

蜂蜜流变学研究：含水量与温度对黏性的影响

王 灿¹ 李淮廷¹ 孙致君¹ 郑伊哲¹ 宋 飞^{1,2}

(¹ 清华大学行健书院, 北京 100084; ² 清华大学物理系, 北京 100084)

摘 要 蜂蜜作为天然营养食品,其流变特性对多领域应用关键。本文采用黏度计等设备,以南京同仁堂百花蜂蜜和纯净水为材料,研究蜂蜜符合的流变模型,并测量蜂蜜在不同含水量和温度下的黏度,进行曲线拟合。结果表明,该蜂蜜为牛顿流体,黏度随体积浓度增大而增大,随温度升高而减小,且均呈指数关系。温度较低、体积分数较高时黏度变化大。本文创新性地提出可用 Arrhenius 模型刻画蜂蜜黏度随温度变化趋势,可据此鉴别蜂蜜质量,为相关产业提供科学依据。

关键词 蜂蜜;流变特性;黏度;Arrhenius 模型

RHEOLOGICAL STUDY OF HONEY: EFFECT OF WATER CONTENT AND TEMPERATURE ON VISCOSITY

WANG Can¹ LI Weiting¹ SUN Zhijun¹ ZHENG Yizhe¹ SONG Fei^{1,2}

(¹ Xingjian College, Tsinghua University, Beijing 100084; ² Department of Physics, Tsinghua University, Beijing 100084)

Abstract As a natural nutritious food, the rheological properties of honey are critical to its application in many fields. In this paper, the rheological model of honey was studied by using viscometer and other equipment, and the viscosity of honey at different water content and temperature was measured, and the curve fitting was carried out. The results showed that the honey was Newtonian fluid, and the viscosity increased with the increase of volume concentration and decreased with the increase of temperature. When the temperature is low and the volume fraction is high, the viscosity changes greatly. This paper innovatively proposes that Arrhenius model can be used to describe the change trend of honey viscosity with temperature, which can be used to identify honey quality and provide scientific basis for related industries.

Key words honey; rheological properties; viscosity; arrhenius model

蜂蜜是蜜蜂采集植物花蜜、分泌物或蜜露,经自身酶解转化而成的天然甜味物质^[1],富含葡萄糖、果糖、氨基酸、维生素及多种生物活性成分^[2],兼具营养价值和药用功能。自古以来,蜂蜜不仅作为食品被广泛食用,还因其抗菌、抗氧化及润肺

止咳等特性,在传统医学和现代保健品领域占据重要地位。此外,其独特的流变特性(如黏弹性、触变性)使其成为食品工业、化妆品和制药行业的关键原料,广泛应用于酱料增稠、药物缓释及护肤品乳化等场景。

收稿日期: 2025-06-15

基金项目: 通专教育背景下大学实验物理教学内容的重构探索与实践、教育部拔尖计划 2.0 研究课题(20211007);无锡市“未来技术太湖创新基金”;清华大学本科教育教学改革经费(53410001325)资助。

通信作者: 郑伊哲, zhengyz22@mails.tsinghua.edu.cn。

引文格式: 王灿,李淮廷,孙致君,等. 蜂蜜流变学研究:含水量与温度对黏性的影响[J]. 物理与工程, 2025, 35(4): 337-342.

Cite this article: WANG C, LI W T, SUN Z J, et al. Rheological study of honey: effect of water content and temperature on viscosity[J]. Physics and Engineering, 2025, 35(4): 337-342. (in Chinese)

黏度是蜂蜜的一个重要物理参数,对加工、运输及最终产品的质量有着关键影响。研究蜂蜜黏度与温度和含水量的关系,不仅有助于深入理解蜂蜜的物理性质,还能为相关产业的生产工艺优化提供理论支持。

从国内外研究现状来看,对于蜂蜜的研究主要集中在其成分分析、保健功能等方面,而针对流变特性的研究相对较少。过去的实验成果表明,温度升高通常会使得蜂蜜黏度降低,而含水量的增加也会对黏度产生一定影响。蜂蜜在低温条件下黏度较大,分子运动被阻碍,从而延缓蜂蜜结晶的形成过程^[3]。

本文旨在完善这一领域的研究,选取南京同仁堂百花蜂蜜作为代表性实验材料,首先通过测量剪切应力与剪切速率的关系,确定其符合的流变模型,再系统测量不同温度和含水量条件下蜂蜜的黏度。我们期望通过本次研究,能够明确温度和含水量对蜂蜜黏度的定量影响规律,为蜂蜜产业在产品配方设计、生产过程控制以及品质提升等方面提供更为精准的科学依据,从而推动蜂蜜相关产业的进一步发展。

