周向约束对泡沫铝陶瓷复合结构 抗弹性能的影响

郑伟[†] 喻琳峰 顾靖伟 (西安航天动力技术研究所,西安,710025)

摘要 目前研究人员获得了陶瓷/金属、陶瓷/纤维等复合结构抗弹性能受周向约束影响的大量成果,但尚未 针对泡沫铝陶瓷复合结构受周向约束影响特性开展相应研究工作.本文基于试验与数值仿真手段,开展了周 向约束对泡沫铝陶瓷复合结构抗弹性能的影响研究,结果表明:周向约束是泡沫铝陶瓷复合结构损伤破坏模 式的重要影响因素,对陶瓷板、泡沫板施加周向约束能限制陶瓷板裂纹扩展,增加抗侵彻阻力,有利于增加复 合结构的吸能作用,提高复合结构抗弹性能.

关键词 周向约束, 泡沫铝, 陶瓷复合结构, 抗弹性能 DOI: 10.6052/1672-6553-2020-096

引言

含多孔材料的复合结构广泛应用于结构防护 领域.国内外研究人员分析发现,含多孔材料复合 结构在弹体高速侵彻下具有优异的性能.Mines 等^[1]基于一维应力波理论及实验测试手段对含泡 沫铝复合结构进行了探讨,发现金属泡沫不仅能延 缓应力波到达时间,而且削弱了应力波的波头压 力,说明了泡沫铝材料在多层防护结构中的优异性 能.Ong等^[2]利用实验与数值仿真手段,分析了在陶 瓷/纤维/金属层叠结构中添加聚亚安酯泡沫层对 结构抗弹性能的影响,发现聚亚安酯泡沫通过拓宽 冲击波上升时间有效地延缓冲击波传播,衰减冲击 波强度,降低了结构整体变形,在陶瓷复合装甲中 添加多孔材料有利于增强结构抗弹性能.

研究中发现,约束效应对陶瓷复合结构抗侵彻 性能影响显著.目前,针对陶瓷/金属复合装甲抗侵 彻性能受约束影响的研究已取得较大进展. Anderson Jr.、Franzen、Weber等^[3-5]通过实验与仿真 手段发现陶瓷板的侧向约束应力增加时,陶瓷板抗 弹性能得到提升.麻震宇、孙娟等^[6,7]发现对陶瓷面 板施加侧向约束有利于提高装甲结构的抗侵彻性 能,且侧向约束板的厚度存在最佳值.胡欣等^[8]研 究了侧向约束应力对氧化铝/钢复合装甲抗侵彻性 能的影响,发现侧向约束应力延长了弹靶界面崩溃的时间,降低了背板损伤.Holmquist等^[9]采用数值 仿真手段探讨了当陶瓷板分别受到无预应力、静水 预应力、径向预应力三种约束时陶瓷复合结构的抗 弹性能,指出静水预应力、径向预应力能有效提升 陶瓷复合结构的弹道性能.Espinosa等^[10]采用 EPIC95有限元软件,基于DOP侵彻方法分析了陶 瓷/钢复合结构的抗侵彻特性受复合靶板几何及边 界条件的影响规律,发现约束效应对复合结构抗侵 彻过程影响不可忽略.

实际工程应用中,为避免或减缓冲击载荷作用 下装甲结构中脆性材料(如:陶瓷、泡沫铝等)损伤 扩展,一般施加边界约束使损伤局部化.周向约束 是复合结构设计的重要因素,直接影响复合装甲抗 弹性能,目前,研究人员获得了陶瓷/金属、陶瓷/纤 维等复合装甲抗弹性能受周向约束参数影响的大 量成果,但尚未针对泡沫铝陶瓷复合结构受周向约 束影响特性开展相应研究工作.本文设计了泡沫铝 陶瓷复合结构,基于试验与数值仿真手段开展了周 向约束对其抗弹性能的影响,获取典型周向约束下 结构的弹道极限速度,同时探讨弹体侵彻过程及弹 体速度、加速度、动能的衰减特性,揭示了泡沫铝陶 瓷复合结构抗弹性能受周向约束的影响机制.

