

金属耗能阻尼器

U型钢板、钢棒、环型、双圆型、x型和三角型。

金属耗能器是一种耗能性优越、构造简单、造价低廉、易于更换的耗能减震装置。它性能稳定，不受环境温度的影响，且长期使用功能维护费用都优于其它2种耗能器(摩擦型、粘滞粘弹性型)。金属耗能器既可以配合隔震支座或隔震系统，作为其中的耗能单元或限位装置，又可以单独用于建筑结构中，设置在剪力墙顶部、梁的中部位，以及其它相对变形较大的部位，作为耗能装置，提供附加阻尼和刚度，因此具有广泛的应用前景。金属屈服耗能器的缺点是比较难控制阈值。

摩擦阻尼器

是一种位移相关型阻尼器。

粘弹性阻尼器

是一种速度相关型阻尼器，

VED 是以夹层方式将粘弹性阻尼材料和约束钢板组合在一起(如图 2.3)，其工作原理是粘弹性材料随约束钢板往复运动，通过粘弹性阻尼材料的剪切滞回变形来耗散能量。VED 所用的粘弹性材料一般是高分子聚合物或玻璃质物质。

由于粘弹性阻尼材料是一种介于粘性液体和弹性体之间的，具有储存能量和耗散能量的材料。它的基本特点是应变滞后于应力。在频率为 ω 的正弦力作用下，线性粘弹性材料的剪切力 $\tau(t)$ 和剪应变 $\gamma(t)$ 可表达为：

$$\tau(t) = \tau_{\max} \sin(\omega t + \alpha); \quad \gamma(t) = \gamma_{\max} \sin \omega t \quad (2.12)$$



粘滞阻尼器

粘滞液体阻尼器（VFD, Viscous Fluid Damper）是一种速度相关型的耗能装置，它是利用液体的粘性提供阻尼来耗散振动能量。粘滞液体阻尼器原先就在航天、机械、军事等领域得到应用。最早应用于土木工程上是在1974年所建的一座桥梁上，以后，在房屋的基础隔震、管网、地震加固、房屋抗风和抗震的设计中得到应用。

粘滞液体阻尼器的种类很多，归纳起来可分为以下两类：

第一类是液体在封闭的容器中产生一定的流速来进行耗能的阻尼器。在这类阻尼器中，活塞要迫使粘滞液体在很短的时间内通过小孔，这将产生很大的压力。此类阻尼器的内部工艺设计要求较高。

第二类是粘滞液体在敞开的容器中产生一定的位移来进行耗能的阻尼器。此类阻尼器要求粘滞液体尽量粘稠以获得最大限度的阻尼。因此设计中粘滞液体材料的选择是关键问题。这类粘滞阻尼器常用的形式即是粘滞阻尼墙。

建筑中常用的粘滞液体阻尼器多是第一类阻尼器。为正确分析附设粘滞阻尼器结构的抗震性能，国内外研究人员提出了许多相关的数学、力学模型来确立粘滞阻尼器的力学计算模型。主要有：线性模型、Maxwell 模型、有限元模型等。

粘滞阻尼器的显著特点是对结构只提供附加阻尼，而不提供附加刚度，因而不会改变结构的自振周期^[22]。其优点是安装了粘滞性耗能器的支撑不会在柱端弯矩最大时给柱附加轴力。粘滞性阻尼器的最新进展是与磁流变体智能材料的联合使用，通过联合拓宽了粘滞性耗能器的发展空间。