1 实验方案

1.1 实验设备

如图 1 所示,实验中所需设备包括黏度计、恒温水浴箱、温度计、转子、量杯。

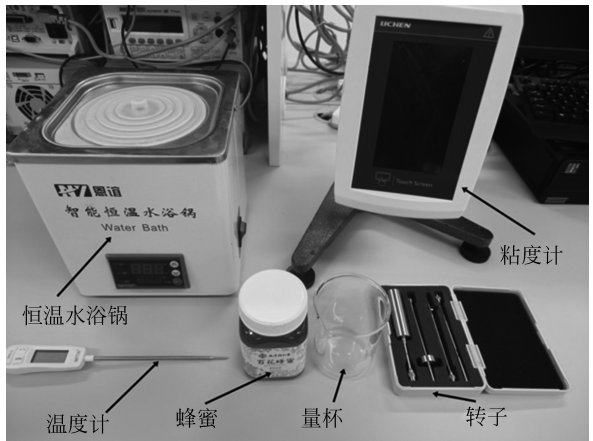


图 1 实验设备实物图

1.2 实验材料

南京同仁堂百花蜂蜜、纯净水

1.3 实验方法

1.3.1 研究蜂蜜的流变模型

使用黏度计,测量室温下 100%浓度的蜂蜜原液的黏度。100%浓度下的蜂蜜黏度较大,因此采用 4 号转子,分别在 6rpm,12rpm 和 30rpm 下测量蜂蜜的黏度。

1.3.2 探究蜂蜜的黏度与含水量之间的关系

室温(26℃)下,通过向蜂蜜中添加不同体积的纯净水,用加水后蜂蜜的体积浓度衡量蜂蜜的含水量,忽视蜂蜜与水混合中的体积变化,得到体积浓度分别为 70%、80%、85%、90%、95%的蜂蜜溶液,再用黏度计分别测量,即可得到不同体积浓度蜂蜜溶液的黏度。

1.3.3 探究蜂蜜的黏度与温度之间的关系

将 90%浓度的蜂蜜溶液放置在恒温水浴锅中加热,控制温度到 30℃、40℃、50℃、55℃、60℃、65℃、70℃,用黏度计分别测量其黏度。

2 实验结果与数据分析

2.1 蜂蜜的流变模型

采用黏度计测量室温下蜂蜜原液的剪切应力与剪切速率,得到结果如表 1。

表 1 蜂蜜剪切应力与剪切速率测量数据

$\dot{\gamma}/s^{-1}$	$\tau/10^{-3} Pa$
1.24	270.08
2.49	545.54
6.20	1379.39

根据对该蜂蜜在室温下的实验结果,对剪切应力 τ 与剪切速率 $\dot{\gamma}$ 之间的关系采用过原点的直线进行拟合。结果如图 2 所示。

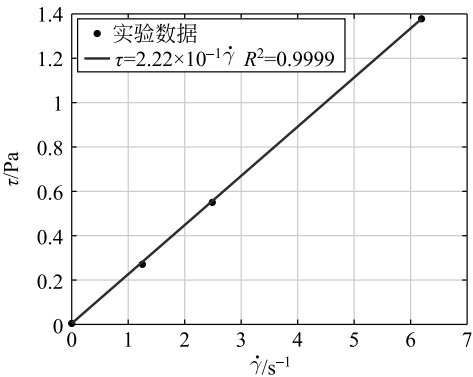


图 2 蜂蜜剪切应力与剪切速率的关系

其中纵轴表示剪切应力 τ , 横轴表示剪切速率 $\dot{\gamma}$ 。从上述拟合图线可以看出, 蜂蜜的剪切应力 τ 与剪切速率 $\dot{\gamma}$ 为线性关系, 因此本实验选取的蜂蜜在实验条件下可近似视为 Newton 流体, 其黏度值 μ 不随剪切速率变化而变化。因此可得到蜂蜜的通用流变模型^[4], 其本构方程为

$$\tau = \mu \dot{\gamma} \quad (1)$$

其中, τ 为剪切应力, 单位为 Pa; μ 为黏度, 单位为 $\text{Pa} \cdot \text{s}^{-1}$; $\dot{\gamma}$ 为剪切速率, 单位为 s^{-1} 。

