

某含炸药组合件防火隔热结构设计

史光梅, 李明海, 向延华, 刘剑钊

(中国工程物理研究院总体工程研究所, 绵阳 621900)

摘要: **目的** 针对某含炸药组合件遭遇意外火灾事故时发生爆炸的问题, 提出在药柱端加装防火隔热结构, 以便延缓炸药温升, 避免炸药发生爆炸反应。**方法** 采用有限元热分析方法, 建立包含炸药热分解反应的数学模型, 通过分析该组合件在火灾环境下热量传递的关键环节及响应规律, 基于经济性、轻便性、可操作性等原则, 采取针对性热控措施, 在药柱端设计三层夹心防火隔热结构, 并将内层钢壳壁面进行磨光处理, 以降低表面热辐射率, 同时, 取消对接法兰间螺栓连接方式, 以避免热“短路”。**结论** 数值分析和试验研究结果均表明, 该结构有效延缓了组合件内炸药的温升, 可避免其在意外火灾事故环境下的热爆炸反应, 有助于提升组合件的储运安全性。

关键词: 防火隔热; 结构设计; 含炸药组合件

中图分类号: TU352.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2016)17-0129-05

Design of Fireproof Thermal Insulation on Explosive-containing Assembly

SHI Guang-mei, LI Ming-hai, XIANG Yan-hua, LIU Jian-zhao

(China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China)

ABSTRACT: The work aims to put forward a fireproof thermal insulation structure to be fixed on the grain end against the blast of explosive-containing assembly in an accidental fire in order to lower the explosive part's temperature rise and avoid explosive blast. The mathematical model involving explosive thermal decomposition reaction was established by finite element thermal analysis. The crucial process in the course of heat transfer and general laws of thermal responses of the assembly in fire accident were analyzed. In view of the economical, portable and operable design principle, a lot of very pertinent thermal control measures were adopted to design a three-layer fireproof thermal insulation on the grain end. The inlayer steel shell surface was polished so as to reduce surface thermal radiation. Meanwhile bolted connection among butt flanges was canceled to avoid thermal short circuit. In conclusion, the numerical analysis and experimental results show that the structure can effectively delay the explosive part's temperature rise, prevent explosive reaction in accidental fire and help improve the safety of the containing explosive assembly.

KEY WORDS: fireproof thermal insulation; structural design; explosive-containing assembly

从热力学观点看, 一般炸药是一种相对不稳定体系, 常温下其内部存在着缓慢的化学反应, 环境不同则以不同的形式进行化学反应。炸药在生产、加工、使用、运输和贮存等过程中会受到各种环境条件的热作用, 导致其发生热分解、燃

烧, 甚至出现爆炸或爆轰等强烈的反应形式, 以致造成重大恶性安全事故^[1-2]。通常, 炸药燃烧的传播速度较慢, 一般为每秒几米, 是通过热传导、热辐射及燃烧气体产物把能量传播扩散到尚未燃烧的炸药部分; 爆炸或爆轰的传播速度则快

收稿日期: 2016-02-10

作者简介: 史光梅 (1974—), 女, 新疆奇台人, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为火烧试验及数值模拟、武器热安全性。

得多,一般为每秒几千米,是靠冲击波对炸药的强烈冲击压缩而传播的。爆炸会对人们的生活环境形成破坏,甚至引发巨大灾害^[3]。

为避免在储存、运输过程中遭遇意外火灾事故时造成安全事故,须考虑对炸药件进行防隔热设计,以延缓炸药温升,避免炸药发生爆炸反应。目前,针对隔热设计,研究应用较多的有隔热涂料^[4-7]和轻质保温隔热材料^[8-12]等。文中采用有限元热分析方法,建立包含炸药热分解反应的数学模型,分析某含炸药组合件在火灾环境下热量传递的关键环节及响应规律,以避免炸药发生爆炸反应为设计原则,基于经济性、轻便性、可操作性等方面考虑,采取针对性热控措施,在药柱端设计三层夹心防火隔热结构。数值分析和实验研究结果均表明,该结构有效延缓了组合件内炸药的温升,可避免其在意外火灾事故环境下的热爆炸反应。

