

多维度探析磷酸铁锂电池结构

——基于问题链的“物质结构与性质”高三复习课

摘要：以磷酸铁锂电池为载体，设计了一节基于问题链的“物质结构与性质”高三复习课。围绕电池的正极、负极、电解液三大组成部分，按“原子结构→分子结构→晶体结构→综合应用”的梯度设置四个递进任务，以六个问题链驱动学生从电子排布逐步深入到晶胞计算与性能分析。问题链的设计以“结构决定性质”为主线，将原子核外电子排布、VSEPR模型与杂化轨道、分子间作用力、晶体类型与均摊法等分散知识点串联为有机整体，在具体材料的结构分析中完成全模块知识的系统回顾与结构化整合。

关键词：问题链；磷酸铁锂电池；物质结构与性质；高三复习课

一、教学主题内容及教学现状分析

“物质结构与性质”是高中化学选择性必修模块，涉及原子结构、分子结构与晶体结构三大知识板块。本节课以磷酸铁锂电池各组成部分的结构探析为主题，涉及的核心知识包括：（1）原子结构与元素性质，涉及核外电子排布、电离能、原子/离子半径递变规律等；（2）分子/离子结构与性质，涉及VSEPR模型、杂化轨道理论、配位键、 σ 键与 π 键、分子极性、分子间作用力等；（3）晶体结构与性质，涉及晶体类型判断、均摊法、晶胞密度计算等。在问题链驱动的探究活动中复习这些核心知识，帮助学生在具体材料的结构分析中实现全模块知识的系统回顾与结构化整合，促进“结构决定性质”学科观念的形成。

《普通高中化学课程标准（2017年版2020年修订）》强调以真实情境为测试载体、以实际问题为测试任务^[1]。在实际教学中，“物质结构与性质”模块的知识点分散、概念抽象，学生容易陷入“背概念、记结论”的困境，缺乏从微观结构层面理解物质性质的系统性思维。尤其在高三年级复习阶段，如何在有限课时内帮助学生实现知识的整合与结构化，是一线教师面临的现实问题^{[2][3]}。

问题链教学以递进式问题驱动学生思维，通过环环相扣的问题引导学生从已知走向未知。在复习课中，围绕某一主题精心设计问题链，能够将分散的知识点串联为有机整体，使情境、问题和任务融为一体，帮助学生在问题解决过程中实现知识的结构化与思维能力的提升^{[2][4][5]}。

磷酸铁锂电池是当前新能源领域的热点材料，其结构涉及原子结构（Fe的电子排布与价态变化）、分子/离子结构（ PO_4^{3-} 、 PF_6^- 的空间构型与配位方式）以及晶体结构（ LiFePO_4 的橄榄石结构、石墨层间化合物）三个结构层级，是实现全模块复习的理想载体。基于此，本节复习课围绕磷酸铁锂电池设计真实情境，以六个问题链驱动学生从电子排布逐步深入到晶胞计算与性能分析，在具体材料的探析过程中活化相关知识，发展化学学科核心素养。

二、学情分析

1. 经过新授课的教学，学生已掌握原子核外电子排布规则、VSEPR模型与杂化轨道理论、晶体类型与均摊法等基础知识。但在面对磷酸铁锂电池这类综合性陌生情境时，学生较难自主调用分

散在三个知识板块中的相关知识来分析同一材料的不同结构维度，反映出提取知识的线索单一，跨模块整合能力有待提高。

2. 学生已知道可以通过分析微粒间作用力来解释物质的性质，但在实际应用中常常出现概念混淆的情况。例如，将共价键能用于解释分子晶体的熔沸点差异，或用分子间作用力解释物质的化学稳定性。这反映出学生对知识的应用边界认识尚不清晰，需要在综合情境中加以辨析和强化。

三、教学思想与创新点

1. 以问题链驱动全模块知识的结构化复习

本课以六个递进问题链作为教学主线，覆盖原子结构、分子结构与晶体结构三大知识板块。问题链之间按“原子→分子→晶体→综合”的认知梯度展开，每个问题链内部也遵循由浅入深的递进逻辑，使知识整合发生在问题解决的过程中而非单纯的归纳总结环节。与常规复习课按知识点线性罗列的方式不同，问题链以电池材料的真实问题为线索，将分散的知识点串联为因果链，避免了单一知识点的孤立复习。

