1003 - 7713/2001/05 - 0620 - 5

电流变阻尼器的抗冲击性能研究*

靳争团， 高跃飞， 任建亭， 姜节胜**

（西北工业大学振动工程研究所，西安 710072）

摘 要： 从理论和试验两个方面研究了所设计的电流变阻尼器在大冲击下的抗冲击性能，分析了电流变液性能与阻尼器结构参数对抗冲击性能的影响。认为采用高性能的电流变液体及改变结构参数，都可以使电流变阻尼器的高速缓冲性能提高。电流变液流速对电流变液的屈服应力影响显著，其值随流速的增加按指数规律减小。从定性、定量两个方面分析了电流变阻尼器作为阻尼器效果不明显的原因为：由电流变效应引起的阻尼力在整个液压阻力中所占比例太小，不能通过改变电压来使液压阻力具有很大的调节可控范围。

关键词：电流变液；阻尼器；抗冲击

中图分类号：O328 文献标识码：A

1 引 言

电流变液是一种智能材料，通过调节施加于电流变液的电场强度，可以连续、快速、可逆地改变其表观粘度和抗剪屈服应力，利用这种优良的机电耦合特性设计出的电流变元器件，如：可控离合器、发动机的 ER 可控支座、可控阻尼器等，已广泛应用于航空航天、机械工程、控制工程和机器人等多个领域[1]。电流变阻尼器在振动隔离、减振降噪及低速冲击下的缓冲性能等方面也有不少研究成果[2-5]，但其在大冲击下的行为研究少见报道，本文主要从理论和试验两个方面研究所设计的电流变阻尼器在大冲击下的抗冲击性能。

2 电流变阻尼器原理与结构

我们设计了两种电流变阻尼器结构。其结构如图 1 所示。活塞运动时，两边产生压力差，使 ER 材料通过电极极板之间流动，对活塞产生阻尼力。改变电极上的电压，即可改变电流变液体的性能，进而控制阻尼力。

对比这两类结构，图 1(a) 的特点是电极板的面积相对较大，液体经过的回路距离较短，电流变液体的流量损失也就相对较小。图 1(b) 的特点是具有补偿杆的傍路式阻尼器。图 1(a) 结构尺寸为：内桶内径 $D_n = 48$ mm，止退杆外径 $d_T = 28$ mm，止退桶内径 $D_T = 58$ mm，内桶外径 $d_n = 55.4$ mm，$L = 340$ mm，$h = 1.3$ mm，其图 1(b) 结构为 $D_T = 58$ mm，$d_T = 30$ mm，傍路管内径 $D_f = 37$ mm，傍路管芯杆外径 $d_f = 34$ mm，$L = 320$ mm，$h = 1.5$ mm 。

* 高等学校博士点专项科研基金资助(1999069908)。

** 通讯联系人，Email：jiangjs@.nwpu.edu.cn

收稿日期：2001 - 08 - 14；修回日期：2001 - 08 - 25。

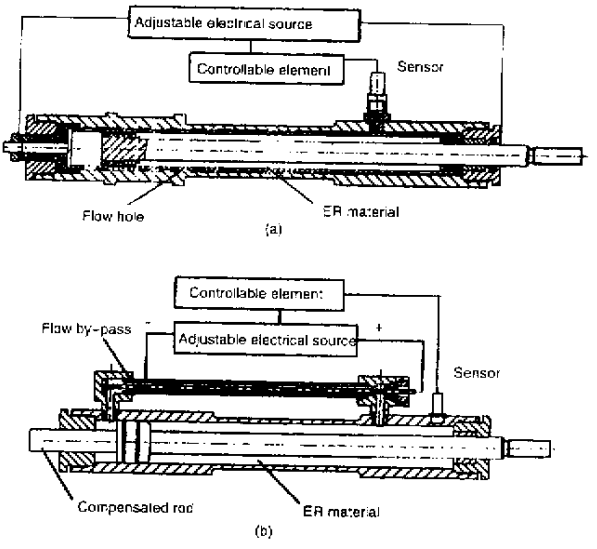

图 1 电流变缓冲器结构

Fig.1 The principle sketch of the ER damper

3 电流变阻尼器缓冲模拟试验

试验内容包括：无电场时电流变缓冲器性能试验；有电场时电流变缓冲器性能试验；结构参数对电流变阻尼器性能影响试验。图 1(a)试验结果如图 2a 所示，图 1(b)试验结果如图 2b 所示。

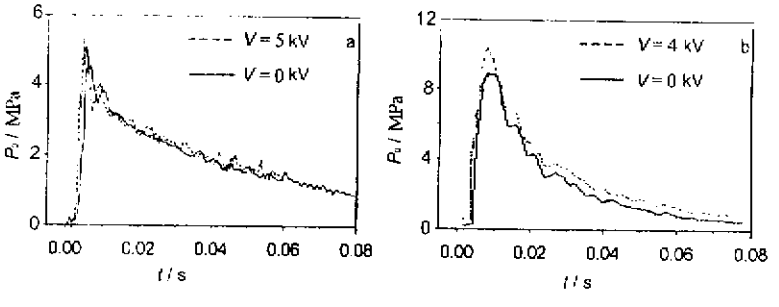

图 2 阻尼器(a)和(b)的液体压力曲线

Fig.2 Experimental results for the pressure responses of the ERF damper (a) and (b) for different input voltages

