

# 高温作用对花岗岩动态压缩力学性能的影响研究

刘石<sup>1</sup>, 许金余<sup>1,2</sup>

(1. 空军工程大学 航空航天工程学院, 西安 710038; 2. 西北工业大学 力学与土木建筑学院, 西安 710072)

**摘要:** 采用高温装置对传统的大直径  $\Phi 100$  mm SHPB 试验设备进行改造, 利用该试验系统对采自陕西秦岭山区的花岗岩进行不同高温与冲击荷载共同作用下的动态压缩试验, 考察了高温下花岗岩的峰值应力、峰值应变、弹性模量的变化规律。试验结果表明: 在  $25\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 600\text{ }^{\circ}\text{C}$  时, 高温作用对花岗岩峰值应力的影响不大;  $800\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 1\ 000\text{ }^{\circ}\text{C}$  时, 花岗岩峰值应力受高温影响明显, 迅速下降;  $600\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 800\text{ }^{\circ}\text{C}$  有可能存在花岗岩内部结构突变的临界温度; 随着温度的升高, 峰值应变呈现逐渐增加的趋势, 而弹性模量离散性较大, 大体上呈现逐渐减小的趋势; 从总体规律上来说, 高温下花岗岩的峰值应力、峰值应变仍然表现出显著的应变率硬化效应。

**关键词:** 花岗岩; 高温; 动态力学性能; 应变率

**中图分类号:** TU452 **文献标识码:** A

## Effect of high temperature on dynamic compressive mechanical properties of granite

LIU Shi<sup>1</sup>, XU Jin-yu<sup>1,2</sup>

(1. Aeronautics and Astronautics Engineering College, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China;

2. College of Mechanics and Civil Architecture, Northwest Polytechnic University, Xi'an 710072, China)

**Abstract:** By using a high temperature split Hopkinson pressure bar apparatus composed of a traditional  $\Phi 100$  mm SHPB and a high-temperature device, a dynamic compression test of granite chosen from Shaanxi Qinling mountain under high temperature and dynamic loading was conducted. The varying laws of its peak stress, peak strain and elastic modulus were studied. It was demonstrated that during  $25\text{ }^{\circ}\text{C}$  to  $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ , temperature has a little effect on its peak stress; but its peak stress drops rapidly within the temperature range of  $800\text{ }^{\circ}\text{C}$  to  $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; the possible critical temperature exists within the temperature range of  $600\text{ }^{\circ}\text{C}$  to  $800\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; the peak strain increases gradually with increase in temperature, and the elastic modulus generally presents decreasing trend; in general, its peak stress and peak strain reveal significant strain rate hardening effect at high temperature.

**Key words:** granite; high temperature; dynamic mechanical properties; strain rate

冲击荷载作用下岩石破坏强度和变形性质的研究, 是岩石动力学最基本的也是最关键的课题之一<sup>[1-3]</sup>。Demirdag 等<sup>[4]</sup>运用液压伺服压力试验机和霍普金森压杆装置对几种不同岩石进行试验, 研究孔隙率、密度和硬度对岩石静态和动态力学性能的影响。Dai 等<sup>[5]</sup>采用 SHPB 装置对有凹口的半圆形试件进行了冲击动力学实验, 提出一种新的参量可以准确的描述岩石 I 型动态破碎的过程。许金余等<sup>[6-7]</sup>采用单轴 SHPB 试验系统研究了岩石在冲击荷载作用下的动态力学性能及变形破坏破碎块度的分形特征。张颖等<sup>[8]</sup>采用 Hopkinson 压杆对岩石进行动态冲击压缩试验, 应变率范围为  $25.4 \sim 193.4\text{ s}^{-1}$ 。李刚等<sup>[9]</sup>用改进的设备对三峡坝址处的花岗岩进行了大量的动态单轴压缩试验和劈裂试验, 探讨了相应的破坏机制。同时, 高温

下的岩石力学性能研究也成为当前岩石力学领域非常活跃的研究方向, 高温下的岩石工程问题也已成为岩石力学的新课题<sup>[10]</sup>。Mufundirwa 等<sup>[11]</sup>通过浅表面位移监控器对黑硅石受温度变化影响下沿主裂纹方向的倾斜变形进行观察, 提出了一种简便的可以将岩体运动与破碎位移生长联系起来的位移修正变量的计算方法。Chepurov 等<sup>[12]</sup>通过对蛇纹石在高温高压下的色谱分析试验, 研究了岩石中的矿物成分及结构形式、空隙及水分的变化。郜保平等<sup>[13]</sup>探讨了  $600\text{ }^{\circ}\text{C}$  内高温状态花岗岩遇水冷却后的力学特性及花岗岩体遇水热破裂劣化机制。秦本东等<sup>[14]</sup>利用自行研制的高温岩石膨胀特性试验装置, 对石灰岩和砂岩试件  $300 \sim 700\text{ }^{\circ}\text{C}$  高温过程中的膨胀特性进行了试验研究。谢卫红等<sup>[15]</sup>对高温作用下石灰岩在单向压缩和单向拉伸加载的微观结构进行了实时试验研究。

