
JJF

中华人民共和国国家计量技术规范

JJF × × × × — 201 ×

纯度标准物质定值技术规范 ——高纯金属纯度标准物质

Technical Specification for Purity Assessment of Certified
Reference Materials — High Purity Metal Certified Reference
Materials

(征求意见稿)

201 × - × × - × × 发布

201 × - × × - × × 实施

国家市场监督管理总局 发布

纯度标准物质定值 技术规范

JJF×××× - 201×

Technical Specification for Purity

Assessment of Certified Reference Materials -

High Purity Metal Certified Reference Materials

本规范经国家市场监督管理总局于201×年××月××日批准，
并自201×年××月××日起施行。

归口单位：全国标准物质计量技术委员会

主要起草单位：中国计量科学研究院

参加起草单位：上海材料研究所

国标北京检验认证有限公司

北京钢铁研究总院

本规范委托全国标准物质计量技术委员会负责解释

本规范主要起草人：周涛（中国计量科学研究院）

崔彦杰（中国计量科学研究院）

唐一川（中国计量科学研究院）

张见营（中国计量科学研究院）

参加起草人：马冲先（上海材料研究所）

陈雄飞（国标北京检验认证有限公司）

唐本玲（北京钢铁研究总院）

国家标准物质计量技术委员会征求意见稿

目 录

引 言	II
1 范围	1
2 引用文件	1
3 术语	1
3.1 化学纯度	1
3.2 高纯金属	1
3.3 杂质元素扣除法	1
4 通用要求	1
4.1 标准物质候选物的筛选	1
4.2 标准物质定性分析	2
4.3 纯度定值方法原则	2
4.4 不确定度评定原则	3
5 定值方法	3
5.1 高分辨辉光放电质谱法	3
5.2 高分辨电感耦合等离子体质谱法	4
5.3 氧氮氢红外热导法	4
5.4 碳硫燃烧红外法	4
6 定值	5
7 赋值与不确定度评定	5
7.1 赋值	5
7.2 赋值的不确定度评定	5
8 计量溯源性	6
附录 A 高纯铜纯度定值实例	8

引 言

本规范的制定，用以规范我国高纯金属纯度标准物质的定值。
本规范为首次发布。

国家标准物质计量技术委员会征求意见稿

纯度标准物质定值技术规范——高纯金属纯度标准物质

1 范围

本规范适用于均质的高纯金属（通常化学纯度 $\geq 99.99\%$ ）的纯度定值及纯度标准物质的研制，对于纯度低于 99.99%的纯金属可参考使用。

2 引用文件

本规范引用了下列文件：

JJF 1005 标准物质常用术语和定义

JJF 1343 标准物质定值的通用原则及统计学原理

JJF 1342 标准物质研制(生产)机构通用技术要求

JJF 1507 标准物质的选择与应用技术规范

凡是注日期的引用文件，仅注日期的版本适用于本规范；凡是不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本规范。

