

文章编号:1006-9941(2023)03-0306-10

隔热胶体装药结构的耐热防护与爆炸性能

王飞¹,马宏昊²,沈兆武²

(1. 安徽理工大学 深部煤矿采动响应与灾害防控国家重点实验室, 安徽 淮南 232001; 2. 中国科学技术大学 中国科学院材料力学行为和 Design 重点实验室, 安徽 合肥 230027)

摘要: 为了研究高温环境下胶体装药结构的安全防护问题及其爆炸特性变化,设计了由隔热外层、吸热胶体、乳化炸药组成的装药结构,采用物性测定、测温分析、爆炸测试技术(水下爆炸,爆速实验,胶体介质近场爆压测量)及现场实验(殉爆实验,炮孔传爆),分别研究了装药结构中3种胶体配比(高分子吸水树脂(SAP)质量比分别为0,0.5%和1%)与乳化炸药2种敏化方式(亚硝酸钠敏化、膨胀珍珠岩敏化)对隔热特性和爆炸性能的影响。结果表明:含0.5% SAP的胶体材料适用于装药结构,具有阻燃性、高比热容、低导热系数特性,隔热防护时间延长至55 min。水下爆炸与爆速实验中,随着水浴加热(100 ℃)时间的增加,2种敏化方式药包的各项爆轰参数(冲击波压力峰值、比冲量、爆速、爆炸总能量)均持续降低。受到乳化炸药破乳与敏化热点减少的双重影响,亚硝酸钠敏化型药包(EE-SN)的爆轰性能衰减比例高于膨胀珍珠岩敏化型药包(EE-EP)。加热2 h后,膨胀珍珠岩、亚硝酸钠敏化的药包爆炸总能量损失分别为4.76%,17.62%。在胶体介质近场爆压测量中,装药结构中胶体层会减弱爆炸冲击波强度。但现场实验爆破效果良好,且实现了装药结构30 mm殉爆、炮孔内稳定传爆,说明该胶体装药结构具有很好的高温爆破应用前景。

关键词: 高温爆破;胶体材料;隔热装药结构;乳化炸药热安全性;冲击波衰减

中图分类号: TJ55; O38

文献标志码: A

DOI:10.11943/CJEM2022199

0 引言

我国拥有丰富的露天自然煤矿,然而,每年直接燃烧煤炭损失却逾2000万吨,累计燃烧煤炭约42亿吨^[1]。对此,国内外学者对煤田自燃火区开展了大量的研究,包括高温火区时间和空间成因^[2-3]、煤田火区多年强度与位置变化趋势^[4]、中国北部火区的三相泡沫与水雾法灭火计划^[5-6]、遥感技术探测煤田火区的各种特征^[7]、煤矿火灾监测分析方法^[8]、煤矿的高温爆破等。煤矿高温爆破是通过安全爆破施工方法及时开采煤田火区中的高温煤层,避免优质煤炭资源的自燃浪费及气体排放污染。国内对煤矿高

温爆破理论与技术进行了十几年的研究^[9]。在煤矿高温爆破现场施工方面,林谋金^[10]提出了在高温炮孔中人工营造水孔的全孔蓄水装药防护方法;在工业炸药热分解方面,罗宁等^[11-12]研究了乳化剂、添加剂对乳化炸药热分解动力学行为的影响;在高温爆破炸药安全方面,郭子如等^[13-14]研究了不同类型工业炸药的耐热特性及性能衰减规律;在乳胶基质老化方面,张阳^[15]通过高低温循环实验研究了乳胶基质的析晶特性与老化机理,为高温爆破提供了重要参考。目前,煤矿高温爆破面临的技术瓶颈是高温环境下装药结构的安全防护问题与其爆炸特性变化。高温炮孔的持续加热效应及防护装药结构均会对乳化炸药性能及其爆炸破岩产生一定的影响,甚至会造成拒爆或爆炸事故^[16-20]。例如,宁夏石嘴山大峰露天煤矿在高温爆破时曾发生2次重大安全事故,究其原因就在于高温炮孔装填炸药的隔热防护措施失效,装填的乳化炸药发生热分解,热量积累发生爆炸。在装药防护方面,陈寿如、李建彬等^[21-22]设计了炸药防护结构,可应用于高温炉结及凝结物的

收稿日期:2022-08-05;修回日期:2022-09-19

网络出版日期:2023-01-13

基金项目:安徽理工大学校级重点项目(xjzd2020-03),深部煤矿采动响应与灾害防控国家重点实验室自主研究课题(SKLMRD-PC20ZZ07),安徽省高校自然科学研究项目(KJ2021A0461),安徽省自然科学基金资助项目(2108085QA40)

作者简介:王飞(1987-),男,讲师,主要从事高温煤矿爆破及乳化炸药性能相关研究。e-mail:kingfly@mail.ustc.edu.cn

引用本文:王飞,马宏昊,沈兆武.隔热胶体装药结构的耐热防护与爆炸性能[J].含能材料,2023,31(3):306-315.

WANG Fei, MA Hong-hao, SHEN Zhao-wu. Thermal Protection and Explosive Performance of Charge Structure with Thermally Insulating Colloid[J]. Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao), 2023, 31(3):306-315.

