

# 石灰岩热弹性方程与高温热变形因子特性的实验研究

杨建<sup>1,2\*</sup> 符力耘<sup>3</sup> 张卫强<sup>4</sup>

1 中国科学院地球化学研究所 贵阳 550081; 2 中国科学院大学 北京 100049;

3 中国石油大学(华东) 青岛 266580; 4 中国矿业大学 徐州 221116

## 1. 摘要

本文通过研究 40 块石灰岩样品分别加热到不同的温度, 讨论弹性模量的热弹性方程与温度对热变形系数的影响。通过 P 波速度实验、单轴压缩实验和注汞实验等相关实验结果, 分析了弹性模量、P 波速度、峰值抗压强度、孔隙度等随温度的变化规律。结果表明: 弹性模量随温度的增加而逐渐减小, 弹性模量和温度的关系符合理论的弹性模量热弹性方程, 即弹性模量是温度的二次函数; P 波速度改变率、峰值抗压强度改变率和有效固体骨架改变率与温度都具有很好的相关性, 通过峰值抗压强度改变率和有效固体骨架改变率与 P 波速度改变率的关系可以研究相关的热变形系数; P 波速度改变率, 峰值抗压强度改变率和有效固体骨架改变率计算得到的热变形系数与温度呈指数关系, 拟合曲线相关系数分别为 0.899、0.917 和 0.924, 即峰值抗压强度改变率和有效固体骨架改变率与 P 波速度改变率相比较能更好的描述岩石受温度影响的性质。

## 2. 正文

### (1) 理论基础

①热弹性方程: 根据克劳修斯不等式, 应变张量表达为:

$$\sigma_{ij} = \frac{\partial \Psi}{\partial \gamma_{ij}}$$

$$\Psi = \Psi(\gamma_{ij}, \theta^*)$$

为赫姆霍兹自由能。弹性模量表达式写为:

$$E = E_2 \theta^{*2} + E_1 \theta^* + E_0$$

。E<sub>1</sub>, E<sub>2</sub>, E<sub>3</sub>为常数,  $\theta^* = \theta / T_0$ ,  $\theta$  为温度增量, T<sub>0</sub>为参考绝对温度。这就是理论的弹性模量热弹性方程。

②热变形系数: 通过弹性应变方法, 热损伤因子为:

$$D(T) = 1 - \left( \frac{V_T}{V_0} \right)^2$$

。V<sub>T</sub> 为损伤后岩石的纵波波速, V<sub>0</sub> 为损伤前岩石中的纵波波速, D(T)为损伤因子。在应用热工程领域中, 材料受温度影响而破坏被称为损伤因子; 在地球物理学领域中, 岩石受温度影响破坏而变形则被称为热变形系数。

### (2) 实验结果

①弹性模量: 高温后石灰岩的弹性模量随温度的变化如图 1 所示。弹性模量与温度的关系可以通过以下经验曲线表示:  $E = 77.716 - 0.172T + 9.531 \times 10^{-5} T^2$ 。拟合曲线相关系数为 0.986。从图 1 中看出, 随着温度的增加, 石灰岩的弹性模量逐渐的降低; 弹性模量在常温下(25℃)最大, 达到 73.14GPa, 在 900℃时最小为 2.17GPa。这可以解释为: 在高温条件下, 热结构应力将出现并引起一些微裂隙的出现, 这些微裂隙随着温度的增大而逐渐的扩张, 从而会使得弹性模量随温度的增加而减小。基于实验数据的弹性模量和温度的拟合关系曲线与理论的弹性模量热弹性方程相一致, 即弹性模量是温度的二

次函数。

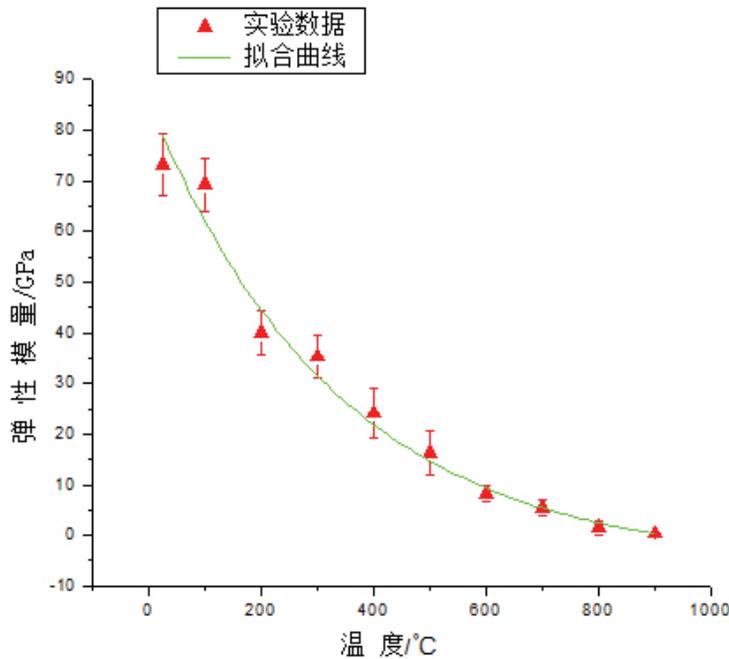


图 1 弹性模量与温度的关系

Fig.1 The relationship between the elastic modulus and the temperature

②改变率：改变率（P 波速度、峰值抗压强度、有效固体骨架）随温度的变化如图 2 所示。各改变率与温度的关系都可以通过以下经验曲线表示： $K=A+BT^C$ 。A, B, C 为实验系数, K 为 P 波速度改变率、峰值抗压强度改变率和有效固体骨架改变率。从图 2 中看出，改变率随着温度的增加而逐渐增大。自由水与结构水的蒸发、矿物的分解反应和热结构应力的出现等都会影响 P 波速度、峰值抗压强度和有效固体骨架的值。