2. 以真实情境为载体串联分散知识点

磷酸铁锂电池的四个组成部分（正极、负极、电解液、隔膜）分别对应不同的结构维度。正极材料 LiFePO_4 涉及原子结构与分子结构（Fe 的电子排布、 PO_4^{3-} 构型），电解液 LiPF_6 和 EC/DMC 涉及分子结构与分子间作用力（配位键、杂化、极性），负极石墨与正极 LiFePO_4 又共同指向晶体结构（均摊法、晶胞密度）。情境本身即为知识组织提供了逻辑框架，使每个结构知识点的复习都有具体的材料附着点。

3. 从定性分析到定量计算的梯度设计

六个问题链的认知层级从电子排布的识记逐步上升到三维晶体结构的想象和定量计算。任务 1 从价电子排布书写（识记）过渡到离子半径比较与结构适配性分析（分析解释）；任务 3 从石墨的晶体类型判断（识别）上升到 Li_xC_6 化学式推导（应用推理）和晶胞密度计算（定量计算）；任务 4 进一步延伸到理论比容量推导和脱嵌率计算，在全课收束环节实现从结构分析到性能解释再到定量计算的完整闭环。

四、教学目标

1. 通过探析磷酸铁锂电池各组成部分的微观结构，复习原子结构、分子结构与晶体结构的基础知识，建立“结构决定性质”的化学观念。

2. 通过问题链的逐层推进，形成从微观结构层面认识物质的分析思路，发展证据推理与模型认知素养。

3. 通过定量计算与结构稳定性分析，感受化学材料在新能源领域中的应用价值，增强科学态度与责任感。

五、教学流程

本复习课的教学流程见图 1。四个任务按“原子结构→分子结构→晶体结构→综合应用”纵向递进：问题链 1~6 内部为知识深度的纵向递进，在单一结构维度内逐层深入；任务 4 的三个问题则为分析视角的横向递进，跨维度调用前序知识完成综合应用。两类递进并行，构成“纵向深入、横向综合”的二维认知路径。

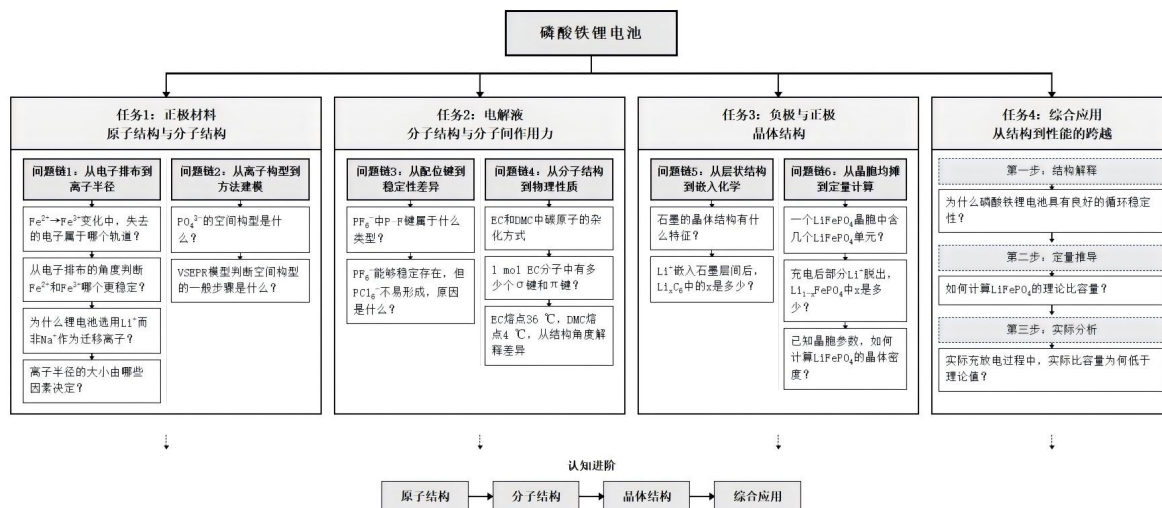


图 1 问题链驱动的磷酸铁锂电池复习课整体架构

任务 1 对应正极材料，包含问题链 1（电子排布→离子半径）和问题链 2（VSEPR 模型）；任务 2 对应电解液，包含问题链 3（配位键）和问题链 4（分子间作用力）；任务 3 对应负极和正极的晶体结构，包含问题链 5（层状结构）和问题链 6（晶胞计算）；任务 4 为综合应用，将前三任务的结构知识整合到循环稳定性和比容量分析中。六个问题链分别指向原子结构、分子结构（VSEPR）、配位键、分子间作用力、晶体结构、定量计算六个知识板块，覆盖“物质结构与性质”模块的核心考点。