但是由于当前地下工程所处地质条件日趋复杂, 岩石工程中的岩石介质所处环境往往涉及冲击荷载、高温

及其相互耦合作用等极端条件。本文利用高温装置改进后的  $\Phi 100$  mm SHPB 试验系统,对不同高温下花岗岩的动态压缩力学性能进行试验研究,研究了峰值应力、峰值应变、弹性模量随温度及应变率的变化关系。

## 1 高温下花岗岩的动态压缩试验

### 1.1 静态力学性能

试验用的花岗岩取自陕西秦岭山区。采用液压伺服压力试验机对花岗岩进行静态力学试验,试验内容包括:饱和和干燥两种状态下岩石的单轴抗压强度、劈裂抗拉强度以及软化系数。通过试件直径的两端,沿轴线方向划两条相互平行的加载基线,将两根直径为 1 mm 的钢丝作为垫条沿加载基线固定在试件两端。试验中仪器的加载速度为 0.3 ~ 0.5 MPa/s,属于静态加载。得到花岗岩的饱和单轴抗压强度为 87.40 MPa,干燥单轴抗压强度为 90.42 MPa,软化系数为 0.96,劈裂抗拉强度为 8.89 MPa。

### 1.2 试验系统

本文中所采用的  $\Phi 100$  mm 高温 SHPB 试验装置,如图 1 所示,是在  $\Phi 100$  mm SHPB 的基础之上加装高温装置组成。SHPB 试验装置主要由主体设备、能源系统、测试系统三大部分组成。本文所采用的加热设备为 RX3-20-12 箱式电阻炉,该设备可以自动控温、升温,采用硅碳棒元件加热,高性能纤维保温。

高温装置主体为管式加热炉、温度控制箱和支撑底座。管式加热炉内径 120 mm,设计最高温度为 1 200  $^{\circ}\text{C}$ ,由刚玉管和耐热钢管组成,保温层采用绝热性能优良的硅酸铝纤维毯,加热元件采用耐高温硅碳棒。采用移动支撑平台以实现管式加热炉与 SHPB 压杆之间的协同工作,加热炉底座上支撑平台通过螺母控制升降,可调控高低,以实现与压杆的对中,支撑平台上面嵌满可自由滚动的钢珠,使加热炉可自由拖动。