拆除爆破;崔晓荣等^[23-24]采用多层隔热材料复合及注水的方式设计了炸药隔热套筒,用于高温炮孔中的装药防护。但是,现有装药防护技术仅仅依靠传统隔热材料(如石棉、陶瓷纤维、海泡石等)本身的低导热率,不能实现较长时间的隔热及控温防护,而对于加热老化后防护装药结构的爆炸破岩性能的研究较少。

传统装药结构采用低导热型材料实现耐热防护,只能单纯通过增加材料厚度来提升隔热效果,防护效果差且会影响炮孔的有效装药量。基于此,本研究提出隔热胶体装药结构^[25],在传统防护结构中增加胶体层,总体结构由隔热外层、吸热胶体层、内层装药组成。依靠胶体材料的高比热容、低导热系数、相变吸热、稳定沸点特性,有效地延长了高温爆破的安全防护时间。通过物性参数测定、温升规律研究、爆炸性能测试及现场爆破实验^[26],研究了加热老化效应及防护结构对内层装药爆炸性能的影响,开展了现场殉爆和工程应用实验,并基于爆破效果分析了隔热胶体装药结构用于高温爆破快速施工的可行性。

1 实验部分

1.1 试剂与仪器

试剂与材料:石棉布、陶瓷纤维、防火隔热膜、消防防火水带等,江苏雅杰密封材料有限公司;高分子吸水树脂(SAP, $D_{50}=40\ \mu\text{m}$),上海凯茵化工有限公司;分散剂(聚丙烯酸盐);蒸馏水;乳化炸药药卷(直径为110 mm),宁夏天长民爆器材有限责任公司;乳化基质,淮南顺泰化工有限责任公司;膨胀珍珠岩(敏化剂),平均粒径为 $150\ \mu\text{m}$,堆积密度为 $0.35\ \text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$;信阳市屹山矿业有限公司;亚硝酸钠,AR级分析纯,上海国药集团;离子探针;电线;PVC管。

实验仪器:恒温水浴锅 HH-2,杭州钦莱实验仪器有限公司;多通道耐高温铠装热电偶传感器,测温范围 $-20\sim 1200\ ^\circ\text{C}$,江苏环亚电热仪表有限公司;水下爆炸水池,直径 $D=5\ \text{m}$,水深 $H=5\ \text{m}$;ICP W138A25型PCB压力传感器,美国压电有限公司;2BS-110多段智能爆速仪,南京理工大学;空中爆炸罐;高分辨场发射透射电子显微镜, JEM-F200,日本电子株式会社;差示扫描量热仪, DSC 204 F1,德国耐驰仪器公司;TPS 2500S型导热系数测定仪,瑞典 HotDisk 公司;玻璃杯;玻璃棒;电热恒温鼓风干燥箱,101系列,苏珀仪器设备有限公司;PVDF传感器(实验室自制)。

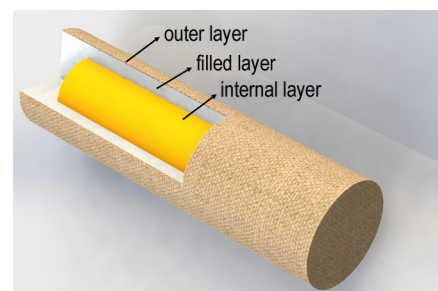
1.2 样品制备

1.2.1 胶体样品

胶体材料由高分子吸水树脂(SAP)、分散剂、水组成,水的质量比在98%以上,SAP材料在2%之内。SAP溶解于水中,经过短时间凝胶化后逐渐变粘稠,最后失去流动性,变成胶体材料。分散剂的作用是保证胶体体系分散均匀。在实验室按SAP:分散剂:水的质量比配制3种胶体样品进行优选,其中,胶体样品1#、2#、3#的配比分别为0:1:99,0.5:1:98.5,1:1:98。

1.2.2 装药结构

传统防护装药结构采取直接在工业炸药药卷外包裹隔热材料,本研究隔热胶体装药结构由外到内依次分为外层-隔热强度层-填充层-吸热胶体层、内层-乳化炸药,如图1所示。其中,装药结构的外径为140 mm,长度为950 mm,内层装填2节乳化炸药药卷(直径



a. schematic view



b. charge structure



c. colloidal material

图1 隔热胶体装药结构

Fig.1 Thermal insulation colloid charging structure

110 mm、长度 450 mm)。外层为传统隔热材料,兼具隔热和保护功能。胶体层填充胶体材料的填充量由结构外层与内层装药的直径所决定。

1.2.3 乳化炸药药包

实验室进行乳化炸药药包水浴加热,以模拟高温炮孔中岩壁热源对胶体装药结构中药卷的加热效果。经加热老化后的药包进行爆炸性能测试(水下爆炸与爆速实验)。添加膨胀珍珠岩作为物理敏化剂的乳化炸药(Emulsion Explosive Sensitized by Expanded Perlite, 简称 EE-EP)配比为乳化基质:膨胀珍珠岩=96:4,添加亚硝酸钠作为化学敏化剂的乳化炸药(Emulsion Explosive Sensitized by Sodium Nitrite, 简称 EE-SN)配比为乳化基质:亚硝酸钠=99.75:0.25。药包为球形药包,外形如图 2 所示,质量均为 30 g,直径为 37~39 mm,密度为 $1.05\sim 1.15\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 。药包水浴加热温度 $100\text{ }^{\circ}\text{C}$,加热时间分别为 0, 1, 2 h。



图 2 乳化炸药水浴加热老化实验

Fig.2 Aging experiment of emulsion explosive by water bath heating

1.3 实验过程

1.3.1 胶体材料物性参数测试

对胶体样品 1[#]~3[#]进行粘度分析,选取合适粘度的胶体材料进行物性参数测定。

热性能测定时,TGA实验升温速率为 $10\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$,样品质量 16.946 mg,气体环境为氮气。

比热容测定时,样品质量为 22.56 mg;运用瞬态平面热源法^[27](Hot disk法)测量导热系数,进行 3 次实验,求取平均值。

胶体材料与水蒸发速率测定时,采用 2 只相同烧杯,称量相同质量(500 g)的水与配制好的胶体材料,放入 $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ 恒温箱中加热,每间隔 5 min 进行质量称量,记录数据作图分析。

