

钢-泡沫铝-纤维复合结构抗冲击性能数值分析

王潇羽, 贺广零, 李趾扬, 王邦国, 谢晓峰

(中国电力工程顾问集团华北电力设计院有限公司, 北京 100120)

摘要: 采用数值模拟的方法研究了冲击荷载作用下钢-泡沫铝-纤维复合结构(以下简称复合结构)的动力响应特性, 并着重考察了面板厚度和芯层厚度对复合结构抗冲击性能的影响, 寻找其规律, 比较分析同质量复合结构中前置钢板与泡沫铝材料质量比对其冲击性能的影响, 寻找前置钢板与泡沫铝最优质量比, 并对这种复合结构进行优化设计, 为工程实际提供数据依据。结果表明, 一定质量范围内, 增加钢板厚度对复合结构抗冲击性能的提升要优于同质量泡沫铝, 但钢板与泡沫铝存在一个质量最优比, 在平面尺寸 9.2 m × 9.2 m、120 t 级的复合结构(PE 纤维和后置钢板定重)中这个最优比在 0.97 : 1 附近。相同平面尺寸 150 t 级的复合结构, 最优比在 0.75 : 1 ~ 0.83 : 1 之间, 考虑工艺要求和造价, 选择前置钢板 9.5 cm、泡沫铝 54 cm 时综合性能更好, 可以抵抗 300 m/s 初始速度弹体, 具有一定安全储备, 其重量只有钢筋混凝土结构的 1/5.67, 体积只有钢筋混凝土结构的 17% 且抗冲击性能较其更优越。

关键词: 泡沫铝; 纤维; 复合结构; 抗冲击性能

中图分类号: V229.7

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2017)01-0113-06

Numerical Analysis on Impact Properties of Steel-aluminum Foam-fiber Composite Structure

WANG Xiaoyu, HE Guangling, LI Zhiyang, WANG Bangguo, XIE Xiaofeng

(North China Power Engineering Co., Ltd. of China Power Engineering Consulting Group, Beijing 100120, China)

Abstract: The method of numerical simulation was used to study the dynamic response characteristics of steel-aluminum foam-fiber composite structure under the action of impact load. The influence of different panel thickness and core layer thickness on the impact resistance of the composite structure was investigated emphatically to find the rule. Compared the influence with different ratio of aluminum foam sandwich plate and front plate in composite structure, optimal mass ratio was marked to optimize the design. In this case, it can provide data basis for engineering practice. It is indicated that: (1) Within the scope of a certain quality, the composite structure with increasing steel plate perform better than aluminum foam in impact resistance. However, there was a optimal quality ratio between steel plates and aluminum foam. The optimal quality ratio was about 0.97 : 1 with 120 tons composite structure with size of 9.2 m × 9.2 m; (2) The optimal quality ratio was about 0.75 : 1 ~ 0.83 : 1 with 150 tons composite structure. As the front steel plate is 9.5 cm and aluminum foam is 54 cm, the combination property was achieved to resist 300 m/s velocity projectile considered technological requirements and cost. In this way, its weight is only 1/5.67 and volume is only 17% of the reinforced concrete structure under a certain safety reserve, and it can perform better in impact resistance.

Key words: foam aluminum; fiber; composite structure; impact properties

传统混凝土防护结构体系具有体积大、重量大等缺点, 有较大的改进空间。根据国际研究动态, 随着新材料和新结构不断地涌现与应用, 针对我国

未来防护工程建设(特别是地下油库地面附近附属设施、导弹发射井等埋深较浅设备)对适应环境条件的新材料与新结构的迫切需要^[1], 本文提出了一种通用的保护地下设施抗冲击结构——钢-泡沫铝-PE 纤维复合结构。

关于夹芯结构高速冲击吸能特性的研究许多都是基于实验研究^[3-4], 张明华等人^[5]通过对泡沫铝

收稿日期: 2016-09-22

作者简介: 王潇羽(1991), 男, 山西大同人, 工程师, 硕士, 主要从事组合结构相关工作(e-mail) wangxiaoyu297090@sina.com。