六、教学实录

任务 1：正极材料——原子结构与分子结构

问题链 1：从电子排布到离子半径

情境：LiFePO₄充放电过程中的电子转移与 Li⁺迁移

[教师问题] LiFePO₄充电时 Fe²⁺→Fe³⁺，失去的电子属于哪个轨道？

[学生回答] 属于 3d 轨道。Fe²⁺的价电子排布是 3d⁶，失去一个电子后变成 3d⁵。

[教师追问] 有同学认为是 4s 轨道，因为书写电子排布式时先写 4s 后写 3d。大家的判断是什么？

[学生讨论后回答] 失电子时先失 4s 电子，但 Fe²⁺已经是 Fe 失去 2 个电子后的状态，电子排布为 [Ar]3d⁶，再失电子只能从 3d 轨道失去。

[教师归纳] 一是简化电子排布式的书写（Fe²⁺为 [Ar]3d⁶），二是失电子顺序——先失 4s 后失 3d，但 Fe²⁺的 4s 轨道已空，3d 有 6 个电子，再失一个电子必然来自 3d。这就是原子核外电子排布与价态变化之间的逻辑关联。

[教师问题] Fe²⁺和 Fe³⁺哪个更稳定？如何从电子排布的角度判断？

[学生回答] Fe^{3+} 更稳定。 $3d^5$ 是半充满结构，根据洪特规则，半充满时能量更低、电离能更大，所以 Fe^{2+} 容易再失去一个电子达到半充满状态。

[教师归纳] 用洪特规则的特例（半充满稳定性）来解释离子稳定性的差异，同时将“电离能大小”与“电子排布”关联起来——电离能不是孤立的数据，它的数值大小背后有电子排布的结构依据。

[教师问题] 为什么锂电池选用 Li^+ 而非 Na^+ 作为迁移离子？从离子半径角度分析。

[学生回答] Li^+ 半径比 Na^+ 小，更易在正负极材料中脱出和嵌入。

[教师追问] 离子半径的大小由哪些因素决定？如果把 Li^+ 换成 Mg^{2+} 呢？

[学生回答] 电子层数—— Li^+ 比 Na^+ 少一层电子，半径小；核电荷数——同周期元素从左到右核电荷数增大，对电子吸引增强，半径减小。 Mg^{2+} 与 Li^+ 电子层数相同，但核电荷数更大，所以半径更小。

[教师归纳] 离子半径比较的两个维度：电子层数和核电荷数。 Mg^{2+} 虽然半径更小，但二价离子迁移需要的能量更大，所以锂电池最终还是选用 Li^+ ——这就说明结构分析需要结合功能需求，不能只看单一因素。

设计分析：以充放电的氧化还原现象为切入点，将 Fe 的价态变化与核外电子排布关联，回顾了价电子排布式书写、半充满稳定性判断、第一电离能、原子/离子半径递变规律等原子结构核心知识。两个核心问题分别对应电子转移和离子迁移两条线索，共同指向“电子排布→离子半径→结构适配性”的认知链条，为后续理解 Li^+ 嵌入提供结构基础。其中 Mg^{2+} 的对比追问，使学生意识到结构分析需要综合多个因素，初步建立“结构适配”的分析意识。

问题链 2：从离子构型到方法建模

情境：正极材料 LiFePO_4 中 PO_4^{3-} 的构型判断

[教师问题] PO_4^{3-} 的空间构型是什么？请运用 VSEPR 模型进行分析。

[学生回答] P 原子的价层电子对数为 4，其中成键电子对为 4，孤电子对为 0。因此 VSEPR 模型为正四面体，分子空间构型也是正四面体，P 原子采取 sp^3 杂化。

