究总院，管理并运营着国家有色金属及电子材料分析测试中心（1983年由原国家科委批准建立）与国家有色金属质量监督检验中心（1985年由国家质量技术监督局批准建立）。中心于1992年通过计量认证(CMA)，2001年通过中国合格评定国家认可委员会（CNAS）认可，是我国金属及电子材料的权威检测机构，同时是我国有色金属行业分析测试标准的主要起草单位之一。

公司拥有一支基础理论扎实、实践经验丰富的研究和服务队伍，其中教授级高工15名，高级工程师39名，工程师26名。建立了以分析化学、材料力学与表面性能、显微组织结构、无损检测为核心的分析测试服务平台，具备了对产品开展多参数、多尺度、高精度、全成分范围检验评价的能力。拥有辉光放电质谱仪、电感耦合等离子体质谱仪、电感耦合等离子体光谱仪、原子吸收光谱仪、原子荧光光谱仪、超高压电子显微镜、大景深激光共聚焦显微镜、波长色散X射线荧光光谱仪等国内外先进仪器，仪器设备在国内实验室处于领先水平。在高纯金属的检测标准制修订中本单位积累了丰富的经验，已经颁布实施的高纯铜、高纯钛、高纯钽、高纯铌等高纯金属的辉光放电质谱法均由本单位负责起草。

标准编制组主要人员墨淑敏、李爱嫦等长期从事化学分析检测工作，尤其擅长电感耦合等离子体质谱、辉光放电质谱等设备的应用及方法开发，并在日常检测中积累了丰富的锆铪检测经验，能够保证该项目计划的顺利完成。

5、主要工作过程

5.1起草阶段

2020年11月2日～4日全国有色金属标准化技术委员会在浙江省桐乡市召开有色金属标准项目任务落实会议，会上确定了标准制定的起草单位为国合通用测试评价认证股份有限公司和国标（北京）检验认证有限公司，国核锆铪理化检测有限公司、集萃新材料研发有限公司、广东先导稀材股份有限公司、昆明冶金研究院参与验证。

国合通用测试评价认证股份有限公司接受任务后，成立了《高纯锆化学分析方法 痕量杂质元素含量的测定 辉光放电质谱法》标准研究小组，负责完成辉光放电质谱法测定高纯铪样品的相关条件实验及公共样品的测定。2020年11月，通过自筹准备了3个高纯锆锭，并对3#样品中的Mg、Al、Mn、Cr、Ni、Cu、Mo、Sn、Hf等元素采用GB/T 13747.27-2020《锆及锆合金化学分析方法 第 27部分：痕量杂质元素的测定 电感耦合等离子体质谱法》 方法定值，上述元素含量范围0.50 mg/kg ～50 mg/kg可作为锆标准样品调节GDMS仪器的RSF因子。

2020年11月~12月，项目组成员进行了大量试验，对样品前处理方法、测试参数等条件进行了优化，对实验数据进行整理，完成了研究报告及讨论稿的编写。2020年1月，将样品和研究报告邮寄给验证单位进行数据的验证工作。各验证单位收到样品后非常积极的投入到相关实验流程的验证及数据测定工作中，截止2020年5月，各验证单位陆续完成标准的验证工作。

202X年XX月XX日~XX日在XXXXX召开第一次工作会议，会上对《高纯锆化学分析方法 痕量杂质元素含量的测定 辉光放电质谱法》（讨论稿）及研究报告进行了讨论。验证单位及与会专家积极提出宝贵意见，汇总各验证单位的意见，主要有以下几个方面：

1） ；

2） ；

3） ；

4） ；

XXXX会议结束之后，标准编制小组充分考虑各验证单位的意见，对讨论稿进行修改完善，形成了《高纯铪化学分析方法痕量杂质元素的测定辉光放电质谱法》（征求意见稿）。

5.2 征求意见阶段

编制组通过发函、中国有色金属标准质量信息网上公开、会议等形式对《高纯铪化学分析方法痕量杂质元素的测定辉光放电质谱法》（征求意见稿）征询意见。

202X年XX月XX日~XX日在XXXXX召开有第二次工作会议，会上对《高纯锆化学分析方法 痕量杂质元素含量的测定 辉光放电质谱法》（征求意见稿）进行意见征询。来自15家单位的近30名代表参加会议，专家提出意见主要如下：

