

# Mg-6Gd-3Y-0.5Zr 镁合金和 ZL114A 铝合金阻尼性能

孟德浩<sup>1,2</sup> 李培杰<sup>1</sup> 徐文涛<sup>3</sup> 袁文全<sup>2</sup> 王端志<sup>2</sup>

(1 清华大学机械工程系, 北京 100084)

(2 北京宇航系统工程研究所, 北京 100076)

(3 郑州大学, 郑州 450001)

**文 摘** 航天结构飞行过程中, 温度、应变振幅等会有大幅的变化, 为了研究服役环境对阻尼的影响, 采用 DMA 测试仪研究了 Mg-6Gd-3Y-0.5Zr 镁合金和 ZL114A 铝合金材料内部阻尼随服役环境的变化。结果表明: 两种材料阻尼都随应变振幅的增大而增大, 且同样应变振幅下 Mg-6Gd-3Y-0.5Zr 阻尼性能优于 ZL114A; 两种材料阻尼都随温度的升高而增大, Mg-6Gd-3Y-0.5Zr 和 ZL114A 合金 330℃ 时阻尼均值分别是 30℃ 时 2.1 倍和 1.3 倍, 可知 Mg-6Gd-3Y-0.5Zr 合金对温升更敏感, 当结构温升较大时, 其阻尼应作为变量进行考虑。

**关键词** Mg-6Gd-3Y-0.5Zr 镁合金, ZL114A 铝合金, 阻尼

中图分类号: TB30

DOI: 10.12044/j.issn.1007-2330.2020.06.015

## Damping Performance of Mg-6Gd-3Y-0.5Zr Magnesium Alloy and ZL114A Aluminum Alloy

MENG Dehao<sup>1,2</sup> LI Peijie<sup>1</sup> XU Wentao<sup>3</sup> YUAN Wenquan<sup>2</sup> WANG Duanzhi<sup>2</sup>

(1 Department of Mechanical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084)

(2 Beijing Institute of Astronautical Systems Engineering, Beijing 100076)

(3 Zhengzhou University, Zhengzhou 450001)

**Abstract** During the flight of the aerospace structure, the temperature and strain amplitude, etc. will change significantly. In order to study the effect of service environment on damping, the internal damping of Mg-6Gd-3Y-0.5Zr magnesium alloy and ZL114A aluminum alloy with the variation of service environment were studied by using DMA tester. The results show that the damping of both Mg-6Gd-3Y-0.5Zr and ZL114A materials gradually increases with the increase of strain amplitude, and under the same amplitude, the damping performance of Mg-6Gd-3Y-0.5Zr is better than that of ZL114A. In addition, the damping of both materials increases with the increase of temperature. The average damping values of Mg-6Gd-3Y-0.5Zr and ZL114A alloy at 330℃ are 2.1 and 1.3 times that at 30℃, respectively. It can be seen that Mg-6Gd-3Y-0.5Zr alloy is more sensitive to temperature rise, when the structure temperature rise is large, its damping should be considered as a variable.

**Key words** Mg-6Gd-3Y-0.5Zr magnesium alloy, ZL114A aluminum alloy, Damping

### 0 引言

由于发动机工作及气动噪声等的影响, 航天飞行器结构面临严重的宽频带随机振动和噪声环境<sup>[1-2]</sup>, 可能使结构出现疲劳失效和动态失稳。统计数字表明, 火箭的地面和飞行试验故障约有一三分之一与振动有关, 而材料的阻尼性能直接关系到结构的振动特性及响应。镁合金具有良好的阻尼减震性能<sup>[3]</sup>, 随着 Mg-6Gd-3Y-0.5Zr 镁合金在航空航天结

构上的应用, 研究其阻尼性能对结构动态特性和减振设计具有重要意义。

国内外学者对镁合金的阻尼机理和性能等进行了研究, 针对镁及镁合金的阻尼机制, GRANATO 和 LÜCKE 提出的位错钉扎-脱钉模型(G-L 理论)<sup>[4-5]</sup>被广泛接受; 文献[6]研究了添加镍、铝、铜和锡等不同元素下应变振幅相关的阻尼性能, 并从研制高阻尼合金的角度对试验结果进行了解释; 文献[7]研究了