TMD

TLD

表 2.2 阻尼器的种类、性能及其应用

类型	优点	缺点	已有应用
金属阻尼器	性能稳定，不受环境温度影响，构造简单、造价低廉、易于更换。	难以控制阈值	台湾金华休闲购物中心；潮汕星河大厦；日本新住友医院等。
摩擦阻尼器	具有很好的耗能能力，而且性能不受温度影响，构造简单，制作方便，造价较低，工程应用前景很好。	材料在恒定的正压力下，长期接触会产生冷粘结或冷凝固；地震后会产生永久偏位，需要进行维修。	云南洱源振戎中学食堂楼和教学楼。
液体粘滞阻尼器	性能稳定，耗能能力强，能够给结构提供较高的附加阻尼比而不改变其固有频率。	加工制作较难，价格较高；粘滞液体易发生渗漏。	北京火车站候车大厅；南京奥体中心观光塔、武汉天兴洲大桥等
粘弹性阻尼器	耗能能力强，大震、小震情况下都可以起作用。	受温度影响大，温度升高时耗能能力减弱。	世界贸易中心大厦；哥伦比亚中心大厦；宿迁市交通大厦等。
调谐质量阻尼器 (TMD)	安装简单、方便，维修更换容易。	对结构的控制仅在较窄频率域内有效，对频率调谐和阻尼比的波动十分敏感，对非平稳激励所产生的瞬态响应效果不好。	澳大利亚悉尼的 Centerpoint power 电视塔；世界贸易大厦中心大厦；上海环球金融大厦等。
调液质量阻尼器 (TLD)	经济，简单易行，多用途，维护费用小，无污染。	控制频域较窄。	日本长崎机场指挥塔、日本横滨导航塔等。

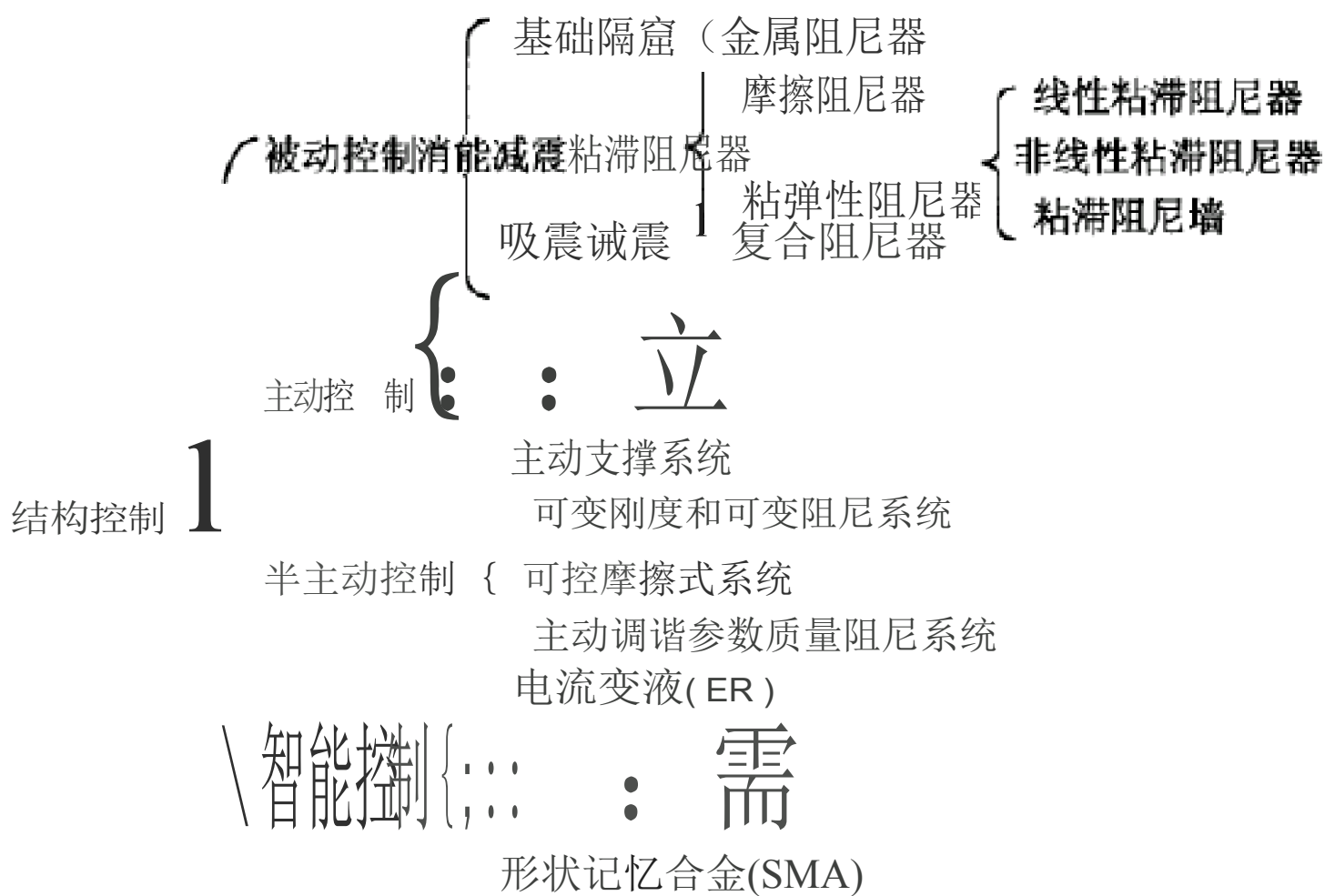
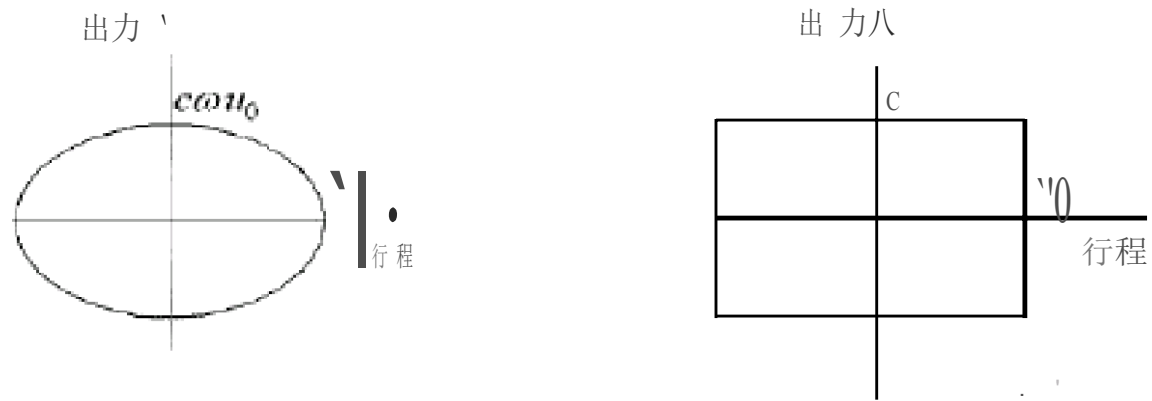