1）按照GB/T 20001.4-2015《标准编写规则》修改方法草案的格式及条款；

2）对主要内容的编制依据在编制说明中进行阐述；

3）对数据进行处理，得出方法的相对偏差；

征求意见阶段共发送《高纯锆化学分析方法 痕量杂质元素含量的测定 辉光放电质谱法》（征求意见稿）的单位数29个，收到回函的单位数29个，回函并有建议或意见的单位数8个，详见征求意见意见汇总处理表。征求意见范围广泛且具代表性，编制组根据意见对征求意见稿进行修改完善，于2018年12月形成了《高纯锆化学分析方法 痕量杂质元素含量的测定 辉光放电质谱法》（送审稿）。

5.3 审定阶段

202X年XX月XX日~XX日在XXXXX项目审定会议。来自20多个单位的40余名专家参加了会议，会议对标准送审稿进行了审定。

会议经讨论后一致认为：本标准是我国首次制定的，标准中涉及内容全面、条款详细，在标准制定过程中认真听取了生产单位及检测单位的意见，同意将其修改后作为推荐性行业标准上报。

桐乡会议结束后，编制组根据审定会会议纪要对送审稿进行修改，对编制说明进行补充完善，形成《高纯锆化学分析方法 痕量杂质元素含量的测定 辉光放电质谱法》（报批稿）。

二、标准编制原则

本标准主要以YS/T 1239 《高纯铪》为依据进行编制。标准的起草过程中遵循以下原则：

1）规范性原：本标准是根据GB/T 1.1-2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》和GB/T 20001.4-2015《标准编写规则 第4部分：试验方法标准》的要求进行编写的；

2）先进性：本方法为首次制定，73种杂质元素全扫，且具有很低的检出限；

3）适用性：本标准能够反映当前国内生产高纯铪企业的技术水平，宜于应用，能够满足企业需求。

三、标准主要内容的确定依据

本标准为初次制定，因此在标准的起草过程中主要对以下几个方面进行了确认：

1、检测项目

本标准检测项目的确定参照了正在制定中的《高纯锆锭》（项目计划编号：2020-0047-YS）。起草中的《高纯锆锭》规定对高纯锆中Al、Ca、Cl、Co、Cr、Cu、Fe、Hf、Mg、Mn、Mo、Na、Ni、Pb、Si、Sn、Ti、V、W等20多种元素含量的检测要求。当需方对产品的化学成分有特殊要求时，可由供需方进行商定。编制组充分考虑用户需求，提高标准的适用范围，同时结合辉光放电质谱仪多元素测定的特点，标准拟对高纯锆中杂质元素全谱扫描。但是在方法的建立过程中发现，Cd、Ag、Pd、Sc等杂质元素存在严重的基体干扰，因此最终确定本方法的测定元素为63种，具体见表1。

表1 元素种类

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Li | Cl | Co | Rb | Sb | Eu | Lu | Au |
| Be | K | Ni | Sr | Te | Gd | Hf | Hg |
| B | Ca | Cu | Y | Ba | Tb | Ta | Tl |
| Na | Ti | Zn | Nb | La | Dy | W | Pb |
| Mg | V | Ga | Mo | Ce | Ho | Re | Bi |
| Al | Cr | Ge | Ru | Pr | Er | Os | Th |
| Si | Mn | As | In | Nd | Tm | Ir | U |
| P | Fe | Se | Sn | Sm | Yb | Pt |  |

2、元素测定范围

各杂质元素的测定范围主要结合当前高纯锆产品中杂质限量的要求，当前高纯锆纯度基本在99.99%，上达不到5N甚至6N，元素的测定下限50 µg/kg完全能够满足测试需求。高纯锆中铪、铁上限为0.0050%，因此本标准拟定测定上限为50 mg/kg，采用可量值溯源的锆标样可以大大提高测试的准确性。因此，确定本方法的测定范围为50 µg/kg～50 mg/kg。

3、样品前处理

锆试样经机械切割加工成片状或棒状试样，要求至少有一个用于辉光放电的光滑平面。加工成合适尺寸的块状样品后，需要对样品的表面进行清洗。分别试验了（1）硝酸、（2）盐酸、（3）王水、（4）硝酸+氢氟酸、（5）各种浓度的氢氟酸洗液进行清洗。试验结果表明，采用氢氟酸（1+19）对样品表面清洗效果最好，能够快速降低待测表面金属杂质元素的残留。因此样品前处理方法为：将试样浸入氢氟酸（1+19）中腐蚀3min～5min，然后依次用去离子水和无水乙醇清洗，取出后用氩气或氮气吹干。