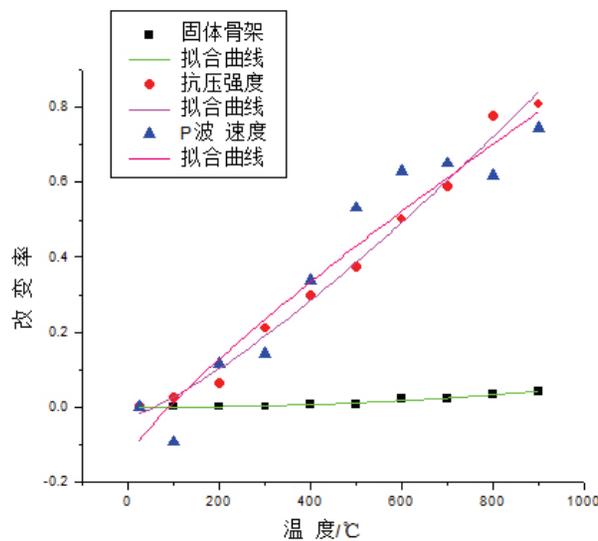


图 2 改变率与温度的关系

Fig.2 The relationship between the change rate and temperature

③热变形系数：图 3 给出了热变形系数（P 波速度、峰值抗压强度、有效固体骨架）与温度的关系。各热变形系数与温度的关系都可以通过以下经验曲线表示： $D(T)=A_1+B_1\exp(T/C_1)$ 。A<sub>1</sub>, B<sub>1</sub>, C<sub>1</sub> 为

实验系数,  $D(T)$  为热变形系数。从图 3 中看出, 热变形系数随温度增加而逐渐增大, 并且在  $900^{\circ}\text{C}$  达到最大, 分别为 0.935, 0.929 和 0.933。

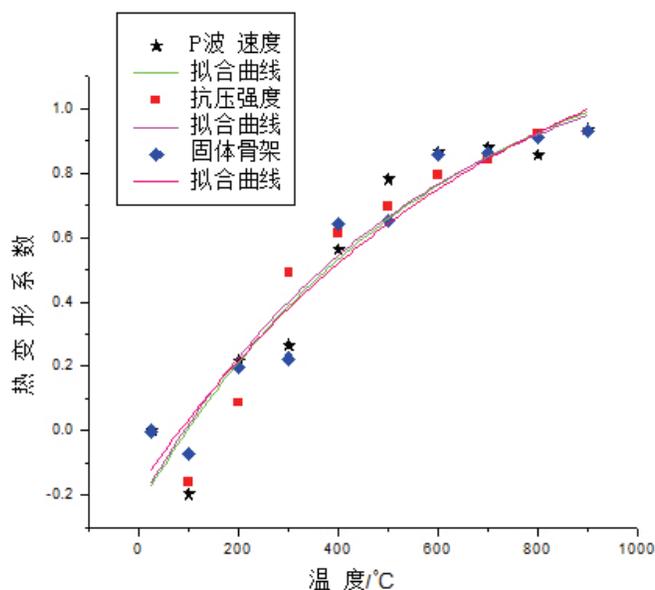


图 3 热变形系数与温度的关系

Fig.3 The relationship between the thermal deformation factor and the temperature

### (3) 结论

①弹性模量和温度的关系可以用热弹性方程表示的, 即弹性模量是温度的二次函数; ②P 波速度改变率、峰值抗压强度改变率和有效固体骨架改变率与温度呈幂函数关系, 随着温度的增加而逐渐增大; ③通过 P 波速度改变率与峰值抗压强度改变率和有效固体骨架改变率关系, 能用峰值抗压强度改变率和有效固体骨架改变率计算热变形系数; ④P 波速度改变率计算得到的热变形系数、峰值抗压强度改变率计算得到的热变形系数和有效固体骨架改变率计算得到的热变形系数都随温度增加而增加。

### 参考文献

- [1]Dillon, O. W. J, A nonlinear thermoelasticity theory, Journal of the Mechanics & Physics of Solids, 1962, 10(2), 123-131.
- [2]王洪纲编, 热弹性力学概论, 清华大学出版社, 1989, 57-66.
- [3]赵洪宝等, 温度对砂岩损伤影响试验研究, 岩石力学与工程学报, 2009, 28(s1), 2784-2788.
- [4]Zhang, W., et al., Experimental study on the thermal damage characteristics of limestone and underlying mechanism, Rock Mechanics & Rock Engineering, 2016, 49(8), 2999-3008.