### 1.3 试验方案

为了充分研究高温下花岗岩的动态压缩力学性

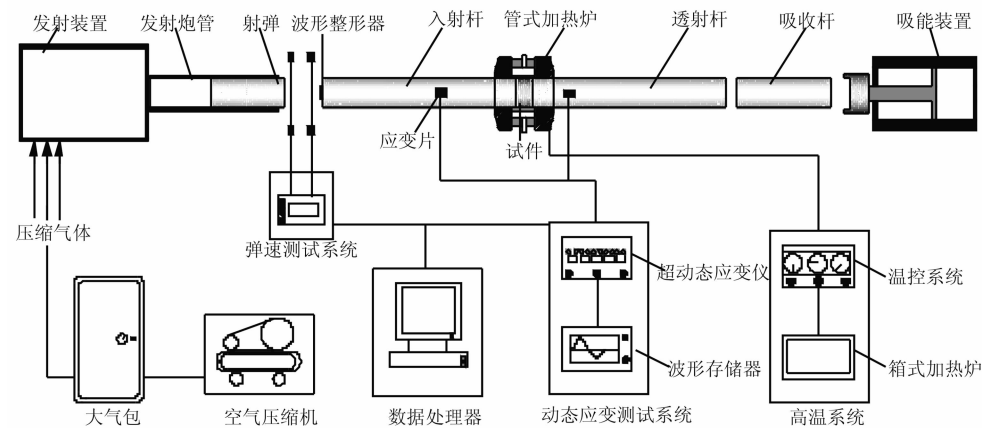


图 1  $\Phi 100$  mm 高温 SHPB 试验系统示意图

Fig. 1 Apparatus of 100 mm diameter high temperature SHPB

能,试验温度设置为 25  $^{\circ}\text{C}$ , 100  $^{\circ}\text{C}$ , 200  $^{\circ}\text{C}$ , 400  $^{\circ}\text{C}$ , 600  $^{\circ}\text{C}$ , 800  $^{\circ}\text{C}$  和 1 000  $^{\circ}\text{C}$  共 7 个温度等级,子弹冲击加载速率设计值分别为 11.0 m/s, 12.0 m/s, 13.0 m/s, 14.0 m/s, 15.0 m/s,进行高温下花岗岩在冲击荷载作用下的动态压缩试验。为了保证对试件加热均匀,以 10  $^{\circ}\text{C}/\text{min}$  的速度升温,到预定温度后保持恒温 3 h,以使试件内外温度一致,制成不同高温下的花岗岩试件。

## 2 高温下花岗岩的动态压缩力学性能分析

利用高温装置改进的  $\Phi 100$  mm SHPB 对高温下 (25  $^{\circ}\text{C}$  ~ 1 000  $^{\circ}\text{C}$ ) 花岗岩进行每组五个冲击加载速率等级作用下的动态压缩试验,试验结果见表 1 所示。

图 2 - 图 4 是高温下花岗岩的峰值应力、峰值应变及弹性模量随温度及应变率的关系曲线。

可以看出,试验结果有一定的离散性,但仍具有明显的总体规律:① 在 25  $^{\circ}\text{C}$  ~ 600  $^{\circ}\text{C}$  时,高温作用对花岗岩峰值应力的影响不大,说明花岗岩均匀性及致密性较好;800  $^{\circ}\text{C}$  ~ 1 000  $^{\circ}\text{C}$  时,花岗岩峰值应力受高温影响明显,迅速下降,此时,可以理解为花岗岩中的矿物成分及其内部结构发生了显著变化,一些容易发生分解、蒸发的矿物质导致岩石内部所含有的预裂纹产生更大裂纹引起强度下降,600  $^{\circ}\text{C}$  ~ 800  $^{\circ}\text{C}$  有可能存在高温下花岗岩内部结构突变的临界温度。② 随着温度的升高,高温下花岗岩的峰值应变呈现逐渐增加的趋势,与 25  $^{\circ}\text{C}$  相比,到 1 000  $^{\circ}\text{C}$  时,相同冲击加载速率下的峰值应变增加了近 1.5 倍 ~ 1.7 倍。③ 本文采用弹性模量  $E_c$ ,即应力 - 应变曲线上上升段上对应压缩强度为 40% 和 60% 的两点连线的斜率,高温下花岗岩的弹性模量离散性较大,大体上随着温度的升高呈现逐渐减小的趋势,尤其是在 800  $^{\circ}\text{C}$  之后,弹性模量迅速降低,总体而言,经历 800  $^{\circ}\text{C}$  的高温对花岗岩的变形特性影响较大。④ 一般认为岩石的峰值应力、峰值应变等与应变率具有正相关性,即存在应变率硬化效应,这已经得到大量试验结果证实,但是,由于岩石试件的不均匀性、尺寸效应、端部效应、加工精度等影响试验结果的因素较多,造成了结果存在偏差和离散。但是从总体规律上来说,即便是在高温状态下,花岗岩的峰值应力、峰值应变仍然表现出显著的应变率硬化效应,均随应变率的提高近似线性增加,在温度达到 800  $^{\circ}\text{C}$  之后,增加的幅度迅速增大。

但是,由于岩石试件的不均匀性、尺寸效应、端部效应、加工精度等影响试验结果的因素较多,造成了结果存在偏差和离散。但是从总体规律上来说,即便是在高温状态下,花岗岩的峰值应力、峰值应变仍然表现出显著的应变率硬化效应,均随应变率的提高近似线性增加,在温度达到 800  $^{\circ}\text{C}$  之后,增加的幅度迅速增大。