4、 仪器工作参数的确定依据

仪器工作参数主要包括放电电流及氩气流量等。通过条件试验，可以找到最佳的氩气流速及合适的放电电流，既能保证有足够的灵敏度，又不会因为电流太大而导致短路。



图1 Ar流速的影响 图2 放电电流的影响

通过通过仪器厂家不同，型号不同，所需的仪器参数不尽相同，但是在测试前必须通过调节满足灵敏度和分辨率的要求。研究结果表明要想获得准确的测定结果，必须通过参数调节使90Zr的谱峰强度不小于5×109 cps，峰的对称性良好，且中分辨率达到4000，高分辨率达到10000左右。

5、 预溅射时间

实验中发现，经过酸洗的样品表面在装样等操作步骤中仍然会导致钾、钠、硅、钙等元素偏高，需要经过一定时间的预溅射，才能使采集数据趋于稳定，因此本标准对预溅射进行了规定，可根据清洗的情况选择适当电流进行5 min~10 min的预溅射。

6、 元素同位素及分辨率的确定依据

采用辉光放电质谱测定高纯锆样品，大多数元素不存在基体干扰，因此只需要在中分辨率下选择丰度高且无同量异位素干扰的质量数进行测定即可。但是有些元素受到放电气体（氩气）形成的单原子或多原子离子的干扰，如K、Ge、Se、As、Br等需要在高分辨率下测定。有些元素会受到基体Hf元素与其它元素形成的多原子离子的干扰，如180Hf1H对181Ta， 180Hf13C对193Ir的干扰，179Hf16O对195Pt，179Hf18O对197Au的干扰，因此Ta、Ir、Pt、Au需在高分辨模式下进行测定。高纯铪中Zr含量<0.3%，ZrO对Cd产生干扰，可选择114Cd在高分辨率下测定。 综上各待测元素的同位素质量数及分辨率如表1所示：

表1 测定同位素和分辨率选择

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 元 素 | 同位素  质量数 | 分辨率 | 元 素 | 同位素  质量数 | 分辨率 | 元 素 | 同位素  质量数 | 分辨率 |
| Li | 7 | 中分辨 | As | 75 | 高分辨 | Sm | 147 | 中分辨 |
| Be | 9 | 中分辨 | Se | 82 | 高分辨 | Eu | 151 | 中分辨 |
| B | 11 | 中分辨 | Br | 79 | 高分辨 | Gd | 157 | 中分辨 |
| F | 19 | 中分辨 | Rb | 85 | 中分辨 | Tb | 159 | 中分辨 |
| Na | 23 | 中分辨 | Sr | 88 | 中分辨 | Dy | 163 | 中分辨 |
| Mg | 24 | 中分辨 | Y | 89 | 中分辨 | Ho | 165 | 中分辨 |
| Al | 27 | 中分辨 | Zr | 91 | 中分辨 | Er | 166 | 中分辨 |
| Si | 28 | 中分辨 | Nb | 93 | 中分辨 | Tm | 169 | 中分辨 |
| P | 31 | 中分辨 | Mo | 95 | 中分辨 | Yb | 172 | 中分辨 |
| S | 32 | 中分辨 | Ru | 101 | 中分辨 | Lu | 175 | 中分辨 |
| Cl | 35 | 中分辨 | Rh | 103 | 中分辨 | Ta | 181 | 高分辨 |
| K | 39 | 高分辨 | Pd | 105 | 中分辨 | W | 184 | 中分辨 |
| Ca | 44 | 中分辨 | Ag | 109 | 中分辨 | Re | 185 | 中分辨 |
| Sc | 45 | 高分辨 | Cd | 114 | 高分辨 | Os | 189 | 中分辨 |
| Ti | 48 | 中分辨 | In | 115 | 中分辨 | Ir | 191 | 高分辨 |
| V | 51 | 中分辨 | Sn | 118 | 中分辨 | Pt | 198 | 高分辨 |
| Cr | 52 | 中分辨 | Sb | 121 | 中分辨 | Au | 197 | 高分辨 |
| Mn | 55 | 中分辨 | Te | 128 | 中分辨 | Hg | 202 | 中分辨 |
| Fe | 56 | 中分辨 | I | 127 | 中分辨 | Tl | 203 | 中分辨 |
| Co | 59 | 中分辨 | Cs | 133 | 中分辨 | Pb | 208 | 中分辨 |
| Ni | 60 | 中分辨 | Ba | 138 | 中分辨 | Bi | 209 | 高分辨 |
| Cu | 63 | 中分辨 | La | 139 | 中分辨 | Th | 232 | 中分辨 |
| Zn | 66 | 中分辨 | Ce | 140 | 中分辨 | U | 238 | 中分辨 |
| Ga | 71 | 高分辨 | Pr | 141 | 中分辨 | — | — | — |
| Ge | 72 | 高分辨 | Nd | 146 | 中分辨 | — | — | — |

