

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2018.06.005

# 高压电缆中间接头防爆壳的内爆炸动力响应<sup>\*</sup>

葛安然 杨 森 何中其  
南京理工大学化工学院(江苏南京,210094)

[摘 要] 应用显式动力学软件 AUTODYN 建立了高压电缆中间接头防爆壳内爆炸的计算模型,对爆炸过程的壳体动力响应进行了数值模拟和定性、定量分析。结果表明:随着距爆心环面距离的增加,壳外壁动力响应参数(位移、速度、应变、应力)峰值在防爆壳主体部分均呈下降趋势,到了变截面体部分,由于能量的汇聚,参数值又开始慢慢回升,进入端部则大幅度上升,并在封头中心处达到最大;爆心环面、端部和封头中心是壳体最薄弱的部位,加强这 3 处及封头与端部连接处的保护是达到整体防爆的关键;壳体变形程度随着爆炸能量的增加近似线性变大,随着壳体厚度增加逐渐变小,且当爆炸能量不变时,厚度增加到 5 mm 后,其对壳体变形的影响不再明显,因此壳体厚度以 5 mm 为宜;增加整体径向直径、减小变截面体与轴向的夹角以及选用椭球封头更有利于壳体防爆。

[关键词] 内爆炸;动力响应;AUTODYN;高压电缆中间接头;防爆壳

[分类号] O383+.3

## Dynamic Response on Internal Explosion of Explosion-proof Shell for High-voltage Cable Middle Joint

GE Anran, YANG Sen, HE Zhongqi  
School of Chemical Engineering, Nanjing University of Science and Technology (Jiangsu Nanjing, 210094)

[ABSTRACT] Explicit dynamics software AUTODYN was used to establish the calculation model for an explosion-proof shell for high-voltage cable joint experiencing internal explosion. Numerical simulation and qualitative or quantitative analysis were carried out on the dynamic response from the shell during the explosion process. The results show that with the increase of the distance away from the explosion center torus, dynamic response parameters of the outer wall (displacement, velocity, strain, and stress) decrease in the main section of the explosion-proof shell. They were observed to increase slowly due to convergence of energy at the variable section, rise dramatically when approaching the end section, and reach the maximum at the head center. The explosion center torus, end section and head center are confirmed as the weakest part of the shell. Strengthening the protection of these three locations and connection between the head and end sections is the key to achieve the overall explosion-proof capacity. Shell deformation increases linearly with the increase of explosive energy, and gradually decreases with the increase of shell thickness until insusceptible at the thickness of 5 mm and constant explosion energy. The preferred shell thickness is 5 mm. Increasing the overall radial diameter, reducing the angle between variable section and axial direction, and selecting the ellipsoidal head are more conducive to the explosion-proof of the shell.

[KEYWORDS] internal explosion; dynamic response; AUTODYN; high-voltage cable middle joint; explosion-proof shell

引言

电力是现代化社会生存发展的血液。近些年,经济高速发展下,各行业机械化程度日益提高,电力能源服务领域不断拓宽,使得高压电缆建设逐步崛起。我国高压电缆发展相对较晚,从生产到投入使用的各个环节面临着更高的挑战,且高压载荷能量巨大,电气设备的防爆更加不容小觑<sup>[1]</sup>。中间接头是电缆系统最薄弱和危险的部位,稍有差池,则会因

<sup>\*</sup> 收稿日期:2018-06-25  
作者简介:葛安然(1993-),男,硕士,主要从事爆炸安全防护研究。E-mail:1046813711@qq.com  
通信作者:何中其(1978-),男,博士,讲师,主要从事爆炸作用及应用、安全技术工程研究。E-mail:hzq555@163.com

密封不严、焊接不牢等问题导致绝缘失效、短路放电,造成燃烧爆炸事故<sup>[2]</sup>。高压电缆能量巨大(110 kV 以上),而在接头处有效的绝缘放电时间持续很短,往往在微秒级,其放电过程可近似看作是高储存能量的电容放电,电压及电流均呈指数下降<sup>[3]</sup>。以电压  $U = 220 \text{ kV}$ 、电容  $C = 100 \text{ } \mu\text{F}$  为例,应用公式  $E = 1/2 CU^2$ ,计算得到理想放电能量为  $2.42 \times 10^6 \text{ J}$ <sup>[4]</sup>。可以认为,高电压电缆中间接头处的放电是瞬间产生巨大能量的过程。