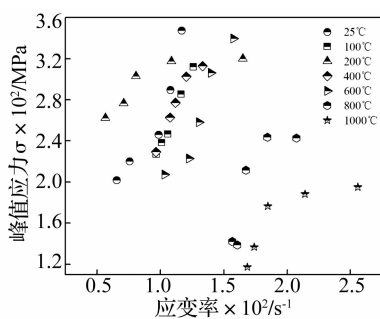


图 2 高温下花岗岩峰值应力的变化曲线

Fig. 2 Changes on peak stress of granite under high temperature

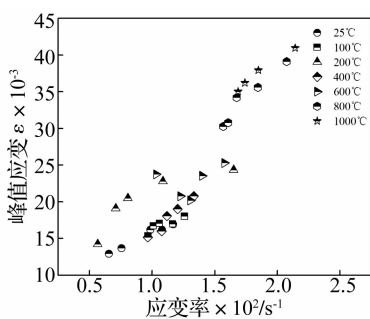


图 3 高温下花岗岩峰值应变的变化曲线

Fig. 3 Changes on peak strain of granite under high temperature

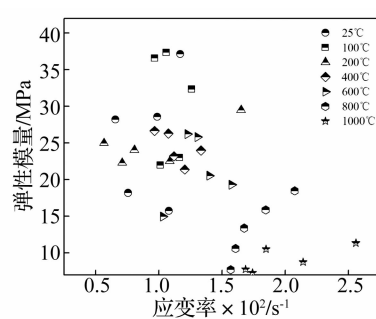


图 4 高温下花岗岩弹性模量的变化曲线

Fig. 4 Changes on elastic modulus of granite under high temperature

表 1 高温下花岗岩 SHPB 试验结果

Tab. 1 Test results of SHPB tests on granite samples under high temperature

编号	温度等级	整形器直径/mm	弹速/(m·s <sup>-1</sup> )	应变率 $\dot{\epsilon}$ /(s <sup>-1</sup> )	峰值应力 $\sigma_p$ /MPa	峰值应变 $\epsilon_p/10^{-3}$	弹模/GPa
GHDC-0-1	25	30	11	65.5	201.81	12.91	28.22
GHDC-0-2	25	33	12	75.6	220.03	13.67	18.18
GHDC-0-3	25	35	13	98.6	245.82	16.18	28.58
GHDC-0-4	25	40	14	108.0	289.42	16.19	15.73
GHDC-0-5	25	45	15	116.9	347.18	16.92	37.12
GHDC-1-1	100	30	11	96.7	226.81	15.33	36.58
GHDC-1-2	100	33	12	101.1	238.25	16.71	21.96
GHDC-1-3	100	35	13	105.9	246.57	17.06	37.36
GHDC-1-4	100	40	14	116.4	285.25	16.97	23.00
GHDC-1-5	100	45	15	126.0	311.94	18.01	32.33
GHDC-2-1	200	30	11	56.5	262.21	14.22	24.97
GHDC-2-2	200	33	12	71.0	276.57	19.09	22.30
GHDC-2-3	200	35	13	80.6	302.86	20.48	24.04
GHDC-2-4	200	40	14	108.6	317.43	22.79	22.51
GHDC-2-5	200	45	15	165.0	319.91	24.31	29.48
GHDC-4-1	400	30	11	96.5	229.18	15.17	26.65
GHDC-4-2	400	33	12	107.5	262.76	16.00	26.28
GHDC-4-3	400	35	13	111.8	277.17	18.07	23.19
GHDC-4-4	400	40	14	120.4	302.53	19.02	21.38
GHDC-4-5	400	45	15	133.3	312.78	20.77	23.97
GHDC-6-1	600	30	11	103.2	207.22	23.75	14.96
GHDC-6-2	600	33	12	122.6	222.77	20.76	26.21
GHDC-6-3	600	35	13	130.5	258.11	20.18	25.81
GHDC-6-4	600	40	14	140.0	306.10	23.53	20.54
GHDC-6-5	600	45	15	157.6	339.69	25.30	19.30
GHDC-8-1	800	30	11	156.8	142.11	30.27	7.70
GHDC-8-2	800	33	12	160.7	138.73	30.77	10.59
GHDC-8-3	800	35	13	167.5	211.45	34.20	13.38
GHDC-8-4	800	40	14	184.5	243.51	35.60	15.86
GHDC-8-5	800	45	15	207.5	242.73	39.12	18.46
GHDC-10-1	1000	30	11	168.6	117.30	35.03	7.74
GHDC-10-2	1000	30	12	174.1	136.64	36.20	7.27
GHDC-10-3	1000	35	13	184.8	176.51	37.92	10.51
GHDC-10-4	1000	40	14	214.1	188.26	40.94	8.73
GHDC-10-5	1000	45	15	255.9	195.06	45.44	11.34

