

让材料科学走近公众: 极端环境金属材料知识的科普转化路径

Bringing Materials Science to the Public: Science Communication Pathways for Metallic Materials in Extreme Environments

供稿|戴冬雷¹, 王喆¹, 葛畅², 崔成凤³ / DAI Donglei¹, WANG Zhe¹, GE Chang², CUI Chengfeng³

内容导读

将极端环境金属材料前沿成果转化为中小学科学教育资源, 核心难点在于调和材料科学学术逻辑与教学逻辑的内在冲突。本文以中国科技馆“科学方法特训营”为实践载体, 以“建设模拟外星科考站”为项目驱动任务, 采用案例研究法, 跟踪7所中学126名初一、初二学生的项目式学习过程, 探索材料科学知识的科普转化路径。研究提出以“工程选材任务逻辑”重构“材料科学知识逻辑”, 将密度、强度、耐腐蚀性、耐热性等材料性能指标嵌入交通科考、环控生保和能源收集等系统设计任务中, 并通过称重、硬度测试、腐蚀观察和耐热演示等活动帮助学生形成直观认识。前后测、任务单和课堂观察结果表明, 该模式能够提升学生对材料性能与服役环境关系的理解, 促进其由单一性能判断转向多因素权衡决策, 并增强知识迁移能力。研究表明, 前沿工程知识的科普转化不应停留于术语简化, 而应重在重构知识组织方式, 使学生在真实任务情境中理解科学概念、工程约束与材料选择之间的关系。该模式可为极端环境材料及其他前沿工程主题进入中小学科学教育提供参考。

极端环境金属材料(高温合金、钛合金等)是国家深空探测战略的核心支撑材料。以中国科技馆“科学方法特训营”的核心任务“建设模拟外星科考站”为例, 其交通科考系统的探测车车身需要轻质高强的钛合金, 环控生保系统的密封舱体需要耐辐射、耐温差的防护材料, 能源收集系统的高温部件需要耐热抗疲劳的高温合金^[1]。材料性能直接决定装备在极端服役环境下的安全与寿命。正是这种关联, 让极端环境金属材料天然具备了连接国家重大科技战

略与中小学科学教育的载体属性。

将材料科学的前沿成果引入中小学课堂, 遇到的困难不只是知识本身的难度。材料科学的知识体系有自己的运行规则——概念的精确性、体系的完整性、推理的严密性。而中小学科学教育遵循另一套逻辑——从学生的已有经验和认知水平出发, 选择适当的呈现方式。两套逻辑之间存在根本性张力^[2]。当前, 材料科学知识的科普工作大多停留在知识介绍和场馆参观层面, 真正把专业知识转化为可操作

课堂任务的教学设计研究较少^[3]。

本研究以中国科技馆“科学方法特训营”的实践为依托，试图回答三个问题：第一，如何将极端环境金属材料的知识逻辑重构为适合初中生的学习任务逻辑？第二，学生在重构后的课程中表现出怎样的学习特征？第三，该模式对前沿科技知识的科普转化有何启示？^[4]

理论基础与分析框架

核心理论资源

课程设计主要依据四个教育理论：

（1）建构主义学习理论认为，学习是学习者基于已有经验主动建构意义的过程，不是被动接收信息。这意味着科普转化要创设问题情境，让学生在解决问题中自己把对材料科学的理解建构出来。

（2）情境学习理论强调，知识内在于具体情境

里之内，脱离情境的抽象概念难以被有效构建意义。工程选材的决策情境正好是材料科学知识产生的原始土壤，把知识“还原”到该情境里去，学生更容易理解它用在什么地方、为什么这样用。

（3）认知负荷理论指出，人的工作记忆容量有限。科普转化要降低外在认知负荷——简化术语、提供可视化工具，同时优化内在认知负荷——重构知识结构、建立清晰的逻辑框架。

（4）最近发展区理论提示，教学应该定位于学生独立完成水平和在他人协助下可实现水平之间的区域。为此，需要设计一些“支架”以帮助学生跨越认知障碍^[5]。

理论向教学设计的转化

这四个理论指向同一个核心设计原则：用工程选材的“任务逻辑”替换材料科学的“知识逻辑”。表 1 给出了理论与教学设计之间的对应关系。

表 1 理论依据与教学设计对应关系

理论依据	核心设计原则	教学实现
建构主义学习理论	知识在问题解决中建构	以“外星科考站选材”为核心驱动性问题
情境学习理论	知识嵌入真实情境	三大子系统（探测车、密封舱、能源部件）选材任务
认知负荷理论	降低外在负荷、优化内在负荷	《选材决策矩阵》、探究站“预测—操作—记录—反思”流程
最近发展区理论	提供学习支架	分层任务设计、决策框架、小组角色结构化

