

•知识介绍•

doi: 10.3866/PKU.DXHX201910029

www.dxhx.pku.edu.cn

摩尔新定义和准确测定的阿伏伽德罗常数

高玲香*, 张姝颖, 张伟强, 翟全国, 胡满成, 高胜利

陕西师范大学化学化工学院, 西安 710119

摘要: 针对 2019 年国际 SI 单位新标准的实施, 依据文献对阿伏伽德罗常数和摩尔物质质量原理进行了简短的历史回顾。着重于摩尔新定义的概念和准确测定阿伏伽德罗常数的描述, 突出了原子量精密测量技术、纳米量级精密测量技术以及材料制备和表征技术的发展。相对而言, 摩尔新定义更能体现科学方法和科学思维同化学知识的关系, 将会对无机化学、分析化学、物理化学等课程教学引起巨大的冲击波, 并且会波及到每个化学专业本科生。本文内容可为提高本科生的科研思维和科研素质提供借鉴。

关键词: 摩尔; 阿伏伽德罗常数; 原子量; 单晶硅; 计量学

中图分类号: G64; O6

New Definition of Mole and the Accurate Avogadro Constant

Lingxiang Gao*, Shuying Zhang, Weiqiang Zhang, Quanguo Zhai, Mancheng Hu, Shengli Gao

School of Chemistry & Chemical Engineering, Shaanxi Normal University, Xi'an 710119, P. R. China.

Abstract: The new standard for international SI units was officially implemented this year and the definitions of the SI basic units, such as mole, will be changed to constants. In this paper, the Avogadro's constant and the principle of molar mass are briefly reviewed, and we focus on the concept of Mole's new definition and how to accurately measure Avogadro constant, as well as the development of atomic weight precision measurement, nano-scale precision measurement, materials preparation and characterization technologies. The new definition of Mole will affect every undergraduate of chemistry because it can better reflect the relationship between scientific methods and scientific thinking and chemical knowledge. It can be anticipated that the new definition of Mole will soon have a huge impact on the teaching of inorganic chemistry, analytical chemistry and physical chemistry. This recount is naturally important to improve the scientific thinking and research quality of undergraduates.

Key Words: Mole; Avogadro constant; Atomic mass; Monocrystalline silicon; Metrology

国际单位制(SI)基本常数定义的修订设想已经酝酿了十多年, 但是, 直到 2018 年 11 月 16 日, 第 26 届国际计量大会全票才通过了关于“修订国际单位制(SI)”的 1 号决议^[1]。根据决议, 千克、安培、开尔文和摩尔等 4 个 SI 基本单位的定义将改由常数定义, 于 2019 年 5 月 20 日起正式生效。显然, 这是国际测量体系有史以来第一次全部采用自然恒量的新 SI, 可保证 SI 的长期稳定性和环宇通用性。就像 1967 年秒定义的修订使我们在今天拥有了 GPS 和互联网技术一样, 新 SI 将在未来对科学、技术、贸易、健康、环境以及更多领域产生深远影响。可以说, SI 基本常数新定义的修订是科学进步的一座里程碑。

收稿: 2019-10-15; 录用: 2020-01-02; 网络发表: 2020-02-21

*通讯作者, Email: gaolx@snnu.edu.cn

基金资助: 陕西师范大学 2019 年特色金课项目“无机化学”