收稿日期: 2020-03-23

第一作者简介: 孟德浩, 1986 年出生, 高级工程师, 主要从事箭体结构设计与镁合金研究工作。E-mail: dh\_meng0015@163.com

变形工艺、热处理、合金元素等对镁合金微观组织、阻尼和微塑变的影响机制以及它们之间的内在联系,采用动态机械分析仪(DMA)研究纯镁阻尼性能随应变的变化规律;文献[8]以合金元素的含量和线应变的应变振幅两个因素为切入点,研究了镁合金材料的阻尼特性机理。目前的研究主要集中于微观尺度下材料成分、成型工艺、热处理等对镁合金阻尼性能的影响以及如何得到高阻尼镁合金材料等<sup>[9-13]</sup>。然而通过文献调研发现,对于航天结构中常用的ZL114A铝合金和最近几年逐渐应用的Mg-6Gd-3Y-0.5Zr镁合金的阻尼性能随服役环境的变化规律还有待研究,缺乏阻尼性能相关的定量分析。

本文主要研究Mg-6Gd-3Y-0.5Zr镁合金材料内部阻尼的变化规律,ZL114A铝合金作为对照。首先介绍阻尼的测试方法,然后采用DMA测试仪分别研究材料内部阻尼随应变振幅、服役温度和频率的变化,分析阻尼变化的机理和规律,拟对Mg-6Gd-3Y-0.5Zr镁合金结构的减振分析及应用具有一定的指导意义。

### 1 阻尼及阻尼的测试

阻尼按类型可分为材料内部阻尼、结构阻尼、流体阻尼、库仑摩擦和斯特里贝克阻尼等<sup>[14]</sup>。本文主要研究材料内部阻尼,材料内部阻尼来源于材料内部各种各样微观和宏观过程中的机械能耗散<sup>[15]</sup>。

根据G-L理论<sup>[4-5]</sup>,材料中普遍存在两种阻碍位错运动的力量—弱钉和强钉。当应力幅值较小时,位错弦在两个弱钉扎点间随周期应力振荡,产生由频率决定的且与应变振幅无关的阻尼;当应力足够大时,位错可以挣脱开弱钉扎点,但并不限制在强钉扎点之间,同时滑移的面积更大,导致阻尼快速增加,随着应力继续增加,位错弦则将形成位错环,此时材料发生不可逆的塑性应变,示意图1。

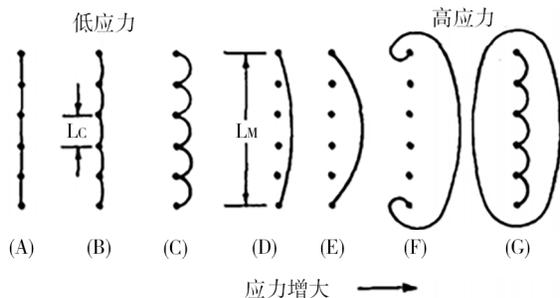


图1 G-L位错阻尼模型

Fig. 1 G-L dislocation damping model

对于材料阻尼测试,一般用阻尼损耗因子 $\eta$ 表示<sup>[16]</sup>。共振棒法(resonant-bar techniques)是测量材料阻尼常用的一种方法,常用的有单、双悬臂弯曲法和三点弯曲法<sup>[17]</sup>,镁合金一般采用单悬臂法。动态

力学分析仪(DMA)是常用的测量仪器,在强迫振动下,其可测量得到材料的损耗因子 $\eta$ 。

采用DMA-Q800型动态热机械分析仪,如图2所示,采用单悬臂梁进行夹持,夹持方式如图3所示。测量的温度范围 $-150 \sim 600 \text{ }^\circ\text{C}$ ,频率范围 $0.01 \sim 200 \text{ Hz}$ ,最大力 $18 \text{ N}$ ,最小力 $0.00001 \text{ N}$ ,模量范围 $10^3 \sim 10^{12} \text{ Pa}$ ,升温速率 $0.1 \sim 20 \text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$ ,降温速率 $0.1 \sim 10 \text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$ 。



