关于晶体熔化相关问题的探讨与启示

蒋炜波 （清华大学附属中学 北京 100084）

摘 要 从一道考查晶体熔化的命题出发，结合两套义务教育物理教材，将实验研究与理论分析相结合，指出命题的科学性问题，探讨关于晶体熔化的相关问题，提出对教学的建议。

关键词 晶体 熔点 晶态 非晶态 启示建议
文章编号 1002－0748(2024)5－0038 **中图分类号** G633·7 **文献标识码** B

1 引 言

晶体的熔化特点和熔化条件，是初中物理中学生需要掌握的基本认知，考试命题也经常针对晶体熔化的相关内容进行考查，比如非常常见的例题1。

例题1 把盛有碎冰块的大试管插入盛有碎冰的烧杯中，如图1所示，用酒精灯对烧杯底部均匀加热。当烧杯中的冰块大部分熔化时，试管中的冰将 （ ）

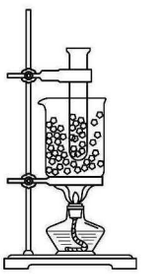


图1

（A）也熔化一部分
（B）全部熔化
（C）一点儿都没熔化
（D）下边的熔化，上边的没熔化

例题1旨在考查学生对晶体熔化的认识：持续吸热，温度达到熔点，熔化过程中温度保持不变。冰是晶体，因此烧杯中的碎冰没有熔化完的时候，其温度始终为0℃（标准大气压下，下同）。此时试管中的碎冰温度最高也仅为0℃，虽然达到了熔点，但由于与大烧杯中的冰水混合物之间不存在温度差，不能发生热传递，因此试管中的冰完全不能熔化。常见的参考答案为C。

烧杯中的碎冰块已经熔化了大部分，烧杯中的水温真的还会维持在0℃吗？试管中的碎冰有没有可能已经开始熔化？这样的质疑源于教学中的一些模糊处理，以及对晶体与熔化认知的不足。鉴于此，有必要对晶体熔化的相关问题进行分析讨论。

2 基于逻辑的思考

假定在烧杯中的碎冰块熔化完之前，烧杯中的冰和水温度始终维持在0℃不变。那么将烧杯和碎冰块这一情境放大，比如对于冬天结冰的湖面情境，是否只要湖面上还有结冰，整个湖面下的湖水的温度就不能高于熔点呢？将情境进一步放大，对于整个地球上的海洋而言，是否只要海面上还有冰块，海水的温度也就不能高于熔点呢？显然，答案都是否定的。“烧杯中的冰没有熔化完时冰和水的温度都不能高于0℃”这一论断，没有考虑到热传递的具体过程。

再从热传递的条件进行思辨论证。如果在烧杯中的碎冰块熔化完之前，水和冰的温度都不能高于0℃，那么最开始的时候，烧杯下方的冰从烧杯吸热熔化得到的水的温度最高也就只能为0℃，此时这些水上方的冰还能继续从这些水处吸收热量吗？热传递的条件是存在温度差，当这些水和水上方的冰的温度都达到0℃时，热传递便不能进行，那么水上方的冰将完全不能熔化。但事实上加热烧杯后，烧杯中的碎冰块能够完全熔化，因此，烧杯中下方的水的温度应该要高于0℃才能保证热传递的进行。

由此看来，在例题1中，当烧杯中的冰块大部分熔化时，试管底部接触到的烧杯中水的温度应该已经超过0℃，试管中的碎冰块应该已经开始熔化，A和D选项相对合理，B和C选项不合理。

3 基于实验的检验

3.1 实验设计

按照图1所示，在烧杯中装入冰块，然后将装有冰块的试管插入烧杯中，试管底部不接触烧杯。将3支温度计分别插入烧杯冰块中不同的深度。用酒精灯隔着石棉网给烧杯底部加热，观察并记录3支温度计的示数变化，以及装置中的冰块熔化

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

情况。

3.2　实验现象

实验过程中遇到了很多被忽略的问题，比如室温空气的影响、3支温度计很难保证规格相同且在同一时刻读数等。先用碎冰块进行实验，尝试多次后最终得到的数据见表1。

表1　碎冰块熔化实验数据

加热时间/min	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	16
温度计1示数/℃	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	5	7	9	10
温度计2示数/℃	0	0	0	0	0	0	0	0	1	2	4	7	10	11	12	13
温度计3示数/℃	0	0	0	0	0	0	1	2	3	5	7	8	10	11	12	13