²⁰²⁰⁻⁰⁹⁻⁰⁶ 收到第1稿, 2020-10-26 收到修改稿.

[†]通讯作者 E-mail:zhengwei19862008@126.com

撞击试验 1

1.1 复合结构设计

选择一定厚度的AD95氧化铝陶瓷面板、泡沫 铝合金中间缓冲层、2A12铝合金支撑背板所组成 的复合结构A为基本构型,各分层实物如图1所 示,其中AD95氧化铝陶瓷板直径为110mm,厚度 为8.0mm; 2A12 铝合金板直径为140mm, 厚度为

10.0mm;泡沫铝板直径为110mm,厚度为12.5mm. 复合结构A中,仅在各分层四周涂抹少量环氧树脂 胶克服侵彻实验中靶板重力的影响;复合结构C中 各分层参数与复合结构A保持一致,但采用高强度 钢环对泡沫板、陶瓷板的周向施加约束,并利用环 氧树脂胶将钢环与泡沫板、陶瓷板的环向进行粘 结,以限制泡沫板及陶瓷板的转动;复合结构A、C 剖视图详见图2所示.



(a) 泡沫铝板 (a) Aluminum foam plate



Fig.1 Target plates in composite structure

(c)2A12铝合金板 (c)2A12 aluminum alloy plate

1.2 试验过程及结果

弹体均采用圆柱形平头弹,直径为12.64mm, 长度为30mm,弹体的材料为未经热处理的38Crsi 钢,弹体的材料密度为7.74g/cm³,弹体质量约为 28.95g.采用轻气炮系统开展撞击试验,试验时弹 体正撞击复合结构A、C.采用高速摄影相机获取弹 体飞行速度,高速摄相机型号为Photron FASTCAM SA5, 拍照帧率为50000 fps, 即每采集一次图像的 时间为20µs.在高速摄相机两侧安置2个1.2kw的 高压灯光源保证拍摄的清晰度,相机测速标定详见 文献[11]所示.弹体撞击复合结构实验测试方案详 见图3所示,试验结果见表1所示.

	Table 1Sectional view of composite structure A and C								
Ν.	Velocity	Damage of	Damage of	Damage of					
INO	(m/s)	ceramic plate	Auminum foam plate	metal plate					
A-1	151	Whole broken	Pit diameter of 39.6mm, and depth of 8.8mm	Basically no damage					
A-2	273	Whole broken	Perforation diameter of 25.2mm	Pit diameter of 5.0mm, and depth of 0.8mm					
A-3	491	Whole broken	Perforation diameter of 33.1mm	Perforation diameter of 14.9mm					
A-4	582	Whole broken	Perforation diameter of 38.2mm	Crack and perforation diameter of 25.1mm					
A-5	736	Whole broken	Perforation diameter of 40.0mm	Crack and perforation diameter of 38.3mm					
C-1	270	Damage in a circle with	Perforation diameter of 13.2mm	Pit diameter of 5.05mm, and depth of 0.7mm					
C I	270	diameter of 60.1mm	renoration traineter of 15.2min	The diameter of 5.05min, and depth of 0.7min					
C-2	310	Whole crack, not broken	Perforation diameter of 16.0mm	Pit diameter of 8 4mm, and depth of 0.5mm					
C 2	510	and perforation	renoration diameter of rotonini	The diameter of omini, and depth of omini					
C-3	524	Perforation diameter of	Perforation diameter of 26.5mm, and back	Perforation diameter of 11.8mm, and height of					
0.5	524	21.4mm	surface deformation area diameter of 54.0mm	bulge is 14.3 mm around the hole					
C = A	502	Perforation diameter of	Perforation diameter of 29.6 mm, and back	Perforation diameter of $14.9 \mathrm{mm}$, and the height					
0-4 392	572	26.8mm	surface deformation area diameter of 60.1mm	of bulge is15.4 mm around the hole					
C-5	778	Perforation diameter of	Perforation diameter of $34.6 \mathrm{mm}$, and back	Perforation diameter of $18.4 \mathrm{mm}$, and the height					
u-5	110	34.3mm	surface deformation area diameter of 62.5mm	of bulge is14.9 mm around the hole					