3 术语

JJF1005 中规定的术语及以下术语适用于本规范。

3.1 化学纯度 chemical purity

主体元素的含量，通常以质量分数 %或 g/g 及其倍数表示，简称纯度。

3.2 高纯金属 high purity metals

化学纯度大于等于 99.99%（质量分数）的单一金属。

3.3 杂质元素扣除法 elemental impurity deduction method

在基于被测物质质量分数的总和为 100%的前提下，通过扣减其中所有杂质元素总量，获得主体元素含量值即纯度值的方法。

4 通用要求

4.1 标准物质候选物的筛选

4.1.1 应在合理成本的前提下，选择纯度相对较高、均匀性和稳定性良好的样品。

注：可以是市售、定制或再制备的样品。

4.1.2 样品应尽量选择颗粒、柱状、薄片、屑状等形式，便于表面清洗，减少切削等易污染操作。

注：样品形状的选择应考虑便于称量并与测量方法相适应。

4.1.3 样品测量前应按照固定步骤进行表面清洗，除去表面污染物和氧化层。

4.2 标准物质定性分析

采用质谱法或光谱法进行定性分析，确保候选物主成分的元素种类符合预期要求。

4.3 纯度定值方法原则

4.3.1 高纯金属因为主含量高，直接测量方法精密度难以满足要求，主要采用杂质元素扣除法，通过测量所有杂质元素含量，扣除所有杂质总量后得到纯度量值。

注：在量值和不确定度满足预期用途的前提下，可使用库仑电位滴定、络合滴定等方法对主元素含量进行直接测定，但需要扣除影响电位/络合滴定结果的其它金属杂质含量。

4.3.2 使用杂质元素扣除法时，为确保纯度量值的准确性，应对天然元素从氢到铀共 91 种杂质元素的含量（除主元素之外）进行测量与合理评估。

4.3.3 由于杂质元素含量较低，对应的测量方法不尽相同且相对单一，因此对测量方法应开展充分研究，对方法的检出限和测量不确定度进行详细考察，提供足够的证据表明对杂质含量测量的准确性和不确定度评定的合理性。

4.3.4 对于 5 种惰性气体元素 He、Ne、Ar、Kr、Xe，由于 Ar 在自然界中占惰性气体的 99% 以上，若在金属原料提纯过程中未引入特殊惰性气体包夹工艺时，可用 Ar 的测量结果合理估算惰性气体总量。

4.3.5 对于 9 种放射性元素 Tc、Po、At、Rn、Fr、Ra、Ac、Pm、Pa，在金属原料没有来自放射性矿物时，可依据放射性元素的来源及半衰期对其含量进行合理评估。

4.3.6 对纯度不确定度评定影响较大的主要杂质元素，应尽量采用两种或两种以上不同原理的独立测量程序进行测量，以排除单一方法可能存在的系统偏差；若难以采用两种或两种以上方法测量，应进行详细的方法确认和实验室间的测量验证，并考虑杂质含量不确定度评定的合理性。

4.4 不确定度评定原则

4.4.1 采用杂质元素扣除法进行纯度测量时，以所有杂质含量的不确定度进行合成计算后得到纯度量值的不确定度。

注：采用辉光放电质谱法（GDMS）测量杂质时，应根据对此方法的研究结果合理评定不确定度，应充分考虑校正因子、基体不同、重复进样和样品均匀性等方面对杂质元素含量测量造成的影响。

4.4.2 对于含量低于定量限的杂质元素，其含量值以方法定量限的一半作为含量值，相对标准不确定度以 100% 计。

5 定值方法

纯金属纯度定值方法，根据原理不同，分为两个类型，一是具有较高精密度的杂质元素扣除法，二是采用库仑电位滴定等方法直接测量主元素含量，然后扣除影响测量的杂质元素总量，方法精密度相对较低。可根据目标物的纯度定值要求、方法的技术要求、杂质种类与含量大小等因素，选择合适的定值方法。

高纯金属纯度定值宜采用杂质元素扣除法，针对不同的杂质元素种类及含量，推荐采用高分辨辉光放电质谱法、高分辨电感耦合等离子体质谱法、电感耦合等离子体光谱法、石墨炉原子吸收光谱法等测量金属半金属杂质元素，采用氧氮氢红外热导法、碳硫燃烧红外法、二次离子质谱法、离子色谱法等测量非金属元素，采用 α 谱仪和 γ 能谱仪等测量放射性元素。

5.1 高分辨辉光放电质谱法

5.1.1 方法原理：在低压（10Pa-100Pa）的惰性气体（高纯 Ar 或高纯 He）氛围中，阴阳极之间施加足够高的电压时，惰性气体被击穿电离，形成等离子体，正离子撞击阴极（样品）表面通过动能传递使阴极发生溅射，将固体样品原子化，在等离子体中被电离，样品离子流引入质量分析器经整形分离后进入检测器，离子流的强度与该元素含量成正比。

5.1.2 方法优点：（1）对固体样品直接进行分析；（2）可以同时测量 70 种以上的元素；（3）高分辨率，通常有低、中、高分辨（300，4000，10000）三种选择模式，中、高分辨能分离大部分多原子离子干扰；（4）高灵敏度，低检出限，元素定量限可达到 1 ng/g；（5）不同元素灵敏度差异小、基体效应小；（6）线性动