图 14 结构控制分类图

Fig 1-1 Classification of structural vibration control

美国的 FEMA 274 将耗能减振阻尼器分为“位移相关阻尼器、速度相关阻尼器和混合型阻尼器”。位移相关阻尼器包括金属阻尼器和摩擦阻尼器，耗能与其变形和相对滑动位移有关，速度相关阻尼器包括粘性液体阻尼器（也称为粘滞阻尼器）和粘弹性阻尼器，其阻尼特性与频率有关。混合型阻尼器包括调谐质量阻尼器(TMD)和调谐液体阻尼器(TLD)等，其中 TMD 是以简单形式固定或连接在主要结构的辅助质量—弹簧—阻尼筒系统。它也是通过吸收结构振动的一些能量来减耗消能的。而 TLD 是另一种类型的吸振器，液体不仅提供所带的辅助质量，而

日本的《被动减震结构设计施工手册》中将耗能减振阻尼器分为粘滞阻尼装置和塑性滞回装置。其中粘滞阻尼装置指利用高分子化合物的粘滞性或粘弹性材料的剪切变形所产生的阻抗力来消耗能量的装置。以及利用高分子化合物或油在管道内流动时产生的节流阻抗力来消耗能量的装置。包括油阻尼器、粘滞阻尼器、粘弹性阻尼器。塑性滞回装置是指利用金属材料（钢材、铅）的塑性滞回所产生的阻抗力消耗能量的装置，同时也包括利用金属材料界面的摩擦所产生的阻抗力消耗能量的装置。包括软钢阻尼器、摩擦阻尼器。



扭) 线性粘滞阻尼器
(a) Linear viscous damper
化) 纯摩擦型阻尼器
(b) Pure friction damper

2-1 两种特殊粘滞阻尼器的滞回曲线

Fig2-1 Hysteresis loop for the two special viscous dampers

自上世纪 70 年代初 Kell 等人提出被动耗能减震概念以来，结构抗震设计的概念方法和工程应用开始了新的变革。由于耗能减震技术有若广泛的应用前景，故虽仅经过三十多年的时间，却研制开发了多种耗能减震装置，大致可分为四类：粘滞耗能器、粘弹性耗能器、摩擦耗能器、金属屈服耗能器等。其中前两类耗能器的特性与速度有关，称为速度相关型耗能器；后两类耗能器的恢复力具有滞变特性，称为滞变型耗能器。