夹芯板进行侵彻实验,得到不同冲击速度下的破坏模式。Hoo Fatt 等人^[6]也归纳出一个利用平头弹和圆头弹正冲击蜂窝板穿甲弹道极限理论解。Hansen 等^[7]利用 LS_DYNA 对泡沫材料夹层板受鸟撞的现象进行模拟,泡沫铝夹层本构模型在达到最大体积应变时发生破坏,“鸟”采用子弹模型替代。Meo 等^[8]利用相同软件分析了夹芯板结构的冲击性能,其中面板使用了 Chang-Chang 失效准则来预测损伤。Guruprasad^[9]提出了牺牲性覆层设计的概念,提出了以多孔金属材料设计装甲防护结构的一般性准则。G. Reyes Villanueva 等^[10]对以纤维-铝板多层薄板为面板、以泡沫铝为夹心的复合材料进行了高速冲击响应实验研究指出高速冲击下该体系有很好的能量吸收特性。

到目前为止,国内外已经对泡沫铝夹芯结构抗冲击性能做了大量研究,但对钢-泡沫铝-PE 纤维复合结构研究尚且不多,因此,研究不同冲击荷载下复合结构动力响应特性、各材料参数对复合结构的冲击性能影响,以及相同工况下复合结构与普通钢筋混凝土结构的冲击性能对比分析,对推行此新型复合防护结构具有现实指导意义。

1 研究方案

本文以国内某重要地下能源设施为算例,选取平面尺寸 9.2 m × 9.2 m 的复合结构作为地面防护结构,研究其在某型号导弹(以下称为弹体)冲击作用下的力学性能(暂不考虑导弹爆炸)。复合结构分为钢、泡沫铝、PE 纤维、钢四层。在控制后置钢板和纤维层不变的前提下,本文着重考虑了前置钢板、泡沫铝层厚度对复合结构的影响。设置若干组结构工况,各组复合结构尺寸及工况设置见表 1。

2 有限元建模

2.1 模型的建立

钢-泡沫铝-纤维复合结构平面尺寸均为 9.2 m × 9.2 m,表 1 中后四组(S6F5、S4F6、S8F4 和 S10F3)按照等质量原则设置。弹体长 3.88 m,弹径 37 cm,总重 2 132 kg,初始速度为 200 m/s、233 m/s、266 m/s、300 m/s,圆形弹头。采用 ANSYS 建立 1/4 模型,分析过程由结构非线性动态分析程序 LS-DYNA3D.971 完成。以 S2F5 模型为例,有限元模型与计算模型如图 1 所示,模型共

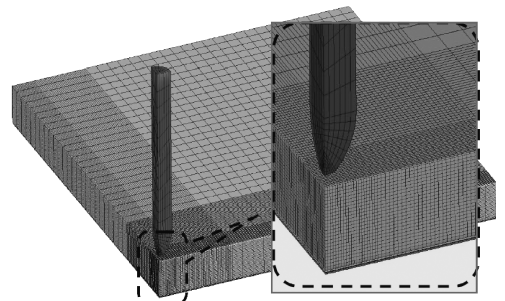
101 020 个单元,弹体和泡沫铝结构采用 Solid164 单元建模,前置钢板、纤维层和后置钢板均因厚度太小而采用 Shell163 单元建模,均为 4 356 个单元,前置钢板和后置钢板均采用厚度方向 3 个积分点积分,而聚丙烯纤维层为复合层材料,厚度方向 48 层纤维以 0°/90°/0° 的交叉方式叠合,因此厚度方向为设置 48 个积分点。在复合结构与弹体接触的界面附近,将复合结构的网格做进一步细划以提高计算精度。

表 1 复合结构尺寸及工况设置

Tab. 1 Size and operating conditions of composite structure

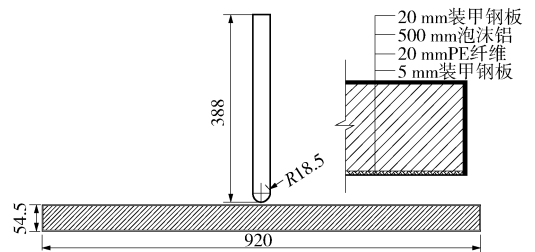
编号	前面钢板/ cm	泡沫铝/ cm	PE 纤维/ cm	后置钢板/ cm	弹体初始速度/ (m · s ⁻¹)	
S2F5	2.0	50.0	2.0	0.5	200	
S2F6	2.0	60.0	2.0	0.5		
S2F7	2.0	70.0	2.0	0.5		
S4F5	4.22	50.0	2.0	0.5		
S6F5	6.44	50.0	2.0	0.5		
S4F6	4.22	60.0	2.0	0.5		
S8F4	8.66	40.0	2.0	0.5		
S10F3	10.88	30.0	2.0	0.5		
						233
						266
					300	