图2 DMA-Q800动态热机械分析仪

Fig. 2 DMA-Q800 dynamic thermo-mechanical analyzer

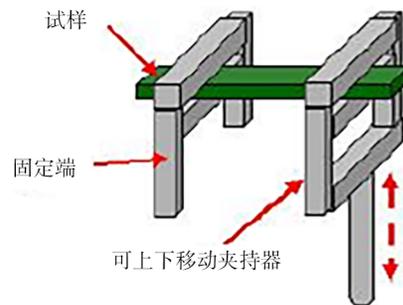


图3 单悬臂夹具阻尼测试示意图<sup>[7]</sup>

Fig. 3 Diagram of damping test of single cantilever fixture<sup>[7]</sup>

制备了Mg-6Gd-3Y-0.5Zr镁合金和ZL114A铝合金测试试件,每种试件有若干件,试件的种类和尺寸如表1所示。

表1 试件种类和尺寸

Tab. 1 Type and size of test piece

材料	编号	试件尺寸/mm
Mg-6Gd-3Y-0.5Zr	SMg1~SMg8	40×10×1
ZL114A	SA11~SA18	40×10×1

## 2 测试结果分析

### 2.1 阻尼随应变振幅的变化

首先研究了Mg-6Gd-3Y-0.5Zr镁合金和ZL114A铝合金阻尼 $\eta$ 随应变振幅 $\varepsilon$ 的变化,激励频率为 $1 \text{ Hz}$ ,测试温度为室温,镁合金应变振幅范围为 $5 \times 10^{-6} \sim 2.2 \times 10^{-3}$ ,铝合金应变振幅范围为 $8 \times 10^{-6} \sim 8.7 \times 10^{-4}$ ,由于DMA测试的载荷有限,且铝合金弹性

模量高于镁合金,因此铝合金可测量的最大应变小于镁合金,试验结果如图4所示。

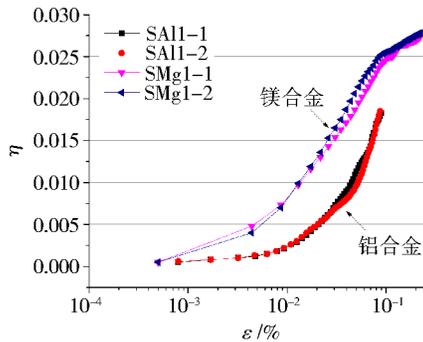


图4 Mg-6Gd-3Y-0.5Zr镁合金和ZL114A铝合金阻尼随应变振幅变化曲线

Fig. 4 Damping change with strain amplitude of Mg-6Gd-3Y-0.5Zr magnesium alloy and ZL114A aluminum alloy

由图4可以看出,不同试件的重复测试表明,测试曲线吻合比较好,表明了测试的有效性。Mg-6Gd-3Y-0.5Zr镁合金和ZL114A铝合金的阻尼随应变振幅的增大而逐渐增大,当超过一定的应变振幅后,阻尼开始迅速增加。测试结果表明两种材料都存在一个“雪崩”式脱钉过程,阻尼快速增加。对于Mg-6Gd-3Y-0.5Zr镁合金,当应变振幅超过 $1.3 \times 10^{-3}$ 后,位错很难从强钉扎点脱钉,阻尼随应变振幅的增大而增大的趋势变得很平缓。对于铝合金,由于测试设备的限制,未测试到更大应变振幅下的阻尼情况。

对于Mg-6Gd-3Y-0.5Zr镁合金,根据G-L理论,当应变振幅很小时,此时阻尼主要跟频率 $f$ 相关,阻尼由热弹性阻尼和可逆位错等组成,根据热弹性阻尼理论,在一个完全梁中热量流动带来的阻尼可以用Debye峰来描述<sup>[18]</sup>:

$$\eta(f) = \eta_{\max} \frac{2 \frac{f}{f_0}}{\left(\frac{f}{f_0}\right)^2 + 1} \quad (1)$$

式中,

$$\begin{cases} \eta_{\max} = \frac{E\alpha^2 T}{2c_p} \\ f_0 = \frac{\pi D_t}{2a^2} \\ D_t = \frac{\kappa}{c_p} \end{cases} \quad (2)$$

式中, $E$ 表示弹性模量, $\alpha$ 表示线膨胀系数, $T$ 表示绝对温度, $c_p$ 表示定压比热容, $a$ 表示试件厚度, $\kappa$ 表示热导率。Mg-6Gd-3Y-0.5Zr相应的参数见表2。

