

爆轰驱动激波风洞中金属成型膜片的探索性试验

林建民

(中国科学院力学研究所 LHD. 100080)

摘要

文中简要介绍了风洞运行中爆轰段气体对主膜片的加载特点, 比较了成型膜片与平板膜片的承载能力, 着重介绍了成型膜片的试验结果。

关键词: 爆轰、爆轰波、膜片

1、引言

爆轰驱动激波风洞利用氢氧混合气体爆轰产生的高温高压气体作为驱动气体, 在风洞中建立高焓高压气流条件。以前向爆轰驱动方式运行时(见图 1)风洞主膜片承受爆轰波及爆轰产物瞬时的冲击载荷。通常激波风洞通过高压压机提供驱动段高压气源, 对主膜片加载过程缓慢。两种加载方式对膜片破膜过程影响巨大, 对膜片的要求也不尽相同。缓慢加载时使用平板膜片即可, 而瞬时施加冲击载荷条件下的膜片选择已成为一大难题。

下面介绍一种用钢板压制成的金属成型膜片, 平板膜片与成型膜片在承受瞬时施加的冲击载荷时的应力状态进行分析与比较。

2、平板膜片

激波风洞常使用平板膜片, 驱动压力较低时采用低碳钢材料, 压力较高时多用不锈钢材料, 实验中在膜片外缘前后施加预紧载荷夹紧(见图 2)。为便于调整、控制破膜压力通常在膜片一侧开有相同宽度、深度且中心对称的径向诱导槽。

实验中爆轰段按一定比例充入压力为 P_{4i} 的氢氧混合气体。由于 P_{4i} 较低膜片在初压作用下的变形可以忽略。上游端部点火引爆后爆轰波及紧随其后的爆轰产物(高温 $T_4=3000K$, 高压 $P_{40}=20P_{4i}$ 燃气)向下游主膜片方向运动。可以假定爆轰波阵面为垂直于管轴线的平面。当爆轰波到达主膜片的一瞬间可以将膜片承载状况描述为开有诱导槽的圆形平板在周边固支条件下承受突加均布冲击载荷的情况。

在突加载荷情况下破膜过程为: i. 膜片承受均布载荷时的弹性变形。ii. 膜片沿诱导槽破裂。iii. 分裂形成的各扇形膜片在高温高压气流作用下弯曲变形(沿膜片根部 $r=R$)。

当各瓣膜片折转 $\alpha = 90^\circ$ 与下游管壁贴附后完成一次破膜过程。

根据以上平板膜片承载状况,膜片最大主应力为径向弯曲应力(为分析方便暂时忽略周向应力及剪应力)。这时膜片的应力分布及变形方程可写为^[1]:

$$\text{径向应力: } \sigma_r = \pm \frac{3P}{8t^2} [R^2(1+\mu) - r^2(3+\mu)] \quad (1)$$

$$\text{挠度方程: } W(r) = \frac{P}{64D} (R^2 - r^2) \quad (2)$$

式中 μ 为材料泊松比,其它符号见图 2。

由以上两式可知膜片承载时最大变形发生在膜片中心 ($r=0$), 最大应力发生在膜片根部 ($r=R$)。容易看出膜片承载瞬间,若膜片根部应力远大于材料许用应力则在膜片根部可能发生断裂和脱落,这种情况对设备及实验模型都将造成严重破坏。若根部应力远小于材料许用应力,则膜片不能完全打开也不符合实验要求,若此时根部应力与材料强度极限相当,膜片可能在根部发生弯曲不至掉膜。这种变形属塑性力学范畴,加之破膜过程中由燃气加热引起的高温蠕变问题十分复杂,本文不详细讨论。但有一点是明显的,即如果膜片材料的塑性储备充裕,对破膜时不发生脱落现象是十分有益的。

综合以上破膜过程及简单分析不难看出适用于承受突加冲击载荷的膜片应具有:①承载时根部应力尽可能小,②诱导槽与破膜压力配合适度,③膜片材料塑性储备充裕的特点。此外,为避免塑性变形过程中膜片脱落,破膜过程中变形幅度应尽可能小 ($\alpha < 90^\circ$)。显然这些要求平板膜片均难以满足。

3、金属成型膜片

金属成型膜片用钢板压制而成,底面为环状平板、中间为球壳形状(见图 3)。采用金属成型膜片是在建造 JF10 爆轰驱动激波风洞之初由俞鸿儒院士提出的。下面就成型膜片与平板膜片在承受相同载荷情况下的应力状态做一比较。

假定两种膜片材料相同,厚度相同且夹膜处管径相同,破膜瞬间膜片尚处在弹性变形范围内。又因爆轰波速足够快膜片凸出部分尺寸较小,可以假定膜片各截面同时加载。容易了解在周边固支条件下成型膜片承受均布载荷时,球壳内部承受的膜应力各处相同且径向应力与周向应力相等。在膜片根部 ($r=R$) 处应力为拉应力:

$$\sigma_m = \sigma_\theta = \frac{PD}{4t} \quad (3)$$

将 $r=R$ 代入式 (1) 可得平板膜片根部最大径向应力为:

$$\sigma_{\max} = \frac{3PD^2}{16t^2} \quad (4)$$

两者之比为:

$$\frac{\sigma_{max}}{\sigma_m} = \frac{3D}{4t} \quad (5)$$

式中 D 为管内径 t 为膜片厚度, 因此有, $D \gg t$ 由此可知 $\sigma_{max} \gg \sigma_m$, 即两种膜片承受相同均布载荷时成型膜片根部应力远小于平板膜片。在目前设备中成型膜片根部应力比平板膜片小一个数量级, 由图 3 还可以看出成型膜片破膜时的变形幅度也小于平板膜片, 有理由相信成型膜片更适用于爆轰驱动运行状态。