注: S-钢; F-泡沫铝; S2F5 表示前置钢板 2 cm、泡沫铝 50 cm、纤维 2 cm、后置钢板 0.5 cm 的钢-泡沫铝-纤维复合结构。



(a) 复合结构 1/4 建模

(a) 1/4 model of the composite structure



(b) 弹体与 S2A5 复合结构尺寸图(单位: cm)

(b) Missile and S2A5 composite structure size(unit: cm)

图 1 复合结构有限元模型与计算模型

Fig. 1 Finite element model and the calculation model

2.2 材料参数

弹体和钢板均采用 *MAT_JOHNSON_COOK 材料模型, 该模型适用于应变率大范围变化的问题。弹体密度 7.83 g/cm^3 , 钢板密度 7.85 g/cm^3 , 两者弹性模量 210 GPa , 泊松比 0.3 。钢板为装甲钢板, 屈服应力 $1\ 380 \text{ MPa}$, 抗拉强度 $1\ 550 \text{ MPa}$ 。

泡沫铝材料采 *MAT_CRUSHABLE_FOAM 模型, 它能够模拟泡沫单元达到拉伸和剪切应变极限时的失效行为, 适合于分析冲击穿透行为。泡沫铝材料采用淮北洪波泡沫金属材料厂制作的开孔泡沫铝材料, 内部橡胶材料填塞, 密度 $1.747\ 4 \text{ g/m}^3$, 弹性模量 1.3 GPa , 拉应力截止值 50 MPa , 其力学特性采用图 2 所示的泡沫铝应力-应变关系描述。

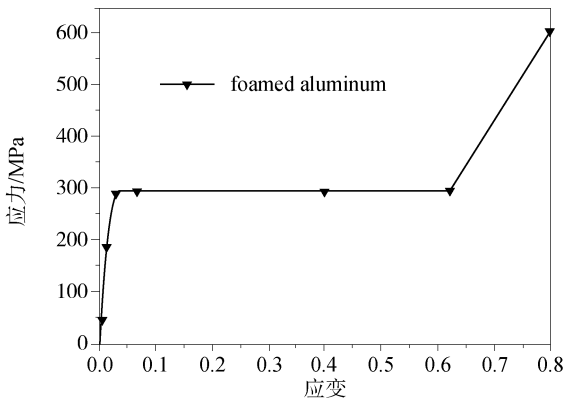


图 2 泡沫铝材料应力应变曲线

Fig. 2 The curve between stress and strain of aluminum foam

PE 纤维采用 *MAT_ENHANCED_COMPOSITE_DAMAGE 材料本构模型, 此材料模型是由 Chang & Chang 发展的复合材料失效模型, 密度 0.97 g/cm^3 , 弹性模量 130 GPa , 泊松比 0.2 , 其他材料参数见表 2。其中 S_{sc} 为剪切强度, S_{xc} 为轴向压缩强度, S_{xt} 为轴向拉深强度, S_{yc} 为横向压缩强度, S_{yt} 为横向拉深强度。为简化计算, 可认为材料各向同性, 并不考虑复合材料层叠效果。

表 2 PE 纤维材料参数表

Tab. 2 PE fiber material parameter

参数	G_{ab} /GPa	S_{xc} /GPa	S_{xt} /GPa	S_{yc} /GPa	S_{yt} /GPa	S_{sc} /GPa
纤维	40	350	420	150	30	30

2.3 边界条件及初始条件

本算例中靶板边界为靶板底面四边 46.8 cm 范围内固支体系, 在对称界面处分别设置对称边界约

束。弹体与前置钢板间采用面对面侵蚀接触。由于弹体会穿透前置钢板并与泡沫铝、纤维层分别产生接触, 因此弹体于泡沫铝、纤维、后置钢板均设置了面对面侵蚀接触。前置钢板与泡沫铝、泡沫铝与纤维层、纤维层与后置钢板层之间均采用自动面对面连接接触。算例中采用的某型号导弹末端速度 300 m/s , 考虑到复合结构作为防护结构上表面尚可有一部分覆土厚度, 因此弹体分别以初始速度 200 m/s 、 233 m/s 、 266 m/s 、 300 m/s 冲击复合结构靶板中心。

