

橡胶隔振支座竖向刚度理论与试验研究

魏陆顺^{1,2}, 黄浩鸣¹, 莊初立¹, 谷前进¹, 梁欢文²

(1. 佛山科学技术学院 交通与土木建筑学院, 广东 佛山 528000; 2. 云南震安减震科技股份有限公司, 云南 昆明 650211)

摘要: 与普通橡胶隔震支座不同, 橡胶隔振支座单层橡胶较厚, 竖向刚度随竖向面压增加而增大. 橡胶隔振支座侧向变形采用矩形模拟, 推导了侧向变形计算公式, 并与试验作了对比, 与试验结果接近. 采用经典弹性力学理论, 推导了¹ 竖向刚度计算公式, 得出了竖向刚度与竖向变形关系, 并对橡胶隔振进行了竖向刚度试验验证. 最后对橡胶隔振支座的疲劳性能进行了试验研究, 结果表明, 橡胶隔振支座具有良好的疲劳性能.

关键词: 橡胶隔振支座; 竖向刚度; 侧向变形; 疲劳性能

中图分类号: TU352.1⁺2

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2023)01-0036-05

Theoretical and experimental study on vertical stiffness of rubber vibration isolation bearing

WEI Lushun^{1,2}, HUANG Haoming¹, ZHUANG Chuli¹, GU Qianjin¹, LIANG Huanwen²

(1. School of Transportation, Civil Engineering & Architecture, Foshan University, Guangdong Foshan 528000, China;

2. Yunnan Quakesafe Seismic Isolation Technologies Co., Ltd., Kunming 650211, China)

Abstract: Unlike laminated rubber seismic isolation bearings, rubber vibration isolation bearings have a thicker single layer of rubber, and the vertical stiffness increases with the increase of vertical load. The lateral deformation profile of the rubber vibration isolation bearing is modeled in a rectangular shape, the lateral deformation calculation formula is derived and compared with the test results, and the theoretical calculation formula is close to the test results. Then, the vertical stiffness calculation formulas related to vertical deformation are deduced by the classical elasticity theory and verified by vertical stiffness tests. Finally, the fatigue performance test is performed on the rubber vibration isolation bearing, and the results show that the rubber vibration isolation bearing has good fatigue performance.

Key words: rubber vibration isolation bearing; vertical stiffness; lateral deformation; fatigue performance

TOD (Transit-Oriented Development) 开发模式在国内一线城市飞速发展. 在 TOD 模式下, 轨道交通产生的振动通过隧道或桥墩传至地基进一步传至周边建筑, 使得 TOD 上盖建筑及邻近建筑振感明显, 并诱发结构二次噪声, 导致 TOD 上盖建筑使用舒适性降低. 因此, 适用于 TOD 结构使用的多功能隔振装置研发成为振动控制领域的热点和难点. 目前, 针对振动现象, 有橡胶隔振和钢弹簧隔振两种方式, 钢弹簧性能和理论计算均较成熟, 而橡胶隔振其理论仍是空白; 针对地震, 主要是隔离水平向地震作用. 在水平隔震同时, 隔离竖向振动, 减轻城市交通等环境振动的影响, 是亟待解决的难题.

在结构的三维隔震(振)方面, 已有学者开展了研究. 现阶段, 国内外多数学者的三维隔震研究是伴随三维支座开发研究进行的. 为解决水平隔震和竖向交通振动问题, 1996 年 Fujita S 等^[1] 研究了一种由螺旋弹簧和橡胶支座组合形成的三维隔震体系, 为克服结构摇摆问题, 结构周围采用支撑支座. 2000 年, S Yabana^[2] 对厚层的橡胶支座进行三维隔震性能研究. 2004 年, 熊世树等^[3] 提出了一种铅芯橡胶碟簧三维隔震支座 (3DB), 并对其性能进行了试验和理论研究, 同期, 孟庆利等^[4] 研究了竖向半主动隔震装置的三维隔震系统. 2004 年, 作者发明了一种新型的三维隔震减振支座, 可实现水平隔震和竖向隔振功能,

收稿日期: 2022-06-30

修改稿日期: 2023-01-18

基金项目: 云南省市一体化项目(202202AH210004); 国家自然科学基金资助项目(51778162); 广东省研究开发项目(2022K10072332)