本文依据期间一些重要的参考文献, 将从考察摩尔新定义和准确测量阿伏伽德罗常数的艰难历程出发, 欲从另一个角度展现采用自然恒量为新 SI 的必要性和重要意义。

1 从阿伏伽德罗定律谈起

1.1 阿伏伽德罗定律的建立

中学起, 我们就知道阿伏伽德罗定律(Avogadro's law)是重要的气体定律之一。阿伏伽德罗(A. Avogadro, 1776–1856 年)时代是物理学界正在探讨气体本质的时代, 法国物理学家盖-吕萨克(J. Gay-Lussac, 1778–1850 年)观察到: 当气体反应时, 反应气体与生成气体的体积成简单整数比, 后称盖-吕萨克定律(Gay-Lussac's law)。1811 年, 为了解释原子的反应, 阿伏伽德罗从盖-吕萨克的结论继续往前推演, 提出了“在相同的温度和压强下, 相同体积的任何气体都含有相同数目的分子”的假设, 后被称为阿伏伽德罗定律^[2], 俗称“四同定律”。该假设明确了分子的概念, 提供了单个原子或分子的性质与宏观物质特性之间的联系, 并与道尔顿(J. Dalton, 1766–1844 年)的原子理论形成了解释物质微观构成的原子-分子学说。应该说阿伏伽德罗提出了一个对近代科学有深远影响的假说。

1.2 阿伏伽德罗常数——庞大而神秘的数字

1.2.1 “阿伏伽德罗常数”的由来

1865 年, 奥地利化学家洛喜密脱(J. Loschmidt, 1821–1895 年)成功地测定出标准状况下 1 cm^3 气体中所含有的分子数大约为 2.7×10^{19} , 第一次出现了 N 值, 这是阿伏伽德罗常数的最早值, 又称洛喜密脱常数。随后, 在 1909 年, 法国物理化学家佩兰(J. Perrin, 1870–1942 年)提出, 1 克分子物质中所含有的粒子数是一个常数 N 。为了纪念阿伏伽德罗, 他建议将这个常数命名为阿伏伽德罗常数。在 1913 年的著作中, 他又再次强调了这一建议, 并首次通过实验测得了阿伏伽德罗常数的值为 6.7×10^{23} ^[3]。

1.2.2 阿伏伽德罗常数的概念

2015 年, 中国学者龙琪对“阿伏伽德罗常数”的概念及其发展史进行研究后归纳出以下几点^[4]:
① 阿伏伽德罗常数不仅仅是一个数值, 而是自然科学中十分重要的基本物理常数, 它起到了建立宏观世界与微观世界数量关系的桥梁作用。许多基本物理常量要通过阿伏伽德罗常数建立联系, 例如, 法拉第常量 F 与基本电荷 e 之间的关系为 $F=N_A \cdot e$, 气体常量 R 与玻耳兹曼常量 k 之间的关系为 $R=N_A \cdot k$ 。
② 阿伏伽德罗常数的数值可以通过实验测定出来。一般采用其近似值 6.02×10^{23} , 它所对应的准确值并不是阿伏伽德罗常数, 而是阿伏伽德罗常数的数值。
③ 阿伏伽德罗常数是有单位的, 按照旧 SI 是 mol^{-1} 。
④ 在 2019 年 5 月 20 日之前的 SI 中, 阿伏伽德罗常数的数值与 $0.012\text{ kg }^{12}\text{C}$ 中所含的碳原子数相同, 符号为 N_A 。其数学表达式为:

$$N_A \text{ 的数值} = \frac{0.012\text{ kg }^{12}\text{C 的质量}}{1 \text{ 个 } ^{12}\text{C 原子的质量}} = \frac{1 \text{ g}}{1.66 \times 10^{-24} \text{ g}} \approx 6.02 \times 10^{23} \quad (1)$$

自然, 随着新的 SI 实行, 它的定义也将扩充, 数值也将更为准确。随着科学技术向微观领域的扩展, 阿伏伽德罗常数越来越显示出它的重要性, 其数值的精确度与人类探索微观世界的前进步伐紧密相联。

1.3 “阿伏伽德罗常数”与“物质的量”和“摩尔”的关联

化学反应的定量处理可以追溯到 1792 年, 当时德国数学家兼化学家里希特(J. B. Richter, 1762–1807 年)引入了“化学计量学”的原理, 将化学反应或化学反应过程解释为原子和分子之间的联系, 就产生了今天所称的“摩尔”和“阿伏伽德罗常数”的概念, 这包括道尔顿“元素的原子彼此之间并无差异, 它们必须具有一定的原子质量和体积”的概念和阿伏伽德罗定律。“摩尔”概念的出现主要归属于德国物理化学家奥斯特瓦尔德(W. Ostwald, 1853–1932 年)。他在 1893 年《物理化学测量

