



国际空间站(ISS)的轨道衰减动力学研究

——23届亚洲物理奥林匹克竞赛(A PhO)第一题答案

徐 睿 宋 峰

(南开大学物理科学学院 300071)

空间站为人类走向太空、利用太空提供了平台。熟悉并了解空间站的运动性质对于开展太空科学研究十分重要。国际空间站(International Space Station, 缩写:ISS)是美俄以及多国开启的空间国际合作项目,是迄今为止世界上规模最大的航天工程。历经数十年的运行,国际空间站已进入了日渐老化的阶段,预计2031年停止使用。相比之下,中国空间站(China Space Station, 缩写:CSS)目前已经按照计划进入应用阶段,神州十九号航天员进驻中国空间站开展相关科学研究,将为人类经济社会发展和外空探索作出更多“中国贡献”。

第23届亚洲物理奥林匹克竞赛(A PhO 2023)理论赛题第一题针对国际空间站,对其轨道衰减动力学进行研究。造成其轨道衰减的原因包括多种能量吸收机制,对其进行分析有利于考查和锻炼学生的物理模型构建和理论分析能力。题目需要准确分析大气阻力、离子阻力和磁场阻力等不同影响因素对气压、空间站衰减速率和空间站下降的影响,并最终系统性探究国际空间站的轨道衰减。

解题思路

本题目需要根据题目信息和提示,构建合适的物理模型来描述外界因素对空间站轨道高度衰减的影响。重点是在理解物理问题的同时,弄清楚需要使用的物理定律和公式,并根据不同的题目的要求,增添不同的外界条件。本题目的各部分之间逻辑性较强,要记得合理利用前面得出的结论和公式。

题目中给出的空间站参数和物理常数如下:

(1) 国际空间站轨道近似为圆形,平均高度最低370 km,最高460 km,此轨道在热层的中心,与地球赤道的倾角为 $\theta=51.6^\circ$ 。

(2) 国际空间站的质量为 $M_s = 4.5 \times 10^5 \text{ kg}$,总长度为 $L_s = 109 \text{ m}$,太阳能电池板的宽度为 $W_s = 73 \text{ m}$ 。

(3) 国际空间站的有效横截面大小约为 $S \approx 2.5 \times 10^3 \text{ m}^2$ 。

(4) 理想气体常数: $R = 8.31 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$

(5) 阿伏伽德罗常数: $N_A = 6.022 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$

(6) 空气的摩尔质量: $\mu = 0.029 \text{ kg} \cdot \text{mol}^{-1}$

(7) 地球的质量: $M_E = 5.97 \cdot 10^{24} \text{ kg}$

(8) 地球的半径: $R_E = 6.38 \cdot 10^6 \text{ m}$

(9) 万有引力常数: $G = 6.67 \cdot 10^{-11} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{kg}^{-1}$

(10) 地球表面的空气密度: $\rho_0 = 1.29 \text{ kg/m}^3$

(11) 地球表面的重力加速度: $g_0 = 9.81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$

(12) 地磁场平均强度: $B = 5.0 \cdot 10^{-5} \text{ T}$

(13) 电子电荷量的绝对值: $e = 1.60 \cdot 10^{-19} \text{ C}$

题目中涉及的基本物理公式

(1) 理想气体定律: $pV = \frac{M}{\mu} RT$

(2) 密度公式: $\rho = \frac{M}{V}$

(3) 压强公式: $p = \rho gh$

(4) 向心加速度公式: $mg = \frac{mv^2}{R}$

(5) 万有引力公式: $mg = \frac{GMm}{R^2}$

(6) 周期公式: $\tau = 2\pi \frac{R}{v}$

(7) 动能公式: $E = \frac{M \cdot v^2}{2}$

(8) 势能公式: $E=M g R$

(9) 力的做功: $dA=F \cdot dL$

(10) 安培力公式: $F=BIL$

A 部分: 修改的气压公式(2.0 分)

本部分要求给出国际空间站高度 h 的空气压强 p_h 的通用积分表达式; 当温度和重力加速度 g_h 与高度 h 无关时空气压强的表达式 p_h^{sta} (标准气压公式); 当温度为常数但重力加速度与 h 有关时空气压强的表达式 p_h^{imp} (改进的气压公式); 气压公式“标准”和“改进”版本的比率 p_h^{imp}/p_h^{sta} ; 高度 h 时空气密度 ρ_h 和中性空气分子浓度 n_h 的表达式。要求使用低阶近似, 精度为 $O(z_h^2)$, 且空间站相对于地表的飞行高度 h 远小于地球半径: $z_h=h/R_E \ll 1$ 。