相比于无限空间,内爆炸冲击波会经受结构内壁面的二次或多次反射,结构形式的多样性和爆炸能量的高度集中使得限制空间内的爆炸问题要复杂得多<sup>[5]</sup>。对此,国内外学者已作了大量的研究。早期代表性的有 Baker<sup>[6]</sup> 经典的内爆炸三脉冲加载模型, Duffey<sup>[7]</sup>、Syrinin<sup>[8]</sup> 等对圆柱形、球形壳体在内爆炸载荷下动态响应的研究。近些年,对于立方体结构, Hu<sup>[9]</sup> 和 Wu<sup>[10]</sup> 等研究了装药形状、位置方向对内壁超压分布的影响;柏小娜等<sup>[11]</sup> 使用镜像爆源的方法将内爆炸载荷下密闭空间内冲击波的传播及作用规律等效为爆源和镜像爆源产生的爆炸冲击波的相互耦合叠加,基于 LAMB 叠加规则,建立了长方体密闭壳体内爆炸冲击波的超压计算模型; Rushton<sup>[12]</sup>、Langdon<sup>[13]</sup> 等分别对两端开口、一端开口的圆柱体钢筒的内爆炸变形进行了实验和数值模拟分析。不难看出,现有工作主要集中在几何规则的立方体、圆柱体、球壳等结构内爆炸效应的分析,而对诸如电缆中间接头防爆壳这类变截面等非规则壳体的研究相对较少。

近些年来,市面上涌现了一大批电缆中间接头防爆外壳,但其多半凭经验生产,在外观设计、材料选择及设计参数等方面均存在诸多不足。本文中,则依托能很好地处理流固耦合、求解变形碎裂问题的显式动力学软件 AUTODYN<sup>[14]</sup>,对爆炸后壳体的动力响应过程进行定性、定量分析,并研究能量等级(炸药量)、壳体厚度对壳体破坏的影响,旨在为电缆中间接头防爆壳的优化设计提供一定的参考。

## 1 AUTODYN 计算的有效性验证

因炸药 TNT 在 AUTODYN 软件中应用成熟,自带的材料方程各项参数的确定均已经过数次实验验证改善,模拟结果更加准确可信,故以同等能量等级的炸药 TNT 近似模拟电缆接头瞬间爆炸的过程。为了验证 AUTODYN 软件在内爆炸载荷下结构动力响应计算方面的合理可行性,笔者对前人研究文献

中 20 号钢筒的内爆炸变形进行数值模拟<sup>[15-16]</sup>,得到了在 TNT 中心装药下钢筒爆心环面的径向位移和变形量与时间的关系。为了更确切地验证数值模拟和实际情况的一致性,将 120 g TNT 内爆下钢筒外壁在爆心环面处的径向位移-时间曲线和在 60、100、120、180 g 不同药量下爆心环面处的变形量分别与实验数据进行对比,如图 1、图 2 所示。从图 1、图 2 可以看到,数值计算与实验结果十分接近,最大偏差不超过 10%,说明 AUTODYN 数值模拟方法能很好地解决内爆炸载荷下壳体动力响应问题。

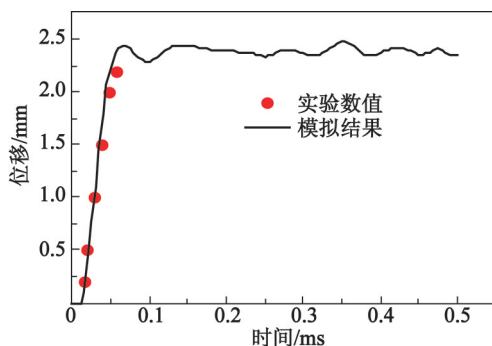


图 1 120 g TNT 内爆下钢筒外壁径向位移的模拟与实验结果对比

Fig. 1 Comparison between simulation and experimental results of outer wall radial displacement of steel drum by internal explosion of 120g TNT

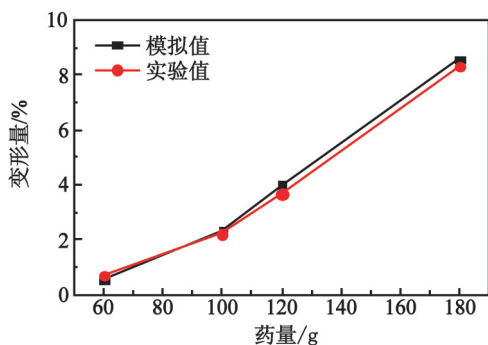
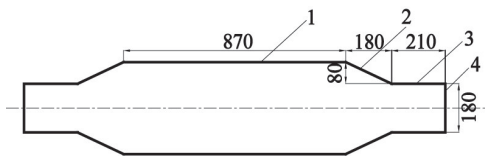