2.2 含水量对蜂蜜黏度的影响

室温(26℃)下, 向蜂蜜原液中加入不同量的水, 逐步稀释, 以控制蜂蜜含水量, 得到不同的蜂蜜溶液体积浓度 ϕ 。用黏度计测量不同含水量的蜂蜜溶液, 测量得到的黏度值结果如表 2 所示。

表 2 蜂蜜溶液黏度与体积浓度关系测量数据

$\phi/\%$	$\mu/10^{-3} \text{Pa} \cdot \text{s}$
70	49.90
75	92.73
80	175.97
85	359.91
90	929.79
95	3713.55
100	21748.5

由表 2 可知, 蜂蜜溶液的黏度值随体积浓度的升高而增大。

对以上数据取自然对数后, 使用 Matlab 进行拟合, 拟合结果如图 3 所示。

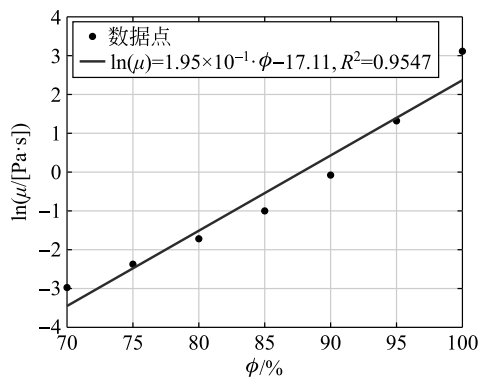


图 3 26℃下蜂蜜 $\ln\mu-\phi$ 关系曲线

其中纵轴表示黏度的自然对数 $\ln\mu$, 横轴表示体积浓度 ϕ 。从图中可以看出, ϕ 与 $\ln\mu$ 近似为线性关系。因此可以得到蜂蜜黏度按以下规律随含水量变化:

$$\mu = A e^{B\phi} \quad (2)$$

其中, A 、 B 为常系数, e 为自然对数的底数。对蜂蜜黏度与体积分数的关系做拟合, 可得到如图 3 所示曲线。

如图 4 所示, 蜂蜜的黏度随着其体积浓度的提高而增大, 但在体积浓度小于 90% 时, 蜂蜜的含水量对其黏度影响不显著。当蜂蜜体积浓度大于 90% 时, 黏度随着蜂蜜体积浓度的提高而急剧增大。

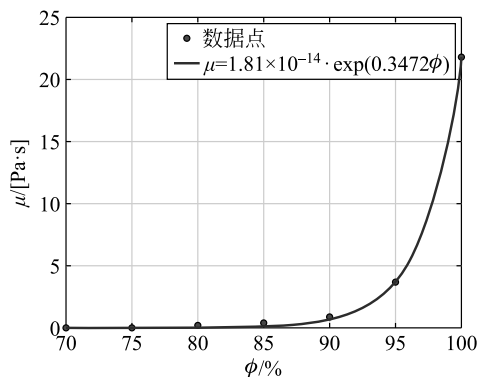


图 4 26℃下蜂蜜黏度与体积浓度的关系

2.3 温度对蜂蜜黏度的影响

实验中使用 90% 体积浓度的蜂蜜, 将温度计插入蜂蜜中, 测量出此时温度为 26℃。

再将蜂蜜置于恒温水浴锅中加热至不同温度, 分别测量其黏度, 得到结果如表 3 所示。

表 3 90% 体积浓度蜂蜜黏度与温度关系测量数据

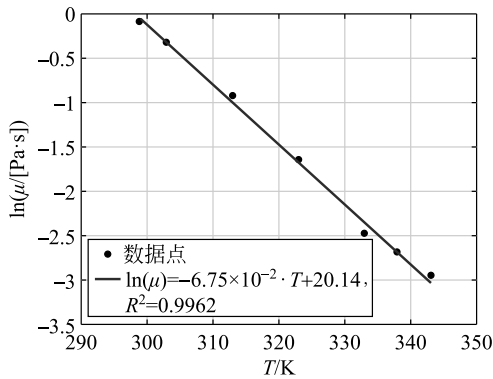
$T/^\circ\text{C}$	$\mu/10^{-3} \text{Pa} \cdot \text{s}$
26	929.79
30	722.89
40	402.44
50	194.36
60	84.04
65	68.28
70	52.53