4、实验及结果

金属成型片的破膜实验在 JF10 风洞中进行, 夹膜部位爆轰段与被驱动段管径相同, 实验采用前向爆轰驱动方式运行。爆轰段初始压力 P_{4i} 分别为 0.5Mpa, 1.0Mpa, 1.5Mpa, 1.8Mpa 及 2.0Mpa, 氢氧混合比为 4:1, 引爆后爆轰段主膜片处压力为 $P_{40} = 20P_{4i}$ 。成型金属膜片分别用 A_3 钢板及 1Cr18Ni9Ti 钢板制成, 厚度均为 $t=3.5\text{mm}$, 膜片几何尺寸见图 3。球壳外侧开有宽度为 $b=3.5\text{mm}$ 弧形十字诱导槽, 诱导槽底部有效厚度为 $\delta = 0.3\sim 0.5\text{mm}$ 。为确保膜片成形后的塑性恢复, 膜片均经过不同温度下的退火处理。

爆轰段初始压力为 $P_{4i}=0.5、1.0、1.5\text{Mpa}$ 时使用材料为 A_3 钢板的成型膜片, 实验后的膜片见图 4。 $P_{4i}=1.8、2.0\text{Mpa}$ 的实验采用材料为 1Cr18Ni9Ti 的成型膜片, 实验后的膜片见图 5。在各自的实验中两种膜片破膜良好, 实验前后膜片称重仅相差 1g。相同厚度相同材质的平板膜片在 $P_{4i}=1.0\text{Mpa}$ 时无一例外地出现掉膜, 有些甚至完全脱落, 实验后的膜片见图 6、图 7。

目前, 成型膜片已投入 $P_{4i}=1.5\text{Mpa}$ 的风洞运行调试出 $T_5=8000\text{K}$, $P_5=8\text{Mpa}$, 运行时间 $t=2\text{ms}$ 的高焓实验状态。实验获得的典型 P_5 曲线绘于图 8。

5、结语

成型膜片几何形状的变化使得膜片根部应力状态发生很大改变, 即由平板时的弯曲剪切应力改变为拉应力。在目前情况下, 承受相同载荷时膜片根部应力仅为平板膜片的二十分之一。此外成型膜片在破膜过程中变形幅度也较平板膜片明显减小。实验结果证实金属成型膜片更适合于在爆轰驱动激波风洞中使用。

目前金属成型膜片的实验研究尚属起步阶段, 诸如材料的选择、提高材料成型后的塑性性能、膜片在塑性变形阶段的断裂等方面还有待进一步探讨解决。

致谢: 实验中得到的俞鸿儒院士、林贞彬研究员、赵成修高工的指导。王杰等同志在加工及实验方面给予了很大帮助, 这里一并表示感谢。

参考文献

[1] 范钦栅《轴对称应力分析》

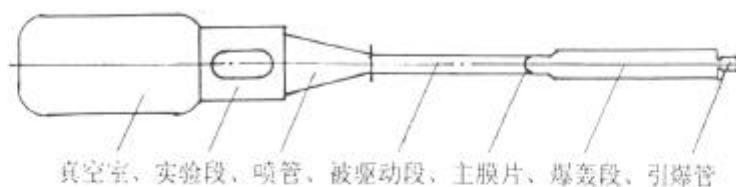


图1 爆轰驱动激波风洞示意图

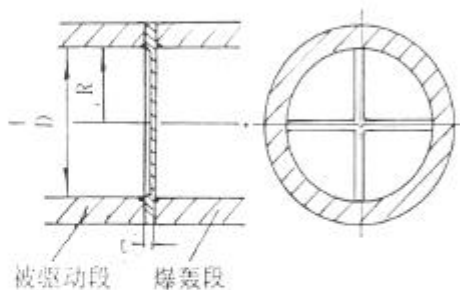


图2 平板膜片

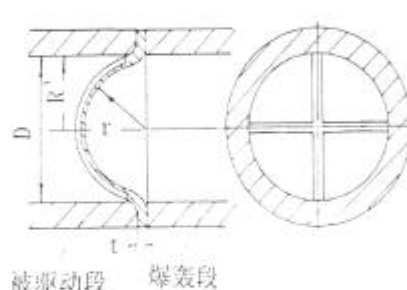


图3 金属成型膜片



图4 实验后的 A3 钢板成型膜片 ($t=3.5\text{mm}$)

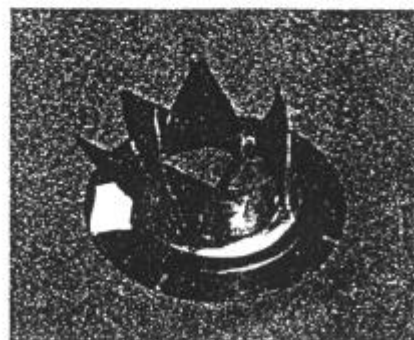


图5 实验后的 1Cr18Ni9Ti 成型膜片 ($t=3.5\text{mm}$)



图6 实验后 Al 平板膜片 ($t=3.5\text{mm}$)

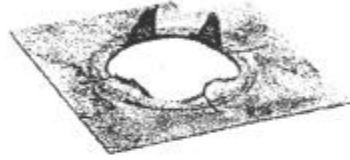


图7 实验后的不锈钢平板膜片 ($t=3.5\text{mm}$)

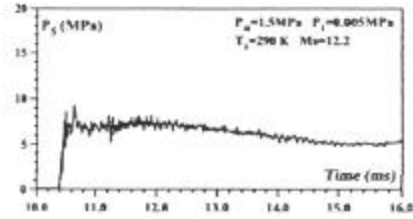


图8 典型 P_s 曲线