手册和辅助书》中写道：“让我们将以克为单位的重量——在数值上与指定物质的分子量相同——称为 1 摩尔，……”^[5]。使用这个定义，单位“摩尔”与质量的关系更密切，因此很长一段时间内被解释为“化学质量单位”。

20 世纪初，科学界使用了摩尔的一种初始前体，即“克分子”，它既表示了数量，又表示了单位。1905 年，爱因斯坦(A. Einstein, 1879–1955 年)在他的工作中引用了“革兰氏分子”这个词，涉及到了一个关于阿伏伽德罗常数的量。佩兰在 1909 年考察布朗运动原理时也使用了革兰氏分子，并推导出了第一个阿伏伽德罗数值^[6]。

在原子理论的实验证实和对阿伏伽德罗常数(每摩尔粒子数)的测定之后，科学界就形成了对摩尔的两种不同认知。德国化学家斯蒂尔(U. Stille, 1910–1976 年)第一次使用一个概念中的两个含义来处理“摩尔”一词：一方面“摩尔”被当作一个化学质量单位，将相对原子质量(A_r)与单位“克(g)”联系起来： $1 \text{ 摩尔} \approx A_r \cdot \text{g}$ ；另一方面，摩尔被视为“摩尔数”，符号为 n ，是一个粒子数，无量纲。

1971 年，“摩尔”在第十四届国际计量大会上被纳入 SI 单位系统，不同认知的矛盾终于得到了解决。因此，在正式确定“物质的数量”(符号 n)为第七个基本量、“摩尔”为各自单位时，对这两个含义的区分就变得多余了，引入阿伏伽德罗常数 N_A 就很自然了。

2 摩尔的定义追溯

2.1 摩尔进入国际单位制

“物质的量”单位——摩尔(mol)，它同原子量有密切关系。

首先是物理界和化学界在相对原子质量标准上的统一。1959 年，在慕尼黑召开的国际纯粹与应用化学联合会(IUPAC)上决定采用德国著名质谱学家马陶赫(J. Matthauch, 1895–1976 年)的建议，以碳同位素 ^{12}C 的相对原子质量 12.0000 为基准，并提交国际纯粹与应用物理联合会(IUPAP)考虑。1960 年，IUPAP 接受这一建议。1961 年，IUPAC 正式通过新标准，决定改用 ^{12}C 作为标准，把它的原子量定为 12，并以此为出发点，给出了其他原子“相对原子质量”的数值。1971 年， ^{12}C 终于以“相对原子质量”被用于 SI 单位摩尔的定义中： $A_r(^{12}\text{C}) = 12$ 。

其次是国际标准化组织(ISO)提出了相应的要求和建议，必须选择 ^{12}C 作为参考，并采用摩尔作为 SI 单位。这就需要通过确定 ^{12}C 的相应质量以定义物质的量的单位。于是，1971 年，国际度量衡总会(CGPM)正式引入了 SI 基本单位摩尔，定义为^[7]：“摩尔是一个系统的物质的量，它包含的基本实体与 0.012 kg ^{12}C 中的原子一样多。使用摩尔时，必须指定基本实体，可以是原子、分子、离子、电子或其他粒子，或此类粒子的指定基团”。根据科学测定，0.012 kg ^{12}C 所含的 C 原子数约为 6.0220943×10^{23} ，用符号 N_A 表示，称为阿伏伽德罗常数。