图 2 不同药量下外壁变形量的模拟与实验结果对比

Fig. 2 Comparison between simulation and experimental results of outer wall deformation under various charge mass

## 2 有限元模型的建立

为避免壳体焊接强度、内部连接加固材料等不确定因素对后续计算分析的影响,直接视该防爆壳结构为一整体,其连接处强度简化为壳体材料本身的强度,建立的壳体断面和尺寸见图 3,材质选用耐腐蚀高韧性的 304 不锈钢。



1 - 主体部分;2 - 变截面体部分;3 - 端部;  
4 - 封头。

图 3 防爆壳断面示意图(单位:mm)

Fig. 3 Cross section diagram of explosion-proof shell  
(unit:mm)

2.1 材料方程及参数的确定

1)空气。空气采用 Ideal Gas 理想气体状态方程,其表达式为

$$p=(\gamma-1)\rho e。$$
 (1)

式中: $p$  为压力; $\rho$  为空气密度, $\rho=1.225\text{ kg/m}^3$ ;  $e$  为气体单位质量内能, $e=206.8\text{ kJ/g}$ ;  $\gamma$  为绝热指数, $\gamma=1.4$ 。

2)炸药。TNT 炸药采用标准的 JWL 状态方程来描述其化学物理的爆轰过程,具体表达式为

$$p=A_1(1-\frac{\omega}{R_1V})e^{-R_1V}+B_1(1-\frac{\omega}{R_2V})e^{-R_2V}+\frac{\omega E}{V}。$$
 (2)

式中: $p$  为爆压; $V$  为爆轰产物的相对体积; $E$  为初始比内能; $A_1$ 、 $B_1$ 、 $R_1$ 、 $R_2$  和  $\omega$  为材料常数,其具体参数取值如表 1 所示。表 1 中, $\rho_0$  为 TNT 密度; $D$  为炸药的爆速; $p_{c-j}$  为爆压<sup>[14]</sup>。

3)304 不锈钢。304 不锈钢的状态方程采用形式简单、适用广泛的 Linear 方程,表达式为

$$p=k(\frac{\rho}{\rho_0}-1)。$$
 (3)

式中: $p$  为压力; $k$  是体积模量; $\rho$  为材料的即时密度; $\rho_0$  则表示材料的原始密度<sup>[14]</sup>。

强度模型则选择适用于描述爆炸过程大变形、高应变的 Johnson-Cook 本构模型,具体表达式为

表 1 炸药 TNT 的材料方程参数

Tab. 1 Material equation parameters of TNT

$\rho_0/$ ( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ )	$A_1/$ GPa	$B_1/$ GPa	$R_1$	$R_2$	$\omega$	$E/$ ( $\text{J}\cdot\text{m}^{-3}$ )	$D/$ ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )	$p_{c-j}/$ GPa
1.63	373.77	3.75	4.15	0.90	0.35	$6.0\times10^9$	6 930	21

表 2 304 不锈钢材料方程参数

Tab. 2 Material equation parameters of 304 stainless steel

$\rho_0/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	$k/\text{GPa}$	$A/\text{MPa}$	$B/\text{MPa}$	$C$	$n$	$m$	$T_m/\text{K}$	泊松比	侵蚀应变
7.90	166.833	454	1 962	0.173 2	0.752	0.699	1 763	0.3	0.15

$$\sigma_y=(A+B\varepsilon_p^n)(1+C\ln\varepsilon_p^*)(1-T_H^m)。$$
 (4)

式中: $\sigma_y$  为材料的等效应力; $\varepsilon_p$ 、 $\varepsilon_p^*$  分别为材料的等效塑性应变和塑性应变率;常数  $A$  表示低应变时的基础屈服强度; $B$  为硬化常数; $n$  为硬化指数; $C$  是材料应变率强化系数; $m$  为材料温度软化系数; $T_H$  为实验温度。 $T_H$  的值由式(5)确定:

$$T_H=\frac{T-T_r}{T_m-T_r}。$$
 (5)