表2 Mg-6Gd-3Y-0.5Zr材料性能

Tab. 2 Properties of Mg-6Gd-3Y-0.5Zr material

$E$ / Pa	$\alpha$ / $10^{-6} \cdot \text{K}^{-1}$	$C$ / $\text{J} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{K})^{-1}$	$\kappa$ / $\text{W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$	$T$ / K
$4.5 \times 10^{10}$	25.6	$1.57 \times 10^6$	31	273

按照上述公式, $f=1$  Hz,试件 $a=1$  mm时对应的热弹性阻尼为 $1.65 \times 10^{-4}$ 。应变振幅为 $5 \times 10^{-6}$ 时,DMA实测总的阻尼为 $5 \times 10^{-4}$ ,热弹性阻尼占总阻尼的33%。随着应变振幅继续增大,位错脱钉变为主要阻尼来源,热弹性阻尼的占比会大大减小。

对于ZL114A试件,在测试达到的最高应变 $8.7 \times 10^{-4}$ 处,阻尼达到0.018 4;对于Mg-6Gd-3Y-0.5Zr镁合金,在测试的最高应变振幅 $2.2 \times 10^{-3}$ 处,阻尼均值达到0.027 5,在应变振幅为 $8.7 \times 10^{-4}$ 处,阻尼均值达到0.023 4,是同样应变振幅下ZL114A阻尼的1.27倍。在测试的应变范围之内,同样应变下,Mg-6Gd-3Y-0.5Zr的阻尼性能比ZL114A铝合金的要高,说明Mg-6Gd-3Y-0.5Zr具有更好的阻尼性能。

## 2.2 阻尼随温度的变化

航天结构在飞行过程中,由于气动加热等作用,结构件的温度会明显的上升。测试了两种材料阻尼随温度的变化,试件数量各为3个,激励频率为1 Hz,温度范围为30~330 °C,应变振幅为 $8.7 \times 10^{-4}$ 。

Mg-6Gd-3Y-0.5Zr合金阻尼随温度变化曲线见图5,可以看出阻尼性能随着温度的增加而增大,30 °C时3根Mg-6Gd-3Y-0.5Zr试件的阻尼值约为0.027 4,330 °C时3根试件的阻尼值是0.059 8、0.057和0.054,平均值是30 °C时的2.1倍,阻尼性能随温度的增高得到了大幅提高。从3根Mg-6Gd-3Y-0.5Zr试件的趋势来看,阻尼随温度不是线性递增的,在约200 °C以下增长相对平缓,超过200 °C后线性增加。3根Mg-6Gd-3Y-0.5Zr试件的总体变化趋势比较一致,但在不同温度区间变化趋势也有差异,这可能与升温过程不均匀有关。

随着温度的不断升高,原子运动加剧,有效位错长度及可动位错密度增加,位错的弛豫及晶界、相界间的滑动也变得相对容易起来<sup>[3]</sup>。晶界对温度特别敏感,在高温下,晶界会与位错一起产生滑移,此时晶界由于粘滞性流动引起能量损耗,即晶界阻尼<sup>[19]</sup>。综上,实验结果与理论研究是相一致的。

由测试结果可知,ZL114A阻尼性能也随着温度的增加而增大,30 °C时3根ZL114A试件的阻尼值都为0.018 4,330 °C时3根试件的阻尼值是0.023 4、0.023 6和0.023 9,平均值是30 °C时的1.3倍,阻尼性能随温度的增高得到了提高,但明显小于Mg-6Gd-3Y-0.5Zr阻尼随温度的增加幅度,可知Mg-

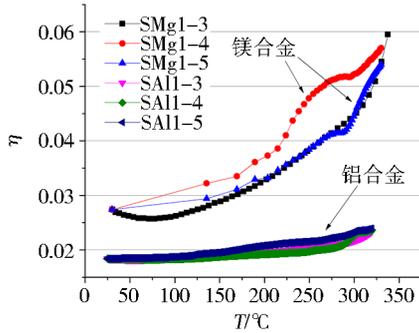


图5 Mg-6Gd-3Y-0.5Zr 镁合金和 ZL114A 铝合金阻尼随温度变化曲线

Fig. 5 Damping change with temperature of Mg-6Gd-3Y-0.5Zr magnesium alloy and ZL114A aluminum alloy