1.3.2 装药结构耐热实验

在宁夏大峰矿区现场进行高温炮孔中传统装药结

构、胶体装药结构的内部温升曲线测量实验,对比分析耐热特性。炮孔直径 145 mm,传统装药结构、胶体装药结构外径为 140 mm,内部均装填直径为 110 mm 的乳化炸药药卷。传统装药结构的外层分别采用陶瓷纤维、玻璃纤维、石棉,药卷被紧紧包裹在内部,结构两端用隔热材料密封,在装药结构外表面、药卷与外层材料接触面布置 1 个温度传感器,分别测量炮孔温度与药卷外表面温度。胶体装药结构外层采用隔热消防水带,在填充层间隙中注满胶体材料,在装药结构外表面、胶体材料内部分别布置传感器 4(sensor-4,测量炮孔温度)与传感器 3(sensor-3),乳化炸药内部布置 2 个传感器,传感器 1(sensor-1)处于药卷中心处,传感器 2(sensor-2)距药卷中心 27 mm,分别测量炮孔温度、胶体材料填充层温度、药卷内部温度。

1.3.3 加热老化后乳化炸药爆炸性能测试

分别在爆炸水池和爆炸罐中进行老化后药包的爆炸性能测试,装置如图 3 所示。

水下爆炸实验中,采用 30 g 球形药包,装药深度位于水下 3.0 m 处,药包与传感器之间的距离 R 为 0.70 m,每个工况重复实验 3 次,取平均值。

爆速实验中,测量时基为 $0.1\text{ }\mu\text{s}$,将加热后的炸药

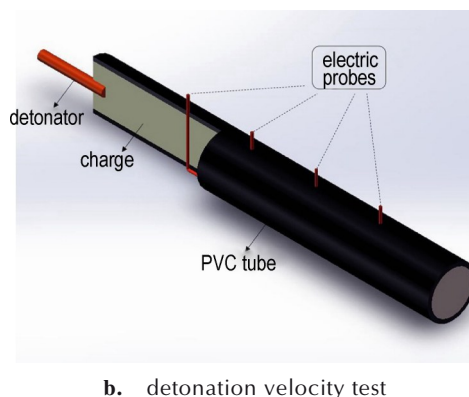
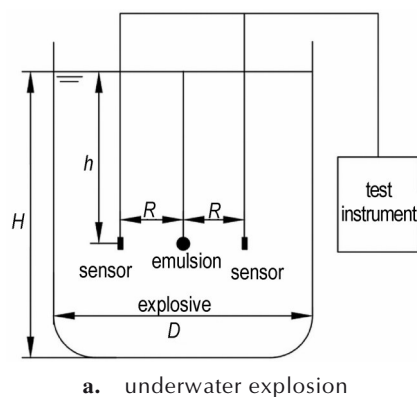


图 3 爆炸测试装置示意图

Fig.3 Schematic diagram of explosion test device

装入PVC管(直径32 mm、长度200 mm),每个药包测量间距为40 mm,第一个离子探针距离起爆端70 mm,以保证测试的炸药形成稳定爆轰,每个工况实验1次,取多测点求平均值。

1.3.4 胶体介质中近场测爆压实验

由于装药结构中胶体层既可以起到隔热防护作用,也会影响爆炸冲击波的破岩效果,为此,设计小型胶体介质场,采用PVDF近场测爆压法^[26]研究不同配比胶体对冲击波爆压的影响,实验装置如图4所示。实验选用 $\Phi 200\text{ mm}\times 250\text{ mm}$ PVC管,底端用塑料薄膜及胶带密封,内部分别装填胶体样品1#~3#;胶体介质场底座采用坚硬石台,上表面平整且水平放置,中心粘帖PVDF压力传感器用以测量爆炸压力曲线,使用1 g雷管装药作为爆源,改变爆心距,以爆源与PVDF之间距离4,7,10,13 cm的工况进行实验,每个工况实验重复3次,取平均值,结合亨利奇^[28]与库尔^[29]理论公式进行爆压变化规律分析。

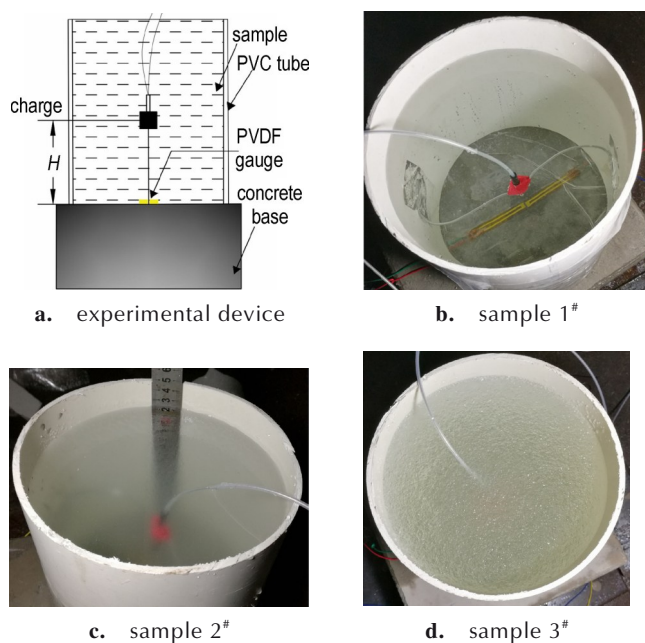


图4 胶体介质中近场爆炸压力测量装置及实验样品图

Fig.4 Measurement of near-field explosion pressure in colloidal medium

1.3.5 装药结构现场实验

通过装药结构的露天殉爆与现场爆破实验研究炮孔中的传爆性能。殉爆实验1次用4个装药结构,长500 mm,外径140 mm,内部装填胶体样品2#与110 mm的乳化炸药药卷1节,主发药包安装1发雷管,将上述装药结构依次轴向对齐放在地面上,4个装