速度相关型阻尼器是利用与速度有关的粘滞性抵抗作用，从小振幅到大振幅的变化来获得衰减力。在设计时，应根据减震建筑物的周期、允许位移、反应加速度等条件确定粘性衰减常数和阻尼器的抵抗，并考虑配置和界限位移等条件，确定其尺寸和数量。

滞变型阻尼器是利用变形与滞回消耗能量。因此在设计时，应根据隔震建筑的周期、允许位移、基底剪力系数等条件，求得阻尼器的屈服剪力、界限变形、能量吸收等，同时要考虑其配置等条件来确定尺寸和数量。

粘滞阻尼器以结构形式的不同进行分类，主要分为三类：圆柱状筒式粘滞阻尼器、粘滞阻尼墙、液缸式粘滞阻尼器。

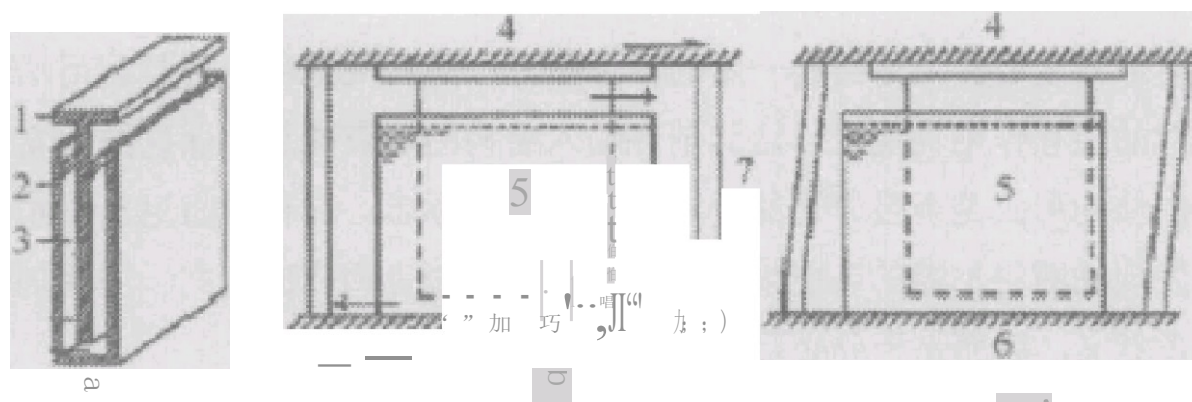
2.1.1 圆柱状筒式粘滞阻尼器

筒式粘滞流体阻尼器由 GERB Vibration Control 公司制造，其结构形式如图 1 所示。这种阻尼器通过活塞在诸如硅凝胶体等高浓度、高粘滞性的流体内运动并使之变形，进而耗散地震输入结构的能量，将机械能转化为热能，从而达到减震(振)的目的。目前该型阻尼器主要用于管网的振动控制以及作为隔震系统的消能组件。

2.1.2 粘滞阻尼墙

粘滞阻尼墙上是一种箱式的粘滞阻尼器，在框架结构中应用时，有时也起到隔震墙的作用，所以称为阻尼堵，其耗能方向是平面方向，如图 2 所示。由日本的 Shimizu Co. 始创，并成功应用于日本 Saitama City 的 Sut-Building 建筑上，试验证明取得了预期的目的——框架在弹性范围内的阻尼比增加约 30%，因而显著地降低了动力反应。由图可知，粘滞阻尼墙中的活塞表现为一钢板，且该钢板只能在平面内运

动，由外板围成的容器内装有粘滞流体。在结构中，其内钢板（活塞部分）固定于上层楼面，其外板（容器部分）则与下层楼面连接。地震作用下，楼层产生层间位移，从而使粘滞阻尼墙里的流体被剪切，地震输入的能量得到耗散。粘滞阻尼墙虽然能提供很大的阻尼力，减震效果也非常好，但由于造价高，所以其应用受到了限制。