1 计算模型和边界条件

某含炸药组合件见图1,由两部分组成,一部分为炸药柱A(热点火温度约为270℃)和钢制外壳;另一部分由燃点为600℃的材料B和钢制外壳。该组合件的火烧试验研究结果表明,火烧开始约2min后,炸药就迅速升温,并发生爆炸反应,致使组合件破损及外壳体飞散,危及周边物体甚至人员安全。

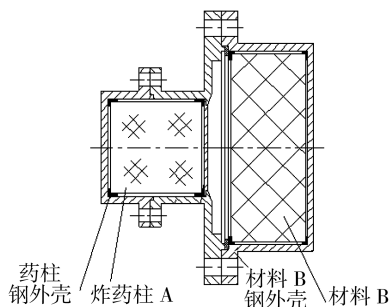


图1 含炸药组合件

Fig.1 Explosive-containing assembly

由于火灾环境中,高温火焰直接作用于组合件的炸药柱外壳,使得炸药迅速升温达到热点火温度,进而引发热爆炸反应,故初步考虑在药柱端设计安装防火隔热结构(见图2),以期通过增大炸药柱外壳和外界火焰场之间的热阻,起到隔热作用,抑制炸药柱的温升,防止炸药发生爆炸反应。

采用Ansys程序建立包括防火隔热结构的组合件有限元热分析计算模型,考虑到组合件的几何

对称性和传热对称性,将研究对象简化为二维轴对称问题。

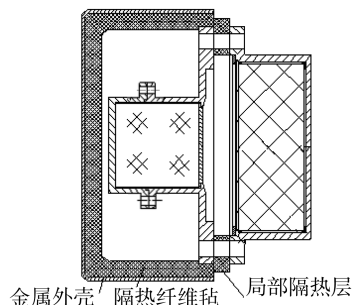


图2 初始设计双层防火隔热结构

Fig.2 Initial design of the two-layer fireproof thermal insulation

在火焰高温作用下,组合件炸药柱会因温升而发生热分解反应。炸药的热分解反应可用Arrhenius方程来表述,文中假定炸药柱A的反应速率常数服从Arrhenius零级反应^[13],且在所研究的温度区间,其反应热、活化能、指前因子等热化学性质参数均为常数,不随温度发生变化,则该放热化学反应的能量守恒微分方程^[14]可表述为:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \nabla^2 T + \rho Q Z e^{\frac{-E}{RT}}$$

式中: T 为绝对温度(K); ρ 为材料密度(kg/m^3); c 为材料比热(kJ/kg); λ 为材料导热系数($\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$); Q 为炸药反应热,文中取 $Q=1.03 \times 10^7 \text{ J}/\text{kg}$; Z 为指前因子,文中计算时取 $Z=6.5 \times 10^{26}/\text{s}$; E 为活化能,文中计算时取 $E=3.02 \times 10^5 \text{ J}/\text{mol}$ ^[15]; R 为普适气体常数,取 $R=8.3143 \text{ J}/(\text{mol}\cdot\text{K})$ 。

假设火灾状态下组合件被火焰完全包敷,将燃烧气体视为灰体对待,忽略火焰的散射作用,假定火焰温度场均匀分布,火焰温升曲线:

$$\theta = 933.27 - \frac{933.27 - \theta_0}{1 + e^{\frac{(t-36.465)}{4.4254}}}$$

式中: t 为时间(s); θ_0 为初始温度,文中计算取23.9℃; θ 为温度(℃)。

组合件被火烧过程中,其外表面与周围环境高温气流之间存在着对流换热和辐射换热。组合件周围的高温火焰气流具有很强的随机性,对流换热情况较为复杂。目前尚无准确的理论关联式对其进行求解,文中计算时按气体强制对流情况作简化考虑,组合件与周围环境间平均对流换热系数为定值,取 $90 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{℃})$ 。