备注:GHDC 表示高温下的花岗岩动态抗压试件。

### 3 结 论

(1) 在 25 °C ~ 600 °C 时,高温作用对花岗岩峰值应力的影响不大;800 °C ~ 1000 °C 时,花岗岩峰值应力

受高温影响明显,迅速下降;600 °C ~ 800 °C 有可能存在高温下花岗岩内部结构突变的临界温度。

(2) 随着温度的升高,高温下花岗岩的峰值应变呈现逐渐增加的趋势;而弹性模量离散性较大,大体上随着温度的升高呈现逐渐减小的趋势,尤其是在 800 °C 之后,弹性模量迅速降低,总体而言,经历 800 °C 的高温对花岗岩的变形特性影响较大。

(3) 从总体规律上来说,即便是在高温状态下,花岗岩的峰值应力、峰值应变仍然表现出显著的应变率硬化效应,均随应变率的提高近似线性增加,在温度达到 800 °C 之后,增加的幅度迅速增大。

#### 参 考 文 献

[ 1 ] 黄理兴, 陈奕柏. 我国岩石动力学研究状况与发展[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(11): 1881-1886.  
HUANG Li-xing, CHEN Yi-bai. Rock dynamics in China: Past, present and future [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(11): 1881-1886.

[ 2 ] 吴绵拔, 刘远惠. 中等应变率对岩石力学特性的影响[J]. 岩土力学, 1980(1): 51-58.  
WU Mian-ba, LIU Yuan-hui. The effect of intermediate strain rates on mechanical properties of rock [J]. Rock and Soil Mechanics, 1980(1): 51-58.

[ 3 ] 李夕兵, 古德生. 岩石冲击动力学[M]. 长沙: 中南工业大学出版社, 1994.

[ 4 ] Demirdag S, Tufekci K, Kayacan R, et al. Dynamic mechanical behavior of some carbonate rocks [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2010, 47(2): 307-312.

[ 5 ] Dai F, Xia K, Zheng H, et al. Determination of dynamic rock Mode-I fracture parameters using cracked chevron notched semi-circular bend specimen [J]. Engineering Fracture Mechanics, 2011, 78: 2633-2644.

[ 6 ] 许金余, 刘 石. 大理岩冲击加载试验碎块的分形特征分析[J]. 岩土力学, 2012, 33(11): 3225-3229.  
XU Jin-yu, LIU Shi. Research on fractal characteristics of marble fragments subjected to impact loading [J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(11): 3225-3229.

[ 7 ] 刘 石, 许金余, 刘军忠, 等. 绢云母石英片岩和砂岩的 SHPB 试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(9): 1864-1871.  
LIU Shi, XU Jin-yu, LIU Jun-zhong, et al. SHPB Test on sericite-quartz schist and sandstone [J]. Chinese Journal of

Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(9): 1864 - 1871.

[ 8 ] 张颖, 李明, 王可慧, 等. 岩石动态力学性能试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(增2): 4153 - 4158. ZHANG Ying, LI Ming, WANG Ke-hui, et al. Experimental study dynamic mechanical properties of rocks[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(增2): 4153 - 4158.

[ 9 ] 李刚, 陈正汉, 谢云, 等. 高应变率条件下三峡工程花岗岩动力特性的试验研究[J]. 岩土力学, 2007, 28(9): 1833 - 1840. LI Gang, CHEN Zheng-han, XIE Yun, et al. Test research on dynamic characteristics of Three Gorges granite under high strain rate[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(9): 1833 - 1840.

[ 10 ] 赵阳升, 万志军, 康建荣. 高温岩体地热导论[M]. 北京: 科学出版社, 2004.

[ 11 ] Mufundirwa A, Fujii Y, Kodama N, et al. Analysis of natural rock slope deformations under temperature variation; A case from a cool temperate region in Japan [J]. Cold Regions Science and Technology, 2011, 65: 488 - 500.

[ 12 ] Chepurov A I, Tomilenko A A, Zhimulev E I, et al. The conservation of an aqueous fluid in inclusions in minerals and

their interstices at high pressures and temperatures during the decomposition of antigorite [J]. Russian Geology and Geophysics, 2012, 53(3): 234 - 246.

[ 13 ] 邵保平, 赵阳升. 600 °C内高温状态花岗岩遇水冷却后力学特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(5): 892 - 898. XI Bao-ping, ZHAO Yang-sheng. Experimental research on mechanical properties of water-cooled granite under high temperatures within 600 °C [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(5): 892 - 898.

[ 14 ] 秦本东, 罗运军, 门玉明, 等. 高温下石灰岩和砂岩膨胀特性的试验研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(2): 417 - 422. QIN Ben-dong, LUO Yun-jun, MEN Yu-ming, et al. Experimental research on swelling properties of limestone and sandstone at high temperature[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(2): 417 - 422.

