

文章编号: 1001-1455 (2000)04-0289-07

爆轰波在阻尼管道中声吸收的实验研究^{*}

郭长铭, 李 剑

(中国科学技术大学力学和机械工程系, 安徽 合肥 230026)

摘要: 实验旨在研究气相爆轰波在阻尼管道(管壁上衬有吸收材料)中传播时的衰减现象。先是在光滑管壁的管道中产生稳定的具有胞格结构的爆轰波, 然后使其通过专门设计的管壁上衬有吸收材料(金属丝网或不锈钢纤维)的阻尼段。利用高速摄影、压力传感器和烟迹技术等手段, 记录和测试了阻尼段对几种混合气体爆轰波的传播速度、爆压及胞格结构产生的影响。实验分别在方管和圆管中进行。发现在某些条件下爆轰波可以被衰减成强爆燃。

关键词: 气相爆轰; 强爆燃; 阻尼段; 吸收材料

中图分类号: O381; O382⁺.1 文献标识码: A

1 引 言

爆轰是一种多发的工业灾害。几乎每年都有关于易燃易爆物质爆炸产生巨大的财产损失和人员伤亡的报道。如 1985 年印度博帕儿化工厂的爆炸事故, 以及发生在山东济南市市区的地下煤气管道爆炸。因此, 如何抑制、熄灭爆轰一直是工业部门和爆炸力学界关注的课题。然而, 爆轰由于传播速度快, 不象燃烧那样容易被抑制和熄灭。目前工业部门现有的比较成熟的抑爆技术是在运输易燃易爆物质管道沿线建立一系列的抑爆剂喷射装置, 通过电子控制的高灵敏度阀门与管道相通。一旦在某处出现爆炸, 其上游和下游的阀门随即自动开启, 抑爆剂喷入管道, 抑制爆炸的蔓延。对于传播速度较低的火焰来说, 抑爆剂可以采用惰性粉末或水雾, 通过物理机制消除火焰的能量; 也可以采用粉状的有机酸盐、碳酸盐和碳酸氢盐一类的化学物质(如单铵磷酸盐), 它们能利用火焰的能量发生反应产生二氧化碳, 而后者是一种耐用又有效的抑爆物质。对于爆轰这样的高速传播过程, 如依然采用上述技术则要求有灵敏度更高的阀门和更有效的抑爆剂。目前, 即使技术上能满足要求, 其成本的昂贵也使绝大多数企业望而却步。近年来人们试图用另外的方法来抑制爆轰的传播。

众所周知, 爆轰波所以能自持稳定地传播是由于横波的产生和发展^[1~2]。于是, 消除横波, 破坏爆轰波自持传播的机理成为探索抑制爆轰的另一条思路。

Gvozdeva^[3]研究了正激波在多孔、可压缩材料上的反射, 发现反射波在某些条件下明显地衰减了。Duper^[4]利用衬在管壁上的吸收材料, 研究爆轰波在阻尼段上游和下游其横波的变化, 认为在衬有吸收材料的管壁上热量和动量的损失是可以忽略的次要因素, 爆轰波在通过阻尼段后衰减以至蜕变的主要原因是横波的声吸收。Vasil'ev^[5]在多孔管壁的管道内研究了临近

* 收稿日期: 1999-09-01; 修回日期: 2000-07-25

基金项目: 国家自然科学基金项目(19372058); 英国文化委员会基金项目(SHA/992/257)

作者简介: 郭长铭(1943—), 男, 教授。

极限的爆轰,并引入了横波与管壁非弹性碰撞的概念,试图用反射系数来解释这种衰减。Teodoreczyk^[6]对氢-氧混合气体爆轰波的衰减作了照相记录,并提出了一个关于爆轰波沿多孔材料传播时大为简化的模型。

我们在研究这一现象时利用方管和圆管进行两个系列的实验。在方管中得到了爆轰波通过阻尼段时波阵面的照片、胞格结构的烟迹记录,测试了爆速的变化,了解了衰减的细节;在圆管中进行了几种燃料与不同的稀释剂以及不同稀释度的混合气体通过阻尼段时的实验研究。