1: 内钢板 2: 外钢板 3: 粘滞材料 4 上层楼面
5: 粘滞阻尼墙 6; 下层楼面 石柱

图2 粘滞阻尼墙示意图

2J.3 液缸式粘滞阻尼器

上述两种阻尼器都是在较大的开阔的容器内通过对流体的局部扰动而产生阻尼耗能。而液缸式粘滞阻尼器则是由于其中的流体受外界扰动流过孔隙（或间隙）而耗能。这类阻尼器首先是在1891年用于法日的15mm口径炮兵步枪中，直到今天，大型炮兵部件和大多数的飞机着陆转向装置还在使用。在1955年，Ralph Peo则首先发明了用于汽车工业的流体阻尼器。典型的产品是由美国Taylor设备公司生产的粘滞流体阻尼器，如图3所示。

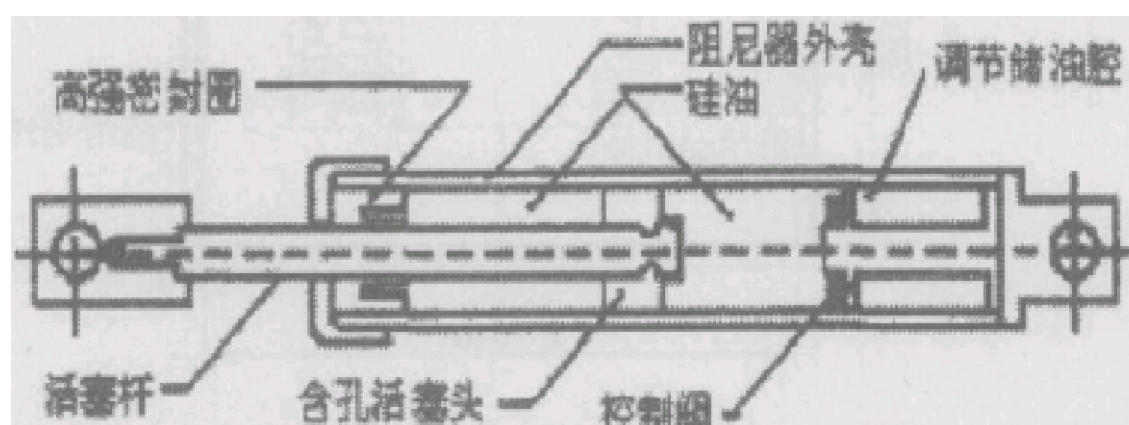


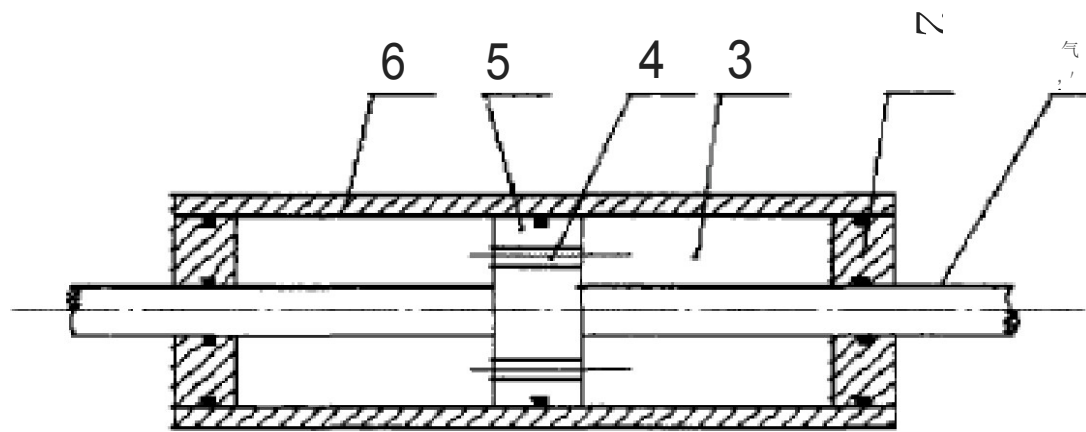
图3 Taylor设备公司生产的粘滞流体阻尼器

Taylor设备公司生产的阻尼器依靠的不锈钢活塞杆铜头周围或（和）内部为环形间隙或（和）孔隙，且该铜头内设计有可抵偿温度变化的双金属恒温器（可使其在中心 ~ 70 摄氏度内运行良好[47]），这种阻尼器的另一端则是为了抵偿由于活塞杆的运动对硅油容积的改变而特殊设计的调节贮油腔，即为阻止下文所说的刚度的发生而设计的。