态范围可达 10^{12} 。

5.1.3 注意事项：测量结果的校正可采用：（1）仪器中标准相对灵敏度因子（StdRSFs）值进行结果校正；（2）使用相适应的基体标准物质或自制校正样品对仪器进行重新校准，以获得更准确的测量结果。

5.2 高分辨电感耦合等离子体质谱法

5.2.1 方法原理：在常压下，惰性气体（高纯 Ar）通过耦合线圈被击穿电离，形成高温等离子体，采用雾化器将溶液样品送入等离子体，在高温下汽化电离，样品离子流经质量分离后，到达检测器，离子流的强度与该元素含量成正比。

5.2.2 方法优点：（1）可以同时测量 60 种以上的元素；（2）高分辨率，通常有低、中、高分辨（300, 4000, 10000）三种选择模式，中、高分辨能分离大部分多原子离子干扰；（3）高灵敏度，低检出限，对金属样品中元素的测量定量限可达到 10 ng/g；（4）线性动态范围可达 10^9 。

5.2.3 注意事项：对金属样品进行分析时：（1）因为主元素成分含量接近 100%，样品转化成溶液，稀释 1000 倍后仍有较强的基体效应，因此应采用标准加入技术进行测量以降低基体干扰；（2）对于难溶解或易形成沉淀的杂质元素如 Ag、Au、Cr、Mo、Nb、Pt、Si、Ta 等，测量结果易偏低，需要考察样品的溶解过程；（3）应考察流程空白对定量限和测量结果的影响。

5.3 氧氮氢红外热导法

5.3.1 方法原理：在惰性气体（高纯 He）氛围下，金属样品在高纯石墨坩埚中，被高温加热熔融，样品中的氧、氮、氢被释放出来，形成 CO 和 CO₂、N₂、H₂O，被载气带至红外检测池和热导检测池中分别进行氧氮氢的测量。

5.3.2 方法优点：高灵敏度，低检出限，方法检出限可达到 0.1 μg/g。

5.3.3 注意事项：（1）不同金属样品的测量条件不同，有些需要添加助熔剂保证气体元素的释放率；（2）应通过实验研究考察气体元素的释放率，使其尽可能达到 100%。

5.4 碳硫燃烧红外法

5.4.1 方法原理：在高纯氧氛围下，金属样品在陶瓷坩埚中高温燃烧，样品中的碳硫被释放，氧化成 CO₂ 和 SO₂，被载气带至红外检测池中分别进行碳硫的测量，红外吸收峰面积和与元素含量成正比。

5.4.2 方法优点：高灵敏度，低检出限，方法检出限可达到 0.5 μg/g。

5.4.3 注意事项：同 5.3.3

6 定值

应符合 JJF1343 的要求，实例见附录 A。

7 赋值与不确定度评定

7.1 赋值

杂质元素扣除法测量纯度可采用公式 (1) 进行计算，其中 P 代表化学纯度， C 代表杂质含量：

$$P = (1 - \sum (c_1 + c_2 + c_3 + c_4)) \times 100\% \quad (1)$$

其中 $c_1 \sim c_4$ 分别是以测量方法进行分类的杂质元素的含量：

c_1 ：对 72 种杂质元素采用 GDMS 方法进行定量测量；对含量较高的杂质元素采用标准加入-高分辨等离子体质谱等方法进行定量测量；

c_2 ：典型非金属元素 C、N、O、H、S 等 5 种元素，采用载气热提取方法；

c_3 ：5 种惰性气体元素 He、Ne、Ar、Kr、Xe，由于 Ar 与 N_2 的热导系数相近，无法分辨，而且 Ar 占了自然界惰性气体中 99% 以上，因此在用热导法测量 N 的过程中，可以认为 N 含量的测量包含了惰性气体总量；

c_4 ：9 种放射性元素 Tc、Po、At、Rn、Fr、Ra、Ac、Pm、Pa，依据放射性元素的来源对其含量进行合理评估。

通过对 91 种杂质元素含量的测量，加和计算出杂质总量，按照上述公式计算得到化学纯度。

7.2 赋值的不确定度评定

根据每种杂质元素测量方法，分别对杂质元素的测量结果进行不确定度评定，得到每种杂质元素测量结果的不确定度；然后将各杂质元素测量结果不确定度合成后，得到杂质总量的不确定度，即可作为纯度量值的不确定度。