2 实验装置

2.1 方管

方管长 5.5m,截面为 38mm×76mm 的矩形。其中阻尼段长 835mm,底部铺设吸收材料。吸收材料有两种:多孔度为 62%的金属丝网,以及不锈钢纤维。阻尼段又分为两部分:前面半段放置烟熏玻璃片,后面半段侧壁开观测窗口,如图 1 所示。烟熏玻璃片安置在阻尼段的侧壁上。窗口上嵌有密封的耐高压的光学玻璃以便进行高速摄影。四个压力传感器分别安置在阻尼段的前方和中间,用来记录压力波形和测试平均速度。

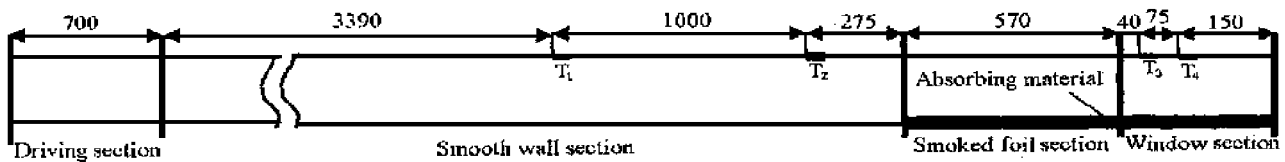


图 1 方管实验装置示意图

Fig.1 Apparatus of rectangular tube

2.2 圆管

圆管长也是 5.5m,内径 50.8mm,另带一个 550mm 长的阻尼段,其外径为 90mm,内径 80mm。阻尼段内衬有一个外径 56mm、内径 50.8mm、多孔度为 18%的多孔管。吸收材料(丝网或纤维)卷在多孔管和圆管之间。三个在阻尼段内安置压力传感器的孔钻透吸收材料及多孔管,以便记录爆轰波的压力波形,另外两个传感器安置在阻尼段上游,如图 2 所示。

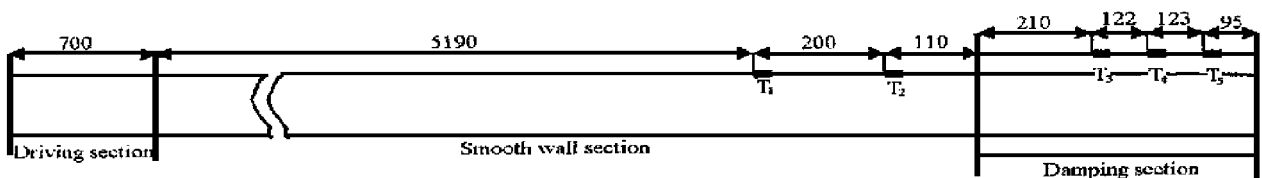


图 2 圆管实验装置示意图

Fig.2 Apparatus of circular tube

2.3 试验气体

试验气体有按当量比配置的氢-氧($2\text{H}_2 + \text{O}_2$)、乙烷-氧($2\text{C}_2\text{H}_6 + 7\text{O}_2$)和丙烷-氧($2\text{C}_3\text{H}_8 + 10\text{O}_2$)三种混合气体,稀释气体为氩气(Ar)和氮气(N_2)。

3 实验结果和讨论

3.1 吸收材料对波阵面结构的影响

图3是正常爆轰波波阵面结构的高速摄影照片,每幅之间的时差为 $10\mu\text{s}$ 。从图3中可以看到,氢-氧-氩($2\text{H}_2+\text{O}_2+3\text{Ar}$)混合气体是十分“规则”的,波阵面上四个三波点和横波清晰可见;而乙烷-氧-氩($2\text{C}_2\text{H}_6+7\text{O}_2+9\text{Ar}$)混合气体是“不规则”的,它的波阵面结构带有许多细微结构。作为对照,图4显示了与图3完全相同的气体组分和初压、但在阻尼段中的波阵面结构。从图4可以看到,由于吸收材料的存在,对氢-氧-氩混合气体,三波点的数目已锐减,而且波阵面发生弯曲;对乙烷-氧-氩混合气体,不仅波阵面发生弯曲,而且波阵面远远厚于图3的正常厚度。