[教师追问] 回顾一下 VSEPR 模型判断空间构型的一般步骤是什么？

[学生思考后] 先确定成键电子对数和孤电子对数，再计算价层电子对数，得出 VSEPR 模型，最后结合孤电子对确定分子的实际空间构型和中心原子的杂化类型。

[教师归纳] 对，VSEPR 模型只关心 σ 键电子对和中心原子上的孤电子对，不关心 π 键和配位键。这一点正是该模型的边界所在——它能预测构型，但不能解释成键的本质。完整理解一个离子或分子，还需要后续的杂化轨道理论和价键理论来补充。

设计分析：以一道具体题目为载体，从 PO_4^{3-} 的构型判断出发，回顾 VSEPR 模型的一般分析步骤。在具体应用中完成 VSEPR 模型与杂化轨道理论的系统复习，体现了“以题载法”的复习课设计思路。

任务 2：电解液——分子结构与分子间作用力

问题链 3：从配位键到稳定性差异

情境：电解液 LiPF_6 中 P 的成键方式

[教师问题] PF_6^- 中 P-F 键属于什么类型？P 原子和 F 各扮演什么角色？

[学生回答] 属于配位键。P 原子提供空轨道（P 的 3d 轨道），F 提供孤电子对，二者形成配位键。

[教师追问] PF_6^- 能够稳定存在，但 PCl_6^- 不易形成，原因何在？

[学生回答] F 原子半径小、电负性大，P-F 键键能大，形成的配位键稳定；而 Cl 原子半径大，P 周围空间不足以容纳 6 个 Cl 原子，空间位阻大，P-Cl 键键能也较小。

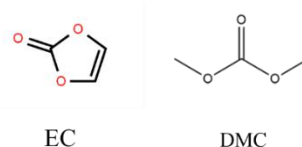
[教师归纳] 这里归纳出配位键稳定性的两个分析维度：一是键能（从电负性和原子半径来理解），二是空间位阻（从配体原子的大小来理解）。这两个维度的分析思路，同样可以用来解释其他配位化合物的稳定性差异——比如过渡金属配合物的稳定性比较。这在复习了配位键形成条件 c 基础上，进一步建立了配位键稳定性的分析方法。

设计分析：以 LiPF_6 为具体化合物，在配位键的判断与稳定性对比分析中完成配位键知识的系统回顾。从 PF_6^- 与 PCl_6^- 的稳定性差异切入，从键能和空间位阻两个角度分析原因，并延伸到过渡金属配合物的稳定性分析，帮助学生建立从结构角度解释物质稳定性的通用分析框架。

问题链 4：从分子结构到物理性质

情境：锂电池电解液常用的两种溶剂 EC 和 DMC

电解液溶剂碳酸乙烯酯（EC）可以提供高介电常数解离锂盐，碳酸二甲酯（DMC）起到调节电解液黏度的作用，结构如图。



[教师问题] EC（碳酸乙烯酯）和 DMC（碳酸二甲酯）分子在结构上有哪些差异？我们从三个层次来分析。

[教师讲述] 首先看层次 1——碳原子的杂化方式。

[学生回答] EC 中亚甲基（ $-\text{CH}_2-$ ）的 C 为 sp^3 杂化，羰基（ $\text{C}=\text{O}$ ）的 C 为 sp^2 杂化。DMC 中甲基（ $-\text{CH}_3$ ）的 C 为 sp^3 杂化，羰基 C 为 sp^2 杂化。

[教师问题] 层次 2——1 mol EC 分子中有多少个 σ 键和 π 键？大家先画出 EC 的结构简式再计数。

[学生画图后回答] EC 是一个五元环，结构为环状碳酸酯。分子中有 8 个 σ 键，有 2 个 π 键。所以 1 mol EC 分子中含 8 mol σ 键和 2 mol π 键。