3 模拟结果与分析

3.1 复合结构破坏特征

图 3 给出了数值模拟得到的芯层复合结构变形模式。前置钢板最先进入压缩变形, 过程中与泡沫铝协同变形, 最终拉升断裂。芯层泡沫铝变形模式也分为压缩区和无压缩区, 但压缩主要发生于弹体作用的中心区域, 可观察到局部的塑性大变形, 冲量较大的情况下, 芯层完全进入密实化, 在加载区域的边缘也有部分泡沫收到压缩, 但压缩量明显减小, 与后面板连接处基本保持原状, 在距离受载区域较远以及被约束区域, 泡沫芯层几乎没有压缩。纤维层和后置钢板在弹体较接近时, 芯层压缩量已经很大时才进入变形阶段, 最终因弹体冲切拉伸断裂。后置钢板和纤维层的变形范围明显大于前置钢

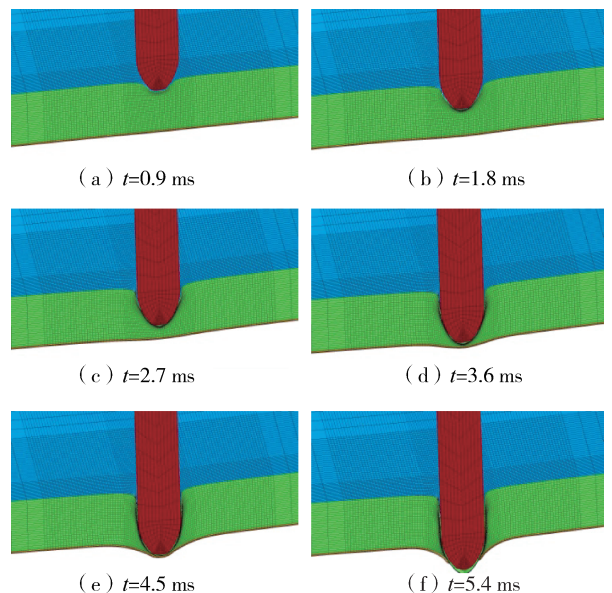


图 3 复合结构受冲击荷载作用下破坏过程

Fig. 3 Destructive of composite structure under impact load

板的影响范围。

3.2 泡沫铝芯层厚度对复合结构抗冲击性能影响

对比 S2F5、S2F6 和 S2F7 结构受初始速度 200 m/s 弹体冲击时吸能情况可知泡沫铝芯层厚度对复合结构抗冲击性能的影响,其吸能对比如图 4 所示,观察可发现, S2F5、S2F6 和 S2F7 结构吸收总能量值分别为 78.79、90.66、86.38 ($\times 10^5$ J),其中 2 cm 厚的前置钢板穿透基本能够吸收 10.5×10^5 J 的能量;三种结构泡沫铝材料吸收的能量分别为 59.97、74.12、70.73 ($\times 10^5$ J), S2F6 泡沫铝较 S2F5 厚度增加 20% 吸能增加 23.59%, S2F7 泡沫铝较 S2F5 厚度增加 40% 吸能增加 17.92%,表明 S2F7 泡沫铝未全部发挥效能,观察弹体侵彻过程能够发现, S2F7 泡沫铝层没有全部大变形压缩时弹体速度已降为 0,表明泡沫铝层、纤维层后置钢板层都未发挥全部效能。

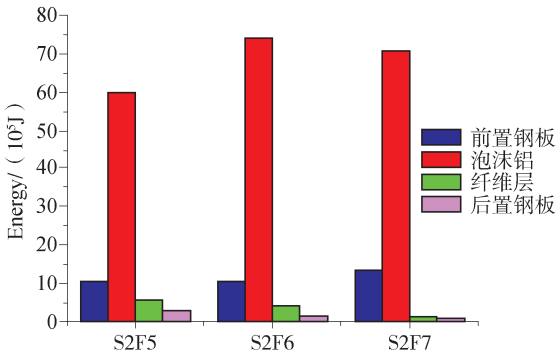


图4 不泡沫芯层厚度下复合结构吸能对比

Fig. 4 Energy comparison of structures with different thicknesses aluminum foams

3.3 前置钢板厚度对复合结构抗冲击性能影响

对比 S2F5、S4F5 和 S6F5 结构受初始速度 200 m/s 弹体冲击时吸能情况可知前置钢板厚度对复合结构抗冲击性能的影响,其吸能对比如图 5 所示,观察可发现, S2F5、S4F5 和 S6F5 结构吸能总量分别为 78.79、90.74、92.23 ($\times 10^5$ J), S4F5 和 S6F5 较 S2F5 吸能总量均有所提高。三种结构前置钢板吸收能量相差很大,分别为 10.53、15.65、28.08 ($\times 10^5$ J), S4F5 结构前置钢板较 S2F5 厚度质量增加 111% (即增加与 100 cm 厚泡沫铝材料相等质量)吸能增加 48.6%, S6F5 结构前置钢板较 S2F5 质量增加 222% (即增加与 200 cm 厚泡沫铝材料相等质量)吸能增加 166.7%,由于三种结构均全部穿透全部发挥效能,因此表