由表 3 可知, 蜂蜜黏度随温度的升高而减小。

对以上数据取自然对数后做线性拟合, 拟合结果如图 5 所示。

其中纵轴表示黏度的自然对数 $\ln\mu$, 横轴表示温度 T 。从图 5 中可以看出, T 与 $\ln\mu$ 近似为线性关系。因此可以得到蜂蜜黏度按以下规律随温度变化

$$\mu = C e^{-DT} \quad (3)$$

图5 90%体积浓度蜂蜜 $\ln\mu-T$ 关系曲线

其中, C 、 D 为常数, e 为自然对数的底数。由图 5 可知拟合优度为 0.9962, 说明指数模型可以较好地描述温度对蜂蜜黏度的影响, 对蜂蜜黏度与温度的关系做拟合, 可得到如图 6 所示曲线。

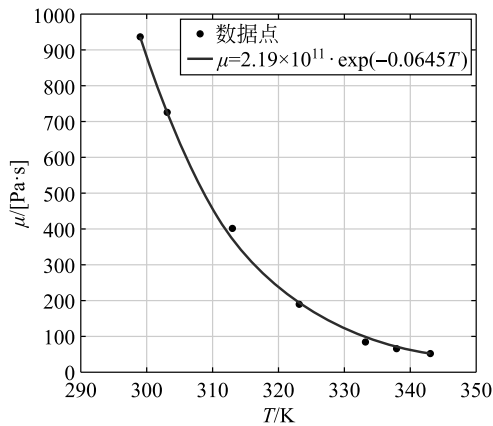


图6 90%体积浓度蜂蜜黏度与温度的关系

由图 6 可知, 蜂蜜的黏度随温度升高而减小。当温度小于 50℃ (323K) 时, 蜂蜜的黏度随温度变化较明显; 但当温度大于 50℃ (323K) 时, 蜂蜜的黏度随温度变化较平缓。

2.4 使用 Arrhenius 模型模拟蜂蜜黏度变化

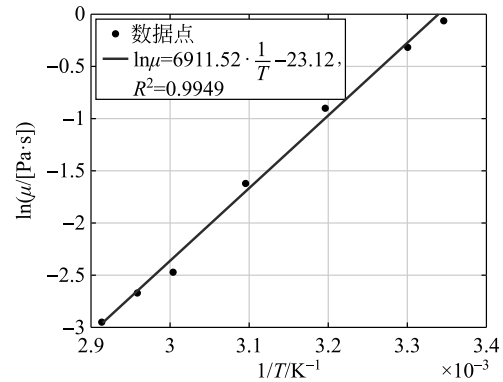
Arrhenius 公式通常表示为

$$\mu = \mu_0 \cdot \exp\left[\frac{E_a}{RT}\right] \quad (4)$$

该公式常用来描述 0℃ 以上蜂蜜黏度与温度变化之间的关系^[5]。公式中 μ 为黏度 (Pa·s), μ_0 为常数, E_a 为活化能 (kJ·mol⁻¹), R 为普适气体常数 (8.314 J·(mol·K)⁻¹), T 为热力学温度 (K)。对方程两边取自然对数后, 得到公式

$$\ln\mu = \ln\mu_0 + \frac{E_a}{RT} \quad (5)$$

据此对不同温度下的测量结果进行线性拟合, 结果如图 7 所示。

图7 90%体积浓度蜂蜜 $\ln\mu-1/T$ 关系曲线

根据图 7, Arrhenius 模型方程对蜂蜜黏度-温度关系曲线实验数据的拟合优度 R^2 为 0.9949, 由此可验证, Arrhenius 模型方程能够很好的描述蜂蜜黏度与温度间的关系。