由于室温空气和冰块混合一起，冰块表面已经有些熔化，导致加热开始时3支温度计示数均为0℃。整个过程中最靠下的温度计3升温最快。

第6分钟时，温度计3的示数开始高于0℃，所在烧杯底部的冰已经熔化。第8分钟时，温度计2的示数开始高于0℃。第11分钟时，温度计1的示数开始高于0℃，此时烧杯中的冰仍没有熔化完全，试管中的冰已经明显开始熔化。第16分钟时，烧杯中的冰块完全熔化，此时试管中的冰块仍然没有熔化完。见图2。



(a) 6 min　(b) 8 min　(c) 11 min　(d) 16 min

图2

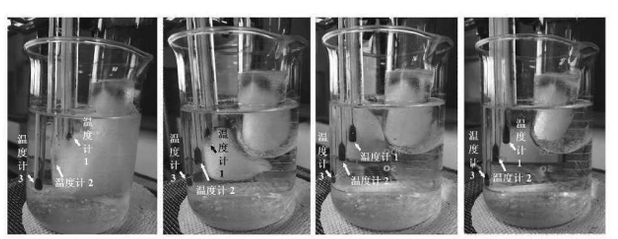
为了减小室温空气混入碎冰块带来的影响，在一开始的时候就将温度计放入水中凝固成整冰块，然后再进行熔化实验，得到的数据见表2。

表2　整冰块化实验数据

加热时间/min	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	16	18
温度计1示数/℃	−7	−7	−5	−3	−2	−2	−1	−1	−1	0	0	0	0	2	3	5	7
温度计2示数/℃	−7	−6	−5	−3	−2	−1	−1	0	0	0	1	3	5	7	9	12	14
温度计3示数/℃	−7	−3	−1	0	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	12	14

整个过程中温度计3仍然升温最快，(因为冰块从四周开始熔化，而温度计3又较为靠近底部和侧壁，因此熔化的时间很短)；温度计2因为更靠近下方和外侧，温度升高得比温度计1更快一些。

第8分钟时，温度计2仍然在冰块中。第11分钟时，烧杯中的冰块已经熔化了大部分，此时温度计1仍然在冰块中，温度计2已经完全位于水中，试管中的冰已经明显开始熔化。第13分钟时，温度计1完全位于水中。第18分钟时，烧杯中的冰块完全熔化，此时试管中的冰块仍然没有熔化完。见图3。



(a) 8 min　(b) 11 min　(c) 13 min　(d) 18 min

图3

3.3　实验结论

用碎冰块进行实验很难克服室温空气的影响，用整冰块进行实验会导致冰块从四周开始熔化，都有一定的不足。但不论如何，正在熔化的冰和熔化成的水的温度并不相同，也并不固定。烧杯中的冰熔化一部分后，试管中的冰就开始了熔化。基于实验可以得到如下明确的结论。

例题1的命题的确存在科学性问题，当烧杯中的冰大部分熔化完成时，A选项描述的现象的确出现，B和C选项描述的现象没有出现，D选项的现象也没有出现(试管中的冰是从接触试管壁和空气的四周开始熔化，并没有自下而上依次熔化)。

晶体熔化过程中，不能随意将“固定的熔化温度”拓展到整个固液混合物，没有熔化的冰和已经熔化成的水，温度都可以与熔点不同。在熔化实验中，温度计的位置放置会直接影响到实验的结果，想要观察到温度计示数保持不变，应使熔化过程慢一些，温度计玻璃泡保持在晶体的熔化位置附近，或者进行搅拌。

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

4　基于理论的分析

例题1的命题出现偏差，其根源在于教学中对晶体和熔点的处理不到位，一些关键概念和信息的界定不够清晰，模棱两可的处理方法最终导致了命题的科学性问题。教学中需要结合初中学生的实际情况适当妥协科学性，但不能教给学生学段内错误的认知，而是要基于认知规律和学科发展性做出适当的考量[1]，要给学生呈现真实的实验过程，让实验情境承载核心素养的发展[2]。

人教版义务教育物理教科书和北师大版义务教育物理教科书，研究晶体熔化的实验完全相同，见图4。人教版教科书对晶体和熔点的阐述为：有些固体在熔化过程中尽管不断吸热，温度却保持不变，有固定的熔化温度，这类固体叫做晶体，晶体熔化时的温度叫做熔点[3]。北师大版教科书的阐述为：物质在熔化过程中虽然吸热，但温度保持不变，这个温度称为它们的熔点，像这样具有确定熔化温度的固体称为晶体[4]。两套教科书对晶体和熔点的阐述看似一致，实则有着本质的不同，对比如表3所示。