式中: $T_r$  为室温; $T_m$  为材料的熔点。式(5)中相关参数取值如表 2 所示<sup>[17]</sup>。

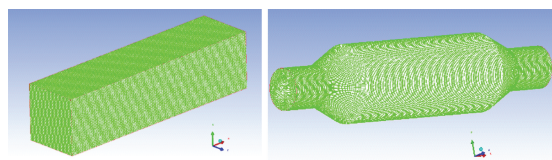
2.2 数值计算模型

空气模型采用 Euler,3D-Multi-Material 算法;炸药模型采用欧拉算法;壳体结构选用 Shell 壳算法。空气域为 2 000 mm×500 mm×500 mm 长方体结构,将壳体和炸药包覆其中,炸药在壳内中心起爆,边界条件设置为 Flow-out(无限域、无反射边界条件)来模拟无限空气域。空气域采用六面体结构化网格,尺寸为 5 mm;壳体则采用非结构化的面网格划分,控制在全局 2 mm;网格划分如图 4 所示。为了定性和定量分析在内爆炸载荷下壳体壁面的受压变形情况,等间距地在壳体外表面设置了一系列高斯测量点,如图 5 所示;其中,点 1、点 17、点 18 沿爆心环面布置,点 16 为封头中心。

3 数值模拟结果分析与讨论

内爆炸下冲击波会遭受壁面的多次反射叠加,作用规律异常复杂,尤其对于高压电缆中间接头防爆壳此类变截面体结构。模拟试验结果表明,壳厚 3 mm、TNT 装药量 400 g 情况下最能全面准确地描述全密闭时该防爆壳的内爆炸动力响应的整个过程,具有代表性,故下文以此组合为研究对象进行定性、定量分析。





(a) 空气网格      (b) 壳体网格  
图 4 模型网格划分

Fig. 4 Meshing of the model

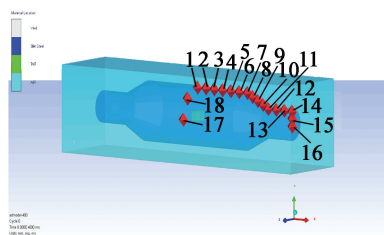


图 5 高斯测量点位置分布  
Fig. 5 Position distribution of Gauss measurement points

3.1 典型时刻的壳体变形和应力分布

图 6 对应的是壳体在典型时刻的变形破裂和壁面的应力分布变化情况。可以看出,由于爆心环面最先受到爆炸载荷的正面冲击,其附近壳体应力不断增大,在  $t=0.2\text{ ms}$  左右开始出现明显的凸起,随着冲击波不断地反射叠加作用于壁面,应力进一步集中,凸起程度逐渐增大;受到壳体壁面的约束,冲击波在被环向壁面反射的同时逐渐向两端靠近,此阶段壳体表面应力开始向两端传播。在变截面体部分的收缩作用下,爆炸能量得到汇聚并向封头处传播,约在  $0.3\text{ ms}$  封头处开始鼓起,并很快在两面连接处达到拉伸强度极限,发生撕裂。此阶段,封头附近应力不断集中增长,并达到历史最大值(约  $680\text{ MPa}$ ),如图 6(d)~图 6(e) 所示。在  $0.4\text{ ms}$  时,封头与壳体已完全分离,并在冲击波作用下进一步向前加速运动,此时壳体两端口已完全开放,冲击波在由端部小断面内向壳外无限大断面冲出时,壳体两