这个框架的核心逻辑是：材料科学的学术逻辑按“概念→机理→应用”纵向展开；教学转化以后，按“需求→性能→选型”的任务逻辑横向组织，让知识服务于问题解决。

研究设计

研究对象与课程设计

研究在中国科技馆“科学方法特训营”项目中进行。对象是北京市东城区 7 所中学的初一、初二学生，共 126 人。所选学校均为东城区科技教育特色校，具有开展科创社团或课后服务课程的条件。课程设置于课后服务时段，每周 1 次，每次 90 min，一共 8 周。

课程以“建设模拟外星科考站”为核心任务，围绕 3 大系统设计 3 个子任务，每个子任务包含材料性能探究和选材决策 2 个环节。整体流程为：情境

导入（1 课时）→材料性能探究（3 课时）→选材决策（2 课时）→作品制作与展示（2 课时）。

数据收集与分析方法

研究采用案例研究法，通过 4 个渠道收集数据^[3]：

（1）前后测问卷。课程开始和结束时各进行一次，测量学生对密度、强度、耐腐蚀性、耐热性 4 个概念的理解，采用 4 级李克特量表，附加一道开放式应用题（“为南极科考站选择保温杯材料”）。

（2）学生任务单。收集学生在 3 个探究活动和选材决策环节填写的任务单，分析其概念表述和决策过程。

（3）课堂观察记录。研究者以参与式观察者的身份记录课堂互动、小组讨论和学生提问，每次课后整理观察笔记。

（4）半结构化访谈。课程结束后，从每所学校

随机抽2名学生（共14人）做15 min访谈，了解其学习体验和迁移应用情况。

数据分析方面，前后测问卷采用配对样本检验，分析各概念理解水平的变化；开放式应用题按“正确—部分正确—错误”三级编码。定性数据方面，任务单按“前概念表现”“决策维度数量”“迁移表现”分类编码；访谈录音转录后，用主题分析法提炼关键发现^[3]。

课程设计与实施

专业知识的教学转化路径

本研究核心挑战在于：如何将“极端环境金属材料

料”这一专业领域知识，转化为初中生可动手操作、能理解的课堂活动，同时保持其与和深空探测真实情景的关联^[1]。表2展示了具体的转化路径。

表2的转化逻辑可概括为：从深空探测的真实需求出发，逐步转化为学生可操作的认知活动。不讲钛合金的密度数值，而从“探测车为什么要轻”切入；盐水腐蚀实验虽不等于太空辐射腐蚀，但两者共享“环境会破坏材料，选材时得考虑能用多久”这个逻辑；高温合金的耐热性用教师演示呈现，让学生看到“普通钢材高温下会变软，高温合金不会”；3个子情境任务把分散的性能知识整合成完整的选材决策，核心思维是“性能服务于工况”。

表2 专业知识—课堂活动—认知目标转化^[1]

专业知识	与深空探测的关联	认知目标	课堂活动	活动类型
钛合金轻质高强	探测车在低重力、崎岖地形行驶，重量直接影响发射成本	理解材料越轻，发射成本越低；但轻的同时必须足够坚固	称重实验：比较铝、铁、钛合金样品的重量	类比实验
高温合金耐热抗疲劳	能源部件需在数百摄氏度高温下长期稳定工作	理解材料在高温下不能软化、变形、快速老化	教师演示不同金属在酒精灯加热下的变化	演示实验
环境腐蚀与材料寿命	外星科考站需在强辐射、腐蚀性环境中长期运行	理解材料会因环境侵蚀而失效，选材时必须考虑“能用多久”	腐蚀观察实验：观察不同金属在盐水中的生锈速度	类比实验
多指标工程选材	真实工程中没有“万能材料”，必须在多项指标间权衡	理解选材不是找“最好的材料”，而是找“最合适的材料”	选材决策矩阵：为每个部件选材并说明理由	决策模拟
材料性能与服役环境匹配	太空环境：低温交变、强辐射、真空	理解选材必须考虑“用在什么地方”“会遇到什么环境”	3大子情境任务：探测车、密封舱、能源部件	情境驱动学习