这样的定义，显示了几个化学量直接或间接地与物质的数量 n 有关。(纯)化学物质 X 作为一个实体，其特征最好是与“量”和“质量”有关的数量。这样，人们就能够根据化学计量学的规律，用平衡的方法或用重量法制备样品。其中，最常见的量有：物质的基本实体粒子数 N ，物质的数量 n ，与粒子数 N 对应的质量 M ，相对原子量 $A_r(\text{X})$ ；依赖于 X 的性质：如，元素、分子、化合物，摩尔质量常数 M_u ，原子质量常数 m_u ，摩尔质量 M ，原子质量 m_a 和阿伏伽德罗常数 N_A 。也就是说在修订后的 SI 中，下面一些关系式是仍然有效的：

$$n(\text{X}) = \frac{N(\text{X})}{N_A} \quad (2)$$

$$n(\text{X}) = \frac{m(\text{X})}{A_r(\text{X})M_u} = \frac{m(\text{X})}{M(\text{X})} \quad (3)$$

$$M(\text{X}) = A_r(\text{X})M_u \quad (4)$$

$$m_a(\text{X}) = A_r(\text{X})m_u \quad (5)$$

$$N_A = \frac{M_u}{m_u} \quad (6)$$

$$\frac{M_u}{N_A} = m_u \quad (7)$$

$$M(\text{X}) = N_A m_a(\text{X}) \quad (8)$$

依据 SI 摩尔定义, 对于质量为 0.012 kg 的 ^{12}C , 式(8)可以写为:

$$M(^{12}\text{C}) = N_A m_a(^{12}\text{C}) \quad (9)$$

2.2 新国际单位制中的摩尔新定义

表 1 是新旧 SI 单位制中“物质的量”的定义对照。由表 1 可以看出, 基本单位摩尔的新定义是由严格的 N_A 的值决定的。即, 准确得到“严格的 N_A 的值”就是如何准确测量 N_A 这个永恒不变的自然常量。同时可以看出, 必须从两个方面理解摩尔: 第一, 它和一个数字有关。第二, 需要识别基本实体, 并建立与化学的联系。要完整地描述单位摩尔中物质的数量, 就需要对基本实体(分析物)进行识别和量化。一定量的物质 $n = 1 \text{ mol}$ 时总是包含相同数量的实体。这个数量与 N_A 的固定数值相同。

表 1 新、旧 SI 单位制中基本量的定义对照表

基本量	单位	旧 SI 单位制	新 SI 单位制	转变的内容
物质的量	摩尔(mol)	体系中的物质的量, 其包含的基本单位等于在 0.012 千克的碳-12 中包含的原子数, 基本单位是原子、分子、离子、电子及其他粒子, 或者这些粒子的组合	1 摩尔物质包含严格的 $6.02214076 \times 10^{23}$ 个基本单元。这个数字是阿伏伽德罗常数 N_A , 单位为 mol^{-1}	摩尔的新定义是以某个确定的原子或者分子个数定义的, 而不是直接与测量某个样品的质量相联系

2.3 从摩尔新定义到阿伏伽德罗常数的准确测定

摩尔的上述定义, 就是国际科学和技术委员会基本常数工作组(TGFC)在 2017 年使用特殊的最小二乘法(LSA)发布的摩尔新定义^[8]。其中, 摩尔包括了阿伏伽德罗常数 $N_A = 6.02214076 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$ 的一个固定值, 且 N_A 的输入将是固定的, 不再有不不确定性。1 摩尔的物质正好含有 $6.02214076 \times 10^{23}$ 指定的实体。1 摩尔可以表示为:

$$1 \text{ mol} = \left(\frac{6.02214076 \times 10^{23}}{N_A} \right) \quad (10)$$

摩尔新定义不会影响或改变相对原子质量, 但原子质量常数和摩尔质量常数将会有极小的不确定性, 因此, 修改摩尔定义对大多数实际和科学工作的影响几乎可以忽略。但同时, 为了达到这个目的, 现在已经使用了一个多世纪的阿伏伽德罗常数, 必须以前所未有的准确性重新确定。

3 阿伏伽德罗常数的准确测定

针对 N_A 的测量工作从 17-18 世纪就已经开始, 科学家们建立了包括气体法、黑体辐射法、布朗运动法、放射性计数法等在内的许多测量方法, N_A 测量的相对不确定度不断下降。现在, 该常数的测量是通过 X 射线晶体密度法(XRCD)实现的, 也被称为“avagadro 实验”或“硅路线”。