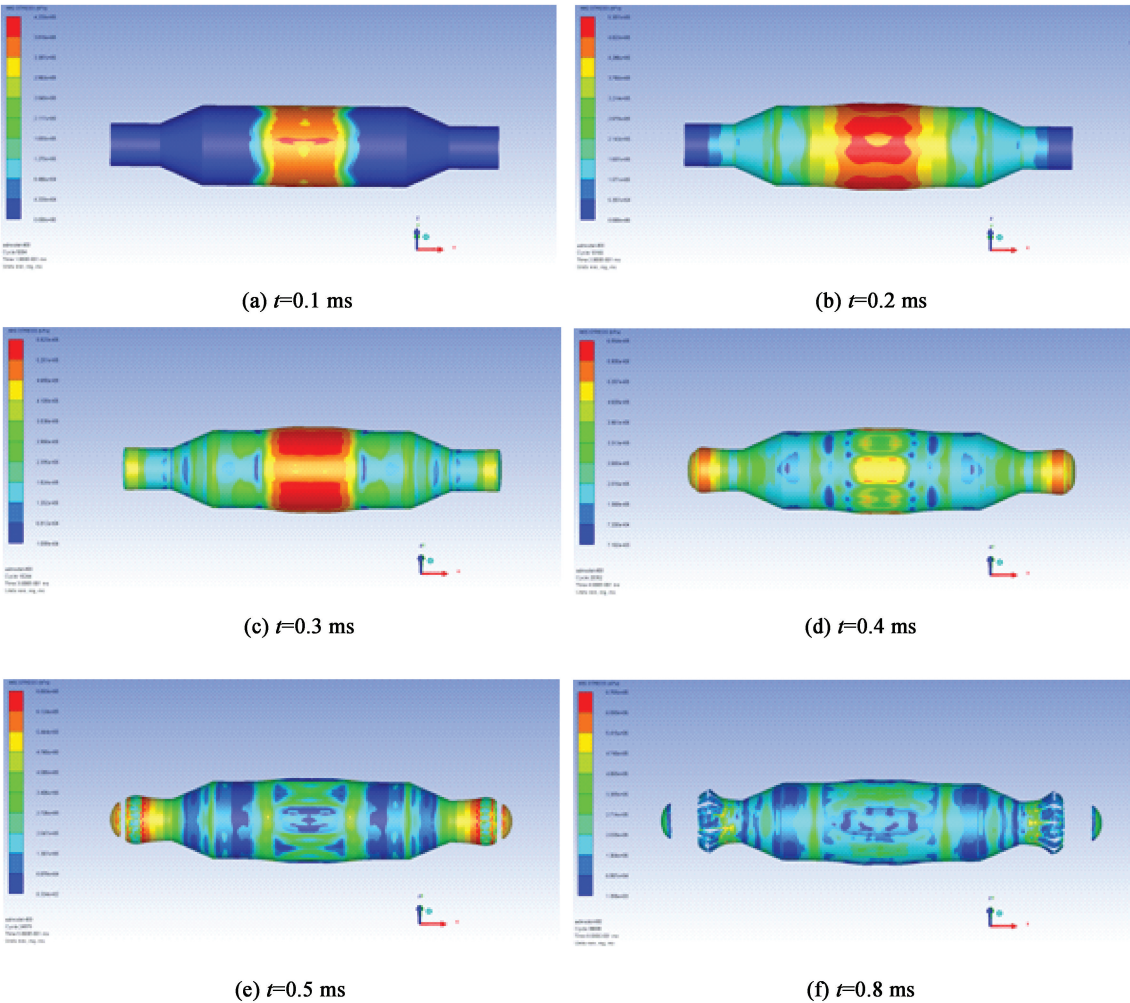


图 6 壳体壁面变形和应力分布变化过程  
Fig. 6 Changes of deformation and stress distribution on the shell wall

端口附近会因扩张作用发生变形破裂,如图 6(f) 所示。而在爆炸能量向两端口释放的同时,壳体弹塑性卸载,表面应力慢慢趋于均匀,壳体变形也在不断振荡过程中逐渐趋于一稳定值。

3.2 壳体动力响应参数的定量分析

高压电缆中间接头防爆壳是变截面体结构,为了更清楚地了解内爆炸下壳体壁面每一处的变形情况,考虑该壳体为中心对称结构,提取图 5 中 1~18 号高斯点的历史数据,得到距爆心环面不同水平距离处壳体外壁上位移、速度、应变、应力的峰值分布,如图 7~图 8 所示,其中,距离 0 cm 为爆心环面,距离 82.5 cm 处为封头中心。由图 6 可得,端部与封头连接处很早即发生了断裂,故不再考虑这一处的参数变化。

下降,最大应变从 11% 降到了几乎为 0,最大应力从 600 MPa 降至不到 350 MPa。在距离 36.25~61.5 cm 的变截面体部分,壳体各特征量变化幅度不大,最大位移保持在 1.5~2.0 mm 左右,最大速度在 10~15 m/s 左右,而壳体的最大应变和最大应力在主体和变截面体连接处有一定的上升,说明此处有应力集中现象。最后,在距离 61.5~82.5 cm 的壳体端部及封头中心,各特征量均表现为大幅度的上升,越靠近封头处,数值越大,并在封头中心位置各特征量数值达到了历史峰值。通过以上对壳体各动力学参数在不同部位分布情况的分析可以得到,壳体爆心环面、端部及封头中心为最易受爆炸破坏发生变形、破裂的部位,应重点加以防护。

图 9~图 10 重点示出了壳体在爆心环面、端部及封头中心的速度和应变时程曲线,旨在更充分地了解其受压变形的变化过程。图 9 中可看到,壳外壁速度上升时间:端部>封头中心>爆心环面,这是因为封头及环面处均受到了冲击波的正面冲击,动力响应时间较短;最大速度:封头中心>爆心环面>端部,是因为压力在封头处汇聚增强,环面受到冲击波的正面作用及反射,而端部主要受到封头处反射