[教师追问] 有几个同学一开始回答 6 个 σ 键，漏掉了哪个键？

[学生] 漏掉了结构简式省略掉的 C-H 键。

[教师问题] 层次 3——EC 的熔点为 36°C ，DMC 的熔点为 4°C ，相差 32°C 。从结构角度解释这一差异。

[学生回答] EC 是环状分子，结构不对称，分子极性大，分子间作用力强；DMC 是链状对称结构，分子极性小。因此 EC 熔点高于 DMC。

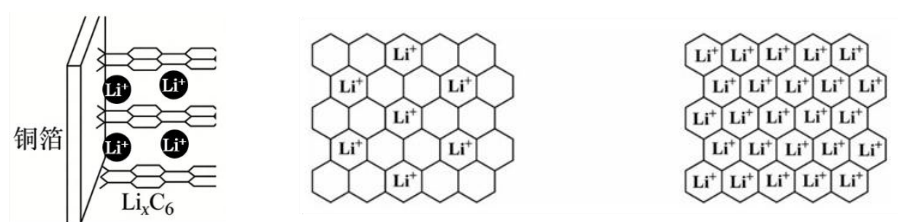
[教师归纳] 这里我们走完了完整的推理链：分子结构→分子极性→分子间作用力→宏观物理性质（熔点差异）。

设计分析：三个层次从杂化方式到 σ/π 键分布再到熔点差异的反向追溯，在对比分析中完成了分子结构模块的覆盖式复习。层次1从杂化方式切入，建立分子的基本构型；层次2细化到 σ 键和 π 键的分布，其中环状结构的计数易错点是高三复习中常见的盲区；层次3从熔点数据出发反推结构差异，形成“分子结构→分子极性→分子间作用力→宏观性质”的完整推理路径。三个层次将杂化轨道、 σ 键与 π 键、分子极性、分子间作用力等分散知识串联为有机整体。

任务3：负极与正极——晶体结构

问题链5：从层状结构到嵌入化学

情境：石墨作为锂电池负极材料的层状结构



[教师问题] 石墨的晶体结构有什么特征？从碳原子的杂化方式、层内和层间的作用力角度分析。

[学生回答] 碳原子采取 sp^2 杂化，层内以共价键连接形成二维网状结构，层间靠范德华力维系。石墨属于混合型晶体，层内有自由移动的电子，因此能导电。

[教师追问] “自由移动的电子”这个表述准确吗？石墨的导电机制和金属一样吗？

[学生思考后] 不完全一样。石墨中每个碳原子有一个未参与杂化的 p 轨道电子，这些电子在层内形成离域 π 键，可以沿层平面方向自由移动。所以石墨能导电，但导电具有各向异性——层内导电性好，层间几乎不导电。这和金属中自由电子在三维方向都能移动不同。

[教师归纳] 对，石墨的导电靠的是离域 π 电子在层内的平面移动，而不是金属晶体中的自由电子。这也说明为什么石墨只能在层平面方向导电。

[教师追问] Li^+ 嵌入石墨层间后，实验测得每个 Li^+ 周围配位 6 个碳原子。 Li_xC_6 中的 x 是多少？

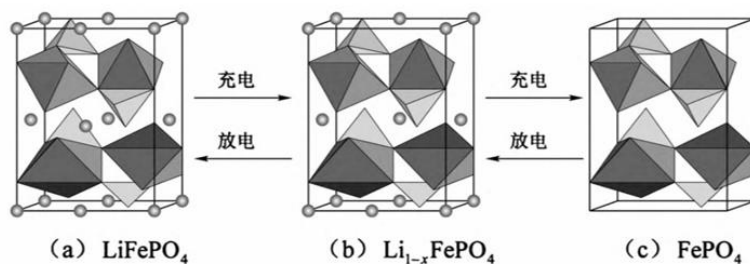
[学生回答] 每个 Li^+ 对应 6 个 C，所以 $x=1$ ，化学式为 LiC_6 。

[教师归纳] 这里将均摊法从常规的晶胞计数迁移到层状化合物的离子配位数。虽然对象不同，但“均摊”的思想——从一个重复单元的比例推整体化学式——是完全一致的。这是均摊法的一种灵活应用。

设计分析：从“石墨为何能作负极”这一驱动性问题展开，通过分析石墨的晶体结构回顾了混合型晶体的判断依据，并重点辨析了石墨导电性与金属导电性的差异——从“自由电子”到“离域 π 电子”，深化了学生对混合型晶体导电机制的理解。将均摊法从常规的晶胞计数迁移到层状化合物的离子配位数，在晶体结构层面完成“结构特征→功能应用”的分析闭环。