7.2.1 均匀性和稳定性的不确定度

应参考 JJF1343，计算标准物质均匀性、长期稳定性引入的不确定度。

7.2.2 合成不确定度

应参考 JJF1343，计算标准物质的不确定度：

$$u_{\text{CRM}} = \sqrt{u_{\text{char}}^2 + u_{\text{bb}}^2 + u_{\text{its}}^2}$$

u_{CRM} ：标准物质的标准不确定度(g/g)；

u_{char} ：标准物质的定值不确定度(g/g)；

u_{bb} ：均匀性引入的标准不确定度(g/g)；

u_{its} ：长期稳定性的标准不确定度(g/g)；

$$U = k \cdot u_{\text{CRM}}$$

U ：标准物质的扩展不确定度；

k ：包含因子。

8 计量溯源性

纯度测量结果的计量溯源性，应根据定值方法的技术路线、计算原理和逻辑关系，将定值结果溯源 SI 单位或具有计量溯源性（以下简称溯源性）的测量标准及标准物质，定值所用的仪器设备，应经过计量检定或校准。

对于杂质元素扣除法，纯度量值及不确定度由杂质元素含量测量结果及不确定度计算得到。杂质元素测量涉及到多种方法，可依据杂质元素含量及测量不确定度对纯度定值结果及不确定度的贡献，通过适当的校正来实现杂质元素的可靠定量，并评估杂质元素测量的不确定度，以保证杂质元素含量测量的计量溯源性。部分方法的计量溯源关键点列在下表中：

测量方法	测量对象	计量溯源关键点
辉光放电质谱法 (GDMS)	73 种杂质元素	1. 可使用 StdRSFs 进行结果校正； 2. 对于较高含量的杂质元素，可使用相似基体标准物质或自制校正样品进行更准确的结果校正； 3. 校正因子、基体差异、测量重复性和样品均匀性等不确定度贡献；

		4. 应考察复合离子对测量对象的干扰情况。
高分辨 ICPMS 方法	金属元素	1. 应采用标准加入技术以降低基体干扰； 2. 对于难溶或易沉淀的杂质，应考察消解程序； 3. 流程空白对测量不确定度的贡献。
氧氮氢红外热导法 碳硫燃烧红外法	氧、氮、氢 碳、硫	1. 仪器校准曲线应采用有证标准物质； 2. 助熔剂对空白的影响； 3. 考察气体元素是否释放完全； 4. 回收率实验。

国家标准物质计量技术委员会征求意见稿

附录 A

高纯铜纯度定值实例

高纯铜纯度标准物质 (GBW02142) 的定值, 采用 GDMS 方法测量其中的 73 种杂质元素含量, HR-ICP-MS 法测量 69 种杂质, 氧氮氢分析和碳硫分析测量其中的 C, S, O, N, H 等 5 种非金属杂质, 合计 77 种杂质元素含量, 惰性气体元素 He、Ne、Ar、Kr、Xe 以 N 含量估算, 9 种放射性元素根据来源进行合理评估后, 确定了从氢到铀所有 91 种杂质元素的含量, 在此基础上计算全部杂质元素总量, 采用杂质元素扣除计算得到高纯铜的化学纯度。

1 GDMS 测量

采用 GDMS 方法对高纯铜样品中的杂质含量进行测量, 共分析了从 Li 到 U 的 73 种杂质元素, S 的测量有可能受到 Ar 气中痕量 SO₂ 的干扰, 所以其 GDMS 测量值只作为燃烧红外法的参考, 不作为定值数据使用。