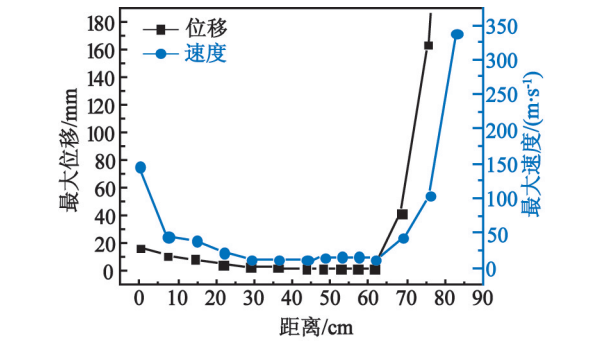


图 7 不同距离处的最大位移和速度

Fig. 7 The maximum displacement and velocity at different distances

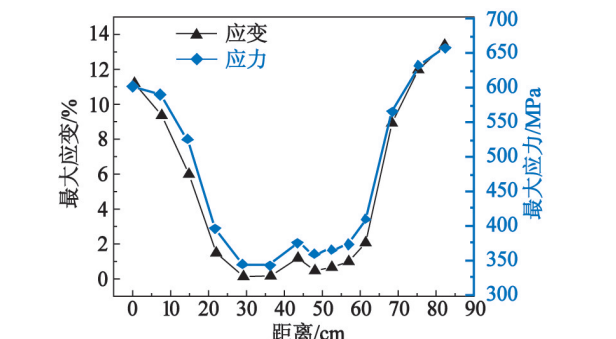


图 8 不同距离处的最大应变和应力

Fig. 8 The maximum strain and stress at different distances

从图 7~图 8 可以看出,在距离 0~36.25 cm 的防爆壳主体部分,随着离爆心环面水平距离的增加,各参数变量值均有不同程度的下降。其中,最大位移从 17 mm 左右缓慢减少到约 2 mm,爆心环面处壳体运动速度较大,达到了 150 m/s 左右,而从距离 7.25 cm 处开始,主体其他部位的最大速度均在 50 m/s 以下缓缓降低;壳体的应变和应力几乎呈直线

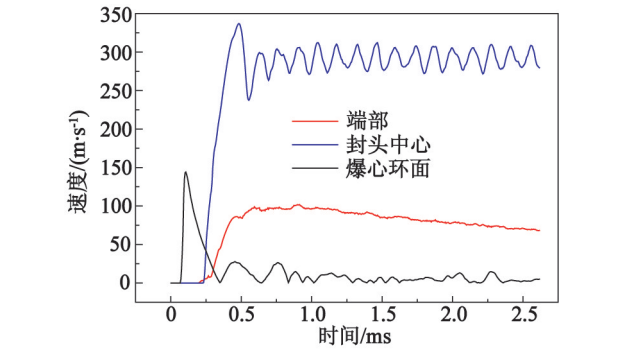


图 9 壳体外壁典型位置的速度时程曲线

Fig. 9 Velocity-time history curve at typical position of the outer wall of the shell

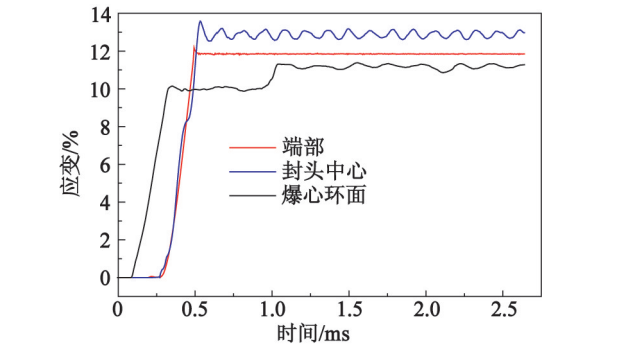


图 10 壳体外壁典型位置的应变时程曲线

Fig. 10 Strain-time history curve at typical position of the outer wall of the shell

压力的作用,相对较弱;爆心环面处速度达到最大的时间约为 0.2 ms,然后便下降为 0,之后在不断振荡中趋于 0,而端部速度在微小波动中缓缓降低,封头处速度则在达到峰值(约 340 m/s),然后在 275 ~ 325 m/s 范围内持续波动,侧面反映了环面处受首次峰值压力影响较大,后续压力作用不明显,封头处因压力汇集集中,且后续冲击波不断推进,受压强度大且作用时间长。图 10 中,峰值及平均应变:封头中心 > 端部 > 爆心环面,说明封头处受压变形最大,端部次之,环面处最小。