3.1 准确测定阿伏伽德罗常数的原理

X 射线单晶密度法确定 N_A 是选用单晶硅为测量材料的。

对于一个高纯度的单晶硅球而言，其物质的量可以由式(11)计算得到：

$$n = \frac{m}{M(\text{Si})} \quad (11)$$

其中， n 为物质的量(单位为 mol)， m 为硅球的质量(单位为 kg)， $M(\text{Si})$ 为硅的摩尔质量(单位为 kg mol^{-1})。

对于一个结构完美的硅球体(图 1)而言，所含原子个数可以用式(12)计算：

$$N = \frac{8 \times V_S}{a^3} \quad (12)$$

其中， N 为硅球中所含硅原子个数， V_S 为硅球体积(单位为 m^3)，8 为每个晶胞中所含硅原子个数， a 为晶格常数(单位为 m)。

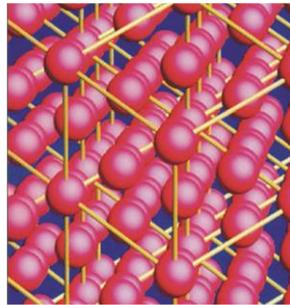


图 1 硅晶格排列示意图

由式(11)和式(12)即可得到阿伏伽德罗常数 N_A ，如式(13)和式(14)所示：

$$n = \frac{N}{N_A} \quad (13)$$

$$N_A = \frac{8 \times M(\text{Si}) \times V_S}{m \times a^3} \quad (14)$$

由式(14)可以看出宏观与微观单位间的关系。这就是说，只要对所用单晶硅的硅摩尔质量、硅球体积、硅球质量和晶格常数进行准确测量，就可以实现阿伏伽德罗常数的准确测定。经计算，为了保持重新定义后的量值一致性，测得的阿伏伽德罗常数的相对标准不确定度应小于 2×10^{-8} 。为此，由几个国家计量院联合成立的被称为阿伏伽德罗常数工作组(IAC)的机构对各个参数的不确定度给出了具体要求^[9]。但从目前来看，当前的测量能力与预期目标还有一定距离。如表 2 所示。

表 2 N_A 测量中当前测量能力与预期目标对比

测量的量	相对不确定度	
	$10^8 \gamma(N_A)$ (目前)	$10^8 \gamma(N_A)$ (预期)
摩尔质量	2.0	1.0
晶格体积	1.8	1.0
硅球体积	3.0	1.0
硅球质量	0.5	0.5
硅球表面积	1.0	0.5
材料完备性	2.0	1.0
阿伏伽德罗常数	4.6	2.1

3.2 准确测定阿伏伽德罗常数的方法

3.2.1 单晶硅摩尔质量的测量

XRCD 方法中硅材料要求不含杂质、晶体完美、理想，必须考虑杂质含量、非杂质点缺陷、位错和微观空洞等因素的影响。为此，IAC 决定改用浓缩硅-28 作为原料，通过单晶硅生长的方法获得具有很高纯度的、浓缩程度达到 99.9% 以上的单晶硅-28^[10]，如图 2 所示。



图 2 ${}^{28}\text{Si}$ 单晶生产步骤

获得硅摩尔质量准确值的过程是复杂而艰难的。因为 ${}^{28}\text{Si}$ 同位素的富集率几乎为 100%: $X({}^{28}\text{Si}) = 0.9995752(12)67$ ，但还必须测量剩下的两个同位素 ${}^{29}\text{Si}$ 和 ${}^{30}\text{Si}$ 的组成情况。一个包括中国在内的有德、日、意、美、加等 8 个国家的科学家合作团队突破了这项工作。首先，使用电感耦合等离子体(ICP)源测量同位素比率，但总是存在质量偏差。接着他们将同位素稀释质谱(IDMS)原理(分析化学中常用的测定矩阵中元素含量的主要方法)应用到“硅问题”上，解决了这一问题。经过几年的努力，硅摩尔质量测定结果的准确性通过完全不同但互相补充的实验方法得到了证实：通过仪器中子活化分析(INAA)确定了高浓硅的物质分数 $X({}^{30}\text{Si})$ ，通过辉光放电质谱法(GDMS)测定了三种稳定硅同位素各自的含量分数。