明增加前置钢板厚度能有效提高复合结构抗冲击性能,且随着前置钢板厚度增加,其吸能效率提高越明显。

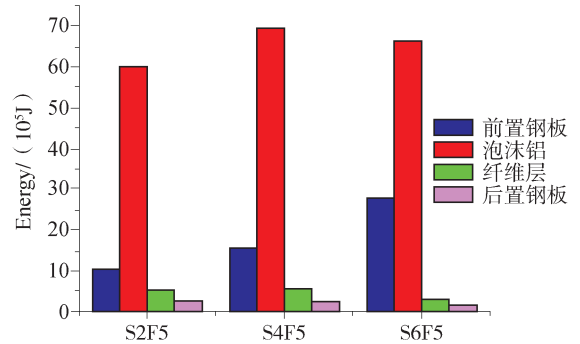
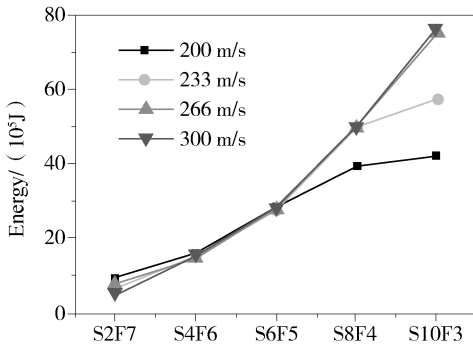


图5 不同前置钢板厚度下复合结构各层材料吸能情况

Fig. 5 Energy of structures in each layers with different thicknesses front plates

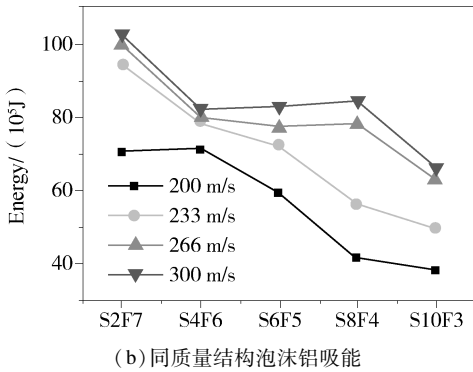
3.4 同质量复合结构不同材料比重对复合结构抗冲击性能影响

相同质量但前置钢板与泡沫铝芯层比重不同的五种复合结构吸能对比如图 6 所示。观察图 6(a)可知,随着钢板层厚度的增加,钢板材料吸能明显增加,且钢板吸能多少与弹体初始速度基本无关,因此将不同初始速度下钢板材料吸能数量平均,更具比较意义,钢板吸能平均值分别为 7.55、15.70、27.76、49.98、75.80 ($\times 10^5$ J), S4F6、S6F5、S8F4、S10F3 结构钢板吸能较 S2F7 分别提高了 107.94%、267.68%、561.99%、1 004.0%,表明较厚的钢板对结构的冲击性能有利。观察图 6(b)可知,随着弹体初始速度的增加,同一泡沫铝吸能也会增加,可以解释为由于泡沫铝材料的应变率效应,随着泡沫铝材料应变速率的增大,其应力随之增大,因此能够吸收更多能量。除 200 m/s 初始速度对应五种结构以及 233 m/s 初始速度对应 S2F7、S8F4、S10F3 结构未被穿透,其他结构工况下复合结构均被穿透,认为泡沫铝材料全部发挥效能,具有可比性:随着泡沫铝层厚度的减少,泡沫铝材料吸能也有明显减少,但当钢板达到一定厚度时,较薄的泡沫铝也能吸收较多的能量,对比 300 m/s 初始速度对应五种结构泡沫铝吸能分别为 102.7、81.87、82.78、84.68、66.41 ($\times 10^5$ J), S4F6、S2F7、S8F4 泡沫铝吸能基本差不多,为 S2F7 结构泡沫铝吸能的 80% 左右, S10F3 较 S2F7 减少 36.3%。图 6(c)所示为等质量五种结构吸能总量,