课题组采用 GDMS 方法测量了 15 组高纯铜样品, 取平均值后得到其中的 73 种杂质含量, 测量结果见表 1。

2 HR-ICP-MS 测量

将清洗后的铜粒用硝酸 (1+1) 溶解, 稀释并加入 1 ng/g 的混合标准溶液 (GBW(E)08428-08431), 稀释后的铜浓度为 1000 mg/kg, 进行 HR-ICP-MS 测量, 结果换算为铜中浓度, 共测量了 69 种杂质元素, 结果列入表 2 中。

Al、Fe 是高纯铜中含量最高的金属杂质, 为了得到更为准确的含量值, 采用 HR-ICP-MS 方法对 Al、Fe 含量采用标准加入法进行了测量。测量时将清洗后的铜粒用硝酸 (1+1) 溶解, 按不同比例分别加入 Al、Fe 的标准物质溶液 (NIST SRM3101a 与 GBW08616), 然后稀释到同一铜浓度 1000 mg/kg, Al、Fe 加入浓度分别为 0, 0.1 ng/g, 0.2 ng/g, 0.5 ng/g, 1 ng/g, 加标溶液中同时加入 1 ng/g 的高纯 Zn 金属 (CCQM-P149 国际比对样品) 溶解配制的溶液作为内标元素, 监控仪器灵敏度的变化。

经测量, 得到 Al、Fe 在高纯铜中的含量, 与 GDMS 方法测量结果的比较数

据列在表 3 中。

表 1 高纯铜中杂质元素 GDMS 测量结果

ng/g Cu

元素	含量	元素	含量	元素	含量	元素	含量
Li	< 1	Co	6	Cd	< 1	Er	< 1
Be	< 1	Ni	49	In	< 1	Tm	< 1
B	33	Zn	8	Sn	< 1	Yb	< 1
F	8	Ga	< 1	Sb	< 1	Lu	< 1
Na	< 2	Ge	60	Te	< 1	Hf	< 1
Mg	< 2	As	3	I	< 1	Ta	28
Al	492	Se	12	Cs	< 1	W	< 1
Si	53	Br	19	Ba	< 1	Re	< 1
P	22	Rb	< 1	La	< 1	Os	< 1
S	220	Sr	< 1	Ce	< 1	Ir	< 1
Cl	36	Y	< 1	Pr	< 1	Pt	< 1
K	2	Zr	< 1	Nd	< 1	Au	< 1
Ca	7	Nb	< 1	Sm	< 1	Hg	< 1
Sc	< 1	Mo	< 1	Eu	< 1	Tl	< 1
Ti	50	Ru	< 1	Gd	< 1	Pb	< 1
V	< 1	Rh	9	Tb	< 1	Bi	< 1
Cr	5	Pd	19	Dy	< 1	Th	< 1
Mn	< 1	Ag	13	Ho	< 1	U	< 1
Fe	151						

表 2 高纯铜中杂质元素 HR-ICP-MS 测量结果

ng/g Cu

元素	含量	元素	含量	元素	含量
Li	< 15	Se	< 60	Eu	< 5
Be	< 20	Rb	< 10	Gd	< 5
B	< 50	Sr	< 10	Tb	< 5
Na	< 120	Y	< 7	Dy	< 5

元素	含量	元素	含量	元素	含量
Mg	< 300	Zr	< 15	Ho	< 5
Al	306	Nb	< 10	Er	< 5
Si	< 500	Mo	< 15	Tm	< 5
P	< 150	Ru	< 20	Yb	< 5
S	< 300	Rh	< 20	Lu	< 5
K	< 10	Pd	< 20	Hf	< 20
Ca	< 7	Ag	< 20	Ta	< 22
Sc	< 10	Cd	< 5	W	< 10
Ti	< 10	In	< 5	Re	< 10
V	< 7	Sn	< 20	Os	< 20
Cr	< 12	Sb	< 50	Ir	< 10
Mn	< 3	Te	< 30	Pt	< 5
Fe	160	Cs	< 15	Au	< 10
Co	< 10	Ba	< 20	Hg	< 20
Ni	45	La	< 5	Tl	< 5
Zn	< 20	Ce	< 5	Pb	< 20
Ga	< 5	Pr	< 5	Bi	< 10
Ge	< 100	Nd	< 5	Th	< 2
As	< 30	Sm	< 5	U	< 1