高温条件下,组合件外表面与环境高温气流之间还存在着强烈的相互热辐射。在Ansys程序中可

把环境温度视为辐射源的温度,把组合件外表面温度视为需求解的未知温度,从而应用表面效应单元模拟点对面的辐射,故周围环境温度即火焰温度为辐射源的温度。由于实际火灾过程中会产生大量炭黑覆盖在组合件外表面,使其外表面黑度增大,故文中计算时取组合件外表面黑度为 0.96。

组合件内部较大的空腔内还存在辐射换热和对流换热。在计算过程中采用辐射矩阵模拟面与面间的辐射,采用表面效应单元模拟空腔内的自然对流换热。

2 防火隔热结构初始设计及数值分析结果

初始设计的防火隔热结构采用双层结构,外层采用厚度为 2 mm 的钢壳,可起到支撑防火作用;内层基于隔热、耐火、轻质和经济性等综合考虑,选择厚度为 5 mm 的普通硅酸铝耐火纤维毡;考虑在炸药柱 A 与材料 B 间加装厚度为 5 mm 的普通硅酸铝耐火纤维毡作为隔热层。

带双层防火隔热结构的组合件达到炸药热点火温度时的热响应计算结果见图 3。可以看出,炸药柱 A 温升最快,最早达到热点火温度的位置处于靠近材料 B 方向和药柱外壳相连接的位置,即组合件连接螺栓成为热“短路”部位。说明在组合件防火隔热结构设计中,对接法兰间不适宜采用螺栓连接。

从图 3 还可以看出,在火烧环境中,防火隔热结构的内壁面温度较高,此时辐射换热方式占较大比重,有必要采取措施降低壁面辐射率,以便削弱防火隔热结构与药柱外壳间的辐射换热量。考虑到普通硅酸铝耐火纤维毡较软,如何将其固定安装在防火隔热结构钢层内壁,在实际工程应用中难以操作,因此初始设计的双层防火隔热结构有待改进。

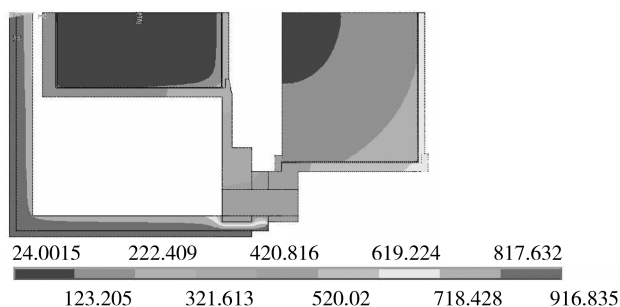


图 3 带双层防火隔热结构组合件热分析云图

Fig.3 The temperature contours of the assembly with two-layer fireproof thermal insulation

3 防火隔热结构改进设计及试验验证

根据前述带双层防火隔热结构组合件热响应计算结果分析,在原设计模型基础上采取以下改进措施。

1) 取消对接法兰间的连接螺栓,将防火隔热结构外壳延伸至与材料 B 外壳相接。

2) 将该防火隔热结构设计为三层夹心结构,即隔热结构内、外层均采用厚度 2 mm 的钢壳,在中间填充普通硅酸铝耐火纤维毡或陶瓷纤维等隔热材料。

3) 将内层钢壳壁面进行磨光处理,以降低表面热辐射率。

改进设计后的带三层防火隔热结构组合件达到材料 B 燃点时刻的热分析计算结果见图 4。可以看出,材料 B 达到燃点发生燃烧时,药柱表面最高温度尚未达到点火温度。在药柱端设计三层夹心防火隔热结构后,该组合件在遭遇意外火灾时材料 B 将被首先点燃发生燃烧,随后通过热传导、热辐射及燃烧气体产物把能量逐步传播扩散到尚未燃烧的炸药部分,继而引燃炸药发生燃烧反应,避免了炸药发生爆炸反应的安全事故。