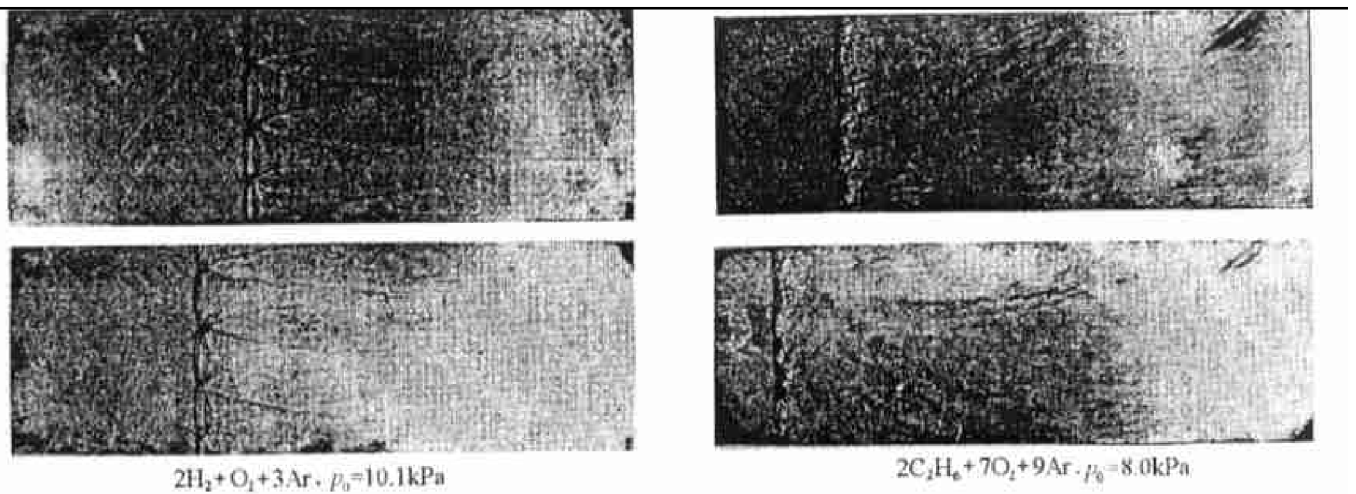


图3 在光滑壁面内正常爆轰波的波阵面结构

Fig.3 The wave front structure of normal detonation in smooth tube

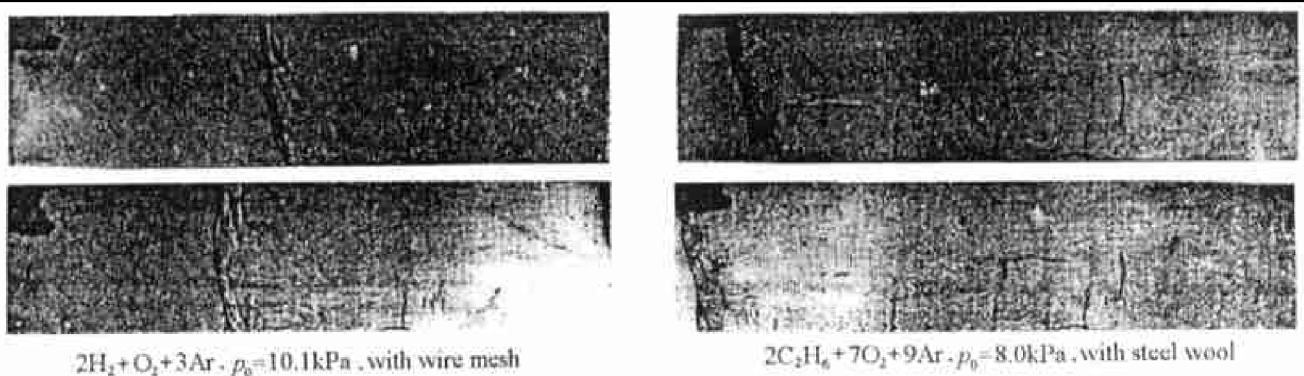


图4 被不同吸收材料衰减的爆轰波波阵面结构

Fig.4 The wave front structure of detonation attenuated by wire mesh and steel wool

从图5可以看出,初压很低时,所有的横波都被抑制掉了,而且前导激波与化学反应区解耦,它们之间出现了很宽的缝隙。这样,爆轰波蜕变为强爆燃。从图5还看出,在前导激波(直的波阵面)后方出现了湍流火焰。火焰的上半部分与靠近吸收材料的下半部分不同。由于吸收材料的作用,下半部分火焰阵面发生弯曲、畸变,而且与前导激波间的距离拉大了。