问题链6：从晶胞均摊到定量计算

情境： $LiFePO_4$ 的橄榄石结构



[教师问题] 一个 LiFePO_4 晶胞中含几个 LiFePO_4 单元？根据 Li^+ 在晶胞中的占位进行计算。

[学生回答] Li^+ 位于顶点（8 个，各贡献 $1/8$ ）、棱上（4 个，各贡献 $1/4$ ）和面心（4 个，各贡献 $1/2$ ）。总数为： $8 \times 1/8 + 4 \times 1/4 + 4 \times 1/2 = 4$ 个 Li^+ ，即 4 个 LiFePO_4 单元。

[教师问题] 充电后部分 Li^+ 脱出， $\text{Li}_{1-x}\text{FePO}_4$ 中 x 是多少？如何确定？

[学生回答] 对比充电前后晶胞中 Li^+ 的位置和数量变化，根据剩余 Li^+ 的占位可以计算脱嵌率 x 。

[学生计算后] 脱出 Li^+ 的数目 = $1 \times 1/4 + 1 \times 1/2 = 3/4$ 个。原来有 4 个 Li^+ ，脱出 $3/4$ 个，剩余 $13/4$ 个，所以 $x = 3/16$ 。

[教师归纳] 这一问把静态的均摊法用到了动态过程中。原来只需要数一个晶胞有几个 Li^+ ，现在还要根据充电后的情况重新数。这就是均摊法的变式应用——从“晶胞组成分析”延伸到“充放电过程中的结构变化分析”。

[教师问题] 已知晶胞参数 a 、 b 、 c ，如何计算 LiFePO_4 的晶体密度？

[学生回答] 密度 $\rho = (Z \times M) / (N_A \times V)$ ，其中 Z 为一个晶胞中的单元数 4， M 为 LiFePO_4 的摩尔质量， V 为晶胞体积 ($a \times b \times c$)。

[教师归纳] 从晶胞识别到定性分析再到定量计算，三个层次都是均摊法的变式，但难度逐级上升。粒子数的确定是定性判断，密度的计算是定量应用，充放电过程中的变化分析则是动态情境下的综合应用。

设计分析：三个层次从“晶胞识别”到“动态分析”再到“定量计算”，均为均摊法的变式应用。第一层回顾均摊法基本操作，顶点/棱/面心的判断方法是基本功的巩固；第二层以充电后离子脱出的具体数据切入，将静态均摊法迁移到充放电动态过程；第三层延伸到定量计算，建立密度公式的完整推导路径。在高三复习课中实现对晶体结构核心知识的逐层巩固。

任务 4：综合应用——从结构到性能的跨越

情境：磷酸铁锂电池的循环稳定性

[教师问题] 为什么磷酸铁锂电池具有良好的循环稳定性？请结合正负极的结构变化进行分析。

[学生回答] LiFePO_4 充电后脱出 Li^+ ，体积收缩约 6.81%^[6]；石墨负极充电后 Li^+ 嵌入层间，层间距轻微膨胀。正负极体积变化形成互补，使电池整体结构保持稳定。

[教师归纳] 这一分析跨越了正极和负极两个结构维度。前三个任务都是单一材料的结构分析，而电池的循环稳定性恰恰取决于正负极结构变化的匹配程度。这就是综合应用的核心——从“分析一个材料”走向“分析一个系统”的视角跃升。

[教师追问] 如何计算 LiFePO_4 的理论比容量？请结合任务 1 的氧化还原思路。

[学生回答] 充电时 $\text{Fe}^{2+} \rightarrow \text{Fe}^{3+}$ ，每脱出 1 mol Li^+ 转移 1 mol e^- 。1 mol LiFePO_4 （约 158 g）转移 1 mol 电子，电量 $Q = 1 \times 96500 \text{ C} = 96500 \text{ C}$ ，换算为容量为 $96500 \div 3.6 \approx 26806 \text{ mAh}$ ，除以质量 158 g 得约 170 mAh/g。

[教师归纳] 从“物质的量”到“电荷量”再到“容量”，每一步都是跨学科的关联。正极的氧化还原反应（ $\text{Fe}^{2+} \rightarrow \text{Fe}^{3+}$ ）通过法拉第常数转化为电荷量，再经单位换算变为可比的容量值。