表 3 高纯铜中 Al、Fe 含量测量结果比较

ng/g Cu

元素	GDMS 方法结果		HR-ICP-MS 方法结果	
	量值	u	量值	u
Al	492	984	306	74
Fe	151	303	160	64

从以上结果比较可以看出，两种方法测量的 Al、Fe 含量在不确定度范围内是一致的，而且 HR-ICP-MS 方法的溯源性更好，不确定度更小，杂质元素 Al、Fe 的定值以 HR-ICP-MS 方法测量结果为准。

3 氧元素含量测量

采用惰性气体熔融-红外法对高纯铜中氧含量进行测量，测量时用高纯石墨坩埚作为容器，在高纯氦气氛围下，高温熔融铜样品，首先以美国 Leco 公司的标准样品 501-550、501-644、501-991、502-411 做仪器状况考察，然后用称重的碳酸钠纯度标准物质（GBW06101）做标准曲线，得到校正系数用于校正测量结果；再将准确称重的碳酸钠纯度标准物质与高纯铜分别称重加入到坩埚中一起测量，计算得到氧的回收率，计算得到的加标回收率都在 95%到 105%之间，间接证明了检测方法的可靠性。

实验选择了吹扫时间、排气周期、排气时间、分析功率、排气功率等 5 个对分析结果影响较大的因素进行实验，在优化的分析参数下，连续做 12 次空白试验，以 10 倍空白值的标准偏差作为方法定量限。为了避免样品分析过程中仪器的记忆效应，每分析一个高纯铜样品之前做一次空白分析，得到高纯铜中氧含量为 1.43 mg/kg。

4 碳元素含量测量

采用燃烧红外法对高纯铜中碳含量进行测量，测量时以 Leco II HP（高纯钨锡合金粒）作为助熔剂，高纯陶瓷坩埚（Leco 528-018 HP）在 1300°C 下烘 4 小时，并使用 Leco 502-231 试剂（纯 Fe 屑）和 Leco II HP 预烧一次，以除去坩埚中含的 C，降低实验本底。样品测量时，首先以美国 Leco 公司的标准样品 502-348 做仪器状况考察，然后用称重的碳酸钠纯度标准物质（GBW06101）做标准曲线，得到校正系数用于校正测量结果；再将准确称重的碳酸钠纯度标准物质与高纯铜分别称重加入到坩埚中一起测量，计算得到碳的回收率，计算得到的加标回收率都在 90%到 105%之间，间接证明了检测方法的可靠性。高纯铜中碳含量的测量结果为 0.56 mg/kg。

5 氢氮硫元素含量测量

根据氧氮氢和碳硫分析的测量结果，判断出高纯铜中 H、N、S 元素含量低于方法定量限。每个元素的含量以定量限的一半为准。定量限以 10 倍空白的标准偏差表示，每个元素空白测量 12 次，H、N、S 元素含量的定量限依次为 0.19 mg/kg、0.19 mg/kg、1.5 mg/kg。

6 放射性元素测量

对于 9 种放射性元素 Tc、Po、At、Rn、Fr、Ra、Ac、Pm、Pa，除了合理进行评估外，委托国家核安全技术中心，采用 γ 谱仪对其进行了测量，测量结果显示计数率均低于本底值，说明高纯铜纯度标准物质未含有这些放射性元素。

7 惰性气体元素含量估算

在采用惰性气体熔融-热导法测量高纯铜中 N 含量时，由于 Ar 与 N₂ 的热导系数相近，两者的峰形在检测器上无法分辨，因此可以认为测量的 N 含量包含了 Ar 的含量，而由于 Ar 在空气中的惰性气体中占 99% 以上，因此认为 N 含量的测量包含了惰性气体总量，在标准物质高纯铜粒的测量中，5 种惰性气体 He、Ne、Ar、Kr、Xe 与 N 的总量小于 0.19 mg/kg。