知识重构：以工程选材逻辑置换材料科学逻辑

材料科学的知识体系按学术逻辑分成3个层次：基础概念层（密度、强度、耐热性等）、机理理解层（合金元素作用、微观组织影响）、设计应用层（选材原则、工艺路线）。前两个层次对初中生来说门槛太高。

本研究转化思路，采用工程选材的决策逻辑组织学习内容——明确部件工况需求→对比材料性能参数→做出选型决策。这条逻辑线清晰、可操作，适应初中生的认知水平。重构后的学习内容由一个核心驱动性问题贯穿始终：“建设外星科考站，不同部件应如何选择金属材料？”^[3]

探究活动设计

围绕转化表2中5类专业知识的认知目标，设

计了4个探究活动（含1个教师演示实验）。每个活动均遵守“预测—操作—记录—反思”4步，其目的是激活前概念、制造认知冲突、促进概念转变^[6]。

（1）探究活动一：称重实验——建立“密度”与“轻质高强”的直观感受。用天平称相同体积的铝块、铁块、铜块和钛合金样片，比较其重量。活动流程：先让学生猜“同样大小的4种金属，哪个最重？哪个最轻？”再分组称量记录。最后讨论“为什么探测车用钛合金不用铁？”“铁更重，是否一定更好？”。通过直接对比建立“密度”的直观感受，为理解“钛合金轻质高强”提供经验基础。

（2）探究活动二：硬度测试实验——建立强度与硬度的区分认识。用简易划痕工具测试几种金属的表面抗划伤能力。需要说明：划痕实验主要反映硬度（表面抗划伤能力），不等于强度（抵抗变形和

断裂的能力)。教学中须明确区分这2个概念——硬度是“表面多硬”，强度是“整体多结实”。活动流程：先让学生猜“哪种金属最不容易被划伤？”；再分组测试记录，最后讨论“硬的材料一定强吗？”“钛合金比铁轻但划痕更浅，这说明什么？”，帮学生区分硬度与强度，理解钛合金“高强”的含义。

(3) 探究活动三：腐蚀观察实验——建立“环境腐蚀”与“材料寿命”的直观感受。将几种金属样品置于盐水，观察其一周内的生锈/腐蚀情况。活动流程：先让学生猜测“哪种最耐腐蚀？”，然后每天观察记录，最后讨论“为什么科考站的密封舱不能随便选一种金属？”“盐水和太空辐射不一样，但工程师都要问同一个问题——这个材料能在太空辐射环境下用多久？”。教学中需明确说明：盐水腐蚀是生活可感知的类比实验，不等同于太空辐射，但两者共享“环境与材料寿命关系”这个核心逻辑。

(4) 探究活动四（教师演示）：耐热对比演示——建立“耐热性”与“高温服役”的直观感受。教师用酒精灯分别加热普通铁片和高温合金样片，学生观察颜色变化和变形情况。出于安全限制，学生不能直接操作该实验。活动流程：先猜测“两种金属加热后会有什么不同？”再观察记录，最后讨论“为什么发动机要用高温合金？”“如果用了普通铁片会怎样？”，把“高温合金耐热抗疲劳”这个专业知识用可

视化的方式呈现出来。

上述4个活动共同支撑3大子系统的选材决策：称重站加硬度测试站为探测车选材提供依据，腐蚀观察站为密封舱选材提供依据，耐热演示为能源部件选材提供依据。

选材决策工具

为了降低选材决策的认知负担，本研究设计了《选材决策矩阵》，把决策过程分为4步：明确环境挑战→列出性能要求→对比候选材料→做出选型决策。依据认知负荷理论，该工具把复杂决策分解成可操作的小步骤，将部分认知加工“卸载”到外部工具上，将学生的认知资源解放出来，用于更高层次的权衡判断。

教学效果与问题分析

概念理解的显著提升

课程开课前、结课后各发放1套问卷，测量学生对密度、力学强度、耐蚀性、高温稳定性四大核心概念认知水平，采用4级李克特量表（1=完全不理解，2=基本理解，3=大部分掌握，4=完全掌握），全部有效回收问卷126份无缺失样本。

126名学生前后测李克特量表得分统计如表3所示，配对样本检验值显示4项指标后测均值均显著高于前测均值。

表3 4大材料性能概念前后测得分对比

性能维度	前测均值±标准差	后测均值±标准差	平均提升幅度	检验值	显著性水平
密度认知	1.62±0.41	3.37±0.35	1.75	32.61	<0.001
力学强度认知	1.58±0.44	3.29±0.38	1.71	30.25	<0.001
耐腐蚀性认知	1.65±0.39	3.32±0.36	1.67	31.08	<0.001
耐热性认知	1.54±0.42	3.31±0.34	1.77	33.14	<0.001