各参与验证单位在推荐的质量数及分辨率下进行了验证，其中清远先导材料有限公司由于Zr++的干扰，导致只有一个同位素的45Sc的检出限较大，而其它验证单位未提示异常，推测这种情况应该与仪器的厂家和型号有关。为了尽可能的适用于各种型号的辉光放电质谱仪，经讨论将Sc改为高分辨下测定。

7、 精密度

本标准为73个杂质元素全扫，测定数据较多，且很多杂质元素含量极低，因此选取了不同含量范围的4个元素进行了数据分析。分别为2#样品的Ag、Si、Ti及1#样品的Si。数据分别见表2~表5。

表2 高纯铪2#样品Ag数据

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 实验室 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 平均值 | RSD/% |
| 1 | 0.0177 | 0.0463 | 0.0271 | 0.0414 | 0.0255 | 0.0192 | 0.0398 | 0.0310 | 36.8 |
| 2 | 0.0471 | 0.0157 | 0.0202 | 0.0318 | 0.0235 | 0.0266 | 0.0247 | 0.0271 | 37.5 |
| 3 | 0.0241 | 0.0187 | 0.0107 | 0.016 | 0.0174 | 0.0202 | 0.024 | 0.0187 | 25.1 |
| 4 | 0.0717 | 0.0856 | 0.0631 | 0.0481 | 0.0536 | 0.0875 | 0.0484 | 0.0654 | 25.5 |
| 5 | 0.0027 | 0.0046 | 0.0038 | 0.0029 | 0 | 0.0049 | 0 | 0.0027 | 74.5 |

表3 高纯铪2#样品Si数据

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 实验室 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 平均值 | RSD/% |
| 1 | 0.117 | 0.1433 | 0.1341 | 0.1138 | 0.1052 | 0.0929 | 0.073 | 0.1113 | 21.5 |
| 2 | 0.4240 | 0.3770 | 0.3486 | 0.5703 | 0.3815 | 0.2536 | 0.2317 | 0.3695 | 30.5 |
| 3 | 0.1472 | 0.1529 | 0.1624 | 0.1761 | 0.1359 | 0.144 | 0.1711 | 0.1557 | 9.5 |
| 4 | 0.2541 | 0.2119 | 0.2282 | 0.2221 | 0.2352 | 0.2484 | 0.2356 | 0.2336 | 6.2 |
| 5 | 0.039 | 0.038 | 0.037 | 0.043 | 0.047 | 0.041 | 0.035 | 0.0400 | 10.1 |

表4 高纯铪 1#样品Si数据

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 实验室 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 平均值 | RSD/% |
| 1 | 0.5282 | 0.5463 | 0.4979 | 0.4433 | 0.4778 | 0.449 | 0.4219 | 0.4806 | 9.6 |
| 2 | 0.6642 | 0.5331 | 0.2451 | 0.0450 | 0.8654 | 0.5281 | 0.6239 | 0.5007 | 54.7 |
| 3 | 1.082 | 1.0551 | 1.0523 | 1.0087 | 1.0978 | 1.1019 | 1.1926 | 1.0843 | 5.3 |
| 4 | 0.3541 | 0.356 | 0.4103 | 0.3572 | 0.3218 | 0.3959 | 0.3538 | 0.3642 | 8.1 |
| 5 | 0.176 | 0.161 | 0.179 | 0.19 | 0.178 | 0.185 | 0.179 | 0.1783 | 5.1 |