8 高纯铜化学纯度定值

根据以上各个杂质元素的定值情况，可以计算得到 91 种杂质总量。对于含量低于定量限的杂质元素，以方法定量限为评定依据，将定量限的 1/2 作为含量值。所有 91 种杂质元素含量列在表 4 中：

表 4 高纯铜中杂质含量列表 mg/kg

元素	测量方法	量值	元素	测量方法	量值	元素	测量方法	量值
H	3	< 0.19	As	1,2	0.003	Eu	1,2	< 0.0010
He	6	< 0.0010	Se	1,2	0.012	Gd	1,2	< 0.0010
Li	1,2	< 0.0010	Br	1	0.019	Tb	1,2	< 0.0010
Be	1,2	< 0.0010	Kr	6	< 0.0010	Dy	1,2	< 0.0010
B	1,2	0.033	Rb	1,2	< 0.0010	Ho	1,2	< 0.0010
C	4	0.56	Sr	1,2	< 0.0010	Er	1,2	< 0.0010
N	3	< 0.19	Y	1,2	< 0.0010	Tm	1,2	< 0.0010
O	3	1.43	Zr	1,2	< 0.0010	Yb	1,2	< 0.0010
F	1	0.008	Nb	1,2	< 0.0010	Lu	1,2	< 0.0010
Ne	6	< 0.0010	Mo	1,2	< 0.0010	Hf	1,2	< 0.0010
Na	1,2	< 0.002	Tc	5	< 0.0010	Ta	1,2	0.025
Mg	1,2	< 0.002	Ru	1,2	< 0.0010	W	1,2	< 0.0010
Al	1,2	0.31	Rh	1,2	0.009	Re	1,2	< 0.0010
Si	1,2	0.053	Pd	1,2	0.019	Os	1,2	< 0.0010
P	1,2	0.022	Ag	1,2	0.013	Ir	1,2	< 0.0010
S	1,2,4	< 1.5	Cd	1,2	< 0.0010	Pt	1,2	< 0.0010
Cl	1	0.036	In	1,2	< 0.0010	Au	1,2	< 0.0010

元素	测量方法	量值	元素	测量方法	量值	元素	测量方法	量值
Ar	6	< 0.0010	Sn	1,2	< 0.0010	Hg	1,2	< 0.0010
K	1,2	0.002	Sb	1,2	< 0.0010	Tl	1,2	< 0.0010
Ca	1,2	0.007	Te	1,2	< 0.0010	Pb	1,2	< 0.0010
Sc	1,2	< 0.0010	I	1	< 0.0010	Bi	1,2	< 0.0010
Ti	1,2	0.05	Xe	6	< 0.0010	Po	5	< 0.0010
V	1,2	< 0.0010	Cs	1,2	< 0.0010	At	5	< 0.0010
Cr	1,2	0.005	Ba	1,2	< 0.0010	Rn	5	< 0.0010
Mn	1,2	< 0.0010	La	1,2	< 0.0010	Fr	5	< 0.0010
Fe	1,2	0.16	Ce	1,2	< 0.0010	Ra	5	< 0.0010
Co	1,2	0.006	Pr	1,2	< 0.0010	Ac	5	< 0.0010
Ni	1,2	0.047	Nd	1,2	< 0.0010	Th	1,2	< 0.0010
Zn	1,2	0.008	Pm	5	< 0.0010	Pa	5	< 0.0010
Ga	1,2	< 0.0010	Sm	1,2	< 0.0010	U	1,2	< 0.0010
Ge	1,2	0.06						

注：1：辉光放电质谱法 GDMS

2：高分辨电感耦合等离子体质谱法 HR-ICP-MS；

3：惰性气体熔融-红外热导法

4：燃烧红外法

5： γ 谱仪法

6：估算法

高纯铜中的所有 91 种杂质元素总量为 3.9 mg/kg，扣除杂质总量后，得到高纯铜的化学纯度为 0.9999961 kg/kg。