地震发生时，其运转流程如图4所示：活塞杆在地震波作用下由腔I向腔II运动，则硅油流体必然通过活塞头的孔反方向流动，直到活塞头两侧的压力平衡。事实上，由于硅油的可压缩性，在此过程中，将产生弹性抗力，即所谓的刚度发展。而另一端的贮油腔的设计正是为了阻止此刚

度的产生。通过调节贮油腔的控制阀门进入该贮油腔内部，减小其压缩性，产生刚度尽可能小，直至为零。

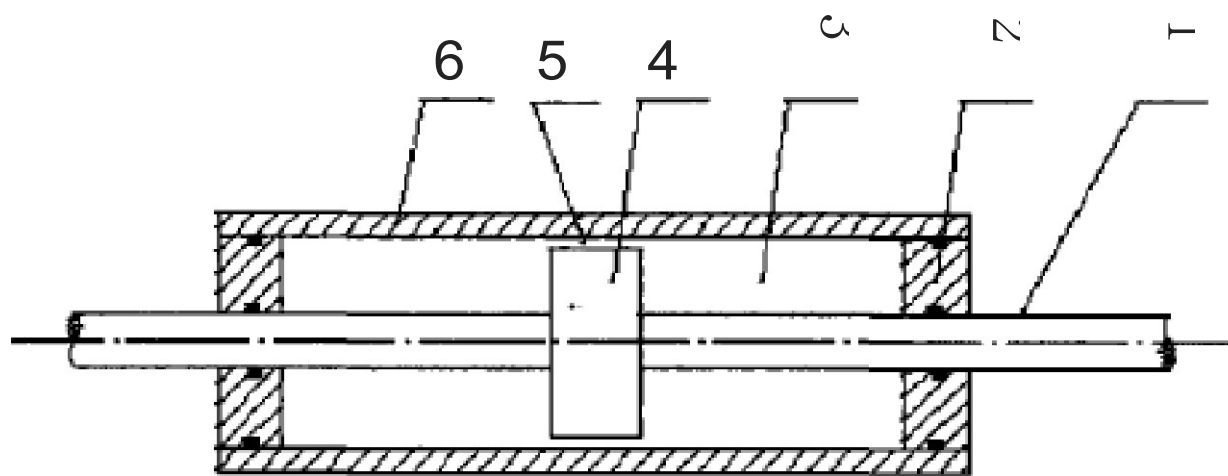
为杜绝此上述回弹刚度的产生，国内及我国台湾的一些研究人员对此类粘滞阻尼器内部构造进行了改进。将活塞杆一直延伸到另一端，做成贯通式的双推杆粘滞阻尼器，并就此做了相关实验，效果也非常显著。这样当结构体系受扰动时，推杆的一端进入油，另一端从油缸内出来，进出油缸的推杆体积正好相等，从而避免设置调节贮油腔。故这样设计的粘滞阻尼器的构造大大简化，使其性能更趋合理。

根据活塞杆构造不同，可将液缸式粘滞阻尼器分为单出杆粘滞阻尼器和双出杆粘滞阻尼器两大类。根据活塞上耗能构件的构造不同，液缸式粘滞阻尼器可分为孔隙式、间隙式和混合式阻尼器三种：孔隙式粘滞阻尼器是指在活塞上留有小孔，活塞和缸筒内壁实行密封的粘滞阻尼器，见图 5；间隙式粘滞阻尼器是指活塞和缸筒内壁留有间隙，见图 6；混合式粘滞阻尼器是指活塞上有小孔，且活塞与缸筒内壁留有间隙的阻尼器。