[教师问题] 实际充放电过程中，为什么实际比容量低于理论值？引入脱嵌率 x 如何计算？

[学生回答] 为保证橄榄石结构不发生不可逆破坏， Li^+ 只能部分脱出。实际比容量 = 理论比容量 \times 脱嵌率。例如实际比容量为 136 mAh/g 时，脱嵌率 $x = 136/170 = 0.8$ ，即每摩尔 LiFePO_4 中约 0.8 mol Li^+ 可逆脱出。

[教师总结] 今天我们从 Fe 的价电子排布出发，最终走到电池的比容量计算。任务 1 的氧化还原和任务 3 的晶胞均摊，在任务 4 中汇合为一条完整的推理链——从单个电子的得失到宏观电池的性能，这就是“结构决定性质”的完整路径。

设计分析：任务 4 作为全课的综合收束，将前三个任务分别复习的结构知识整合到同一问题情境中，从“单一结构维度分析”走向“跨维度综合应用”。正负极体积变化的互补关系解释了循环稳定性的结构基础，完成了结构分析与性能解释的对接。理论比容量推导呼应任务 1 的氧化还原思路（ $\text{Fe}^{2+} \rightarrow \text{Fe}^{3+}$ 电子转移），脱嵌率计算关联任务 3 的晶体结构分析（晶胞中 Li^+ 占位），定量计算承接任务 3 的密度计算能力。三个跨度在同一课时内形成闭环，体现了“从材料到系统”的视角跃升和“从微观到宏观”的推理路径。

七、教学反思

1. 问题链的认知递进设计

本节课的问题链按“原子结构→分子结构→晶体结构→综合应用”的梯度展开，认知层级从电子排布的识记逐步上升到三维晶体结构的想象。任务 1 从 Fe^{2+} 的价电子排布（识记）过渡到离子半径比较与结构适配性分析（分析解释）；任务 3 从石墨的晶体类型判断（识别）上升到 Li_xC_6 化学式的推导（应用推理）。每个任务内部的问题也遵循由浅入深的递进逻辑。问题链的认知梯度与“物质结构与性质”模块的知识层级相吻合，使知识整合发生在问题解决的过程中而非单纯的归纳总结环节。

2. 真实情境在复习课中的作用

以磷酸铁锂电池为载体，电池的四个组成部分（正极、负极、电解液、隔膜）分别对应不同的结构维度，情境本身为知识组织提供了逻辑框架，避免了复习课常见的“知识罗列”模式。真实情境为抽象的结构概念提供了附着点：分析 PO_4^{3-} 空间构型时对应的不是一道孤立题目，而是电池正极材料的组成；计算晶胞密度时对应的不是公式套用，而是材料性能的定量评估。这种情境嵌入有助于在复习课中建立“结构决定性质”的学科观念，同时降低知识罗列的枯燥感。

3. 不足与改进方向

本节课的设计仍存在以下不足。四个任务在一节课内完成，时间较为紧张，部分问题的讨论深度可能不够，后续可考虑精简任务量或调整为两课时。问题链的设计以教师预设为主，学生的自主提问和探究空间有限，如何在问题链中嵌入开放性更强的问题是后续改进的方向。此外，本节课未涉及隔膜材料的结构分析，后续可尝试将隔膜（如聚烯烃多孔膜）纳入复习素材，进一步丰富情境的完整性。

参考文献

[1] 中华人民共和国教育部. 普通高中化学课程标准（2017年版2020年修订）[S]. 北京：人民教育出版社, 2020.

[2] 滕瑛巧, 王星乔, 包朝龙, 等.“主题链接，问题驱动”促进单元复习知识结构化——以“酿酒过程中有机化合物的相互转化”为例[J]. 化学教学, 2021(7): 47-52.

[3] 杨群英, 张贤金. 促进内容结构化的高三化学复习教学研究——以“无机物的性质、转化和应用”专题教学为例[J]. 化学教与学, 2023(4): 60-65.

[4] 夏珺. 高中化学专题复习课中问题链的设计策略与应用[J]. 化学教与学, 2024(10): 64-66+59.

[5] 张丽华. 主题式情境建构在化学复习课中的实践与思考[J]. 课程教学研究, 2024(6): 73-77.

[6] 李颖璐, 邵卓, 张宏波, 等. 三元锂离子电池与磷酸铁锂电池的全方位比较：性能、成本与应用前景[J]. 当代化工研究, 2025, (24): 18-20.