再使用 Matlab 根据 Arrhenius 公式对蜂蜜与温度之间的关系进行拟合, 拟合曲线如图 8 所示。

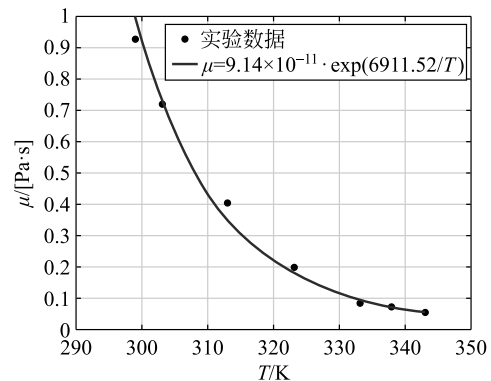


图8 Arrhenius 模型拟合蜂蜜黏度与温度的关系

由图 8 可知, 蜂蜜的黏度在低温区变化快, 在高温区变化慢, 符合前文拟合的结果。

对照图 8 中公式与 Arrhenius 模型方程, 可以进一步估算出蜂蜜的活化能 E_a 为

$$E_a = 57.46 \text{ kJ/mol} \quad (5)$$

2.5 指数模型与 Arrhenius 模型的关系

通过线性拟合, 可以得到蜂蜜黏度变化的指数模型为

$$\mu = 5.58 \times 10^8 \cdot \exp(-0.0675T) \quad (6)$$

而蜂蜜黏度变化的 Arrhenius 模型为

$$\mu = 9.14 \times 10^{-11} \cdot \exp\left(\frac{6911.52}{T}\right) \quad (7)$$

在有限温度内,利用 Taylor 展开,Arrhenius 模型可在参考温度 T_0 (单位为 K) 附近一阶线性化

$$\frac{1}{T} \approx \frac{1}{T_0} + \left(-\frac{1}{T_0^2}\right)(T - T_0) \quad (8)$$

将式(8)代入到 Arrhenius 公式(5)中,得到

$$\ln \mu = \ln \mu_0 + \frac{2E_a}{RT_0} - \frac{E_a}{RT_0^2} T \quad (9)$$

观察对比(3)和(9),可以发现两者形式相同,因此参数对应为

$$C = \mu_0 \cdot \exp \left[\frac{2E_a}{RT_0} \right] \quad (10)$$

$$D = \frac{E_a}{RT_0^2} \quad (11)$$

将式(5)中活化能的值和式(6)中 D 的值代入到式(11)中,可计算出

$$T_0 = 320 \text{ K} \quad (12)$$

再将式(12)的结果代入到(10)中,可计算出

$$C = 5.26 \times 10^8 \quad (13)$$

在区间 $T_{\min}, T_{\max}$ 上做一阶 Taylor 展开时,剩余项大致为

$$R_2(T) \approx \frac{f''(\xi)}{2}(T - T_0)^2$$

其中, ξ 在 $T_{\min}, T_{\max}$ 之间, $f(T) = 1/T$, 所以 $f''(\xi) > 0$, 误差随 $(T - T_0)^2$ 增大。实验测量数据为 $26 \sim 70^\circ\text{C}$, 式(12)中计算所得 T_0 恰为测量数据区间中点, 此时 $\max(|T_{\min} - T_0|, |T_{\max} - T_0|)$ 最小, 最大误差最小, 因此式(12)计算结果合理。对比式(13)中计算所得 C 与式(6)中实验测量所得的 C 可以得到, 式(13)的相对误差为 5.73%, 误差较小。

根据以上分析计算, 可以认为, 式(6)中的指数模型本质上是 Arrhenius 模型 Taylor 展开后一阶线性化的结果。因此, 在精度要求不高的情况下, 可以采用指数经验模型进行快速估算。

3 结果分析

3.1 蜂蜜的流变模型验证

实验数据表明, 蜂蜜的剪切应力与剪切速率呈线性关系 ($R^2 > 0.99$), 符合牛顿流体特性, 其本构方程为 $\tau = \mu \dot{\gamma}$ 。这一结果与工业中常见的非牛顿流体(如酸奶、果酱)形成对比, 可以认为此类型

蜂蜜在加工过程中无需考虑剪切稀化或增稠效应。

3.2 含水量对蜂蜜黏度的影响机制

蜂蜜黏度随体积浓度 φ 的增加呈指数增长 ($\mu = A e^{B\varphi}$)。当 $\varphi > 90\%$ 时, 黏度随含水量降低而急剧上升, 表明高浓度蜂蜜的分子间作用力显著增强。这一规律可用于鉴别蜂蜜的质量或是否掺水^[6]。

3.3 温度对蜂蜜黏度的影响机制

实验数据表明, 蜂蜜黏度随温度升高呈指数衰减 ($\mu = C e^{-DT}$), 表明温度升高显著降低了蜂蜜分子间的相互作用能。这一变化规律可通过 Arrhenius 模型精确描述 ($R^2 > 0.99$)。模型拟合得到的活化能 $E_a = 57.46 \text{ kJ/mol}$, 该数值处于典型糖类溶液的活化能范围 ($40 \sim 70 \text{ kJ/mol}$) 内, 表明蜂蜜流动需要克服较高的能垒。值得注意的是, 在 $30 \sim 50^\circ\text{C}$ 区间, 温度每升高 10°C 黏度下降约 40%, 而在 $50 \sim 70^\circ\text{C}$ 区间降幅减缓至约 25%。这种非线性变化反映了不同温度区间分子作用力的差异: 低温区主要克服氢键网络; 高温区主要克服范德华力。