药结构之间分别间隔10,20,30 mm,引爆主发药包。同时在露天矿区作业面进行现场实验,炮孔孔深4.0 m,孔距3.5 m,排距3.0 m,孔径145 mm。每个炮孔装入2个装药结构,长950 mm,外径140 mm,内部装填胶体样品2#与110 mm的乳化炸药药卷2节,其中1个装有起爆药包和雷管,起爆方式为正向起爆,通过岩石破碎和挖掘情况评判爆破效果。

2 结果与讨论

2.1 胶体材料物性参数分析

对胶体样品进行物性测试,结果如图5所示。显微照片可以看出胶体颗粒为粒径小于200 μm 的无规则凝胶颗粒(图5a)。图5b为胶体样品1#~3#的照片,可以看出样品1#呈现为单一水相状态;样品2#体系呈现半胶粒化状态,且保持一定的微流动特性,颗粒伴随着微小空气泡分散在水中,为三相组成,用 α 角来表征其凝胶化程度, α 约为 37° ;样品3#呈现出完全胶粒化效果,体系中只有胶体颗粒与微小空气泡,为两相体系, α 约为 50° 。将胶体应用于装药结构,如果粘度过小(如样品1#)则成形性不好,不利于现场炮孔装填;如果粘度过大(如样品3#),则内部流动性不好,内部循环传热不畅,故以样品2#作为胶体材料比较理想,并在后续实验中测量其物性参数。

图5c为样品2#的TGA实验结果。如图5c所示,当环境温度升温至 $100\text{ }^\circ\text{C}$ 时,胶体质量剩余约60%,在 $119\text{ }^\circ\text{C}$ 左右胶体的质量损失速率最大,直至 $157\text{ }^\circ\text{C}$ 时完全损失。在整个过程中胶体材料一直处于吸热、蒸发状态,没有发生化学反应,保持与水相同的稳定阻燃特性。经测定,样品2#的比热容为 $4.02\text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$,为常温下水的96.2%,具有很好的吸热性能。 $20\text{ }^\circ\text{C}$ 时样品2#的3次导热系数分别为0.5125, 0.4998, $0.4987\text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$,平均值为 $0.5037\text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$,3次数据的方差为0.0063,为同温度下水($0.599\text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)的84.1%,传热速率明显低于水,这是因为在胶体的制备搅拌过程中引入了很多微小空气泡,降低了体系导热系数。图5d为样品2#的蒸发速率测定结果。由图5d可知,水和胶体的质量均随时间持续减少,这是样品被加热至沸点后蒸发所致;加热150 min后,水和样品2#的蒸发率分别为47%,40%,这是由于胶体中水分子受到SAP高分子网络的物理吸附,限制了水分子的热运动与蒸发速率,使其导热系数低于水,隔热效果优于水。

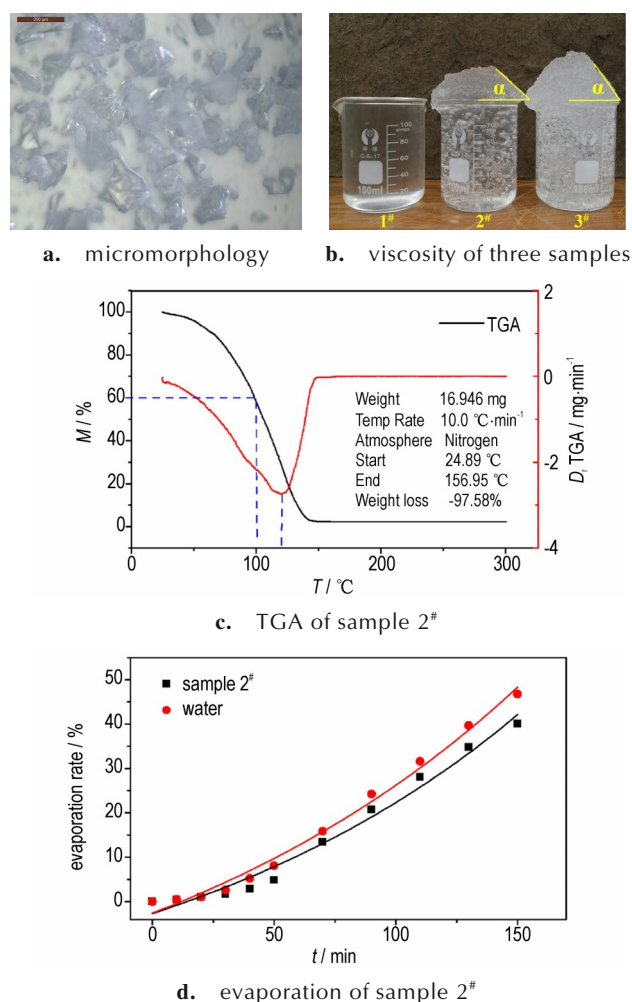


图5 胶体材料物性参数测试结果

Fig.5 Physical parameters test of colloidal materials

2.2 隔热装药结构复合耐热特性

图6为高温炮孔中传统装药结构和胶体装药结构内温度变化图像。经测量,实验炮孔温度稳定在280 °C左右,环境温度为12 °C左右。如图6a所示,采用石棉(asbestos)、陶瓷纤维(ceramic fiber)、玻璃纤维(glass fibre)单一防护的传统装药结构中的乳化炸药,分别经过6,7,10 min后外表面温度开始超过100 °C,药卷外表面温度持续升高,待50 min后达到200 °C。乳化炸药长时间处于超过100 °C的加热环境中是非常危险的,容易发生燃烧以致于爆炸,之后停止了实验。3种材料均是通过低导热率实现隔热防护,单纯通过增加材料厚度提升隔热效果,炮孔尺寸上很难满足,且其隔热防护时间短。

由图6b可知,在胶体装药结构的温升曲线中,填充层胶体温度(sensor-3)经过20 min加热后达到沸点并稳定在93 °C左右,与现场海拔(1960 m)水的沸点