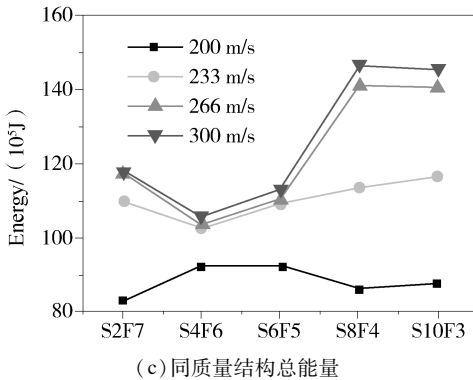
(a) 同质量结构钢板吸能

(a) Steel energy absorption of three structure with same quality



(b) 同质量结构泡沫铝吸能

(b) Aluminum foam energy absorption of three structures with same quality



(c) 同质量结构总能量

(c) Energy absorption of three structures with same quality

图 6 同质量复合结构吸能对比

Fig. 6 Energy absorption comparison of three structures with same quality

观察可知, 除 200 m/s 初始速度对应五种结构以及 233 m/s 初始速度对应 S2F7、S8F4、S10F5 结构未被穿透, 其他工况下复合结构均被穿透, 具有可比性; 对比 300 m/s 初始速度对应五种结构, 相比吸能最少的 S4F6 结构, S6F5、S2F7、S8F4、S10F3 结构吸能较其分别提高 7.02%、11.56%、

39.03%、37.97%, 表明同质量的复合结构中, 增大钢板比重会提高复合结构的冲击性能, 但当前置钢板与泡沫铝质量达到一定比值之后, 再增加钢板比重效果将不再明显, 表明同一质量复合结构中钢板与泡沫铝材料存在一个最优比, 在本节中讨论的 120 t 级的复合结构中, 前置钢板与泡沫铝的质量最优比在 0.97 : 1 附近。这种现象可以解释为: 增加泡沫铝材料较增加相同质量的前置钢板吸能效果明显, 因此 S2F7 结构吸能较多, 但当前置钢板刚度达到一定量级后, 能有效带动泡沫铝材料变形吸能, 且钢板冲击性能提高速度比其厚度增加更明显, 因此 S8F4 结构的抗冲击吸能最好, 而当钢板比重过大时, 泡沫铝材料太少, 以致总体吸能减少, 因此 S10F3 吸能效果不如 S8F4。

4 钢-泡沫铝-纤维复合结构优化设计

如表 3 所示, 能够抵抗 300 m/s 弹体冲击的混凝土井盖起码需要 4.1 m 厚, 9.2 m × 9.2 m × 4.1 m 的混凝土结构重达 850 t, 拟定复合结构重量为 150 t, 即为混凝土结构的 1/5.67。为寻求 150 t 重量级的能够抵抗 300 m/s 初始速度弹体冲击的复合结构, 本节中设置 S2F8、S4F7、S6F6、S8F5、S10F4 五种结构方案, 各结构尺寸数据见表 4。

表 3 半穿甲炸弹侵彻能力
Tab. 3 Bombs penetration ability

弹速/(m · s ⁻¹)	100	200	300	400	500
钻土深度/m	14.9	36.4	57.9	79.4	100.9
钻钢筋混凝土深度/m	0.9	2.3	4.1	6.3	8.7

表 4 各结构尺寸数据表
Tab. 4 The data tble of structure size

编号	前面钢板/cm	泡沫铝/cm	PE 纤维/cm	后置钢板/cm
S2F8	2.00	88.0	2.0	0.5
S4F7	4.22	78.0	2.0	0.5
S6F6	6.44	68.0	2.0	0.5
S8F5	8.66	58.0	2.0	0.5
S10F4	10.88	48.0	2.0	0.5

五种结构能量吸收对比如图 7 所示。观察可发现, 五种结构总吸能分别为 150.3、139.44、147.62、173.78、161.77 (× 10⁵ J), 表明 S8F5 结构能够吸收最多的能量。观察各结构发现, 前置钢板和泡沫铝的质量比有一个最合适的比值, 当其增

大或减小时,复合结构均达不到最优抗冲击吸能,这个最优质量比应该存在于 S8F5 和 S10F4 之间,通过进一步数值分析,发现前置钢板与泡沫铝质量最优比在 0.75 : 1 ~ 0.83 : 1 之间。