如此，单晶硅的摩尔质量可用下式计算：

$$M(\text{Si}) = f_{28}M({}^{28}\text{Si}) + f_{29}M({}^{29}\text{Si}) + f_{30}M({}^{30}\text{Si}) \quad (15)$$

式中， M 为元素的摩尔质量， f_i ($i = 28, 29, 30$) 为硅的三种同位素(${}^{28}\text{Si}$, ${}^{29}\text{Si}$, ${}^{30}\text{Si}$) 的丰度。

迄今为止 ${}^{28}\text{Si}$ 中的最高富集度： $X({}^{28}\text{Si}) = 0.999993053(21)\text{mol}^{-1}$ 。表 3 为硅的三种同位素修订之前和之后各个硅同位素的摩尔质量。

表 3 硅同位素在 SI 修订之前和之后各个硅同位素的摩尔质量

i 的数值	$M({}^i\text{Si})/(\text{g}\cdot\text{mol}^{-1})$	
	修订前	修订后
$I = 28$	27.9769265350(05)	27.976926535(13)
$I = 29$	28.9764946653(06)	28.976494665(13)
$I = 30$	29.973770137(23)	29.973770137(30)

3.2.2 单晶硅球体积的测量

在三维物体的体积测量中, 球体是测量精度能达到最高的最佳形状。合格的大单晶硅被切割成单晶硅球体, 并通过研磨抛光清除硅球表面的金属污染, 使硅球表面层得以准确的表征和测量, 以提高球的质量和体积测定所要求的修正值的精度。在此项工作中, 为了便于与千克原器(被国际计量组织认定为质量单位实物基准)进行比较, 球体的质量要尽量接近 1 kg (直径约为 93.6 mm)。此外, 为了确保所获得的 1 kg 质量的不确定度, 必须要求它的直径加工精度在 1 nm 范围内。目前, 在硅球加工水平最高的实验室澳大利亚 CSIRO 的精密光学中心(ACPO), 球面度已达到优于 50 nm, 即在各个方向测量直径的差异已达 5×10^{-4} 量级^[11]。通过精密测量硅球的质量和利用激光干涉方法测量平均直径就能得到硅球体积的准确值, 不确定度达 10^{-8} 量级。这意味着由球面度误差引起的体积相对不确定度小于 1×10^{-12} 。

3.2.3 硅球质量的测量

理想的单晶晶胞由 8 个原子组成(图 1), 即单晶胞内原子数 $n = 8$ 。但在硅晶体的生长过程中, 会受其他原子的影响, 从而影响 n 的数值。目前生长的硅晶体还有点阵缺陷, 使得 n 不再是一个自然数, 而应由下式计算:

$$n = (N_0 + \delta) \quad (16)$$

式中, $N_0 = 8$, δ 是缺陷的修正值, 约为 10^{-7} 量级。不纯的原子主要是碳、氧和氮, 但所占比例极小。由于点缺陷, 在硅原子占有的所有规则位置处, 球质量与被测质量值之间的差值为:

$$m(\text{欠缺}) = V \sum_i (m_{28} - m_i) N_i \quad (17)$$

式中 m_{28} 和 m_i 分别是 ^{28}Si 原子和第 i 个点缺陷的质量(空位质量为零), V 是球的体积, N_i 是点缺陷 i 的浓度。

3.2.4 硅球晶格常数的测量

采用 X 射线单晶密度法 XRCD 法测定^[12], 得到了硅球的晶胞参数为:

$$d_{220}(\text{XINT}) = a(\text{XINT}) / 8^{1/2} = 192.01371198(34) \text{ pm} \quad (18)$$