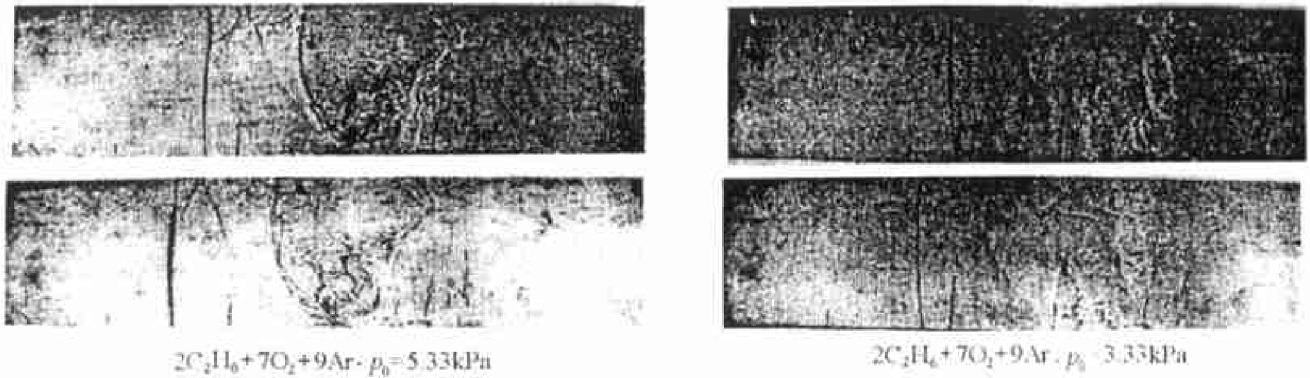


图 5 初压很低时被不锈钢纤维衰减的爆轰波波阵面

Fig.5 The wave front structure of detonation attenuated by steel wool at very low initial pressure