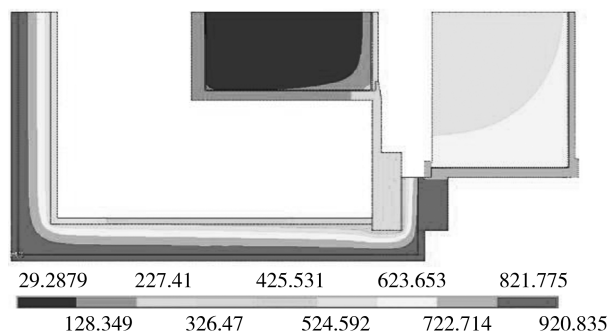


图 4 带三层防火隔热结构组合件热分析云图

Fig.4 The temperature contours of the assembly with three-layer fireproof thermal insulation

根据改进后的三层夹心防火隔热结构分析模型设计的实验装置见图 5。三层夹心防火隔热结构由内外金属壳及陶瓷纤维填充层组成,并对内层钢壳壁面进行磨光处理。组合件对接法兰间取消螺栓连接,填加局部隔热垫后压装在一起。防火隔热结构的外金属壳延伸至局部包覆材料 B 的外壳,并采用销钉固结。

针对该三层防火隔热结构组合件实验装置开展了 2 轮油池火烧试验研究。结果均表明,在火烧开始约 10 min 后,实验装置开始燃烧,整个试验

过程中组合件实验装置仅发生燃烧反应,试验结果与数值模拟计算结果符合较好。

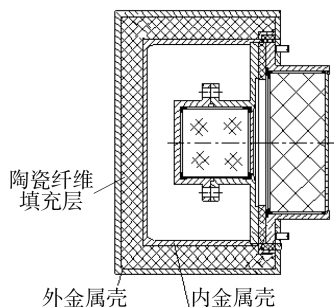


图5 三层防火隔热结构组合件实验装置
Fig.5 The experimental device of the assembly with three-layer fireproof thermal insulation

4 结语

针对某含炸药组合件遭遇意外火灾事故时发生爆炸的问题,通过数值分析和试验研究,在药柱端设计防火隔热结构,以延缓炸药温升,避免了其在意外火灾事故环境下的热爆炸反应。采用有限元热分析方法,建立了包含炸药热分解反应的数学模型,通过数值分析手段明确了火灾环境下组合件热量传递的关键环节及响应规律。基于经济性、轻便性、可操作性等多方面考虑,将初始双层防火隔热结构设计模型改进为三层夹心防火隔热结构,并将隔热结构内层钢壳壁面进行磨光处理以降低表面辐射率,削弱壳体间的辐射换热效应,取消对接法兰间螺栓连接方式,以避免热“短路”。

根据改进后的三层夹心防火隔热结构分析模型设计了实验装置,并开展了油池火烧试验研究。结果表明,整个试验过程中组合件实验装置仅发生燃烧反应,炸药未发生热爆炸,与数值模拟计算结果符合较好。数值分析及试验研究结果均表明,文中设计的三层夹心防火隔热结构能有效延缓组合件内炸药温升,可避免其在意外火灾事故环境下的热爆炸反应,有助于提升组合件的储运安全性。

参考文献:

- [1] 刘治兵,段赞,吴洁红.民爆物品生产安全事故成因及动力学演化模型[J].煤矿爆破,2010(4):5—9.
LIU Zhi-bing, DUAN Yun, WU Jie-hong. Study on Causation Model of Civil Explosives Safety Accident and Its Dynamic Evolution[J]. Coal Mine Blasting, 2010(4): 5—9.
- [2] 惠君明,解立峰.硝铵炸药生产中恶性事故的防范[J].爆破器材,1995,24(5):35—37.
HUI Jun-ming, XIE Li-feng. Protection of Serious Accident on Industrial Production of an Explosives[J]. Explosive Materials, 1995, 24(5): 35—37.
- [3] 宁建国,王成,马天宝.爆炸与冲击动力学[M].北京:国防工业出版社,2010.
NING Jian-guo, WANG Cheng, MA Tian-bao. Explosion and Shock Dynamics[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2010.
- [4] 王玲玲,李国强,董毓利.大空间火下膨胀型防火涂层隔热性能试验研究[J].四川大学学报(工程科学版),2015,47(5):60—66.
WANG Ling-ling, LI Guo-qiang, DONG Yu-li. Experimental Study on Fire Protection Performance of Intumescent Coating under Large Space Fires[J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2015, 47(5): 60—66.
- [5] 王雅丽,李会宁,曹德榕,等.常用涂料隔热效果的研究[J].现代涂料与涂装,2015,18(3):25—27.
WANG Ya-li, LI Hui-ning, CAO De-rong, et al. Study of Thermal Insulating Effect of Conventional Paints[J]. Modern Paint & Finishing, 2015, 18(3): 25—27.
- [6] 刘劲阳,陈景华.巧克力包装隔热性能改进方案[J].包装工程,2014,35(19):18—24.
LIU Jing-yang, CHEN Jing-hua. Improvement Scheme of Heat Insulation Properties of Chocolate Packaging[J]. Packaging Engineering, 2014, 35(19): 18—24.
- [7] 林浩,冯坚,冯军宗,等.非烧蚀防隔热材料表面热防护涂层的研究进展[J].材料导报,2015,29(11):29—35.
LIN Hao, FENG Jian, FENG Jun-zong, et al. Development of Thermal Protection Coatings for Non-ablative Thermal Protection Materials[J]. Materials Review, 2015, 29(11): 29—35.
- [8] 石小靖,张瑞芳,何松,等.玻璃纤维增韧SiO₂气凝胶复合材料的制备及隔热性能[J].硅酸盐学报,2016,44(1):129—135.
SHI Xiao-jing, ZHANG Rui-fang, HE Song, et al. Synthesis and Heat Insulation Performance of Glass Fiber Reinforced SiO₂ Aerogel Composites[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2016, 44(1): 129—135.
- [9] 段志强,易建政,滕利才.伪装隔热封套材料研究[J].包装工程,2012,33(5):59—61.
DUAN Zhi-qiang, YI Jian-zheng, TENG Li-cai. Study of Camouflage and Heat-shielding Envelop Material

- [J]. Packaging Engineering, 2012, 33(5): 59—61.
- [10] 刘瑞祥, 杨杰, 隋学叶, 等. 耐 1500 °C 超高温轻质高效隔热材料的制备及性能的初步表征[J]. 现代技术陶瓷, 2014(5): 17—20.
- LIU Rui-xiang, YANG Jie, SUI Xue-ye, et al. Preliminary Characterization and Preparation of Resistance to 1500 °C High Temperature Lightweight Efficient Thermal Insulation Material[J]. Advanced Ceramics, 2014(5): 17—20.
- [11] 廖佳, 李远兵, 段斌文, 等. SiO₂ 微粉加入量对高纯氧化铝轻质隔热材料性能的影响[J]. 耐火材料, 2015, 49(1): 17—19.
- LIAO Jia, LI Yuan-bing, DUAN Bin-wen, et al. Influences of SiO₂ Micropowder Additions on Properties of High Purity Al₂O₃ Light-weight Insulation Materials [J]. Refractories, 2015, 49(1): 17—19.
- [12] 杨杰, 隋学叶, 刘瑞祥, 等. 航天飞机及高超飞行器用刚性隔热材料研究进展[J]. 现代技术陶瓷, 2015 (3): 25—29.
- YANG Jie, SUI Xue-ye, LIU Rui-xiang. The Research Development of Rigid Insulation Materials for the Space Shuttle and Hypersonic Aircraft[J]. Advanced Ceramics, 2015(3): 25—29.
- [13] 金韶华, 松全才. 炸药理论[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2010.
- JIN Shao-hua, SONG Quan-cai. Explosive Theory[M]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University Press, 2010.
- [14] 杨世铭, 陶文铨. 传热学(第 3 版)[M]. 北京: 高等教育出版社, 1998.
- YANG Shi-ming, TAO Wen-quan. Heat Transfer[M]. Beijing: Higher Education Press, 1998.
- [15] 李明海. 火灾环境下抗事故包装结构热-力耦合响应的数值模拟[R]. GF-A-0090584, 2008.
- LI Ming-hai. Numerical Simulation of Accident-resistant Packaging Structure's Thermal-mechanical Coupling Response In Fire Conditions[R]. GF-A-0090584, 2008.