第一作者: 魏陆顺(1973—), 男, 博士, 教授级高工, 主要从事振动控制研究. E-mail: weils@fosu.edu.cn

并在实际工程中得到了应用^[5]。综上可知, 在竖向被动隔振方面, 市场上有成熟的橡胶减振支座和钢弹簧两种方式; 在水平隔震方面, 成熟的方案是整体结构水平隔震技术。对于整体结构采用竖向隔振时, 须满足地震作用下结构不会出现大的摇摆反应。此方面研究成果较少, 仍处于起步阶段。

在橡胶支座理论方面, 为准确计算隔震支座的竖向性能和水平性能, Gent 和 Lindley (1959, 1970, 1974 年)^[6-8] 最早开始了钢板对橡胶约束作用下支座特性研究, 在假设橡胶体积不可压缩、垂直压缩变形引起橡胶鼓凸, 其变形量与圆板中心成正比, 并采用抛物线模拟变形剖面的条件下, 推导橡胶隔振支座的竖向压缩性能、水平剪切性能和弯曲性能计算公式。上述推导是基于竖向变形较橡胶总厚度是微小变形。对于橡胶隔振支座, 钢板对橡胶约束大大减小, 上述条件已不再成立。基于上述现状, 本文开展橡胶隔振支座理论和试验验证相关研究。

1 橡胶隔振支座侧向变形

1.1 橡胶隔振支座侧向变形理论计算

本部分推导支座侧向变形计算。对于单层橡胶体, 中孔半径为 r_0 , 外径为 D , 变形前橡胶层厚度为 t_R 。取环形单元 dR 分析 (见图 1), 变形后高度为 H , 变形前后环形单元体积不变, 变形前体积为

$$V = 2\pi R \cdot dR \cdot t_R \quad (1)$$

变形后体积包括 2 部分, 高度为 H 的环形体积为

$$V_1 = 2\pi R \cdot dR \cdot H \quad (2)$$

上述 2 部分体积变化为

$$dV = V - V_1 = 2\pi R \cdot dR \cdot \delta_V \quad (3)$$

式中: 竖向变形 $\delta_V = t_R - H$ 。

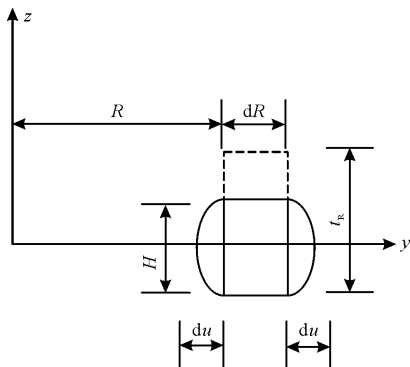


图 1 橡胶单元变形状态

Fig. 1 Deformation state of rubber unit

变形后鼓出部分中, du 为鼓出最大位移, 取变形后鼓出部分沿高度不变, $y = du$, 变形后鼓出部分体积为

$$V_2 = \int_{-\frac{H}{2}}^{\frac{H}{2}} \pi [(R + dR + y)^2 - (R + dR)^2] dz + \int_{-\frac{H}{2}}^{\frac{H}{2}} \pi [R^2 - (R - y)^2] dz \quad (4)$$

$$V_2 = 4\pi R \cdot du \cdot H \quad (5)$$

环形单元变形前、后体积不变, 可得

$$dV = V_2 = 2\pi R \cdot dR \cdot \delta_V \quad (6)$$

$$du = \frac{\delta_V}{2H} \cdot dR \quad (7)$$

对于 R 位置, 鼓出值为

$$u_R = \int_{r_0}^R \frac{\delta_V}{2H} \cdot dR = \frac{\delta_V}{2H} \cdot (R - r_0) \quad (8)$$

Lindley 推导的 $u_R = \frac{3}{4} \frac{\delta_V}{H} \cdot (R - r_0)$, 其计算结果较式(8)大。由式(8)可知, 橡胶隔振支座向外鼓出和向内鼓出计算一样, 即中孔鼓出量与外围鼓出量相同。