题目中给出了解题的基本方向: “主要由中性的 O_2 和 N_2 分子带来的大气压, 可以利用理想气体定律表示: $pV = \frac{M}{\mu} RT$ 。其中的 p 、 V 、 T 、 M 和 μ 分别表示压力、体积、温度、质量和摩尔质量, R 是理想气体常量。有两个方程可以计算气压与高度的关系。第一个方程适用于标准对流层模型 ($h < 100$ km), 且假设温度随高度增加而降低。第二个方程属于热层标准模型 ($h > 250$ km), 且假设温度不会随着高度而变化很大, 此模型可用于国际空间站所在的高度。我们可以假设所有压力都是流体静力和各向同性的(也就是在所有方向上作用大小相等)。”

因此, 在解答该部分问题时, 基本假设是所有的压力都是流体静力学的, 也就是在所有方向上作用大小相等。然后基于微分思想, 考虑一个高度变化 dh 所带来的气压 dp_h 变化, 利用前文给出的气压公式可以得到 dh 与 dp_h 之间的关系:

$$dp_h = p_{h+dh} - p_h = g_h(M/V)dh, \quad (1)$$

利用理想气体方程将式(1)中的 M/V 进行替换可以获得:

$$\frac{dp_h}{p_h} = -\frac{g_h \mu}{RT_h} dh, \quad (2)$$

对以上表达从 $h=0$ 到高度 h 进行积分可以获得气压的表达式:

$$p_h = p_0 \exp\left(-\frac{\mu}{R} \int_0^h \frac{g_h}{T_h} dh\right), \quad (3)$$

其中 p_0 是高度在 0 处的气压。

针对后续问题, 题目中给出了相关备注。要想顺利获得正确结果, 合理利用题目信息必不可少。“注 1: 地球热层在高度 300~600 km 时温度变化不大, 在太阳一面平均约为 800~900 K。因此, 在研究国际空间站在轨飞行时可以取 $T_h=T=const$ 。特别注意, 由于国际空间站几乎一半的飞行时间在地球阴影里, 这里的温度急剧下降, 我们可以取 $T=425$ K 作为这些高度的平均温度。这个温度也符合 $h=400$ km 处的空气密度 $\rho_h \sim 10^{-12}$ kg/m³ [MSISE-90 地球上层大气模型]。”

在分析标准气压公式时, 不需要考虑高度对重力加速度的影响。因此这里使用 $g_h=g_0$ 的近似获得标准气压公式:

$$p_h^{sta} = p_0 \exp\left(-\frac{h}{h_0}\right), \quad (4)$$

其中的 $h_0 = \frac{RT}{ug_0}$ 。根据给出的参数值, 代入后求得:

$$h_0 = \frac{RT}{ug_0} = \frac{8.31J \cdot K^{-1} \text{mol}^{-1} 425K}{0.023kg \cdot \text{mol}^{-1} 9.81m \cdot s^{-2}} \approx 12400m$$

此时获得的标准气压公式仍不完善, 其中并未考虑高度对重力加速度的影响。因此在计算气压的积分时, 可以考虑 g_h 依赖 h 关系的一阶近似修正, 精确度为 $O(z_h^2)$, $z_h=h/R_E$, 来进一步获得精确度更高的气压公式, 也就是改进的气压公式。通过一阶近似可以获得相应的近似值: $g_h \approx g_0(1 - 2z_h)$ 和 $\int_0^h dhg_h \approx g_0 h(1 - z_h)$ 。将此近似值代入气压的积分表达式(3)就获得了改进的气压公式:

$$p_h^{imp} = p_0 \exp\left(-\frac{h(1 - z_h)}{h_0}\right), \quad (5)$$

标准气压公式和改进的气压公式区别在于是否考虑高度的影响。因此可以估算 $h=4.0 \times 10^5$ m 时气压公式“标准”和“改进”版本的比率 p_h^{imp}/p_h^{sta} :

$$\frac{p_h^{imp}}{p_h^{sta}} = \frac{\exp\left(-\frac{h(1 - z_h)}{h_0}\right)}{\exp\left(-\frac{h}{h_0}\right)} = \frac{h^2}{e^{h_0 R_E}} \approx 7.54,$$