- 1: 活塞杆 2: 密封和导向套 3: 油腔
4: 阻尼孔 5: 球阀 6: 油缸

图 5 孔隙式粘滞阻尼器



- 1: 活塞杆 2: 密封和导向套 3: 油腔
4: 活塞 5: 阻尼间隙 6: 油缸

图 6 间隙式粘滞阻尼器

- 1 摩擦耗能
- 材料非弹性变形耗能
- 耗能减震结构 { 材料粘弹性耗能
- 液体阻尼耗能
- 混合式耗能

图 13 耗能方式分类

粘弹性阻尼器依靠粘弹性材料的剪切滞回性能来增加结构的阻尼，达到减小结构动力反应的效果。最早的粘弹性阻尼器是美国 3M 公司研制开发的，它由两块钢板夹一块矩形钢板组成（图 13）。钢板之间有一层粘弹性材料，通过硫化固定在钢板上。在反复荷载作用下，钢板与钢板之间产生相对运动，使粘弹性材料层产生往复剪切变形，从而吸收和耗散能量。常用的粘弹性材料为高分子聚合物，这种材料既有粘性，又具有很好的弹性，可以在变形时将吸收的能量转换成热量散发出去，从而减小结构的

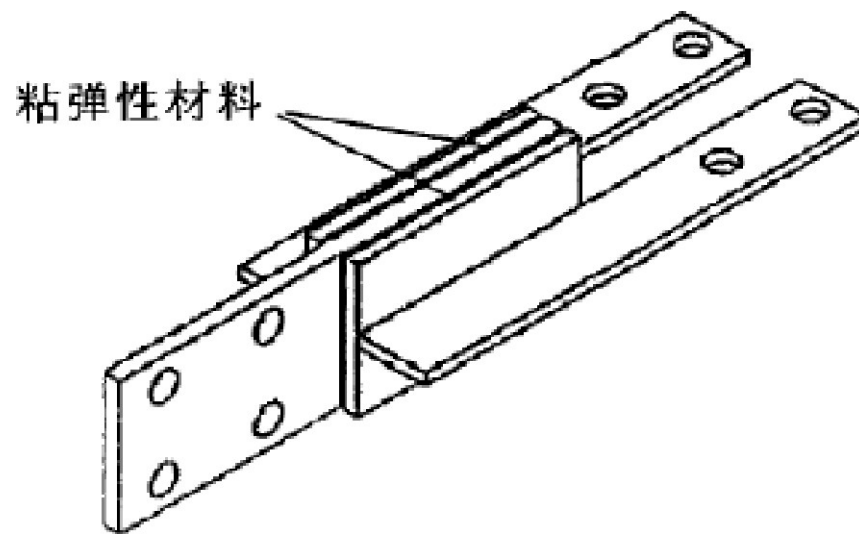


图 13 粘弹性阻尼器构造

风振和地震反应。该阻尼器已得到广泛应用。另外一些日本公司也开发了一些粘弹性阻尼器，比如 Shimizu 公司的沥青橡胶组合（BRC）粘弹性阻尼器，Bridgestone 公司的粘弹性橡胶剪切阻尼器等均已在实际工程中应用，并取得了良好的效果。