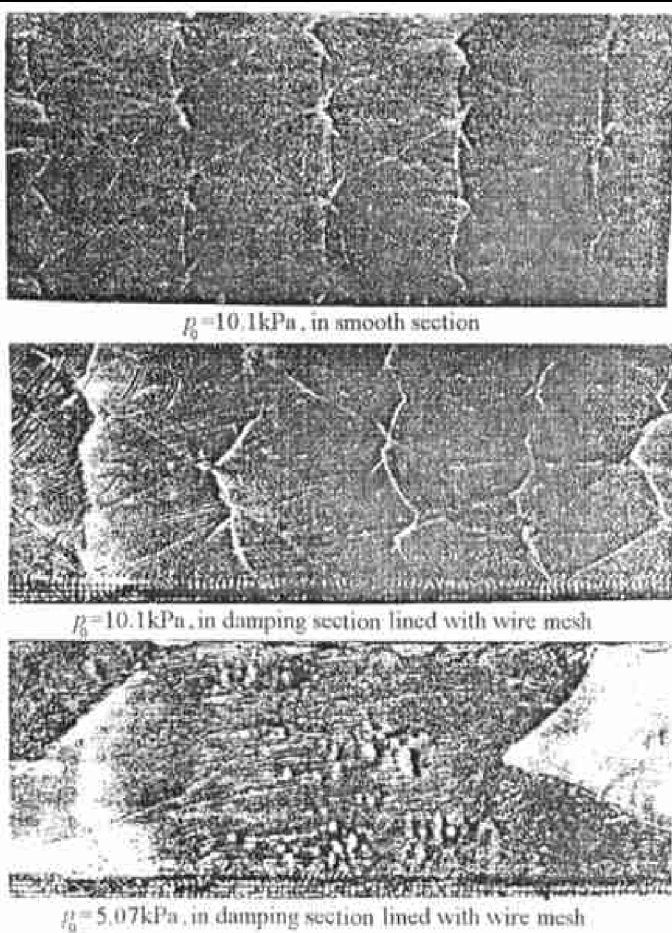


图 6 2H₂+O₂+3Ar 爆轰波的烟迹记录

Fig.6 The smoked foil record of detonation for 2H₂+O₂+3Ar

图 6 是无吸收材料和有吸收材料两种情况下爆轰波胞格结构的烟迹记录。可以看出,在同样的初压下,由于吸收材料的作用,胞格数目变少、尺寸变大。

3.2 关于临界初始压力

实验研究确定了临界初压的存在。对于给定的混合气体和吸收材料,在截面形状和尺寸

表 1 几种混合气体的初始压力临界值

Table 1 The values of p_c for some gas mixtures

吸收材料	混合气体种类	p_c /kPa
不锈钢纤维	2H ₂ +O ₂	9.33
	2H ₂ +O ₂ +3Ar	12.67
	2H ₂ +O ₂ +9Ar	34.00
	2H ₂ +O ₂ +4N ₂	45.33
	2C ₂ H ₆ +7O ₂ +9Ar	8.67
	2C ₃ H ₈ +10O ₂ +12Ar	9.33
金属丝网	2H ₂ +O ₂ +3Ar	12.00
	2H ₂ +O ₂ +9Ar	29.33
	2C ₂ H ₆ +7O ₂ +9Ar	8.00
	2C ₂ H ₆ +7O ₂ +9N ₂	21.33
	2C ₃ H ₈ +10O ₂ +12Ar	8.33
	2C ₃ H ₈ +10O ₂ +12N ₂	18.00

确定的管道中,存在一个初始压力的临界值 p_c 。临界值的高低反映了某种吸收材料在上述条件下对给定混合气体衰减效果的大小。

当初压 $p_0 \gg p_c$ 时,稳定的自持传播的爆轰波能通过阻尼段,爆速略有变化。当初压降至 p_c 时,稳定传播的爆轰波不能维持了,爆速明显下降,降至正常速度的 60%~90%。图 7 显示了在有吸收材料存在时爆速与初压的关系。可以看到,当 $p_0 = p_c$ 时,爆速是不稳定的。这表明此时爆轰波可能已蜕变也可能尚未蜕变成强爆燃。当 $p_0 < p_c$ 时,则爆轰波肯定蜕变成强爆

燃,但传播速度保持在正常速度的 60%~70%(方管中)或 50%~60%(圆管中)而并不进一步下降。

临界初压 p_c 定量地反映了,某种吸收材料在特定的管道中,对某种混合气体衰减作用的大小。表 1 是金属丝网和不锈钢纤维两种吸收材料在实验条件下对几种混合气体的临界初压值。需要指出的是,这里在圆管中测得的氢-氧气体的 p_c (9.33kPa) 低于 Dupre 在 50.8mm 内径管道中测得的临界初压 (14.67kPa)。原因在于他的金属丝网多孔度为 56%, 远远高于我们的多孔管的多孔度 (不足 18%)。

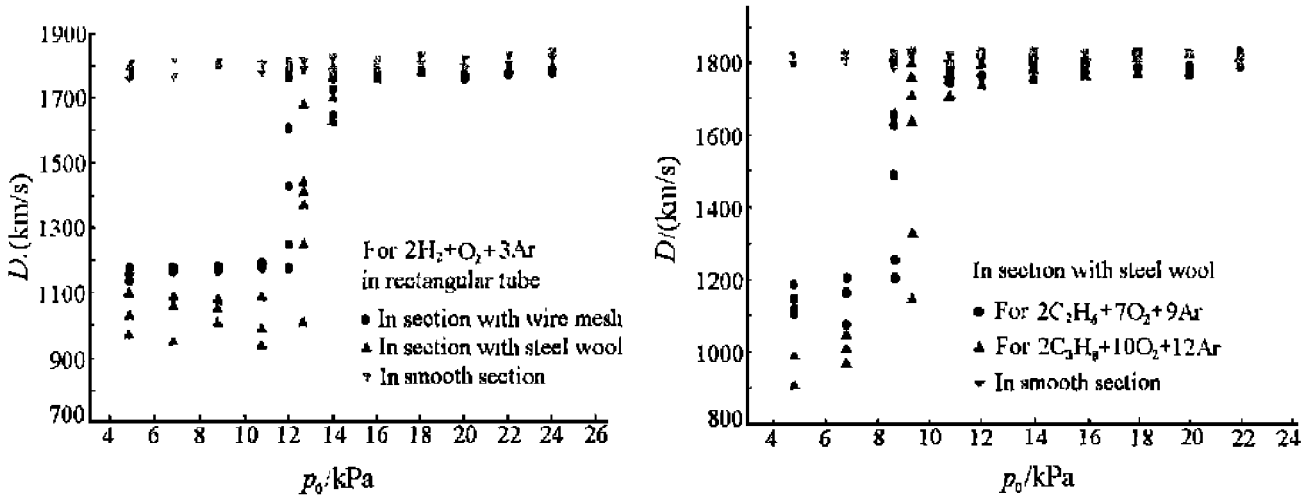


图 7 在阻尼段中爆速与初压的关系

Fig.7 The relation between detonation speed and initial pressure in damping section