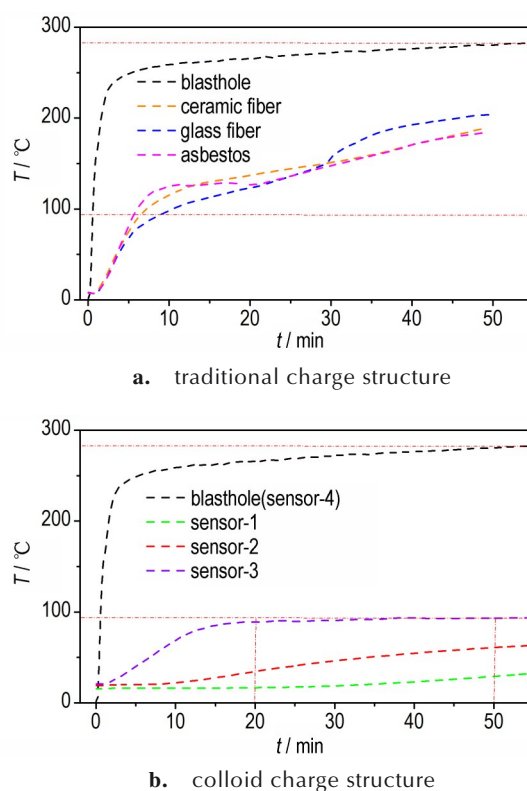


图6 高温炮孔中不同装药结构内温度变化规律

Fig.6 Temperature variation of different charge structures in high-temperature blast holes

温度一致,持续至55 min。可以看出整个隔热结构温度由外向内呈现逐渐降低的趋势,由于热量是从外向内进行传导,胶体材料层温度达到沸点,乳化药卷内温度低于沸点并在持续上升。离药卷中心位置约27 mm的传感器2(sensor-2)在50 min后的温度约为60.8 °C,药卷中心处传感器1(sensor-1)在50 min后的温度约为29.2 °C,表明炸药内部温度由外向内逐渐降低。加热55 min后取出装药结构,内部药卷完好,没有烘烤、灼烧状态,满足现场快速爆破施工要求。其隔热特性如下:首先外层隔热材料具有阻燃、导热率低特点,减缓高温孔壁对结构的加热速率;其次胶体材料具有阻燃(水>98%)、吸热(高比热容)、相变(气化相变吸热,100 °C水汽化相变潜热为2257 J·g⁻¹)特性;最后在持续加热效应下,胶体材料不断吸热后温度达到沸点。

由上述实验结果可知,传统隔热结构依靠材料低导热性实现隔热效果,而胶体隔热结构中的胶体层可以通过吸热特性延长内层炸药的安全防护时间达55 min。

2.3 乳化炸药爆炸性能参数特征

研究加热老化效应对乳化炸药爆轰性能的影响,

选取不同实验组中典型的冲击波压力时程曲线进行对比分析,结果如图7所示。由图7可知,2种敏化方式(亚硝酸钠敏化、膨胀珍珠岩敏化)的炸药加热后仍保持较好的爆炸性能,冲击波波形曲线也符合指数型衰减,随着加热时间的增加,2组炸药爆炸压力峰值呈现明显的降低趋势。

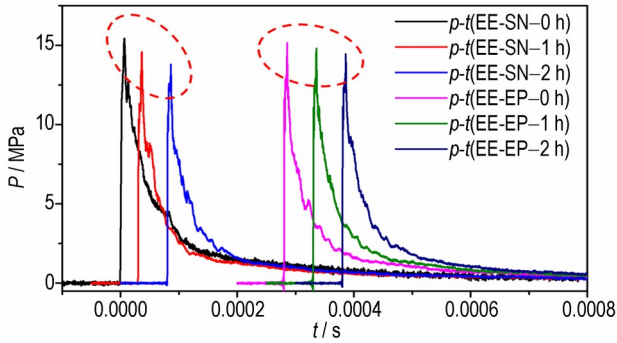


图7 不同加热时间后冲击波压力时程曲线
Fig.7 Shock wave pressure histories after different heating time

对乳化炸药的爆炸力学特征参数(冲击波压力峰值、爆轰速度、比冲量、总能量以及总能量损失率)进行进一步计算分析。

(1) 冲击波比冲量 $i(t)$

水下爆炸冲击波比冲量 $i(t)$ 是炸药水下爆炸压力时程曲线对时间的积分,相应的计算公式为^[30]:

$$i = \int_0^{6.7\theta} \Delta p^2(t) dt \quad (1)$$

式中, i 为冲击波冲量, $\text{Pa}\cdot\text{s}$; $\Delta p(t)$ 为距离爆压中心 R 处爆炸冲击波压力随时间变化的函数; R 为药包与传感器之间的距离, m ; θ 为衰减时间常数, s , 指压力从峰值 p_m 衰减到 p_m/e 所需的时间, 与距离 R 有关。

(2) 比冲击波能 E_s 与比气泡能 E_b ^[30]:

$$E_s = \frac{4\pi R^2}{W\rho_w C_w} \int_0^{6.7\theta} \Delta p^2(t) dt \quad (2)$$

表1 2种敏化类型的乳化炸药水浴加热后的爆轰参数

Table 1 Detonation parameters of two sensitized emulsion explosives heated in water bath

explosives	t/h	p_m / MPa	$D / \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	$I / \text{Pa}\cdot\text{s}$	$E_s / \text{MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$	$E_b / \text{MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$	$E / \text{MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$	$E_{\text{loss}} / \%$
EE-EP	0	15.23±0.57	3469±46	970±7	0.709±0.017	2.262±0.042	3.237±0.013	0.00
	1	14.89±0.37	3324±42	957±9	0.683±0.015	2.223±0.005	3.157±0.026	2.47
	2	14.23±0.31	3167±38	939±10	0.663±0.025	2.189±0.009	3.083±0.002	4.76
EE-SN	0	15.51±0.11	4706±55	944±17	0.703±0.013	2.238±0.014	3.348±0.035	0.00
	1	14.40±0.24	4257±91	912±2	0.639±0.028	2.101±0.068	3.065±0.025	8.45
	2	13.60±0.29	3847±74	863±14	0.595±0.024	1.979±0.082	2.758±0.114	17.62