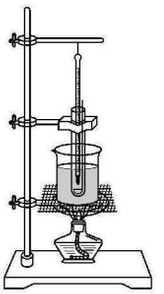


图4　海波熔化

表3　两套教科书对比

认知内容	人教版教科书	北师大版教科书
固体与晶体	固体的范畴大于晶体，即固体分为晶体和非晶体	
固定的温度	熔化过程中，固体的温度不变	熔化过程中，物质的温度不变
概念的界定	先界定晶体，然后利用晶体熔化界定熔点	先界定熔点，然后利用熔点界定晶体

两套教科书都将固体分为晶体和非晶体，但是在晶体和熔点的相互界定上，以及熔化时温度不变的主体对象上，持有不同的观点。想要厘清这些问题，需要从多个角度进行讨论。

4.1　晶态与非晶态

凝聚态，是指由大量粒子组成，并且粒子间有很强的相互作用的系统，固态和液态是最常见的凝聚态。在固体中分子间的相互作用占主导地位，分子无规律热运动处于从属地位。若所有分子都整齐地在空间排列起来，形成周期性的分布点阵，此时内部任一分子的受力都是平衡的。所以完全有序的周期性排列是固体中分子聚集的最稳定的状态，这就是晶体的状态，即晶态[5]。

可见晶体的概念，是基于分子（或原子）的周期性规律分布建立的，晶体最引人注目的特征是其对称性，晶体外观的对称性反映了内在分子排列的对称性，见图5。当分子热运动达到一定程度（即分子平均动能达到一定程度，表现为温度达到一定程度）时，排列分布才能被破坏，而晶体内部的排列稳定且有规律，因此晶体熔化需要确定的温度条件，此所谓晶体的熔点。

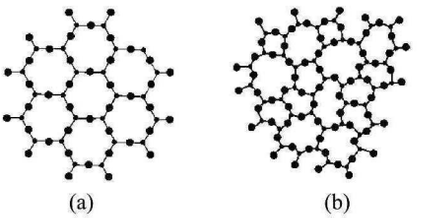


图5　晶态与非晶态

与晶态相对的是非晶态，此时系统内的分子之间仍然依靠相互作用力“固定”了彼此的位置，但分子排列没有规律，打破排列所需要的热运动剧烈程度也各不相同，因此熔化时没有固定的温度条件，即没有熔点。玻璃是最为典型的非晶态的物质，即非晶体。有意思的是，晶体材料也能够在特定的温度和特殊的条件下凝聚为非晶态，比如金属玻璃，它兼有玻璃、金属、固体和液体的特性，是一种新型高性能材料。

4.2　物态的划分

不论是按照体积和外形的宏观表象划分物态，还是从分子间距、分子间作用力等微观层面界定固态、液态和气态，都没有区分“固态”中分子（或原子）的有规律排列和无规律排列。进一步从结构有序性考虑，传统的“固态”可以分为结构有序的晶态和结构无序的非晶态，于是最终得到新的物态划分，见表4。

表4　物态划分

物态		确定体积	确定形状	结构有序
气态		无	无	无
凝聚态	液态	有	无	无
	非晶态	有	有	无
	晶态	有	有	有

在非晶相关的研究领域，非晶态被认为是和气态、液态、固态相并立的第四种常规物质状态[6]，显然，此处的固态专指晶态。处于气态的物质称为气体，处于液态的物质称为液体，处于晶态的物质称为晶体，处于非晶态的物质称为非晶体。非晶的结构和性能并不固定，会随时间发生演化，最为著名的实验当属沥青滴漏实验。这项实验旨在证明物质的性

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

质并不像看上去那样简单，一些物质看上去虽是固体，但实际上具有液体的性质，这正是非晶的特点。沥青滴漏是世界上持续时间最久的物理实验，1944年7月11日，都柏林圣三一学院开始进行该实验，在2013年7月11日，第一次拍到了沥青液滴的滴落，见图6。



图6

可见，晶体和非晶体的概念并不是由熔化时的温度表现来界定的，而是源于内部分子（原子）的分布规律，有无固定的熔化温度只是微观上分子（原子）是否分布有序的宏观体现。两套教科书在晶体和熔点的界定上都不够清晰，但相比之下，人教版教科书通过晶体来界定熔点的做法要更符合实际。