表1 复合结构A、C的撞击实验结果



图2 复合结构A、C示意图

Fig.2 An illustrative view of composite structure A and C



Fig.3 A sketch of experimental system

2 有限元仿真及其验证

2.1 复合结构建模

采用Ansys/Ls-dyna有限元计算程序进行数值 仿真,弹体、陶瓷板、泡沫板、金属背板的几何尺寸 与侵彻实验所用尺寸一样.

网格划分:采用拉格朗日算法,选择八节点六 面体单元结构网格,并添加沙漏控制更好地获得泡 沫软材料的大变形.仿真模型中,对弹体、陶瓷板整 体进行网格细化,将泡沫板、金属板进行分割,对泡 沫板、金属板的中心受撞击区域进行网格细化.弹体单元数量为8640,陶瓷板单元数量为216000,泡 沫板单元数量为162000,金属板单元数量为 162000,共计548640个单元,网格详见图4所示.

边界约束:因弹体及靶板对称性,在弹体及靶 板的对称面上添加对称约束限制对称面上节点的 位移,铝合金背板侧面施加固定约束.因复合结构 C中陶瓷板、泡沫板沿径向位移较小,以刚性约束 模拟陶瓷、泡沫板的侧向边界.

接触:采用自动面-面侵蚀接触处理弹体与复 合结构中各分层的接触关系;泡沫板与其它分层采 用软接触算法;结构中除泡沫板外的各分层之间均 使用自动面-面接触.



图 4 弹体撞击复合结构的仿真计算模型 Fig.4 Geometric model of composite structure impacted by projectile

2.2 材料模型

参照其他研究者关于 AD95 氧化铝陶瓷的研 究^[12],其JH-2模型参数如表2所示.参照文献[11, 13],38CrSi钢子弹及2A12铝合金背板的材料参数 见表3所示.参照文献[14],泡沫铝采用 MAT_ BILKHU/DUBOIS_FOAM 材料模型,率相关参数及 失效模型采用数据列表进行输入,部分参数见表4 所示.

表 2 AD95氧化铝陶瓷的JH-2模型参数

Table 2 The parameters of Johnson-Holmquist II model of AD95 Al ₂ O ₃ ceramics
--

$ ho(kg/m^3)$	G(GPa)	$\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}_{0}(\mathrm{s}^{-1})$	T(GPa)	$P_{HEL}(\text{GPa})$	HEL (GPa)	A_r	B_r	C_r
2.70	120.0	1	262	3.27	6.0	0.889	0.29	0.0045
M	N	β	D_1	D_2	$K_I(GPa)$	$K_2(GPa)$	$K_3(GPa)$	
0.53	0.764	1.0	0.005	1.0	184.56	185.87	157.54	

表3 38CrSi钢及2A12铝合金的J-C模型参数

Table 3	J-C model	parameters of	38CrSi steelv	and 2A12	aluminum al	llo
	•					

	Density(kg/m ³)	Shear modulus (GPa)	a (MPa)	b (MPa)	n	с	m	\mathcal{E}_{f}
2024-T351	2785	27	280	400	0.20	0.011	1.43	0.20
38CrSi	7740	77	550	632	0.35	0.017	0.78	0.80

表4	包沫铝材料部分参数
----	-----------

Table 4 (Constitutive mod	el p	arameters	of	alu	minum	foam
-----------	------------------	------	-----------	----	-----	-------	------

Density	Plastic poisson's	Elastic modulus	Yield strength
(kg/m ³)	ratio	(MPa)	(MPa)
890	0.14	840	4.5

2.3 仿真计算与试验结果的对比验证

相同工况条件下,实验及数值仿真所获弹体形 貌、剩余质量、剩余长度的结果见表5所示,发现二 者基本吻合,误差均小于8%.