1.2 橡胶隔振支座侧向变形试验研究

为验证橡胶隔振支座侧向变形理论计算, 对橡胶隔振支座进行了试验研究。支座尺寸见图 2。试验过程同时测试了支座的竖向变形和侧向变形, 加载按 $1 \text{ MPa} \pm 10\%$ 、 $1.5 \text{ MPa} \pm 10\%$ 和 $2 \text{ MPa} \pm 10\%$ 进行。

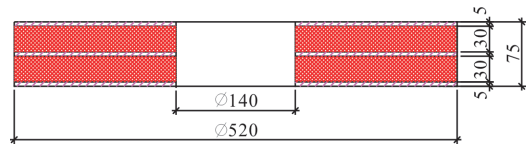


图 2 橡胶隔振支座尺寸

Fig. 2 Size of rubber vibration isolation bearing

侧向变形试验结果见表 1, 试验和模拟曲线见图 3, 曲线 3 和表 1 中矩形模拟, 为公式(8)计算结果。表 1 中抛物线模拟为 Lindley 采用方式, 对于橡胶隔振支座, 采用矩形模拟较抛物线具有更好的精度。

表 1 侧向变形试验值和理论模拟值

Tab. 1 Lateral deformation test values and theoretical simulation values

试验 面压/MPa	单层橡胶 竖向变形 /mm	侧向变形/mm		
		试验值	理论模拟	
			矩形	抛物线
1	0.85	2.51	2.78	4.17
1.5	1.24	4.18	4.08	6.13
2	1.59	5.76	5.33	8.00

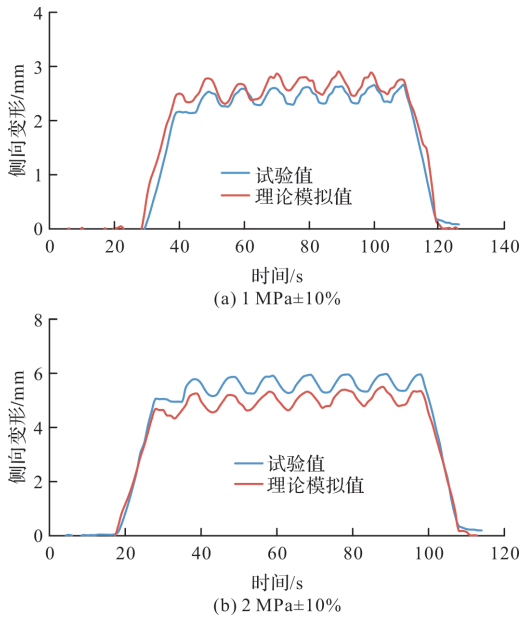


图3 侧向变形曲线对比

Fig. 3 Comparison of lateral deformation curves

2 橡胶隔振支座竖向刚度

2.1 橡胶隔振支座竖向刚度理论计算

建筑橡胶隔震支座竖向刚度理论计算中, 支座刚度大, 橡胶竖向变形和侧向变形均较小, 推导的竖向刚度理论计算公式得到的支座刚度为恒定值, 与竖向荷载或变形无关. 而橡胶隔振支座竖向变形大, 建筑橡胶隔震支座竖向刚度理论计算公式不再适用. 本部分利用弹性力学经典理论, 推层橡胶隔振支座竖向刚度理论计算公式.

橡胶隔振支座竖向受力和变形为轴对称空间问题, 坐标系见图1, 本部分采用位移求解, 环向位移采用式(8), 即

$$u_R = \frac{\delta_V}{2H} \cdot (R - r_0) \quad (9)$$

各应变量为

$$\epsilon_R = \frac{\partial u_R}{\partial R} = \frac{\delta_V}{2H} \quad (10)$$

$$\epsilon_\theta = \frac{u_R}{R} = \frac{\delta_V}{2H} \left(1 - \frac{r_0}{R}\right) \quad (11)$$

$$\epsilon_z = \partial u_z / \partial z \quad (12)$$

上式中 u_z 为竖向变形分量, 对应体积应变为

$$\theta = \epsilon_R + \epsilon_\theta + \epsilon_z = \frac{\delta_V}{2H} \left(2 - \frac{r_0}{R}\right) + \frac{\partial u_z}{\partial z} \quad (13)$$

不计体力, 位移分量应满足下述方程为

$$\left(\frac{1}{1-2u}\right) \frac{\partial \theta}{\partial z} + \nabla^2 u_z = 0 \quad (14)$$