试验中，数据的波动主要是由于火药装药的不一致性和液体中可能有气体混入造成的，我们给出的曲线是由同一条件下多次试验结果的平均值曲线。由试验结果可知，多种结构以及不同参数下的同一结构，在不同电场强度下的液体压力 P_0 与各自对应的无电场时的值相比没有明显变化。

4 电流变阻尼器建模与仿真计算

4.1 电流变阻尼器数学模型

电流变液阻尼器模拟试验的工作过程为冲量发生器中火药燃烧产生冲击力的过程和后坐质量运动的动力学过程,根据火药燃烧理论和动力学理论,可建立整个模拟装置的数学模型。电流变阻尼器所提供的阻尼力由两部分组成,即:

$$\Delta p = \Delta p_\eta + \Delta p_{ER} = p_0 \tag{1}$$

$$\Delta p_\eta = \frac{\rho k_2}{2}\left(\frac{A_0}{a_f}\right)^2 \nu^2 \qquad \Delta p_{ER} = c\,\frac{L}{h}\,\tau_y \tag{2}$$

式中,Δp_η、Δp_{ER}分别为液体流动时粘性产生的阻尼力和电流变效应产生的阻尼力;A_0 为阻尼器作动活塞工作面积;a_f 为流液孔的面积;ρ 为电流变液体的密度;k_2 为液体流动损失系数,在下面予以确定;ν 为活塞速度。

通常,c 在 23 之间,而且认为 Δp_{ER}在所加电场一定的情况下为一不变量,特别在低速流动状态时。但对于高速流动,就应考虑流速对电流变效应的影响,即动、静屈服应力的差别。电流变液的屈服应力随流速的增加按指数规律下降,大致是其静屈服应力的四分之一[2]。若上面各式中电流变液的屈服应力仍用其静屈服应力 τ_y(目前我们所用的电流变液的静屈服应力值在 3 kV/mm 电场下为 2 kPa 左右),将流速的影响折算到参数 c,则其值应为 23 的 1/4,取为 0.67。

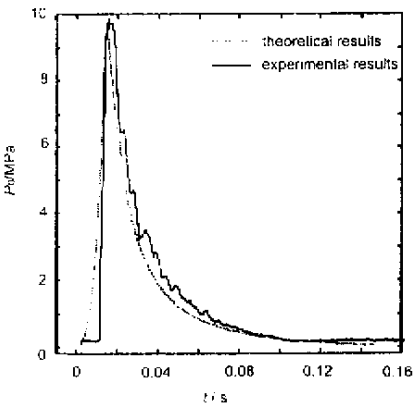

图 3 试验、计算对比曲线

Fig.3 Comparison between theoretical and experimental pressure responses of damper

4.2 计算结果讨论

以不加电场时电流变液阻尼器的试验结果为基准,通过不断调整模拟计算程序中参数的值,使两个结果相吻合,由此可得相应试验条件下的 k_2 的值为 7.3,至此计算所需的所有参数都已确定。图 3 表示了由这些参数得到的计算结果与试验结果的比较(结构 b)。在电场作用下,电流变液体产生电流变效应,从而引起液体流动时阻尼力的变化。图 4 为有电场和无电场时,电流变阻尼器的冲击响应对比结果。

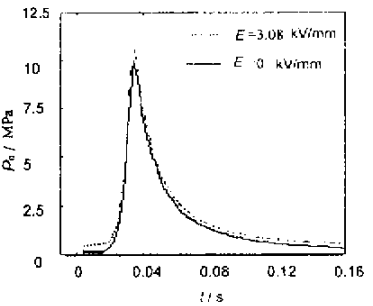

图 4 有电场和无电场对比曲线

Fig.4 Comparison pressure response of damper between with and without electric field

由图 4 可知,当电场强度 $E = 0$ kV/mm 时,压强 P_0 的最大值为 9.54 MPa,对应于 $E = 3.08$ kV/mm 的 P_0 的最大值为 10.35 MPa。所增比例为 8.49%。这一比例是对实际结构建模计算而得,但由于模型对实际结构作了很多简化,具有一定的误差,而且由于试验检测手段等原因,此电流变效应很可能在试验中检测不到。另外,8.49%的差别是在实际结构所能加最大电场时的效果,当电场更小时,电流变效应会更不明显,所以,就我们目前的实际结构、电流变液体性能,电流变液体不能应用于如此高速冲击下的缓冲。