3.3 关于吸收材料的有效长度

图 8 给出了几种混合气体在不同初压下速度变化与传播距离的关系。可以看出,对任何混合气体,即便初压等于或低于临界初压,爆轰波的传播速度在阻尼段的前半段未见有明显下降。只是在阻尼段中传感器 T_4 处速度才出现突然下降。这意味着在我们的实验条件下,阻

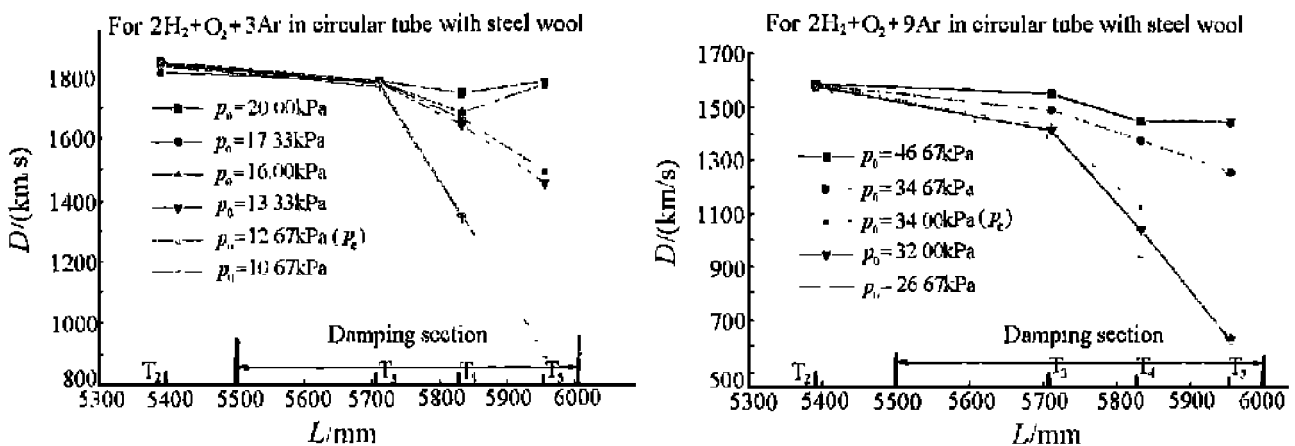


图 8 在不同初压下阻尼段中爆速的分布

Fig.8 The change of detonation speed in damping section under different initial pressure

尼段的有效衰减长度至少是 300mm,即为管径的 6 倍。吸收材料达不到这一长度,则不可能抑制爆轰波。这一长度就是吸收材料的最短有效长度。

这一现象可解释如下。当爆轰波传播到吸收段时,其横波与吸收材料发生碰撞,一部分被吸收。这一“扰动”将向相反方向以声速传播,在相对一侧的管壁上又发生反射。壁面上横波吸收这一扰动的传播将使整个爆轰波区域的横波削弱,于是有可能使爆轰衰减成强爆燃。横波传播所需要的时间,即为爆轰波后方已发生化学反应气体中的扰动以当地声速通过管子截面所需的特征时间

$$t_c = d/c_{cj} \quad (1)$$

式中: d 为方管截面尺寸, c_{cj} 为已发生化学反应区内的声速。在此特征时间内爆轰波传播的距离

$$L = Dt_c \quad (2)$$

式中: D 为爆轰波的速度。因此, $L/d = D/a_{cj}$,对大多数常用的气体组分来说,在方管中该比值在 1.82~1.86 之间($T=283K$),如表 2 所示。这就表明,只有起码在吸收段起始点下游 1.9 d 处才能反映出整个爆轰区域横波被吸收的效果。小于这一距离,压力衰减和胞格的吸收不明显。考虑到该扰动需经过反射才会产生更明显的效果,一般取 $L/d \approx 4^{[7]}$ 。在圆管中,由于反射的方向分散,所需的特征时间更长。所以在我们的实验里要到 6 倍管径的距离上才显示吸收效果。这也是我们称爆轰波在阻尼管道中“声吸收”的原因。