设 u_z 方向变形满足平截面假定, 式(14)可简化为

$$\left(\frac{2-2u}{1-2u}\right) \frac{d^2 u_z}{dz^2} = 0 \quad (15)$$

式(15)对应结果为

$$u_z = Az + B \quad (16)$$

竖向位移对应边界条件为 $(u_z)_{z=0.5H} = \delta_V$, $(u_z)_{z=-0.5H} = 0$, 由边界条件确定的式(16)中系数 A 、 B 值, 即

$$u_z = \frac{\delta_V}{H} z + \frac{\delta_V}{2} \quad (17)$$

式(17)为竖向位移方程, 由此可得竖向应力为

$$\sigma_z = \frac{E}{1+\mu} \left(\frac{\mu}{1-2\mu} \theta + \frac{\partial u_z}{\partial z} \right) = \frac{E}{1+\mu} \frac{\delta_V}{H} \left(\frac{1}{1-2\mu} - \frac{\mu}{1-2\mu} \frac{r_0}{2R} \right) \quad (18)$$

取任一界面, 同平衡方程得

$$F_v = \int_r^R \sigma_z 2\pi R dR = 2\pi \frac{E}{(1+\mu)} \frac{\delta_V}{H} \int_r^R \left(\left(\frac{1}{1-2\mu} \right) - \left(\frac{\mu}{1-2\mu} \right) \frac{r_0}{2R} \right) R dR \quad (19)$$

$$F_v = \int_r^R \sigma_z 2\pi R dR =$$

$$2\pi \frac{E}{1+\mu} \frac{\delta_V}{H} \left(\frac{R^2 - r^2}{2 - 4\mu} - \frac{\mu \cdot r_0}{2 - 4\mu} (R - r) \right) \quad (20)$$

式中: R 、 r 为橡胶隔振支座变形后的状态, 即 $R = D/2 + u_R$, $r = r_0 - u_R$.

设 $\alpha = \pi \frac{E}{1+\mu} \frac{(0.5D + r_0 - \mu \cdot r_0)(0.5D - r_0)}{1-2\mu}$,

对于确定的橡胶隔振支座, α 为常数, 有

$$F_v = \alpha \frac{\delta_V}{t_R - \delta_V} \left(1 + \frac{\delta_V}{t_R - \delta_V} \right) \quad (21)$$

由式(21)可得竖向刚度公式为

$$k_v = \frac{dF_v}{d\delta_V} = \alpha \left(\frac{1}{t_R - \delta_V} + \frac{\delta_V}{(t_R - \delta_V)^2} - \frac{2\delta_V^2}{(t_R - \delta_V)^3} \right) \quad (22)$$

由式(22)可知, 随竖向压缩变形增加, 竖向刚度会逐步增大, 竖向刚度呈现非线性特性. 式(22)采用弹性力学理论得出, 由于橡胶材质的弹性模量在不同应力下为非恒定常数, 表观弹性常数还需经相关试验修正确定.

2.2 橡胶隔振支座竖向刚度试验验证

试验试件见图2, 取竖向变形为0对应刚度为基准刚度, 由式(22)可得到不同竖向变形对应竖向刚度与基准刚度比见图4, 图4中 E 和 μ 取为常数. 随竖向变形增加, 刚度逐步增大.

验证试验竖向刚度测试包括: 1 MPa、1.5 MPa、2 MPa、5 MPa、8 MPa 和 10 MPa, 加载采用试验面压 $\pm 10\%$, 其竖向刚度值见表2.

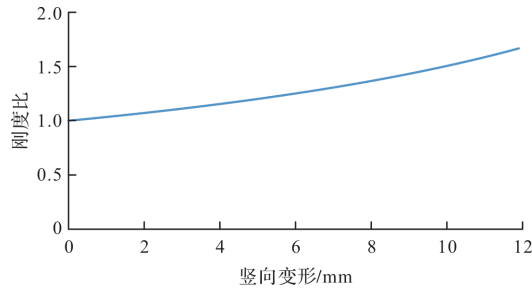


图 4 刚度比与变形关系

Fig. 4 Relationship between vertical stiffness ratio and vertical deformation

表 2 竖向刚度试验结果

Tab. 2 Test results of vertical stiffness

试验面压 /MPa	单层橡胶 竖向位移 δ_v /mm	竖向刚度 试验值/ $\text{kN} \cdot \text{mm}^{-1}$	刚度比
$1 \pm 10\%$	0.85	140.70	1.00
$1.5 \pm 10\%$	1.24	198.30	1.41
$2 \pm 10\%$	1.59	199.98	1.42
$5 \pm 10\%$	4.31	254.51	1.81
$8 \pm 10\%$	5.43	537.96	3.82
$10 \pm 10\%$	5.76	803.89	5.71