式(18)表示 X 射线干涉仪的移动晶片在移动 46 mm 距离时与晶体轴垂直的平均晶格间距, 式中 XINT 是 X 射线干涉仪的缩写。

每个球的平均晶格参数为:

$$a(\text{S}) = (1 + \sum_i \beta_i \Delta N_i) a(\text{XINT}) \quad (19)$$

式中的 S 是硅球 AVO28-S5c 或 AVO28-S8c, 下标 i 是点缺陷, β_i 是应变系数, ΔN_i 是球与干涉仪之间点缺陷 i 的浓度差。

基于以上计算, 硅球的核心直径和体积测量结果的加权平均值为: AVO28-S5c 和 AVO28-S8c 平均直径分别为 93710811.21(50) nm 和 93701526.26(47) nm; 两者的平均体积分别为 430.819289(7) cm^3 和 430.763223(7) cm^3 。

如此, 就可以获得在不确定度满足要求的情况下测定的阿伏伽德罗数值(表 4)^[13]。

表 4 IAC 公布的 N_A 值

编号	年	$10^{-23} N_A/\text{mol}$	$10^8 y(N_A)$
[55]	2011	6.02214082(18)	3.0
[56]	2015	6.02214076(12)	2.0
[57]	2017	6.022140526(70)	1.2
[58]	2017	6.02214084(15)	2.4

y 为不确定度

4 结语

(1) 对 2019 年国际 SI 单位新标准的实施, 本文对阿伏伽德罗常数和摩尔物质质量原理依据文献进行了简短的历史回顾, 着重于摩尔新定义的概念和实现准确测定阿伏伽德罗常数的描述。这个叙述对于化学专业本科生是必要的。因为摩尔新定义的概念不久将对无机化学、分析化学、物理化学教学引起的巨大冲击会波及到每个化学专业本科生。

(2) 国际 SI 单位新标准的实施, 不光涉及到标准和概念, 更多的是化学计量学和材料到化学的合成方法、检测技术的研究。自然, 它们对提高本科生的科研思维和科研素质就显得尤为重要了。

(3) 本文重视对原始文献的引用, 意在激发学生对学习的热情, 更好地引导学生热爱化学、进入化学的情景, 以便掌握实、深、厚的知识领域, 为创新创业做好准备。须知, 用基本常数来定义新 SI 基本量的思想是通过实验确定的, 也暗示着在修订后的时代, 必须要不断地维护和改进相关实验。新摩尔定义更能体现科学方法和科学思维同化学知识的关系。

参 考 文 献

- [1] 晏刘莹, 高蔚. 中国计量, **2018**, No. 12, 6.
- [2] Avogadro, A. *J. Phys.* **1811**, 73, 58.
- [3] Jensen, B. W. *J. Chem. Educ.* **2010**, 87 (12), 1302.
- [4] 龙琪. 化学教育, **2015**, 36 (17), 75.
- [5] Cerruti, L. *Metrologia* **1994**, 31, 159.
- [6] Einstein, A. *Annalen der Physik* **1905**, 322, 549.
- [7] Terrien, J. *Metrologia* **1972**, 8, 32.
- [8] Newell, D. B.; Cabiati, F.; Fischer, J.; Fujii, K.; Karshenboim, S. G.; Margolis, H. S.; Mirandés, E. D.; Mohr, P. J.; Nez, F.; Pachucki, K. *Metrologia* **2018**, 55, L13.
- [9] Becker, P.; Friedrich, H.; Fujii, K.; Giardini, W.; Mana, G.; Picard, A.; Pohl, H.-J.; Riemann, H.; Valkiers, S. *Meas. Sci. Technol.* **2009**, 20 (9), 4.
- [10] Andreas, B.; Azuma, Y.; Bartl, G. *Metrologia* **2011**, 48, S1.
- [11] Becker, P.; Nicolaus, A. *Europhy. News* **2009**, 40 (1), 24.
- [12] 沈乃激. 物理, **2018**, 47 (10), 648.
- [13] Abrosimov, N. V.; Arefev, D. G.; Becker, P.; Bettin, H.; Bulanov, A. D.; Churbanov, M. F.; Filimonov, S. V.; Gavva, V. A.; Godisov, O. N.; Gusev, A. V. *Metrologia* **2017**, 54 (4), 599.