前后测问卷显示，学生在4个核心概念上的理解水平都有明显提高。约81.7%的学生在密度、强度、耐腐蚀性、耐热性这些概念的理解上，从课前的普遍偏低水平提升到了课后的普遍良好水平。

开放式应用题（“为南极科考站选择保温杯材料”）要求运用选材决策框架。课后能从多因素（保温、耐低温、重量、成本）角度进行分析的学生比例明显增加，57.9%的学生能运用课程所学的框架

完成分析^[2]。

前概念干扰的有效转变

课前任务单显示，41.3%的学生带着“越重的材料越结实”“铁是最强的金属”这类前概念。课堂观察发现，称重实验里学生看到铝比铁轻但硬度测试中铝的表现并不差时，不少人露出困惑的表情。

经“飞机为什么不用铁做机身”追问之后，学生在任务单里开始出现概念转变的痕迹。课后访谈

中，部分学生表达了类似的感受：“以前我觉得重的东西才结实，现在知道轻的东西也可以很结实，要看用在什么地方。”课后能正确区分“重量”和“强度”的学生比例，比课前提升了 29.3%。

单一维度思维的有效突破

第一次做选材决策时，65.1% 的学生只看一个指标，典型说法是“钛合金最轻，就选它”。引入成本和加工难度约束条件并通过小组辩论，学生的决策维度明显变多了。第二轮决策中，能同时考虑多个指标的学生比例提升 31.7%。

典型案例如下：一个小组在探测车选材时坚持“钛合金最轻，就选它”，完全不考虑成本。经过“预算有限”的情境调整和小组辩论，该小组调整为“车身主体用铝合金，关键受力部件用钛合金”。另一个小组在密封舱选材时列出了强度、耐腐蚀、重量、成本 4 个指标，逐项打分并加权计算，最终选择了“铝合金加防护涂层”方案，汇报时清晰阐述了选材理由。

浅层参与的识别与有效干预

课堂观察发现，约 24.6% 的小组存在“浅层参与”的问题：一两个学生包揽了操作和讨论，其他人处于旁观状态。在实施结构化小组角色（记录员、材料员、汇报员、质疑员轮换）之后，浅层参与的情况明显改善，原本被动的学生发言次数明显多了起来。

一个原来不怎么说话的学生在访谈中表示：“当汇报员那次，我必须把小组的想法讲清楚，所以第一次认真听他们讨论，还问了几个问题。”这说明角色结构化不只是分配了任务，更重要的是创造了参与的必要条件。

情境依赖与迁移表现

经过“去情境化”提炼环节，再给学生一个生活化的迁移任务（“为郊游选水壶材料”）。接受过提炼环节的学生的表现明显优于未接受该环节的学生，迁移成功率提高了 39.2%。提炼环节的核心即引导学生总结一般性的决策步骤：明确需求→列出选项→对比性能→权衡取舍→做出决策。

课后访谈中，64.3% 的学生能清楚复述该决策框架，其中 80.2% 的学生能在新情境里主动运用。

一个学生说：“选水壶的时候，我想的是——要轻、要保温、要结实、不要太贵，然后对比不锈钢和钛合金，最后选了钛合金，虽然贵一点但是轻很多。”

讨论

主要发现与理论意涵

本研究的核心发现是：用“工程选材任务逻辑”来组织材料科学知识，能有效促进初中生对材料性能概念的理解和选材决策能力的发展^[3]。其理论意涵在于：知识呈现的组织逻辑比知识本身的简化程度更重要。认知负荷理论强调知识结构的内在逻辑会影响学习效果^[6]，本研究验证了该判断——将学术逻辑转成任务逻辑，本质上是优化了知识的内在认知负荷。

研究还识别了 4 类典型教学问题——前概念干扰、单一维度思维、浅层参与、情境依赖，并验证了相应的干预策略的有效性^[6]。这些发现丰富了建构主义学习理论在科普教育场景里的应用，特别是“认知冲突强度”对概念转变的关键作用：反直觉实验之所以有效，正是因为制造的认知冲突足够强，使学生没法通过“同化”来回避矛盾。