Note: t is heating time in hot water bath; p_m is pressure peak of shock wave; D is detonation velocity; I is specific impulse; E_s is specific shock energy; E_b is specific bubble energy; E is specific total energy; E_{loss} is loss of specific total energy.

$$E_b = (\sqrt{1 + 4CT_b} - 1)^3 / 8C^3 k_1^3 W \quad (3)$$

$$k_1 = 1.135\rho_w^{1/2} / \rho_h^{5/6} \quad (4)$$

式中, E_s 为比冲击波能, $\text{MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$; W 为实验药包的质量, kg ; ρ_w 为水的密度, $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$; C_w 为冲击波在水中的传播声速, $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$; E_b 为比气泡能, $\text{MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$; T_b 是气泡第一次脉动周期, s ; p_h 是测点处流体总静水压, Pa ; $C = -0.3905$ 为实验条件测得的校正系数^[31]。

(3) 炸药水下爆炸总能量 E ^[30]:

$$E = K_f(\mu E_s + E_b) \quad (5)$$

$$\mu = 1 + 1.3328 \times 10^{-1} p_{CJ} - 6.5775 \times 10^{-3} p_{CJ}^2 + 1.2594 \times 10^{-4} p_{CJ}^3 \quad (6)$$

$$p_{CJ} = \frac{1}{4} \rho_o D^2 \quad (7)$$

式中, E 为水下爆炸总能量, $\text{MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$; μ 为冲击波损失系数; K_f 为药包的形状参数, 对于球形通常取 1.00; ρ_o 为药柱的密度, $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$; D 为炸药的爆轰速度, $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$; p_{CJ} 为 C-J 爆轰压力, MPa 。

(4) 总能量损失率 E_{loss} :

$$E_{\text{loss}} = (1 - E_i / E_0) \times 100\% \quad (8)$$

式中, E_i 为水浴加热 i 小时后的爆炸总能量, $\text{MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$; E_0 为未水浴加热时总能量, $\text{MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$; E_{loss} 为总能量损失率, %。

加热后乳化炸药药包爆轰参数如表1所示, 表中数据为实验平均值。

由表1可知, 2种敏化类型的乳化炸药压力峰值、比冲量、爆速、爆炸总能量均随着水浴加热时间的增加呈现出明显的持续下降趋势, EE-SN 的下降趋势及数值高于 EE-EP。经过 1 h 加热效应后, EE-EP, EE-SN 爆炸总能量分别降低了 2.47%, 8.45%; 经过 2 h 加热效应后, EE-EP, EE-SN 压力峰值分别降低了 6.57%, 12.31%; 比冲量分别降低了 3.20%, 8.58%; 爆速分别降低了 8.71%, 18.25%; 爆炸总能量损失率分别为

4.76%,17.62%。分析乳化炸药各项爆轰参数的下降比例,EE-EP抗加热老化性能好,更适合装填于高温爆破环境下的防护装药结构。

乳化炸药体系在持续水浴加热后发生破乳结晶现象,破坏了油包水结构,造成爆轰的激发与传递减弱、爆炸性能下降。具体表现如下:在加热老化效应下,乳化炸药油相材料中的油膜粘度降低;水相过饱和溶液中的硝酸铵随着温度的变化,其晶型由常温下的 α 型、 β 型转变为四方晶体(II)型,晶体密度变小,进而体积变大刺破粘度变弱的油膜材料,发生破乳后析出的晶体会加速整个乳化体系破乳进程^[32]。对于EE-EP,内部的敏化热点不会被破坏,主要是体系发生破乳析晶,使得炸药有效爆炸当量减少。对于EE-SN,除了发生破乳析晶之外,其敏化热点也会遭到破坏。在水浴加热过程中,乳化基质粘度降低,EE-SN内部产生的敏化小气泡慢慢汇聚后成为大气泡,生成的大气泡再从乳化基质中逸出或者变成无效气泡,使得炸药内部的敏化热点大大减少,敏化热点被逐渐破坏的过程也会加速乳化体系破乳析晶,既减少了敏化热点又降低了有效爆炸当量,双重因素降低了炸药的爆炸性能。

2.4 胶体介质中爆炸压力变化规律

选取3种胶体介质(样品1#~3#)、4种爆心距(4,

7,10,13 cm)的典型爆炸压力时程曲线进行分析,实验结果如图8所示。由图8可知,曲线压力信号总长一般在40 μ s内,压力峰值上升沿在2 μ s左右。3种胶体中4 cm处的波形曲线下降沿较好,与冲击波压力曲线的指数型下降一致,在爆心距(7,10,13 cm)处,会出现第二个压力峰值的情况,这是胶体介质场边界PVC管的反射压力导致。第一个压力峰值真实记录了介质场中波阵面经过传感器的压力情况,压力峰值及理论计算数据如表2所示。

3种胶体介质中不同爆心距处爆炸实验压力与计算对比值如图9所示。随着爆心距的变化,3种胶体中的压力峰值大小为(样品1#>样品3#>样品2#)。在爆心距4,7 cm处,样品1#的测量爆压与亨利奇、库尔经验公式计算值偏差较大,这是因为近场爆炸中影响因素较多,经验公式的适用性较差导致。在爆心距10,13 cm处,样品1#的测量爆压与理论计算值一致性较好。在爆心距10 cm处,相比于样品1#,样品2#,3#的爆压分别衰减了约31%,15%;在爆心距13 cm处,相比于样品1#,样品2#,3#的爆压分别衰减了约23%,12%。3种介质内爆压的衰减程度大小为:样品2#>样品3#>样品1#,说明相比于水中爆炸冲击波传播,胶体介质中衰减比例更大。样品3#呈现完全胶凝化,胶体