发现结果相差较大,证明了高度的影响很大,有必要采用改进的气压公式。

在其他条件相同时,密度和压强成正比。气压的差距如此之大,表明气体的密度差距也很大。气压之间接近八倍的关系,气体的密度几乎提升了八倍。因此为了避免明显的误差出现,不仅是当涉及气压,在涉及空气密度时也同样需要使用修正的气压公式。根据正比关系,空气的密度可以表示为:

$$\rho_h^{imp} = \frac{M}{V} = \rho_0 \exp\left(-\frac{h(1-z_h)}{h_0}\right), \quad (6)$$

所以高度 h 时中性空气分子浓度 n_h 的表达式为:

$$n_h = N_A \frac{\rho_0}{\mu} \exp\left(-\frac{h(1-z_h)}{h_0}\right). \quad (7)$$

B 部分: 轨道减速和空间站下降速率 (3.0分)

在上一部分当中,对压强和密度进行了分析,因此在本部分将分析外力对空间站的减速作用。作为后续部分的基础,这里考虑确定质量为 M_s 的空间站受到恒定的摩擦力 F_{drag} 时的轨道衰减速率问题,并且假设下降高度 dh 远小于飞行高度 h ($dh \ll h$)。题目具体要求为给出空间站在高度 h 的稳定轨道运行时的速度 v_h 和旋转周期 τ_h ; 空间站在半径为 R_E+h 的圆形轨道运动时的总能量 E_s ; 空间站在一个小时时间间隔 dt 内其高度下降 dh , 写出 dh 和 dt 的方程; 空间站(脱轨)的下降速率 u_h ; 绕地球一圈的高度下降量 H_h 和空间站从高度 h 下降到地球表面所需的总时间 T_h 。

让我们一起考虑空间站在摩擦力 F_{drag} 作用下的轨道衰减速率问题。基于万有引力定律,通过牛顿第二定律,也就是地球的万有引力与离心力平衡可以获得两个重力加速度的表达式:

$$g_h = \frac{v_h^2}{R_E(1+z_h)}, g_h = \frac{g_0}{(1+z_h)^2}. \quad (8)$$

联立求解以上两式可以获得空间站的速度和周期:

$$v_h = \sqrt{\frac{g_0 R_E}{1+z_h}}, \tau_h = 2\pi \frac{R_E+h}{v_h} = 2\pi \sqrt{\frac{R_E}{g_0}} (1+z_h)^{3/2}, \quad (9)$$

在求解机械能问题时,根据机械能守恒,空间站在半径为 R_E+h 的圆形轨道运动的总能量包括动能和重力势能,因此其机械能为二者的和:

$$E_s = \frac{M_s v_h^2}{2} - M_s g_h R_E (1+z_h) = -\frac{M_s g_0 R_E}{2(1+z_h)}. \quad (10)$$

接下来分析造成空间站轨道衰减的能量损失。能量的损失 dE_s 是外力 F_{drag} 做负功造成的,做功的多少取决于外力和位移,而位移取决于速度和时间,则:

$$dA_{drag} = -F_{drag} v_h dt. \quad (11)$$

根据式(10),轨道能在高度变化 dh 时的变化 dE_s 为:

$$dE_s = +\frac{M_s g_0}{2(1+z_h)^2} dh. \quad (12)$$

在整个轨道衰减过程中,外力对空间站做负功导致了整体能量改变,根据能量守恒有:

$$F_{drag} v_h dt = \frac{M_s g_0}{2(1+z_h)^2} dh. \quad (13)$$

利用上式可以获得 dh , 与时间相除就可以获得下降速率:

$$u_h = \frac{dh}{dt} = \frac{2F_{drag}}{M_s g_0} v_h (1+z_h)^2 = \frac{2F_{drag}}{M_s} \sqrt{\frac{R_E}{g_0}} (1+z_h)^{3/2}. \quad (14)$$

从以上结果可以看出,空间站的脱轨下降速度与摩擦力、空间站的高度和质量有关,而具体的摩擦力也与高度相关。利用此下降速度和周期,可以得到绕地球一圈的高度下降量 H_h :

$$H_h = u_h \tau_h = \frac{dh}{dt} = \frac{4\pi R_E}{M_s g_0} F_{drag}(h) (1+z_h)^3 \quad (15)$$