适用边界与推广条件

本模式适合初中阶段的材料科学启蒙教学^[2-3]，聚焦材料性能的宏观认知和工程选材的系统思维培养。

推广该模式需要满足以下条件：（1）具备与专业知识对应的生活化或情境化类比实验；（2）教师接受过工程思维和项目式教学的前期培训；（3）课程有足够的课时保障（建议不少于 8 课时）。

研究局限

研究的局限性也很明显。（1）样本量不大，而且都来自东城区的科技教育特色校，结论是否能够推广到别的学校有待更大范围的验证。（2）课程只有 8 周，对学习效果的长期保持和迁移能力追踪不够。（3）受实际条件限制，未设置严格的对照组，因果推断的能力有限。（4）部分评价指标依赖研究者编码，可能存在主观偏差。后续研究可以在上述方向上继续深入^[2-3]。

结束语

本研究以中国科技馆“科学方法特训营”为平台，提出并验证了极端环境金属材料知识的科普转化路径：用工程选材的“任务逻辑”替换材料科学的“知识逻辑”，让学习内容从“是什么”转向“用在哪里、怎么选”。

在课程设计层面，工程选材的任务逻辑可以作为材料科学知识科普转化的组织框架。“需求-性能-选型”这个3步法降低了知识的认知负荷，让学生在解决真实问题的过程中建构理解。专业知识-课堂活动-认知目标的转化表，可以作为同类科普转化设计的参考工具。

在学习表现层面，经过8周课程，约81.7%的学生在材料性能概念理解上取得了显著进步，整体理解水平从课前的普遍偏低提升到了课后的普遍良好。在选材决策中，57.9%的学生能够从单一维度判断转向多因素权衡。“去情境化”提炼环节使知识迁移成功率提升了39.2%。验证了认知冲突策略、决策矩阵、角色结构化、迁移任务等干预策略对前概念干扰、单一维度思维、浅层参与、情境依赖4类科普转化中典型教学问题的有效性。

在推广性层面，本模式可以迁移到其他前沿工程知识（如新能源材料、复合材料、生物材料）的科普转化上，关键在于识别该领域的“任务逻辑”，用类似的“需求-性能-选型”框架来组织学习内容。

参考文献

[1] 邹艳芬, 刘立文, 李云龙, 等. 从地球到深空: 极端服役条件

下的增材制造技术研究进展[J/OL]. 材料工程, (2025-12-25) [2026-04-19]. <https://link.cnki.net/urlid/11.1800.TB.20251224.1448.004>

- [2] 陈磊, 王晨昱. 馆校结合 STEM 教育的实践探索——以“创意制作恐龙绘本”为例. 中小学信息技术教育, 2024(11): 83
- [3] 陈松, 任琼瑶. 基于 PBL 理念的初中物理跨学科实践教学探索——以“自制天文望远镜”为例. 湖南中学物理, 2026, 41(5): 80
- [4] 李学玲, 杨玉琴, 周志源, 等. 基于真实情境的任务驱动式学习设计——高铁建设中金属材料的选择. 化学教学, 2021(11): 54
- [5] 叶建青. 基于工程思维的“海带中碘的提取”微项目教学. 中学化学教学参考, 2025(17): 40
- [6] 郑小平. 深度学习视域下初中物理错误前概念的转变策略——以人教版“平面镜成像”为例. 中学物理, 2023, 41(22): 42

作者简介: 戴冬雷 (1982—), 女, 江苏省盐城人, 北京市东城区教育科学研究院教师。2004年毕业于南京师范大学应用化学(环境保护与治理方向)专业, 主要研究方向: 科学教育、馆校协同、课程开发、拔尖创新人才培养。参与组织实施中国科技馆“科学方法特训营”东城区项目。通信地址: 北京市东城区东公街9号; E-mail: 13810803182@163.com。

王喆 (1978—), 女, 北京人, 北京市东城区教育科学研究院课程运行部主任。研究方向: 区域课程, 创新人才培养。通信地址: 北京市东城区东公街9号。

葛畅 (1996—), 河南省驻马店人, 中学物理教师, 2025年毕业于中国科学院大学材料与化工专业, 主要研究方向: 新能源材料。通信地址: 北京市东城区培新街6号。E-mail: 15652565711@163.com。

崔成凤 (1996—), 女, 山东省德州人, 中学物理教师, 2022年毕业于北京科技大学物理学专业。主要研究方向: 金属或合金在高温高压下的物理特性。通信地址: 北京市东城区夕照寺街13号。E-mail: cuichengfeng2018@163.com。