表5 高纯铪 2#样品Ti数据

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 实验室 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 平均值 | RSD/% |
| 1 | 2.0755 | 1.9704 | 1.8104 | 2.0269 | 2.1552 | 1.8527 | 2.0084 | 1.9856 | 6.1 |
| 2 | 2.1995 | 2.1926 | 2.2139 | 2.2658 | 2.3430 | 2.2796 | 2.1129 | 2.2296 | 3.3 |
| 3 | 5.0828 | 5.3045 | 5.732 | 6.6608 | 4.9133 | 5.3866 | 5.9291 | 5.5727 | 10.7 |
| 4 | 1.7796 | 1.7348 | 1.8008 | 1.7273 | 1.7856 | 1.7403 | 1.8043 | 1.7675 | 1.8 |
| 5 | 2.325 | 2.344 | 2.354 | 2.304 | 2.306 | 2.261 | 2.207 | 2.3001 | 2.2 |

剔除异常值后，数据汇总分析见表6。

表6 数据分析结果

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 元素 | 各试验室数据平均值Xi  /(mg/kg) | 均值的平均值  X/(mg/kg) | (Xmax-Xmin)/X  /% |
| 2#-Ag | 0.031、0.027、0.019、0.065、0.010 | 0.030 | 180.9 |
| 2#-Si | 0.112、0.156、0.233、0.040 | 0.135 | 142.7 |
| 1#-Si | 0.481、0.501、0.365、0.178 | 0.381 | 84.8 |
| 2#-Ti | 1.985、2.229、1.768、2.300 | 2.070 | 25.7 |

在数据分析的基础上，给出实验室之间分析结果允许的相对偏差，见表7。

表7 允许差

|  |  |
| --- | --- |
| 元素含量范围*w /* (µg/kg) | 相对偏差/% |
| 10～50 | 200 |
| ＞50～300 | 150 |
| ＞300～1000 | 100 |
| ＞1000～5000 | 50 |

四、标准水平分析

辉光放电质谱（GDMS）具有优越的检测限和宽动态线性范围，且样品制备简单、基体效应低，近20年来得到了快速发展，是高纯金属、半导体材料中痕量和超痕量杂质元素分析的最有效的手段之一。目前，GDMS方法已经日趋成熟，并形成相关标准，如ASTM标准系列中[ASTM F2405-04(2011)高纯铜](https://www.astm.org/Standards/F2405.htm)、[ASTM F1709-97(2016)高纯钛、[ASTM F1593-08(2016) 高纯铝的GD-MS测试方法](https://www.astm.org/Standards/F1593.htm)](https://www.astm.org/Standards/F1709.htm)等以及ISO/TS 15338:2009关于GDMS测试方法的导则。

目前，国内外尚无采用GDMS方法对高纯铪或其它铪产品中杂质元素含量进行分析的标准发布。本标准采用辉光放电质谱对高纯铪中73种杂质元素进行分析，涉及元素全面；元素测定下限10 µg/kg，是其它分析手段如ICP-MS、ICP-AES远不能达到的，能够满足高纯铪产品分析检测的需要。

标准审定会上专家认为本标准使用先进的科学仪器，实验数据充分，各验证单位认真参与标准的验证过程，征求意见广泛，经多次修改完善后标准文本内容详实，操作性强，一致认为《高纯锆化学分析方法 痕量杂质元素含量的测定 辉光放电质谱法》基本达到国际先进水平，同意作为行业标准进行申报。

五、与现行法律、法规、强制性国家标准及相关标准的关系

本标准属于高纯锆的化学分析方法标准，领域内没有强制性国家标准。本标准与现行法律、法规和相关标准相协调、无冲突。

六、专利及涉及知识产权

本文件起草过程中没有检索到专利和知识产权问题。

七、重大分歧意见的处理和依据

无。

八、标准作为强制性或推荐性国家（或行业）标准的建议

建议该标准为推荐性为行业标准。

九、贯彻标准的要求和措施建议

由于《高纯铪》产品标准YS/T 1239-2018制定时本标准尚未颁布实施，因此在YS/T1239-2018中对于高纯铪的化学成分检测规定表述为按照供需双发商定的检测方法进行。建议高纯铪的生产和使用单位积极组织本标准的学习与宣贯，可向企业、公司和科研院校（所）推荐本标准。建议YS/T 1239修订时将本标准作为化学成分检测的参照标准予以规定。

十、废止现行有关标准的建议

本标准为新制定标准，不涉及其它标准的废止。

十一、其它应予说明的事项

无。

十二、推广应用的预期效果

本标准是高纯锆分析方法标准，与高纯锆产品标准相配合，对我国高纯锆的生产、贸易具有较强的指导作用，弥补了高纯锆分析方法的空白，对于促进我国锆产品的生产、贸易具有重要意义。

国标（北京）检验认证有限公司

2020年12月