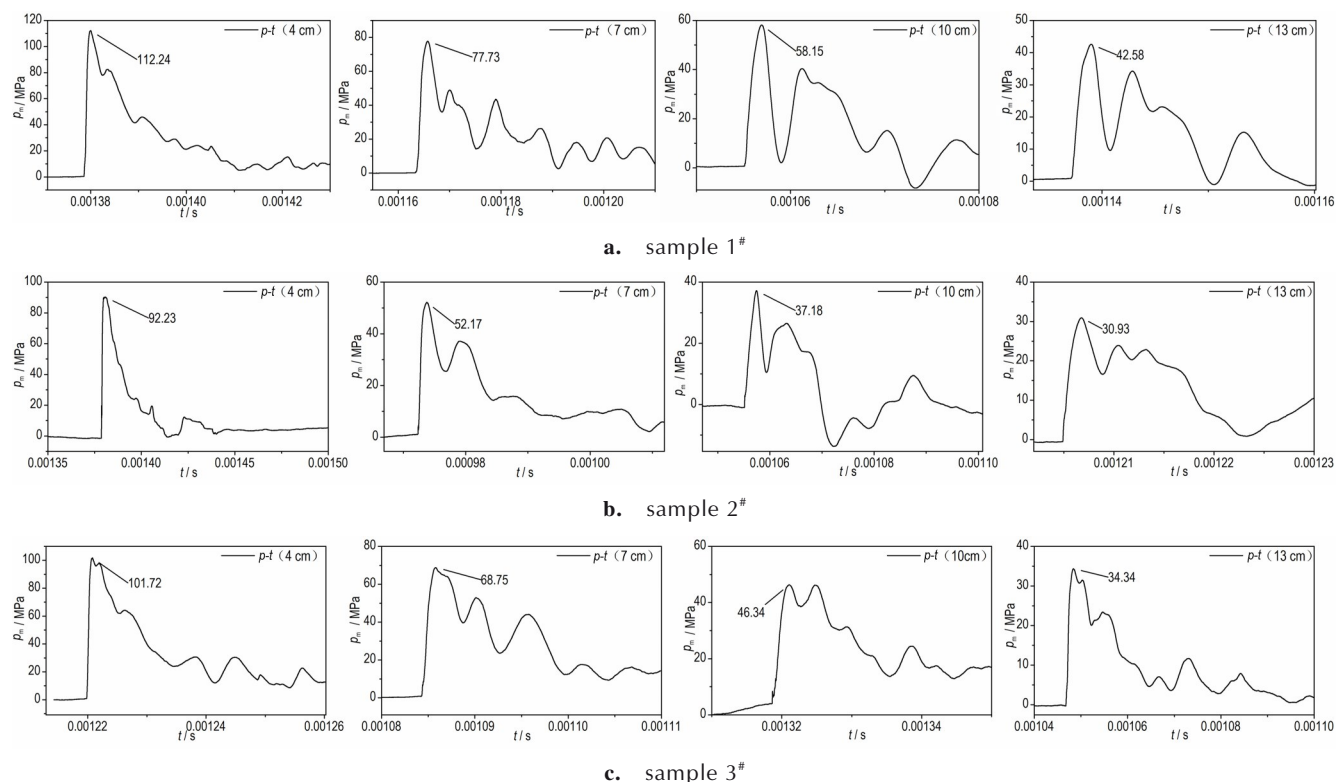


图8 3种配比胶体介质中不同爆心距下的爆炸压力曲线

Fig.8 Explosion pressure curves at different distances from the explosion center for three colloidal proportions

表 2 3种胶体介质场中4种爆心距条件下冲击波峰值压力

Table 2 Peak shock wave pressures at four distances from the explosion center for three colloidal media

R / cm	p_m of 1 [#] / MPa	p_m of 2 [#] / MPa	p_m of 3 [#] / MPa	$p_{m,h}$ calculation by Henrich ^[28] / MPa	$p_{m,c}$ calculation by Cole ^[29] / MPa
4	112.24	91.03±1.13	101.72	177.84	165.35
7	75.39±3.58	51.99±0.26	66.43±3.29	82.39	87.86
10	55.94±4.23	38.53±0.68	47.67±6.52	52.08	58.71
13	40.15±3.44	30.92±1.46	35.34±1.31	37.7	43.65

Note: data in table are the average of two experiments, but only one valid data was collected from 1[#] and 3[#] at the distance of 4 cm; R is distance from the explosion center; p_m is peak of shock wave pressure, $p_{m,h}$ is calculation by Henrich^[28], $p_{m,c}$ is calculation by Cole^[29].