表5 弹	体剩余质	量与剩余:	长度的对比
------	------	-------	-------

Table 5 Comparison of residual mass and length of projectiles

N.	Mas	s of residual projectile	; (g)	Length of residual projectile (mm)		
INO	Experiment	Simulation	Deviation	Experiment	Simulation	Deviation
A-1	28.85	28.94	0.3%	29.5	29.7	0.6%
С-3	27.79	26.57	-4.1%	27.4	26.5	-3.3%

A-1工况下,实验及数值仿真所获复合结构各 层损伤形态见图5所示.结合仿真结果可以发现, 实验与数值仿真中陶瓷板均整体断裂且出现陶瓷 大碎片;仿真中泡沫板成坑但未被击穿,成坑直径 为35.4mm,坑深为9.7mm,与相应实验中泡沫板成 坑直径39.6mm、坑深8.8mm相比,误差约在10%左 右;仿真中金属背板中心部分区域仅发生弹性变 形,而相应实验中背板未发生变形损伤,数值仿真 与实验现象相同.





C-3工况下,实验及数值仿真所获复合结构各 层损伤形态见图6所示.结合仿真结果可以发现, 实验与数值仿真中陶瓷板、泡沫板均发生穿孔,但 陶瓷板宏观裂纹较少;仿真中陶瓷板穿孔直径为 21.8mm,泡沫板穿孔直径为23.1mm,泡沫板背弹面 损伤区域的直径为47.4mm,与相应实验中瓷板穿 孔直径21.4mm,泡沫板穿孔直径26.5mm,泡沫板 背弹面损伤域直径54.0mm相比,陶瓷板穿孔直径 的误差相对较小,约为5%,而泡沫板损伤的误差相 对偏大,约为12%;仿真中金属背板穿孔直径为 10.9mm,穿孔区域附近的平均隆起高度为12.9mm, 而相应实验工况中背板穿孔直径为11.8mm,穿孔 区域附近的平均隆起高度为14.3mm,因侵彻试验 中背板产生裂纹导致实验中穿孔区域的平均隆起 高度较数值仿真结果偏大,而背板穿孔尺寸的误差 相对较小,总体误差约为8.6%.

通过对数值仿真与实验中弹体变形、陶瓷板及 泡沫板损伤、金属背板破坏进行对比可知,尽管二



D' (0.2.	• • • •	· 1
Firch	Plate damage of struct	ure L = 1 in e	evneriment and	simulation
115.0	i fate damage of struct		experiment and	Simulation

者之间存在一定误差,但不超过10%,且各分层结构的变形损伤与实验均吻合良好,故仿真计算模型可以用于泡沫铝复合结构的抗弹性能分析.

3 周向约束影响分析

基于数值仿真手段,采用"两弹法"获取复合 结构A、C的弹道极限速度.图7分别显示了复合结 构A、C受弹体以不同速度侵彻时,弹体法向剩余速 度随弹体初始撞击速度的变化规律.



从图7曲线可知,对复合结构A、C而言,当弹体初始撞击速度大于弹道极限速度时,弹体法向剩余速度随弹体撞击速度的增加而增加;随着弹体初始撞击速度的增加,当速度大于700m/s时,复合结构A、C中弹体法向剩余速度趋于平稳,周向约束对陶瓷/泡沫铝/金属复合结构抗弹性能的影响被削

弱;复合结构A的弹道极限速度为495m/s,复合结构C的弹道极限速度为527m/s,复合结构C的抗弹性能优于复合结构A.

图8显示了弹体初始撞击速度为500m/s时,复 合结构A、C中弹体法向剩余速度随撞击时刻的变 化规律.可以发现,复合结构C对弹体法向剩余速 度的衰减程度始终强于复合结构A;弹体以速度 500m/s侵彻复合结构C时,弹体法向剩余速度小于 零,表明弹体被反弹,而复合结构A中弹体法向剩 余速度大于零,表明复合结构A被弹体完全穿透, 复合结构C的抗弹性能好于复合结构A.