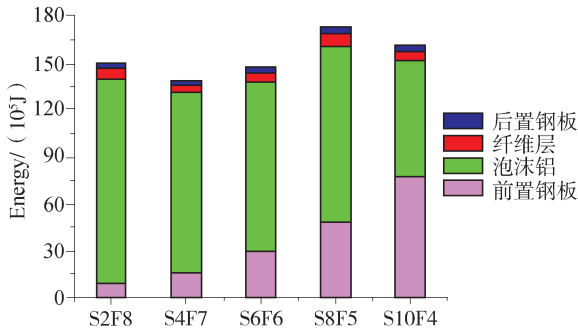


图7 五种结构能量吸收对比

Fig. 7 Energy absorption comparison of five kinds of structures

结构的制作工艺同样是需要考虑的因素之一:为考虑到钢板的厚度规格,厚度 >60 mm 时需在专门的特质钢板轧制机上轧制,因此可将前置钢板厚度定义在 95 mm。泡沫铝材料采用生产后切割的方法生成,因此理论上任何厚度都可以切割而成,因此同时将泡沫铝厚度定义为 540 mm,此时产生的结构 S9.5F54.0 依然能够保证重量在 150 t,能够保证抵抗 300 m/s 着地速度弹体冲击,且有一定的安全储备。考虑到材料的造价,特殊钢板的造价大约为 3 000 元/t,而泡沫铝材料将近 7 000 元/t,因此少用泡沫铝材料当然是比较好的选择。由于在 150 t 级别的复合结构中,钢板与泡沫铝质量比达到 0.75 : 1 ~ 0.83 : 1 时结构的冲击性能最强,因此可以选择钢板和泡沫铝质量比 0.83 : 1,此时,刚在钢材最多,造价最小。当然由于 S9.5F54.0 还有一定安全储备,通过数值模拟表明其能拦截 330 m/s 初始速度的弹体,可认为具有一定安全储备。

5 结论

1) 每单增加 10 cm 泡沫铝时,复合结构吸能增加 14.18×10^5 J,而单增加相同质量钢板材料时,总吸能增加 18.94×10^5 J,一定质量范围内,单增加钢板对复合结构抗冲击性能的提升要优于增加相同质量泡沫铝。

2) 120 t 级的同质量的五种复合结构中,随着前置钢板与泡沫铝质量比的增加,相比质量比(前置钢板与泡沫铝质量的比值)最小的结构,其他结

构吸能分别提高 7.02%、11.56%、39.03%、37.97%,表明增大钢板比重会提高复合结构的冲击性能,但当前置钢板与泡沫铝质量达到一定比值之后,再增加钢板比重效果将不再明显,钢板与泡沫铝材料存在一个质量最优比,在 120 t 级的泡沫铝夹芯复合结构中,前置钢板与泡沫铝的质量最优比在 0.97 : 1 附近。

3) 150 t 级的钢-泡沫铝-纤维复合结构中,前置钢板与泡沫铝质量最优比在 0.75 : 1 ~ 0.83 : 1 之间,考虑工艺要求和造价,前置钢板 9.5 cm、泡沫铝 54 cm 时冲击性能最好,可以抵抗 300 m/s 初始速度弹体,具有一定安全储备,极限弹体初始速度为 330 m/s,其重量只有钢筋混凝土结构的 1/5.67,体积只有钢筋混凝土结构的 17%,且冲击性能较钢筋混凝土更优越,很好的解决了钢筋混凝土防护结构重量大、体积大的问题,具有较大的推广意义。

参考文献:

- [1] 廖祖伟. 钢板-支撑钢筋-聚氨酯复合材料结构的性能及其在地下防护工程中的应用研究 [D]. 四川: 西南交通大学, 2007.
LIAO Z W. Study on performance of steel /supported reinforcing bar /polyurethane composite structures and research on the application of underground protective work [D]. Sichuan Province: Southwest Jiaotong University, 2007.
- [2] 杨飞, 王志华, 赵隆茂. 泡沫铝夹芯板抗侵略性能的数值研究 [J]. 科学技术与工程, 2011, 11(15): 3378-3382.
YANG F, WANG Z H, ZHAO L M. Numerical studies on aluminum the penetration resistance of foam sandwich board [J]. Science Technology and Engineering, 2011, 11 (15): 3378-3382.
- [3] VILLANUEVA G R, CANTWELL W J. The high velocity impact response of composite and FML-reinforced sandwich structures [J]. Composites Science and Technology, 2004, 64(1): 35-54.
- [4] VAIDYA U K, NELSON S, SINN B, et al. Processing and high strain impact response of multifunctional sandwich composites [J]. Composite Structures, 2001, 52(3): 429-440.
- [5] 张明华, 赵恒义, 谌河水. 泡沫铝夹芯板动态抗侵略性能的实验研究 [J]. 力学季刊, 2008, 29(2): 241-247.
ZHANG M H, ZHAO H Y, ZHAN H S. Experimental research on anti-penetration properties of sandwich plate with aluminum foam core [J]. Chinese Quarterly of Mechanics, 2008, 29(2): 241-247.