4.3 静屈服应力对阻尼器缓冲效果的影响

由前面计算模型可知，电流变液的静屈服应力 τ_y 越高，电流变效应越大，电流变阻尼器的阻尼可控范围越大，其缓冲余地也就越大。假设电流变液的静屈服应力为 4.0、6.0、8.0 和 12.5 kPa 时，实际结构对应的响应曲线为图 5。从图 5 观察知，随着电流变液的静屈服应力增大，冲击阻尼力也逐渐增大。

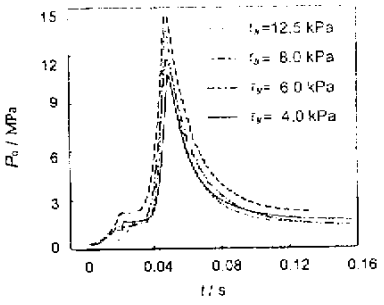

图 5 电流变液静屈服应力对压力的影响

Fig.5 Pressure of damper at different static – yield stress of ER material

4.4 结构参数对阻尼器性能的影响

电流变效应阻力的大小除与电流变液体的屈服应力有关外，还与电流变阻尼器的结构尺寸有关，下面讨论这些参数对电流变效应的影响。

4.4.1 电极板长度 L 的影响 对电流变阻尼器缓冲性能的影响基本上与电流变液静屈服应力对其的影响规律相同，即增大 L，粘性流动阻力的变化较小，由电流变效应引起的阻尼力增大，从而其在阻尼器内总液压阻力中所占的比例也将增大，有利于提高结构的缓冲性能。

4.4.2 电极板间隙 h 的影响 在假定流液孔的环形面积不变的情况下，h 越小，电流变效应越明显，越容易对结构所受的冲击载荷进行缓冲。

4.4.3 流液孔环形面积的影响 流液孔的环形面积越大，液体流动时的粘性阻力越小。而且由等流量理论，电极板间液体的平均流速越小，液体的屈服应力越大，电流变效应引起的阻尼力也越大。所以，可控阻尼力在整个液压阻力中调节比例加大。

综上所述，对于我们目前的试验，采用高性能的电流变液体及改变结构参数，都可以使电流变阻尼器的高速缓冲性能提高。而改变结构参数对于具体的结构来说，受加工精度、空间等因素的限制，调节余地较小。

5 结 论

通过对电流变阻尼器大冲击载荷下缓冲性能的试验和理论分析，可得到以下结论：

1. 就目前我们所用的电流变液(静屈服应力值在 3 kV/mm 电场下为 2 kPa 左右)，将其应用于大冲击结构中，因高速流动，其屈服应力明显减小，从而表现出的电流变效应太小不能满足缓冲要求；

2. 液体流速对电流变液的屈服应力影响显著，其值随流速的增加按指数规律减小。电流变液在高速时的屈服应力约为其静屈服应力的四分之一，具体关系有待进一步研究；

3. 从定性、定量两个方面分析，电流变阻尼器作为阻尼器效果不明显的原因为：由电流变效应引起的阻尼力在整个液压阻力中所占比例太小，不能通过改变电压来使液压阻力具有很大的调节可控范围；

4. 通过理论分析、计算，对试验提出了改进意见：用性能更好的电流变液体，改变结构的有关参数，然而受实际工程中空间、加工精度等因素的限制，其修改余地较小。因此，研制和获得高性能的电流变液是电流变阻尼器应用于大冲击下结构缓冲的关键。

参 考 文 献

[1] Tao Baoqi (陶宝祺). Smart Material Structure (智能材料结构), National Defense – industrial press (国防工业出版社), Beijing (北京), 1997

[2] Masami Nakano, Takuya Yonekawa. Pressure Responses of ER Fluid in a Piston Cylinder – ER Valve System, SAE 881138

[3] Wereley, Norman M, Lindler, Jason. Biviscous Damping Behavior in Electrorheological Dampers, ASME: AD, 1999, **59**: 67

[4] Onoda, Junjiro, Oh, Hyun – Ung, Minesugi, Kenji. *J. AIAA*, 2000, **38**: 1736

[5] Jin Zhengtuan (靳争团). M. E. Thesis, Northwestern Polytechnical University (西北工业大学硕士论文), 2001

Behavior of High Shock Resistance of ER Damper *

Jin Zhengtuan, Gao Yuefei, Ren Jianting, Jiang Jiesheng **

(*Institute of Vibration Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi 'an* 710072)

Abstract This paper mainly carries out a combined theoretical and experimental research of the property of ER damper as bumper in large force impact. Experiments show that the ER damper has little effect in large force impact using current ERF, and theoretical analysis also prove the conclusion. The main reasons and the further measures in order to improve the situation are discussed in detail.

Key words ER fluid, ER damper, Impact resistance

* Project supported by the Foundation for Doctoral Studies of State Education Ministry of China (1999069908).

** To whom correspondence should be addressed, Email: jiangjs@nwpu.edu.cn