图9分别给出了弹体以速度500m/s侵彻复合 结构A、C时,弹体动能、弹体法向剩余速度随撞击 时刻的变化规律.研究表明,整个侵彻过程中复合 结构 C 对弹体动能的衰减程度始终好于复合结构 A,表明周向约束能明显提高泡沫铝陶瓷复合结构 的抗弹性能.弹体侵彻复合结构 C 过程中,同一时 刻下弹体法向剩余速度较复合结构 A 大.结合高速 侵彻实验中复合结构 A 、C 的各分层损伤,发现周向 约束作用下陶瓷板中心粉碎区的径向扩张受到限制,提高了复合结构抗侵彻阻力,并避免泡沫板产 生裂纹扩展,有利于发挥泡沫板吸能作用,增强复 合结构耗能.



图9 撞击速度500m/s时弹体法向加速度及动能分析

Fig.9 Normal acceleration and kinetic energy analysis of projectile for impact velocity 500m/s

综上,当陶瓷板、泡沫板无周向约束限制时,粉 碎区形成的陶瓷碎片及粉末将沿径向进行膨胀扩 展,在膨胀力的作用下陶瓷粉碎区向外扩展,引发 陶瓷整体破碎,并进一步削弱陶瓷板对弹体的阻 碍、磨蚀作用,且因无约束存在易使泡沫板被撞飞, 无法完全发挥泡沫板的吸能作用;当陶瓷板、泡沫 板存在周向约束时,二者形成的陶瓷颗粒及粉末无 法沿径向进行膨胀扩展,减小陶瓷面板的径向裂 纹,抑制陶瓷锥的径向裂纹和碎裂,弹体前端破碎 较为彻底的陶瓷碎片紧贴于弹体周围,大部分破碎 陶瓷碎片将在弹体前端起到阻碍、磨蚀作用,并在 周向约束下与弹体一块挤压泡沫板、金属背板,有 利于发挥泡沫材料的吸能特性.因此,对陶瓷板、泡 沫板施加周向约束能限制陶瓷板裂纹扩展,降低陶 瓷板破碎程度,充分发挥泡沫板吸能作用,增加复 合结构耗能,提高结构抗弹性能.

4 结论

采用实验与数值仿真手段,分析了周向约束对 泡沫铝陶瓷复合结构抗弹性能的影响规律与机制, 取得了结论如下:

1)通过典型撞击实验工况验证表明,数值仿真 所获弹体及复合结构各分层的变形损伤均与实验 吻合良好,所用材料模型及相应参数可用于泡沫铝 陶瓷复合结构抗弹性能的数值仿真计算.

2)周向约束是泡沫铝复合结构损伤破坏模式 的重要影响因素.对泡沫铝陶瓷复合结构而言,无 周向约束时,陶瓷板整体破碎,泡沫板受挤压内凹 且生成断裂裂纹;对泡沫板及陶瓷板周向施加约束 时,陶瓷板主要在中心区域发生损伤破碎,破碎程 度相对最小,泡沫板不产生断裂裂纹.

3)当泡沫铝陶瓷复合结构参数保持不变时,对 陶瓷板、泡沫板施加周向约束能限制陶瓷板裂纹扩 展,有利于发挥泡沫板吸能作用,增加抗侵彻阻力 及复合结构耗能,提高复合结构抗弹性能.

参考文献

- Villanueva G R, Cantwell W J. The high velocity impact response of composite and FML-reinforced sandwich structures. *Composites Science and Technology*, 2004, 64:35~54
- 2 Ong C W, Boey C W, Hixson R S. Advanced layered personnel armor. International Journal of Impact Engineering, 2011, 38:369~383
- 3 Anderson-Jr C E, Morris B L. The ballistic performance of confined Al₂O₃ ceramic tiles. *International Journal of Impact Engineering*, 1992, 12(2):167~187
- 4 Anderson-Jr C E, Royal-Timmnons S A. Ballistic perfor-

mance of confined 99.5% Al₂O₃ ceramic tiles. *International Journal of Impact Engineering*, 1997, 19(8):703~713