(下转第 142 页 Continued on Page 142)

察、文件审查、外部评估结论等评价手段,重点关注纠正行动实施后是否有重复缺陷出现或缺陷的趋势变化是否有改变、行动的实施是否引发新的或其它的问题等。

2.5.2 对于重要外部经验反馈的纠正行动计划开发的有效性评价

由于重水堆技术存在较多的共性问题,因此来自重水堆业主联合会(COG)的运行经验反馈信息对于中核运行三厂来说有着非常重要的价值。比如,2008年5月 Pickering A 核电厂1号机组装卸料机曾发生过L杆蜗轮与BELL齿轮连接的6个连接螺栓断裂的故障,导致机组停堆59天。由于对该外部经验反馈的分析评价不到位,只是简单采取了培训的行动,从而导致2011年1号机组因装卸料机故障而停堆检修。中核运行三厂还曾因对COG有关同样的仪表管线的外部经验反馈的纠正行动计划开发有效不足,没有具体落实如何实施预防性维修工作,从而导致在2013年1月19日和3月2日,中核运行三厂1号机组因为破损燃料定位系统的仪表管线泄漏进行两次计划小修工作。还有其它情况,比如端屏蔽冷却系统堆腔覆盖气体氢气浓度异常升高等问题,这些都是在对已经获取了COG其它核电厂类似的经验反馈的情况下,由于未能有效开发纠正行动计划而给电厂造成了安全和经济上的损失的案例。IAEA的分析报告也曾指出一个普遍存在的现象,即在评价外部经验反馈的适用性时存在一种寻找各种支持其不适用于本电厂的依据的倾向。中核运行三厂对于重要COG经验反馈采取实际的纠正行动的比例一直低于加拿大本土的CANDU核电厂和罗马尼

亚Cernavoda核电厂,后续启动对重要外部经验反馈类(比如COG经验反馈小组定义的重要事件)的纠正行动计划有效性评价工作,并持续优化对核电厂还是很有实际意义。

3 结论

通过2015年以来开展的中核运行三厂纠正行动计划有效性评价工作,总体上的开发质量还是较好的,大部分都能满足要求。开展此项工作的意义不仅仅是监督经验反馈的实效、对一些质量不符合要求的纠正行动计划的重新开发以解决问题,更重要的是促进核电厂员工对于核电厂安全文化和管理理念及工作的认同,并形成开发高质量纠正行动计划的共识。对于有效性评价工作本身,由于实践经验不足,也有相当的改进空间。本文论述的改进方向建议也可以作为后续开展有效性评价优化工作的基础。

参考文献:

- [1] International Atomic Energy Agency. Effective corrective actions to enhance operational safety of nuclear installations; IAEA-TECDOC-1458 [S/OL]. Vienna; International Atomic Energy Agency, 2005. http://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/te_1458_web.pdf.
- [2] International Atomic Energy Agency. Best practices in the organization, management and conduct of an effective investigation of events at nuclear power plants; IAEA-TECDOC-1600 [S/OL]. Vienna, Austria; International Atomic Energy Agency, 2008. http://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/te_1600_web.pdf.

(责任编辑 郑文棠)

(上接第118页 Continued from Page 118)

- [6] HOO FATT M S, PARK K S. Perforation of honeycomb sandwich plates by projectiles [J]. Composites: Part A, 2000, 31(8): 889-899.
- [7] HANSEEN AG, GIRARD Y, OLOVSSON L, et al. A numerical model for bird strike of aluminium foam-based sandwich panels [J]. International Journal of Impact Engineering, 2006, 32(7): 1127-1144.
- [8] MEO M, VIGNJEVIC R, MARENGO G. The response of ho-

neycomb sandwich panels under low-velocity impact loading [J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2005, 47(9): 1301-1325.

- [9] GURUPRASAD S, MHKHERJEE A. Layered sacrificial claddings under blast loading, Part I: analytical studies [J]. International Journal of Impact Engineering, 2000, 24(9): 957-973.

(责任编辑 郑文棠)