### 3.3 参数影响性分析

为了对高压电缆中间接头防爆壳的安全设计提供一定的参考,以壳体在最脆弱部位爆心环面、封头中心这两处的最大位移和速度为衡量标准,考察在中心装药下能量等级、壳体厚度对壳体变形的影响。

#### 3.3.1 能量等级对壳体变形的影响

在保持壳体厚度 3 mm 不变的情况下,图 11 给出了 TNT 药量由 100 g 增加到 500 g 时爆心环面的最大位移和封头中心处的最大速度的变化情况。可看出,随着药量的增加,壳体在这两处的变形曲线呈现出一定的一致性,均表现为近似直线型增长。其中,爆心环面的最大位移由 3.58 mm 增加到 26.13 mm,封头中心处的最大速度由 110 m/s 增加到了 400 m/s,说明爆炸能量对壳体变形破坏有着直接显著的影响。

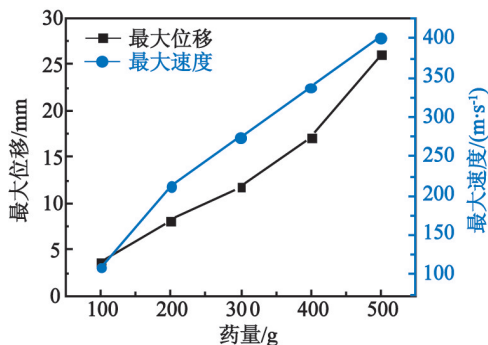


图 11 不同药量下壳体爆心环面处的最大位移和封头中心处的最大速度

Fig. 11 The maximum displacement of the explosion center torus and the maximum velocity of the head center with different charges

#### 3.3.2 壳体厚度对变形的影响

如图 12 所示,保持装药量 400 g 不变,研究壳体在不同厚度下的变形情况。可以看出,壳体厚度由 3 mm 增加到 11 mm 的过程中,爆心环面处的最大位移由 17.16 mm 下降到 3.16 mm,减少了 81.6%,封头中心处的最大速度由 337.83 m/s 下降

到 96.82 m/s,减少了 71.34%。且随着厚度的增加,曲线下降慢慢变缓,意味着壳体在这两处的变形程度逐渐减弱,说明壳体厚度增加到一定量时,对壳体变形的影响不再显著。

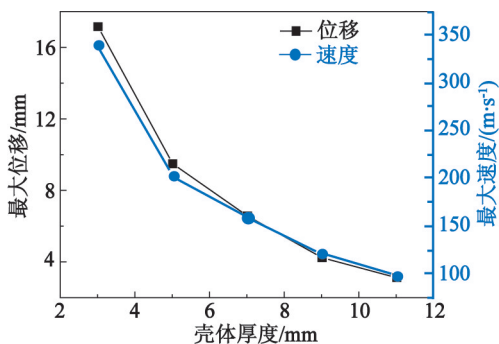


图 12 不同厚度下壳体爆心环面处的最大位移和封头中心处的最大速度

Fig. 12 The maximum displacement of the explosion center torus and the maximum velocity of the head center with different shell thickness

## 4 结论

笔者在验证 AUTODYN 计算有效性的基础上,建立了基体材料为 304 不锈钢的高压电缆中间接头防爆壳的几何模型,以炸药 TNT 模拟电缆中间接头的爆炸,对爆炸后壳体的动力响应过程进行了定性、定量分析,可以得到:

1) 在壳体的主体部分,随着距爆心环面距离的增加,壳外壁动力响应参数(位移、速度、应变、应力)逐渐下降;到了变截面体部分,由于能量的汇聚,参数值又开始慢慢回升;进入端部,则大幅度上升并在封头中心处达到最大。

2) 爆心环面、端部和封头中心是防爆壳最薄弱的部位,而封头处因变截面体结构对爆炸冲击波的汇聚作用,受压高且作用时间长,变形破裂最为严重,并会在很短的时间内最先与端部在两面连接处分离。

3) 壳体变形与爆炸能量近似呈线性正相关,而随着壳体厚度的增加逐渐变小,且当厚度增加到 5 mm 以后,其对壳体变形的影响不再明显。

4) 为达到良好的防爆效果和更久的使用寿命,防爆壳在材料上应选择类似 304 不锈钢这种强度较高且韧性、耐腐蚀性好的合金;壳体厚度以 5 mm 左右为宜,在爆心环面、端部和封头中心处应加厚处理,封头与端部连接处应焊接加强筋/肋;整体径向直径应尽可能加长,变截面体与轴向的夹角应尽量



减小以削弱冲击波的汇聚,且避免刚好在封头处集中;相比平板结构,椭球形封头是曲面反射,反射波速度和强度均次于平面反射而受力状态更优,是更好的选择。

参 考 文 献

[1] 曹淘铖. 高压超高压电力电缆技术的应用[J]. 科技资讯,2016,14(36):50-51.