注: 取 1 MPa 对应竖向刚度为基准刚度。

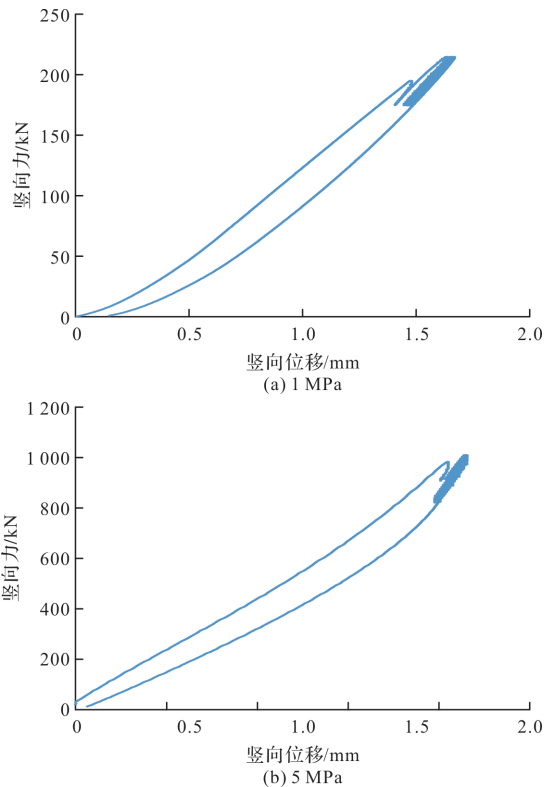


图 5 竖向刚度测试曲线

Fig. 5 Vertical stiffness test curves

3 橡胶隔振支座疲劳性能

为确定橡胶隔振支座疲劳性能, 对 400 型隔振支座进行了 200 万次疲劳试验. 支座尺寸见图 6,

橡胶剪切模量为 0.392 N/mm^2 , 疲劳试验对应竖向面压为 $5 \text{ MPa} \pm 30\%$, 加载频率为 1 Hz . 试验测试了隔振支座初始刚度、50 万次、100 万次、150 万次、170 万次、180 万次和 200 万次加载后的竖向刚度值(见图 7), 较初始值, 竖向刚度变化在 $-3.9\% \sim +6.3\%$ 之间. 竖向刚度曲线见图 8. 由疲劳试验可知, 200 万次试验后, 其性能基本不变, 橡胶隔振支座具有良好的抗竖向循环振动能力.