最后在考虑空间站从高度 h 下降到地球表面所需的总时间 T_h 时,利用上面下降速率的微分方程(14),获得了 dh 和 dt 的关系,对 dt 积分即可获得下降总时间:

$$T_h = \int_0^{T_h} dt = \frac{M_s}{2} \sqrt{\frac{g_0}{R_E}} \int_0^h \frac{dh}{F_{drag}(h) (1+z_h)^{3/2}}. \quad (16)$$

值得注意的是,以上结果是适用于普遍外界阻力的通用公式,在之后分析具体外力影响时仍需使用。

C 部分: 大气阻力 (1.0 分)

本部分主要研究大气分子所带来的空气阻力对空间站的影响,要求给出空气阻力 F_{air} , 轨道高度下降速率 u_h^{air} , 和下降量 H_h^{air} ; 以及空间站由于空气阻力从高度 h 下降到地球表面所需的总时间 T_h^{air} , 并给出了提示关系 $h_0 \ll h \ll R_E$ 。基于 B 部分的结果, 也就是一般阻力对空间站衰减的影响, 本部分的重点是成功分析空气阻力的表达式, 后续结合之前的结果即可。

空间站的速度 v 比 $h \approx 300 \sim 400$ km 处的大气分子热运动的平均速度(几百米/秒)大多倍, 可以假设这些分子在与空间站相撞前是静止的, 且假设碰撞后分子获得与空间站相同的速度。在此情况下, 基于空气分子质量, 之前求得的空气浓度, 以及空间站的有效面积和速度, 空气阻力可以表示为:

$$F_{air} = n_h m_{air} v_h^2 S = \frac{N_{air} m_{air}}{V} v_h^2 S = \rho_h v_h^2 S. \quad (17)$$

利用 B 部分获得的下降速率方程, 并且将空气阻力代入得到:

$$u_h^{air} = \frac{2\rho_0 S \sqrt{g_0 R_E^3}}{M_S} (1+z_h)^{1/2} \exp(-h(1-z_h)/h_0). \quad (18)$$

同样的, 利用速度和周期获得绕地球一圈的高度下降量 H_h^{air} :

$$H_h^{air} = u_h^{air} \tau_h = \frac{4\pi S R_E^2}{M_S} \rho_0 (1+z_h)^2 \exp(-h(1-z_h)/h_0). \quad (19)$$

在考虑关系 $h_0 \ll h \ll R_E$ 时, 利用下降速率的微分方程(14), 并将阻力换成空气阻力, 获得 dh 和 dt 的关系, 对 dt 积分即可获得空间站由于空气阻力从高度 h 下降到地球表面所需的总时间 T_h^{air} :

$$T_h^{air} \approx \frac{M_S}{2\rho_0 S \sqrt{g_0 R_E^3}} \int_0^h dh \left(1 - \frac{h}{2R_E}\right) e^{+h/h_0} \approx \frac{M_S h_0}{2\rho_0 S \sqrt{g_0 R_E^3}} \left(1 - \frac{h}{2R_E}\right) e^{+h/h_0}. \quad (20)$$

从以上的计算过程可以看出, 本题目前后关联性极强, 需要合理利用之前的重要结论, 系统性地看整个问题。

D 部分: 原子氧离子阻力 (1.0 分)

该部分仍然是分析外力对空间站的衰减, 与之不同的是此时分析的是氧离子粒子对空间站的减速作用。要求给出这些粒子机械碰撞相关的减速力 F_{ion} 在 24 小时内的平均值, 氧离子的密度 ρ_{ion} 表达式, 氧离子所导致的空间站下降速率 u_h^{ion} , 电离效应所导致的公转一周下降量 H_h^{ion} 。题目的要求已经给出了解答方向, 先分析具体的力, 再代入之前得到的公式即可。

在热层中, 在紫外线、X 射线太阳辐射和宇宙射线的影响下, 空气电离发生(“极光”)。不像 O_2, N_2 在太阳辐射作用下不会发生强电离, 因此, 一般来说, 在地球上层大气氮原子比氧原子少得多。在 250 km 以上高度, 氧原子占主导。含有电子和氧离子的层会出现在大气的向阳侧。这种情况下, 原子氧离子的浓度达到 $n_{ion} \sim 10^{12} \text{ m}^{-3}$ 。