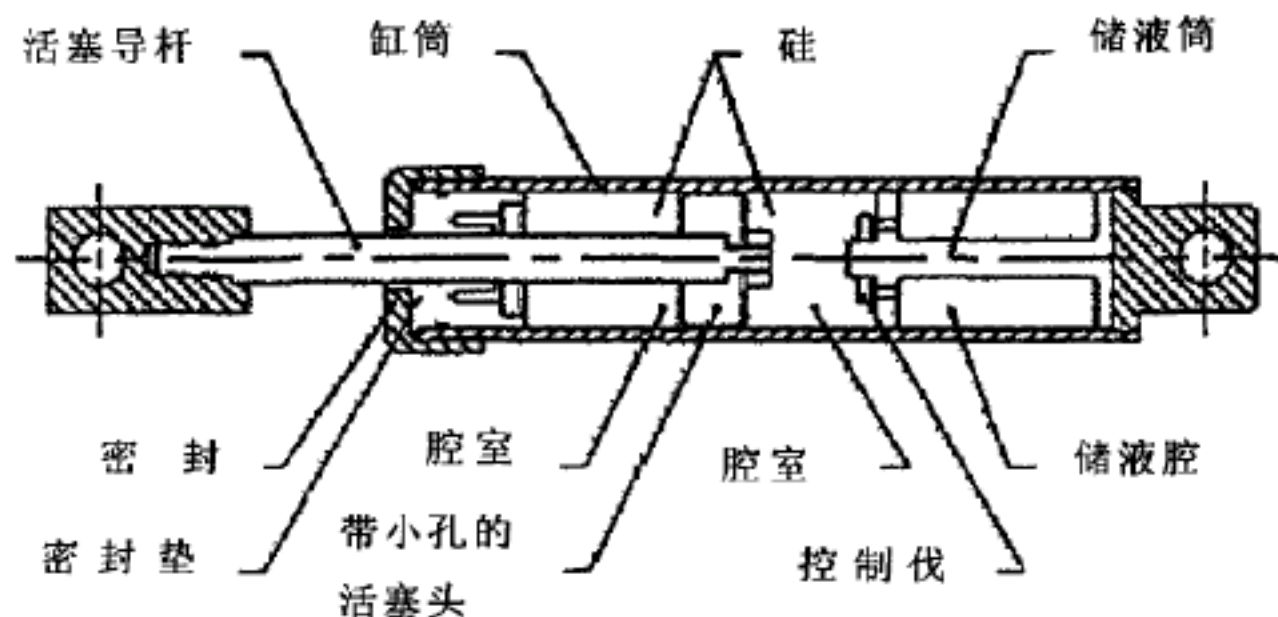


图 1.4 粘滞流体阻尼器结构

3 目前研究开发的阻尼器种类很多，归纳起来主要有：（1）金属阻尼器；（2）摩擦阻尼器；（3）粘滞阻尼器；（4）粘弹性阻尼器；（5）复合型阻尼器。

（1）金属阻尼器

由于金属材料在弹塑性范围以后具有较好的滞回性能，因而被用来制造各种类型的耗能装置。常用的有：软钢阻尼器、铅阻尼器和形状记忆金属阻尼器。

软钢阻尼器[22-25]是充分利用软钢具有良好的屈服后性能，进入塑性阶段后具有良好的滞回特性。1972 年 Kelly 首先进行金属阻尼器的研究和实验的；1991 年 Wittaker 等人和 1992 年 Tsai 等人分别研究了 X 型软钢阻尼器（XADAS）和三角形软钢阻尼器（TADAS）的减震特性。目前这两种阻尼器是国内外研究较多的软钢阻尼器。由于软钢阻尼器具有滞回特性稳定，低疲劳性能好，对环境和温度的适应性强和长期性能稳定等优点，因此引起了国内外学者的广泛关注，并已在一些建筑物上开始应用。软钢阻尼器的缺点是：可恢复性差，其滞回耗能性能受其形状的影响较为显著，如形状制作不合适，会引起滞回环的畸变。

铅阻尼器[24]是充分利用铅具有密度大、熔点低、塑性高、强度低、润滑能力强等特点，同时由于铅具有较高的延性和柔性，故在变形过程中可以吸收大量的能量，并且具有较强的变形跟踪能力。同时，通过动态回复和再结晶过程，其组织和性能还可恢复至变形前的状态，因此铅阻尼器具有以下优点：①使用寿命不受限制；②提供的阻尼力可靠；③对位移变化敏感；④构造简单，工作中不需维护。但它具有恢复性差和对环境造成污染等缺点。目前研制开发出的阻尼器类型粘弹性阻尼器减震性能研究与优化分析

4

主要有：铅挤压阻尼器、铅剪切阻尼器、铅节点阻尼器、异型嵌阻尼器等。

形状记忆合金（SMA）[26]是一种兼有感知和驱动功能的新型材料，它与传统材料的区别是具有高阻尼和大变形超弹性特性，能够重复屈服而不产生永久变形，因而具有很好的耗能能力。目前，主要的记忆合金为 Ni-Ti 合金、Cu 基合金和 Fe 基合金等。90 年代初，一些学者对形状记忆合金阻尼结构的地震反应进行了研究。美国国家地震工程研究中心对装有铜锌铝记忆合金装置的 5 层钢框架模型进行了试验研究。

（2）摩擦阻尼器

摩擦阻尼器[26-28]的研究始于 70 年代末。目前，研究开发的摩擦阻尼器主要有：Pall 摩擦阻尼器、Sunitome 摩擦阻尼器、摩擦剪切铰阻尼器、滑移型长孔螺