3.4 工业实际应用建议

基于本实验结果, 提出以下工业应用优化方向:

3.4.1 生产工艺控制

在蜂蜜加工(如过滤、灌装)过程中, 建议将温度控制在 50°C 以上以显著降低黏度, 减少能耗并提高效率; 但需注意高温可能导致营养成分降解, 需平衡温度与品质的关系。对于高浓度蜂蜜(如 $\varphi > 90\%$), 可通过适度加热改善流动性, 避免管道堵塞或混合不均。

3.4.2 质量检测标准化

可建立基于黏度的快速检测方法: 利用低温下高浓度蜂蜜的黏度突变特性可设计便携式黏度计检测水分含量, 辅助鉴别掺水蜂蜜。若实测黏度远低于理论值(如 $\varphi = 90\%$ 时 $\mu = 929.79 \text{ cp}$), 则可能被过度稀释。

未来可通过补充实验, 构建更为精细的蜂蜜黏度模型; 在此基础上, 结合环境温度与黏度测量值, 可实现对蜂蜜含水量的反演计算。基于该方法, 亦可进一步开发专用的蜂蜜含水量在线检测仪器, 为蜂蜜质量监控与生产工艺优化提供新的技术手段。

3.4.3 产品开发指导

在蜂蜜衍生品(如饮品、化妆品)配方中,可根据目标黏度需求调整含水量(如 $\varphi = 80\% \sim 90\%$ 时黏度适中),或通过温度控制实现理想质构。

4 结语

本研究通过系统实验探究了南京同仁堂百花蜂蜜的流变特性,揭示了其黏度与温度、含水量之间的定量关系,并验证了 Arrhenius 模型在蜂蜜黏度预测中的适用性,为相关产业提供科学依据。

致谢: 本项工作受无锡市科学技术局、无锡市滨湖区人民政府、无锡市滨湖区科学技术局提供的“未来技术太湖创新基金”项目资金支持,在此

一并予以感谢。

参 考 文 献

- [1] GB 14693—2011, 食品安全国家标准 蜂蜜[S].
- [2] 闫玲玲, 杨秀芬. 蜂蜜的化学组成及其药理作用[J]. 特种经济动物, 2005(2): 40-42.
- [3] 赵亚周, 田文礼, 国占宝, 等. 蜂蜜结晶的影响因素及评价指标[J]. 中国农业科技导报 1994, 10(2): 114-117
- [4] 潘君拯, 谭群. 蜂蜜的流变特性[J]. 自然杂志, 1991, (6): 476-477.
- [5] 杨前浩, 袁媛, 李红艳, 等. Arrhenius 模型模拟蜂蜜黏度-温度-含水量变化规律[J]. 南昌大学学报(理科版), 2018, 42(4): 364-368.
- [6] 陆则坚, 郑宝东, 陈丽娇. 蜂蜜流变特性及其质量鉴定[J]. 农业工程学报, 1994, (2): 114-118.

(上接第 336 页)

站来说无法使用太空电梯。

为了减小太空运载火箭的发射成本, 正在实验探索火箭的回收使用, 如 SpaceX 猎鹰 9 号的一级火箭重复使用 10 次的话, 单次发射成本可以降低 50%, 中国长征 8 号改进型, 计划在 2030 年之前实现一级火箭和助推器垂直回收, 计划将成本降低 30%~50%。还有电磁+化学混合推进系统, 前段在地面上运用电能以电磁弹射方式加速飞船, 后段用火箭方式推进飞船, 以求减少化学燃料的消耗。

参 考 文 献

- [1] 张三慧. 力学, 大学物理学(第一册)[M]. 北京: 清华大学出版社, 1999: 188.
ZHANG S H. Mechanics, university physics (Volume 1)[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1999: 188. (in Chinese)
- [2] 中国运载火箭技术研究院. 一种地球天梯系统: CN106005477A [P]. 2016-10-12 [2025-03-20]. <http://www2.drugfuture.com/cnpat/search.aspx>
China Academy of Launch Vehicle Technology. An Earth's ladder system: CN106005477A[P]. 2016. 2016-10-12 [2025-03-20]. <http://www2.drugfuture.com/cnpat/search.aspx>