这些粒子机械碰撞所带来的减速力需要在空气阻力公式的基础上考虑夜晚电离作用的明显减弱。可以设定离子浓度的平均值为最大值的一半, 利用式(17)可以得到离子带来的减速力:

$$F_{ion} = \frac{1}{2} \rho_{ion} v_h^2 S = \rho_{ion} \frac{\mu_{ion}}{N_A} n_{ion}, \quad (21)$$

知道了离子带来的减速力后, 举一反三, 就可以获得由离子带来的空间站下落速度:

$$u_h^{ion} = \rho_{ion} \frac{S \sqrt{g_0 R_E^3}}{M_S} (1+z_h)^{1/2}, \quad (22)$$

以及绕地球一圈的高度下降量 H_h^{ion} :

$$H_h^{ion} = u_h^{ion} \tau_h = \rho_{ion} \frac{2\pi S R_E^2}{M_S} (1+z_h)^2. \quad (23)$$

E 部分: 地球磁场的阻力 (2.0 分)

本部分主要研究磁场阻力对空间站衰减的影响, 重点是推导出磁场阻力的表达式。题目要求估算感应电流强度 I_{ind} ; 确定出与空间站运动方向相反的制动安培力 F_{ind} 的近似表达式; 由于地球磁场所导致的空间站下降速率 u_{ind} 和磁场所导致的空间站

转一周的高度下降量 H_h^{ind} 。题目给出提示可以将空间站长度 L 近似为面积 S 的平方根, 可以将 $\sin(\pi/2-\theta)$ 近似作为 $\sin(\phi)$ 的平均值, 可以使用采样点的离散数来计算平均值。

考虑地球磁场对空间站运动的影响, 地球表面附近的磁场值是 $(3.5-6.5) \cdot 10^{-5} \text{ T}$, 平均值为 $5 \cdot 10^{-5} \text{ T}$ 。当空间站在磁场中高速运动时, 空间站结构中的导电部分会产生感应电流(电动势(EMF))。电动势导致空间站导电部分中电荷重新分布。空间站周围会出现电场, 影响环境中带电粒子的运动。电子被吸到空间站带正电势的部分(相对于空间站的中间部分), 带正电的离子被吸到空间站上具有负电势的部分。撞击空间站表面的电子和离子会结合成为中性氧原子, 同时电子在空间站导电部分运动形成电流。空间站在太空中运动, 从周围空间中“收集”电子和离子并与它们碰撞。为简单估计流过空间站导电部分的电流大小, 我们将假设空间站只在其横截面积 S 内收集, 并且所有离子和电子都参与到电流产生当中。

电流大小与电子数直接相关, 在时间 dt 内撞击空间站的电子数量为:

$$dN = n_{ion} v_h S dt. \quad (24)$$

因此电流为:

$$I_{ind} \approx e \frac{dN}{dt} = e n_{ion} S \sqrt{\frac{g_0 R_E}{1 + z_h}}. \quad (25)$$

轨道的阻碍安培力与 $[\vec{v}_h \times \vec{B}] = v_h B |\sin(\phi)|$ 成比例, 其中的 ϕ 为地球磁场与空间站速度方向的夹角。 $\theta=51.6^\circ$ 为空间站轨道相对于地球赤道的倾角。考虑空间站的旋转从最高纬度($\phi=\pi/2-\theta$)开始, 旋转半圈后空间站到达最低纬度($\phi=\pi/2+\theta$), 另外半圈的过程与之相反。在旋转周期中, $|\sin(\phi)|$ 的平

均值可以表示为:

$$\langle |\sin(\phi)| \rangle = \frac{1}{2\theta} \int_{\pi/2-\theta}^{\pi/2+\theta} d\phi |\sin(\phi)| = 0.93 \approx 1. \quad (26)$$

利用四个等距采样点同样可以得到近似结果:

$$\langle |\sin(\phi)| \rangle = \{ \sin(\pi/2 - \theta) + \sin(\pi/2) + \sin(\pi/2 + \theta) + \sin(\pi/2) \} / 4 = 0.89 \approx 1. \quad (27)$$

接下来我们都使用近似值 $\langle |\sin(\phi)| \rangle \approx 1$ 。当电流经过空间站时, 利用安培力公式和近似条件 $L \sim \sqrt{S}$, 得到阻碍安培力:

$$F_{ind} = B I_{ind} \langle |\sin(\phi)| \rangle L \approx B I_{ind} \sqrt{S} = e B S^{3/2} n_{ion} \sqrt{\frac{g_0 R_E}{1 + z_h}}, \quad (28)$$