[ 15 ] 谢卫红, 高峰, 李顺才, 等. 石灰岩热损伤破坏机制研究[J]. 岩土力学, 2007, 28(5): 1021 - 1025. XIE Wei-hong, GAO Feng, LI Shun-cai, et al. Study on mechanism of thermal damage fracture for limestone [J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(5): 1021 - 1025.



(上接第 189 页)

最后,考虑在弹性支撑条件下的弹性耦合板结构系统,为了简化过程,本文假定所有边界弹簧和耦合弹簧刚度值均取为  $10^5$ , 耦合位置  $x_c = 0.75$  m, 耦合角度  $\alpha = 90^\circ$ . 表 6 列出了耦合板结构系统的前 6 阶固有频率。

表 6 所有弹簧刚度值为  $10^5$ , 耦合角度为  $90^\circ$   
下耦合板结构固有频率 ( $x_c = a_1/2$ )

Tab. 6 Natural frequencies for T-coupled plates at  $90^\circ$   
with uniform spring stiffness  $10^5$  ( $x_c = a_1/2$ )

模态阶次	本文方法/Hz	FEA/Hz	偏差/%
1	21.396	21.368	0.13
2	21.604	21.555	0.22
3	24.010	24.006	0.02
4	25.500	25.487	0.05
5	28.398	28.260	0.49
6	28.493	28.474	0.07

### 3 结论

本文采用一种改进的傅里叶级数方法,对 T 型耦合板结构自由振动特性进行求解分析。将 T 型耦合板结构位移函数不变地表示为一种改进的加速傅里叶级数形式,采用 Rayleigh-Ritz 方法求解基于能量原理的拉格朗日方程,得到关于未知位移级数傅里叶展开系数的标准特征值问题。采用各个方向均匀分布的弹簧来模拟边界支撑及耦合连接,可以通过改变弹簧刚度值而简单实现各种边界条件及耦合连接的模拟。采用本文方法对 T 型耦合板结构进行了自由振动特性分析,通过与有限元结果相对比验证本文方法的正确性和适用性。本文方法可以方便地扩展到多板耦合结构系统

动态特性分析。

### 参考文献

[ 1 ] Cremer L, Heckl M, Ungar. E E. Structure-borne Sound[M]. 2<sup>nd</sup> ed. Berlin: Springer Verlag, 2005.

[ 2 ] Shen Y, Gibbs B M. An approximate solution for the bending vibrations of a combination of rectangular thin plates [J]. Journal of Sound and Vibration, 1986, 105(1): 73 - 90.

[ 3 ] Kessissoglou N J. Power transmission in L-shaped plates including flexural and in-plane vibration [J]. Journal of the Acoustical Society, 2004, 115: 1157 - 1169.

[ 4 ] 游进, 李鸿光, 孟光. 耦合板结构随机能量有限元分析[J]. 振动与冲击, 2009, 28(11): 43 - 46. YOU Jin, LI Hong-guang, MENG Guang. Random energy finite element analysis of coupled plate structures [J]. Journal of vibration and shock, 2009, 28(11): 43 - 46.

[ 5 ] 李凯, 黎胜, 赵德有. 耦合板结构振动波传递及能量分布可视化研究[J]. 船舶力学, 2011, 15(4): 419 - 426. LI Kai, LI Sheng, ZHAO De-you. Visualizing vibration wave flow characteristics in plate structures by vibration intensity techniques [J]. Journal of ship mechanics, 2011, 15(4): 419 - 426.

[ 6 ] 闫安志, 崔润卿. 耦合板的导纳功率流[J]. 焦作工学院学报(自然科学版). 2001, 20(2): 144 - 147. YAN An-zhi, CUI Run-qing. Mobility power-flow through plate like coupled structures [J]. Journal of Jiaozuo institute of technology, 2001, 20(2): 144 - 147.

[ 7 ] Du J, Li W L, Liu Z, et al. Free vibration of two elastically coupled rectangular plates with uniform elastic boundary restraints[J]. Journal of Sound and Vibration, 2011, 330(4): 788 - 804.

[ 8 ] Li W L. Free vibrations of beams with general boundary conditions[J]. Journal of Sound and Vibration, 2000, 237(4): 709 - 725.

[ 9 ] Li W L. Vibration analysis of rectangular plates with general elastic boundary supports [J]. Journal of Sound and Vibration, 2004, 273(3): 619 - 635.