- 5 Weber K, Hlomquist T J, Templeton D W. The response of layered aluminum nitride targets subjected to hypervelocity impact. *International Journal of Impact Engineering*, 2001,26(1):831~841
- 6 麻震宇,曾首义,蒋志刚.陶瓷复合靶板抗长杆弹侵彻的数值模拟分析结构优化分析.中国科学技术大学学报,2007,37(7):727~731(Ma Z Y, Zen S Y, Jiang Z G. Numerical analysis of protective coefficient of confined ceramic composite target. *Journal of University of Science and Technology of China*,2007,37(7):727~731(in Chinese))
- 7 孙娟,黄小忠,杜作娟,等.约束机制对陶瓷复合靶抗弹 性能的影响.中南大学学报(自然科学版),2011,42 (11):3331~3335(Sun J, Huang X Z, Du Z J, et al. Effect of confinement mechanisms on performance of ceramic composite targets. *Journal of Central South University* (*Science and Technology*), 2011,42(11):3331~3335(in Chinese))
- 8 胡欣,王扬卫,高举斌,等.约束应力对AD95 陶瓷弹击 损伤特征的影响.北京理工大学学报,2010,30(5): 589~593(Hu X, Wang Y W, Gao J B, et al. Effect of confined stress on impact damage of ceramic AD95. *Transactions of Beijing Institute of Technology*,2010,30(5):589~ 593(in Chinese))
- 9 Holmquist T J, Johnson G R. Modeling prestressed ceram-

ic and its effect on ballistic performance. International Journal of Impact Engineering, 2005, 25:113~127

- 10 Espinosa H D, Dwivedi S, Zavattieri P D, et al. A numerical investigation of penetration in multilayered material/ structure system. *International Journal of Solids and Structures*, 1998, 35(22):2975~3001
- 11 肖新科.双层金属靶的抗侵彻性能和 taylor 杆的变形与 断裂[博士学位论文].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2010: 100~105(Xiao X K. The ballistic resistance of double-layered metallic target and the deformation & fracture of taylor rod Ph.D Thesis]. Harbin:Harbin Institute of Technology, 2010:100~105(in Chinese))
- 12 杨震琦.层状复合结构动态力学行为及应力波传播特 性研究[博士学位论文].哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2010:120~130(Yang Z Q. Research of dynamic mechanical properties and stress wave propagation characterstics of layered composite structures [Ph. D Thesis]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2010: 120~130 (in Chinese))
- 13 Wang L, Li Y L, Suo T, et al. Mechanical behavior of commonly used aeronautical aluminum alloys under dynamic. *Journal of Aeronautical Materials*, 2013, 34(4):71~77
- 14 Zheng W, Pang B J, Chen Y. Rate-dependent constitutive model coupled with temperature softening for opencell aluminum foam. Applied Mechanics and Materials, 2014, 470:70~75

ANALYSIS OF ANTI-PENETRATION PERFORMANCE OF CERAMIC COMPOSITE STRUCTURE CONTAINING ALUMINUM FOAM INFLUENCED BY CIRCUMFERENTIAL RESTRICTION

Zheng Wei Yu Linfeng Gu Jingwei[†]

(Xi'an Institute of Aerospace Solid Propulsion Technology, Xi'an 710025, China)

Abstract Many results has been obtained regarding anti-penetration performance of ceramic/metal and ceramic/fiber composite structure influenced by circumferential restriction, but relevant research of ceramic composite structure containing aluminum foam is still absent. This paper studies effects of circumferential restriction for anti-penetration performance of ceramic composite structure containing aluminum foam, based on experiments and numerical simulations. The results show that circumferential restriction is the key mechanism of damage characteristics of ceramic composite structure containing aluminum foam for a scircumferential restriction of ceramic and aluminum foam plate could limit crack propagation of ceramic plate and aluminum foam plate and increase resistance, thus enhancing energy consumption of composite structure, and improving the anti-penetration performance.

Key words circumferential restriction, aluminum foam, ceramic composite structure, anti-penetration performance

Received 6 September 2020, Revised 26 October 2020.

[†] Corresponding author E-mail:zhengwei19862008@126.com