[2] 张承信,李强,韩夏清. 一种新型电缆防火防爆盒的研制[J]. 华东电力,2013,41(7):1526-1528.

ZHANG C X,LI Q,HAN X Q. Development of a new type of cable fire and explosion prevention box[J]. East China Electric Power,2013,41(7): 1526-1528.

[3] 唐炬,龚宁涛,李伟,等. 高压交联聚乙烯电缆附件局部放电特性分析[J]. 重庆大学学报(自然科学版),2009,32(5):528-534.

TANG J, GONG N T, LI W, et al. Characteristic analysis of partial discharge in high-voltage XLPE cable accessories [J]. Journal of Chongqing University ( Natural Science Edition ), 2009,32(5): 528-534.

[4] 刘庆明,汪建平,李磊,等. 电火花放电能量及其损耗的计算[J]. 高电压技术,2014,40(4):1255-1260.

LIU Q M, WANG J P, LI L, et al. Calculation of electric spark discharge energy and its energy loss [J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(4): 1255-1260.

[5] ZAPATA B J,WEGGEL D C. Collapse study of an unreinforced masonry bearing wall building subjected to internal blast loading[J]. Journal of Performance of Constructed Facilities, 2008,22(2): 92-100.

[6] BAKER W E. 爆炸危险性及其评估[M]. 张国顺,文以民,刘宝吉,译. 北京:群众出版社,1988.

[7] DUFFEY T, KRIEG R. The effects of strain-hardening and strain-rate sensitivity on the transient response of elastic-plastic rings and cylinders[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 1969,11(10):825-844.

[8] SYRUNIN M A, FEDORENKO A G, IVANOV A G. Dynamic strength of cylindrical fiberglass shells under multiple explosive loading [J]. Combustion, Explosion & Shock Waves, 1997,33(6):713-717.

[9] HU Y,WU C,LUKASZEWICZ M, et al. Characteristics

of confined blast loading in unvented structures[J]. International Journal of Protective Structure, 2011,2(1): 21-43.

[10] WU C, LUKASZEWICZ M, SCHEBELLA K, et al. Experimental and numerical investigation of confined explosion in a blast chamber[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries,2013,26(4): 737-750.

[11] 柏小娜,李向东,杨亚东. 封闭空间内爆炸冲击波超压计算模型及分布特性研究[J]. 爆破器材,2015,44(3):22-26.

BAI X N,LI X D, YANG Y D. Calculation model and the distribution of wave pressure under internal explosion in closed space[J]. Explosive Materials, 2015,44(3): 22-26.

[12] RUSHTON N,SCHLEYER G K, CLAYTON A M, et al. Internal explosive loading of steel pipes[J]. Thin-Walled Structures,2008,46(7/8/9):870-877.

[13] LANGDON G S, OZINSKY A ,YUEN S C K. The response of partially confined right circular stainless steel cylinders to internal air-blast loading[J]. International Journal of Impact Engineering, 2014,73(2):1-14.

[14] 石少卿,汪敏,孙波,等. AUTODYN 工程动力学分析及应用实例[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2011.

[15] 秦学军,张德志,杨军,等. 内部爆炸作用下钢筒变形过程的电探针测量技术[J]. 爆炸与冲击,2014,34(1):115-119.

QIN X J, ZHANG D Z, YANG J,et al. Electric probe measurement technique on deformation process of cylindrical steel shell under inside-explosion loading[J]. Explosion and Shock Waves, 2014,34(1):115-119.

[16] 秦学军,张德志,杨军,等. 内部爆炸作用下钢筒塑性变形研究[J]. 兵工学报,2014(增2): 135-138.

QIN X J, ZHANG D Z, YANG J,et al. Research on plastic deformation of cylindrical steel shells under internal explosion loading [J]. Acta Armamentarii, 2014 (Supple. 2):135-138.

[17] 李星星. 304 不锈钢本构模型参数识别研究[D]. 武汉:华中科技大学,2012.

LI X X. Research on the constitutive model parameters identification of 304 stainless steel[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology,2012.

声 明

1、本刊对发表的文章拥有出版电子版、网络版版权,并拥有与其他网站交换信息的权利。本刊支付的稿酬已包含以上费用。

2、本刊文章版权所有,未经书面许可,不得以任何形式转载。

《爆破器材》编辑部