6Gd-3Y-0.5Zr 阻尼相比 ZL114A 对温度更敏感。

### 2.3 阻尼随激振频率的变化

航天结构振动具有宽幅激励的特点,由于整个飞行器的固有频率较低,一阶频率一般在 20 Hz 以下,因此影响较大的还是低频响应。用 DMA 研究了 1~120 Hz 下阻尼性能的变化,两种试样各三根,温度为室温。

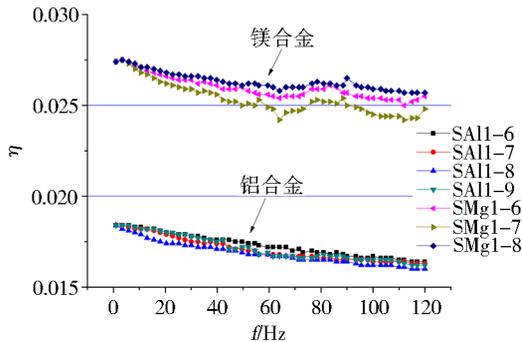


图6 ZL114A 和 Mg-6Gd-3Y-0.5Zr 合金阻尼随频率变化  
Fig. 6 Damping change with frequency of Mg-6Gd-3Y-0.5Zr magnesium alloy and ZL114A aluminum alloy

由图 6 看出,在 1~120 Hz 内,常温下 Mg-6Gd-3Y-0.5Zr 镁合金的阻尼性能在 3 Hz 达到峰值,然后随频率的增加而下降,但下降幅值不大,120 Hz 下相对峰值下降的幅度在 6.5%~11%。高应变状态下,镁合金阻尼主要是位错脱钉引起的阻尼,当频率比较高时,位错运动跟不上振动频率,导致频率增高时,阻尼性能反而下降。

ZL114A 没有明显的阻尼峰,在 1~120 Hz 内,ZL114A 的阻尼性能随频率的增加而下降,120 Hz 下相对 1 Hz 阻尼下降 0.002 0~0.002 4,降幅在 10.8%~13.0%。对比两个合金阻尼随频率的变化可知,ZL114A 阻尼在 1~120 Hz 内均小于 Mg-6Gd-3Y-

0.5Zr 阻尼,Mg-6Gd-3Y-0.5Zr 和 ZL114A 阻尼随频率的变化趋势一致,但 ZL114A 的降幅略大。

### 3 结论

Mg-6Gd-3Y-0.5Zr 镁合金和 ZL114A 铝合金材料阻尼性能是一个随着应变振幅、环境温度和激振频率等因素不断变化的物理量,主要结论如下:

(1) 超过一定应变振幅后,Mg-6Gd-3Y-0.5Zr 镁合金和 ZL114A 铝合金阻尼都随应变振幅的增大而逐渐增大;

(2) 在测试的频率范围内(1~120 Hz),Mg-6Gd-3Y-0.5Zr 镁合金和 ZL114A 铝合金阻尼都随频率增加而减小,降幅都在 15% 以内,其中 Mg-6Gd-3Y-0.5Zr 在 3 Hz 处有阻尼峰,而 ZL114A 铝合金未发现有关阻尼峰;

(3) Mg-6Gd-3Y-0.5Zr 镁合金和 ZL114A 铝合金阻尼都随温度的增加而增加,330 °C 时阻尼均值分别是 30 °C 时阻尼的 2.1 倍和 1.3 倍,可知 Mg-6Gd-3Y-0.5Zr 阻尼相比 ZL114A 对温度更敏感;对于有高温工作环境的镁合金结构,为了得到更准确的动力学响应,应该考虑阻尼随服役温度的变化。

### 参考文献

[1] 潘忠文,廉永正,曾耀祥,等. 运载火箭振动环境试验条件解析[J]. 导弹与航天运载技术,2013(6):29-32.  
PAN Zhongwen, LIAN Yongzheng, ZENG Yaoxiang, et al. Elucidation of vibration environmental test conditions for launch vehicle[J]. Missiles and Space Vehicles, 2013(6):29-32.