4.3　固定的熔化温度

如果固定的温度是指熔化过程中物质（未限定物态）的温度不变，而且学生在晶体熔化实验中也用温度计测量了固体和液体的混合物温度，那么就很容易衍生出“熔化过程中的冰和水混合物的温度始终都保持为0℃”这样的错误结论。那么使用固体温度不变的表述是否就合理呢？

使原子和原子或分子和分子结合起来的作用力，称为化学键。化学键的强弱是以结合能的大小来衡量的，打破这些化学键需要消耗能量。强的化学键有离子键、共价键和金属键，数量级为$10^0 \sim 10^1$ eV，负责把原子和原子结合成分子或晶体；弱的化学键有范德瓦耳斯键和氢键，数量级为$10^{-2} \sim 10^{-1}$ eV，负责把分子和分子结合成晶体。

因此，晶体熔化过程中的“固定的熔化温度”，其本质应该是打破化学键时分子的平均动能不变，宏观上相当于“0℃的冰吸收热量后熔化成0摄氏度的水”，熔化后得到的水可以继续吸热升温。人教版教科书的固体温度不变的表述，没有关注到熔化后的液体，以及固体到液体的变化过程；北师大版教科书的物质温度不变的表述，是基于熔化的微观过程的阐述，考虑到了固体和液体两方面，但观点不够明确清晰，结合晶体熔化测温操作时仍然容易引起误解。

5　启示与建议

在核心素养理念下，与晶体和熔化相关的教学和命题，需要物理理论的分析，需要真实实验的支撑，才能充分保证其科学性。

熔点是晶体熔化时的宏观温度表现，并非定义晶体的依据。增加“结构有序”这一维度后，气态、液态、晶态和非晶态能够较为清晰地界定区分，这是晶体定义的根源。在处理时需要考虑到学生的认知规律和实情，建议教科书设置“科学窗”简要介绍晶体和非晶体的微观结构差异，从而在行文时先明确晶体的概念，再结合实验表明其熔化时的温度特征，进而界定熔点。

熔化时“固定的温度”也需要界定清楚。晶体熔化成液体时，熔化前后晶体和液体的温度相同，都等于熔点；没有熔化的晶体和已经熔化的液体，温度都可以不等于熔点。所谓“固定的熔化温度”，仅仅在熔化位置针对熔化前后的晶体和液体成立。如果将冰和水进行理想薄面分层，如图7所示，那么0℃薄层代表熔化位置，其他层则代表处于不同温度的冰和水。建议教科书明确熔化前后晶体和液体的温度不变，并限定时间空间范围，即温度不变仅限于熔化位置熔化前后的晶体和液体，帮助学生形成基本的观念[5]。

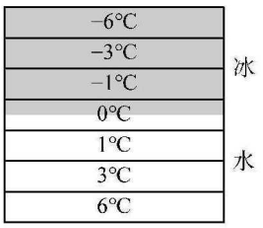


图7

晶体熔化的实验和命题需要注意细节。首先，加热不能太快，热源与熔点温差过大，会让整个容器中的温度梯度加大，温度计的测量区域又有限，便很难观察到熔化时温度持续不变的现象。然后，温度计测量位置应该随着熔化的进程而调整，尽量使温度计一直处于固体和液体的交界面附近，既让测量结果更准确，也避免学生误解熔化时整个容器中都是熔点温度且不变。然后，可以减少容器的容积并配备搅拌棒，这样虽然打破了熔化分层位置，但能够缩小不同位置的温差，可以让容器内部整体的温度近似一致。最后，命题时切忌机械地套用观点，需要进行细致的理论思辨，严格基于真实的实验现象和数据，不能随意更改实验条件，避免出现例题1那样的科学性问题。

参考文献

[1] 蒋炜波. 初中物理教学如何做好科学性妥协[J]. 物理教学，2021，43(05)：39　43，34.

[2] 蒋炜波. 核心素养导向下的“光的反射”教学设计[J]. 物理教学，2021，43(09)：39　42，45.

[3] 彭前程，杜敏. 义务教育教科书物理（八年级上册）[M]. 北京：人民教育出版社，2023.

[4] 闫金铎，苏明义. 义务教育教科书物理（八年级上册）[M]. 北京：人民教育出版社，2023.

[5] 蒋炜波. 教学设计如何指向学生物理观念的培养？[J]. 基础教育课程，2019(08)：56　60.

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net