表 2 几种气体的 D/c_{cj} 值

Table 2 The values of D/c_{cj}

混合气体种类	D/a_{cj}
$2H_2+O_2$	1.844
$2H_2+O_2+Ar$	1.836
$2H_2+O_2+3Ar$	1.820
CH_4+2O_2	1.860
CH_4+2O_2+Ar	1.851
$2C_2H_2+5O_2$	1.850
$2C_2H_6+7O_2$	1.862
$2C_2H_6+7O_2+9Ar$	1.842
$C_3H_8+5O_2$	1.863

3.4 稀释气体和吸收材料对衰减效果的影响

从表 1 可以看出,对同一种吸收材料和同一种燃料——氧气组分来说,用氮气稀释在抑制效果上要比用氩气稀释的好。对 $2H_2+O_2+4N_2$ (氮气约占 57%), p_c 为 45.33kPa; 而对 $2H_2+O_2+9Ar$ (氩气占 75%), p_c 为 34kPa, 尽管后者的稀释程度更高。

对同一种混合气体和同样长度的吸收段来说,不锈钢纤维的抑制作用比金属丝网更有效。从表 1 可以看出,前者的临界初压值总是略高于金属丝网的值。

4 结 论

(1) 一定长度的吸收材料确能对爆轰波的传播起衰减作用。波阵面结构的照片、胞格结构的烟迹记录以及爆速和爆压的下降都说明了这一点。衰减的主要机理是爆轰波波阵面上的横波被吸收。这显示了横波的维持在爆轰波稳定自持传播过程中重要的不可替代的作用。另外,设法消除横波或破坏横波维持的机理不失为抑制、熄灭爆轰波的另一条有效的途径,值得有关工业部门重视,并继续深入开展这方面的研究。

(2) 对于给定的混合气体和吸收材料,在截面形状和尺寸确定的管道中,存在一个初始压力的临界值 p_c 。初压高于临界值,稳定的自持传播的爆轰波仍能通过阻尼段;初压降至临界

值,爆轰波通过阻尼段时是不稳定的,即可能已蜕变也可能尚未蜕变成强爆燃;初压低于临界值,爆轰波肯定蜕变成强爆燃。临界值的高低反映了某种吸收材料在上述条件下对给定混合气体衰减效果的大小。

参考文献:

- [1] Fickett, Davis. Detonation [M]. Berkeley, CA: University of California Press, 1979.
- [2] Kailasanath K, et al. Determination of Detonation Cell Size and Roll of Transverse Waves in Two-dimensional Detonations [J]. Combustion and Flame, 1985, 61: 199.
- [3] Gvozdeva L G, et al. Normal Shock Waves Reflection on Porous Compressible Materials [J]. AIAA, 1986, 106: 155—165.
- [4] Dupre G, et al. Propagation of Detonation Waves in Acoustic Absorbing Walled Tube [J]. AIAA, 1988, 114: 248—263.
- [5] Vasil'ev A A. Near-limiting Detonation in Channels with Porous Walls [J]. Combustion Explosion and Shock Waves, 1994, 30: 101—106.
- [6] Teodoreszyk A, et al. Detonation Attenuation by Foams and Wire Meshes Lining the Walls [J]. Shock Waves, 1994.
- [7] 郭长铭, 李剑. 40×40mm 方截面双层爆轰激波管的改造 [J]. 实验力学, 1997, 12(3): 401—405.

Experimental Investigation of Acoustic Absorption of Detonation by Absorbing Materials Lining Wall

GUO Chang-ming, LI Jian

(Dept. of Modern Mechanics, University of Science and Technology of China, Hefei Anhui 230026, China)

Abstract: The present experimental investigation attempts to understand the attenuation of detonation waves propagating through an absorbing material lining section. A stable cellular detonation wave was generated in tube section with smooth walls firstly. Then it would propagate through a specially designed section lining with wire mesh or steel wool. High-speed spark schlieren, pressure transducers and smoked foil are used to record the structure of detonation wave front, the cellular structure and measure the pressure and speed of detonation. The experiment was carried out in a rectangular tube and a circular tube respectively. Under certain conditions, detonation can be attenuated and transformed into fast deflagration.

Key words: gaseous detonation; intensive combustion; damping section; absorbing material