[2] 王晓雷,南宮自军,龙梁,等. 惯组飞行角振动环境测量与环境条件设计[J]. 宇航总体技术,2018,2(1):37-40.  
WANG Xiaolei, NANGONG Zijun, LONG Liang, et al. Measure of IMU'S angular vibration environment during a rocket flight and design of test condition [J]. Astronautical Systems Engineering Technology, 2018, 2(1):37-40.

[3] 刘楚明,纪仁峰,周海涛,等. 镁及镁合金阻尼特性的研究进展[J]. 中国有色金属学报,2005,15(9):1319-1325.  
LIU Chuming, JI Renfeng, ZHOU Haitao, et al. Research and development progress of damping capacity of magnesium and magnesium alloys[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2005, 15(9):1319-1325.

[4] GRANATO A, LÜCKE K. Application of dislocation theory to internal friction phenomena at high frequencies [J]. Journal of Applied Physics, 1956, 27(7):789-805.

[5] GRANATO A, LÜCKE K. Theory of mechanical damping due to dislocations [J]. Journal of Applied Physics, 1956, 27(6):583-593.

[6] SUGIMOTO K, NIHYA K, OKAMOTO T, et al. A study of damping capacity in magnesium alloys [J]. Transactions of the Japan Institute of Metals, 1977, 18(3):277-288.

[7] 范国栋. 纯镁和镁合金的阻尼及微塑变行为研究  
宇航材料工艺 <http://www.yhclgy.com> 2020年 第6期

[D]. 哈尔滨工业大学, 2013.

FAN Guodong. Research on damping and microplastic behavior of pure Mg and Mg alloys [D]. Harbin Institute of Technology, 2013.

[8] 田铁. 镁合金阻尼特性的实验研究[D]. 重庆工学院, 2008.

TIAN Tie. Experimental study of magnesium alloy damping capacities [D]. Chongqing Institute of Automobile, 2008.

[9] WATANABE H, MUKAI T, SUGIOKA M, et al. Elastic and damping properties from room temperature to 673 K in an AZ31 magnesium alloy [J]. Scripta Materialia, 2004, 51(4): 291-295.

[10] SRIKANTH N, GAOFENG C H, GUPTA M. Enhanced damping of a magnesium alloy by addition of copper [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2003, 352(1-2): 106-110.

[11] RIEHEMANN W, ABED EI-AI F. Influence of ageing on the internal friction of magnesium [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2000, 310(1/2): 127-130.

[12] ZHANG Z, ZENG X, DING W. The influence of heat treatment on damping response of AZ91D magnesium alloy [J]. Materials Science and Engineering: A, 2005, 392(1/2): 150-155.

[13] 王敬丰, 凌闯, 潘复生, 等. 合金元素对镁合金阻尼性能影响的研究进展 [J]. 兵器材料科学与工程, 2009(3): 90-95.

WANG Jingfeng, LING Chuang, PAN Fusheng, et al. Research progress in influence of alloying elements on damping properties of magnesium alloys [J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2009(3): 90-95.

[14] DE SILVA C W. Vibration damping, control, and design [M]. CRC Press, 2007.

[15] BERT C W. Material damping—introductory review of mathematical models, measures and experimental techniques [J]. Journal of Sound and Vibration, 1973, 29(2): 129-153.

[16] 高菲. Mg-Gd-Y-Al 合金力学及阻尼性能的研究 [D]. 上海交通大学, 2014.

GAO Fei. Mechanical properties and damping capacity study of Mg-Gd-Y-Al Alloys [D]. Shanghai Jiaotong University, 2014.

[17] 李沛勇, 戴圣龙. 材料阻尼及阻尼合金的研究现状 [J]. 材料工程, 1999(8): 44-48.

LI Peiyong, DAI Shenglong. Status of research on material damping and damping alloys [J]. Journal of Materials Engineering, 1999(8): 44-48.

[18] GOKEN J, RIEHEMANN W. Thermoelastic damping of the low density metals AZ91 and DISPAL [J]. Materials Science and Engineering: A, 2002, 324(1): 134-140.

[19] LEVINSON D W, MCPHERSON D J. Phase relations in magnesium-lithium-aluminum alloys [J]. Transactions of the ASM, 1956, 48: 689-705.