知道了安培力之后, 利用之前的结论获得空间站下降速率:

$$u_h^{ind} = 2 n_{ion} \frac{e B S^{3/2} R_E}{M_S} (1 + z_h), \quad (29)$$

以及周期下降高度:

$$H_h^{ind} = u_h^{ind} \tau_h = \frac{4\pi e B (S R_E)^{3/2}}{M_S \sqrt{g_0}} (1 + z_h)^{5/2}. \quad (30)$$

F 部分: 数值结果和计算 (1.0 分)

本部分要求计算不同高度对应的参数值, 主要考查学生的计算能力, 需要根据之前的结果代入计算。

根据对空间站轨道高度高于 380 km 时的减速效应, 三种减速过程排序为: (1) 安培力; (2) 氧离子碰撞; (3) 中性氧气分子碰撞带来的大气阻力。

本题目基于国际空间站的运动原理和机械能守恒, 从抽象到具体, 层层深入分析了不同外力对空间站的轨道衰减作用。首先分析一般外力的影响作为通用的基本理论, 再具体分析不同种类外力

表 1

h[km]	T_h^{air} [day]	u_{air} [m/day]	u_{ion} [m/day]	u_{ind} [m/day]	Σ [m/day]	w_{ISS} [m/day]
350	316	184	14	28	226	~170 [in 2008]
375	2360	30.9	14	29	73	-
400	17700	5.3	14	29	47	≤100 [in 2021]
410	39500	2.6	14	29	45	≤70 [in 2022]

表 2

h[km]	H_h^{air} [m]	H_h^{ion} [m]	H_h^{ind} [m]
350	11.7	0.9	1.8
375	2.0	0.9	1.8
400	0.3	0.9	1.8
410	0.2	0.9	1.8

的表达和作用,整个解题过程体现了物理学研究的基本逻辑,即为建立理论物理模型,用以分析具体实际问题。该题目不仅考察的物理知识点较多,而且对考生的物理思维也提出了相应要求。希望各位读者在后续的学习中不仅要学习具体的解题过程,更要掌握解决问题的物理思维。



科苑快讯

用“地球工厂”制造更为清洁、环保的肥料

研究人员发明一种新配方,不用任何能量输入或二氧化碳排放,只将含氮的水与富铁岩石混合,就能产生氨(ammonia)这种农业所需的关键化学物质。这种新型环保的合成氨方法,有可能改变肥料生产工艺,并减少化学工业的碳足迹(carbon footprint)。这项概念验证研究已发表于《焦耳》(Joule)期刊上。

其灵感来自 20 世纪 80 年代的西非马里,当地居民发现了一口释放氢气的井。科学家后来确定,这是地球表面深处的水和岩石之间自然化学反应的结果。一些科学家因此顿悟:也许可以把地球当作工厂,利用其热量和压力,以更清洁的方式生产氨等有价值的化学物质。

氨不但是化肥的关键成分,未来还可能成为清洁能源。但今天的氨工业不仅是能源密集型产业、消耗了全球 2% 的能源,而且二氧化碳排放量一直高居化工行业榜首。

论文资深作者、麻省理工学院(MIT)的阿巴特(Iwnetim Abate)说,其团队建立了一个模拟地球地下环境的岩石-水反应系统,将合成的富铁矿物暴露在含氮的水中,引发岩石氧化反应并产生氨,他们称其为“地质氨”(geological ammonia)。

之后,他们又用橄榄石(olivine,一种富铁天然岩石)替代合成矿物,更好地模拟现实场景。通过添加铜催化剂并将温度调至 300 °C 进一步优化过程,他们验证了方法的可行性和持续性。

虽然含铁岩石遍布世界各地,但是若要广泛应用,仍有亟待解决的问题:如何钻入地球深处的富铁



岩石,如何注入含氮的水,解决岩石如何破裂、膨胀以及与气体、液体相互作用的复杂问题。

尽管前路多艰,但其经济前景仍令人鼓舞。此外,它还为解决废水污染开辟了新途径。由于去除废水中的氮源需要花费金钱和能源,所以若把废水处理和氨生产结合起来,每千克氨则会产生 3.82 美元的额外利润。

(高凌云编译自 2025 年 1 月 22 日 SciTechDaily 网站)