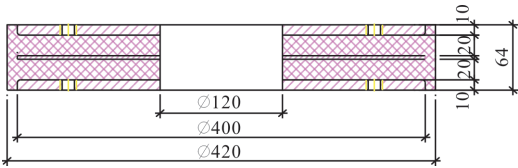


图 6 橡胶隔振支座尺寸

Fig. 6 Size of rubber vibration isolation bearing

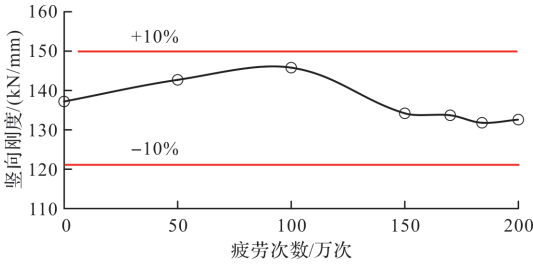


图 7 疲劳试验竖向刚度值

Fig. 7 Vertical stiffness values in the failure experiment

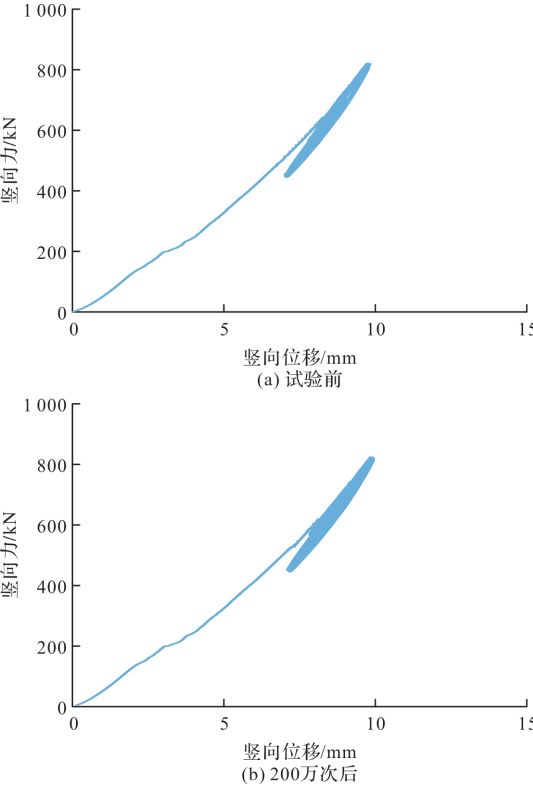


图 8 竖向刚度测试曲线

Fig. 8 Vertical stiffness test curves

4 结语

对于橡胶隔振支座,由于橡胶层较厚,钢板对橡胶约束大大减小,用于建筑抗震橡胶支座的竖向刚度计算公式已不再适用.论文针对支座侧向鼓出采用矩形变形模拟较抛物线有更高的计算精度,且中心孔的鼓出量与外围鼓出量相同,此计算方法可作为隔振支座尺寸设计使用.

为导出竖向刚度计算公式,本文依据经典弹性力学理论,采用位移求解方法,推导了相关计算公式.公式表明,竖向刚度与竖向压缩变形有关,且与竖向刚度试验结果趋势一致.由于橡胶应力、应变关系的非线性特性,论文推出的计算公式与实际还存在较大偏差,建议使用本公式时,应结合不同橡胶材料特性和试验修正共同确定.

200 万次的疲劳试验结果表明,橡胶隔振支座是一种良好的隔振装置,且支座承载力大,高度小,是一种较理想隔振选择方案.

参考文献 References

- [1] FURUKAWA S, SATO E, SHI Y D, et al. Full-scale shaking table test of a base-isolated medical facility subjected to vertical motions[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2013, 42 (13), 1931-1946.
- [2] YABANA S. Development of thick rubber bearing for three-dimensional seismic isolation[C]//Proc. of 12th World Conference on Earthquake Engineering, Auckland, New Zealand; ResearchGate, 2000, 104-106.
- [3] 熊世树, 陈金凤, 梁波. 三维基础隔震结构多维地震响应的非线性分析[J]. 华中科技大学学报(自然科学版). 2004. 32(12), 81-84.
- XIONG Shishu, CHEN Jinfeng, LIANG Bo. Nonlinear analysis of multi-dimensional seismic response in 3D base isolated structure[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology(Nature Science Edition). 2004. 32(12), 81-84.
- [4] 孟庆利, 林德全, 张敏政. 三维隔震系统振动台实验研究[J]. 地震工程与工程振动. 2007(3):116-120.
- MENG Qingli, LIN Dequan, ZHANG Minzheng. Study on three-dimensional isolated system in shaking table test[J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration. 2007(3):116-120.
- [5] 魏陆顺, 周福霖等. 三维隔震(振)支座的工程应用与现场测试[J]. 地震工程与工程振动. 2007(3):121-125.
- WEI Lushun, ZHOU Fulin et al. Application of three-dimensional seismic and vibration isolator to building and site test[J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration. 2007(3):121-125.
- [6] GENT A N, LINDLEY P B. The compression of bonded rubber blocks[J], Proc. Instn. Mech. Engrs., 1959, 173(3): 111-122.
- [7] Gent A N, Meinecke E A. Compression, bending, and shear of bonded rubber blocks[J]. Polymer Engineering and Science. 1970. 10(1): 48-53.
- [8] GENT A N. Henry R L. ROXBURY M L. Interfacial Stresses for bonded rubber blocks in compression and shear[J]. Journal of Applied Mechanics. 1974, 41 (4): 855-859.

(编辑 沈 波)