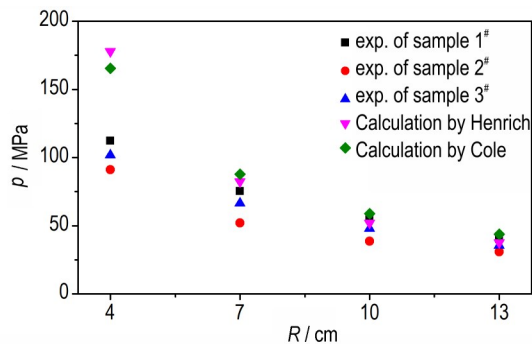


图 9 3种胶体介质中不同爆心距处爆炸实验压力与计算对比值
Fig.9 Comparison between measured and calculated explosion pressures at different distances from the explosion center for three colloidal media

颗粒内部伴随着微小空气泡,这会耗散冲击波传播能量,降低爆压。样品 2[#]呈现半胶凝化,其体系中存在胶体颗粒、微小空气泡、水,三相之间波阻抗差距较大,冲击波在样品 2[#]中传播时,在三相界面处出现较为复杂的多次透射、反射以及气泡吸能的综合影响,造成爆压在样品 2[#]中衰减比例最大,这在一定程度上会降低装药结构的破岩效果。

2.5 功能防护装药结构传爆特性

现场实验(殉爆实验、炮孔传爆)结果如图 10 所示。由图 10b 可知,主发药包起爆后被发装药结构全部殉爆,经现场检查无残留炸药和被发药包炸飞现象,实现了装药结构的 10, 20, 30 mm 殉爆;现场炮孔传爆之后,经过现场检查以及第二天挖掘情况分析,表明试验现场未见残留药卷,装药结构装填的 13 个炮孔全部传爆,未出现拒爆现象,爆堆如图 10d,说明装药结构在炮孔内能正常传爆,爆破效果未受影响。

3 结论

(1)相比于传统隔热结构,胶体隔热装药结构依靠胶体材料的阻燃、高比热容、低导热系数、相变吸热等特性,能使隔热防护时间延长至 55 min。现场实验

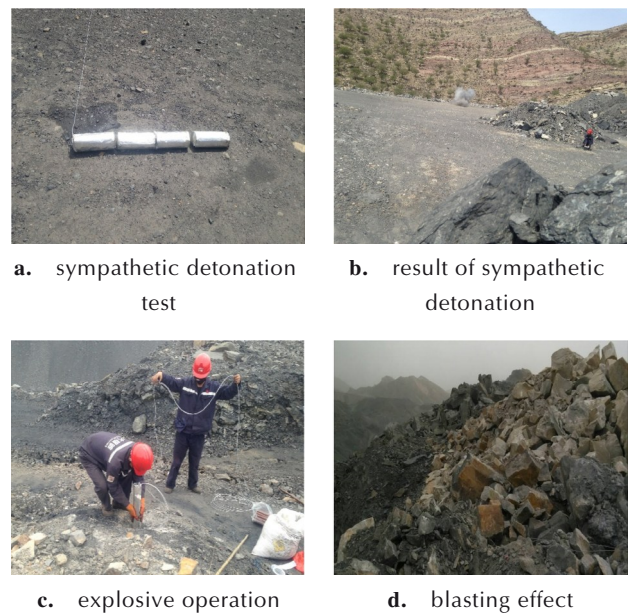


图 10 功能装药结构现场爆炸实验

Fig. 10 Field explosion experiment for functional charge structure

结果表明,胶体隔热装药结构可实现 30 mm 殉爆、高温炮孔内稳定传爆,且爆破效果良好。

(2)随着水浴加热时间的增加,乳化炸药药包的各项爆轰参数均持续降低,其中亚硝酸钠敏化药包的爆炸性能衰减比例高于膨胀珍珠岩敏化药包。水浴加热(100 ℃)1 h 后,亚硝酸钠、膨胀珍珠岩敏化的乳化药包爆炸总能量损失分别为 2.47%, 8.45%;加热 2 h 后,亚硝酸钠、膨胀珍珠岩敏化的乳化药包爆炸总能量损失分别为 4.76%, 17.62%。膨胀珍珠岩敏化药包耐高温性能较好。

(3)胶体介质近场爆压实验表明,胶体颗粒、微小空气泡、水介质三相之间波阻抗存在较大差别,冲击波在三相的交界面上存在多次复杂反射与透射,造成爆压衰减。

参考文献:

[1] STRACHER G B, TAYLOR T P. Coal fires burning out of con-

- trol around the world: thermodynamic recipe for environmental catastrophe [J]. *International Journal of Coal Geology*, 2004, 59(1): 7-17.
- [2] SONG Z, KUENZER C, Zhu H, et al. Analysis of coal fire dynamics in the wuda syncline impacted by fire-fighting activities based on in-situ observations and landsat-8 remote sensing data [J]. *International Journal of Coal Geology*, 2015, 141: 91-102.
- [3] YANG F, QIU D. Exploring coal spontaneous combustion by bibliometric analysis [J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2019, 132: 1-10.
- [4] HUO H, NI Z, GAO C, et al. A study of coal fire propagation with remotely sensed thermal infrared data [J]. *Remote Sensing*, 2015, 7(3): 3088-3113.
- [5] LU X, WANG D, QIN B, et al. Novel approach for extinguishing large-scale coal fires using gas-liquid foams in open pit mines [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2015, 22(23): 18363-18371.
- [6] SHAO Z, WANG D, WANG Y, et al. Controlling coal fires using the three-phase foam and water mist techniques in the anjialing open pit mine [J]. *China Natural Hazards*, 2015, 75(2): 1833-1852.
- [7] ZHANG J, WAGNER W, PRAKASH A, et al. Detecting coal fires using remote sensing techniques [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2004, 25(16): 3193-3220.
- [8] CHEN Y, JING L, BO Y, et al. Detection of coal fire location and change based on multi-temporal thermal remotely sensed data and field measurements [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2007, 28(15): 3173-3179.
- [9] 郑炳旭. 中国高温介质爆破研究现状与展望 [J]. *爆破*, 2010, 03: 13-17+35.
ZHENG Bing-xu. Current status and prospect of high temperature blasting research in china [J]. *Blasting*, 2010, 03: 13-17+35.
- [10] 林谋金, 郑炳旭, 李战军, 等. 全孔蓄水法在高温火区爆破中的应用 [J]. *爆破*, 2016, 33(3): 114-117.
LIN Mou-jin, ZHENG Bing-xu, LI Zhan-jun, et al. Application of impounding water blasthole method in fire area blasting [J]. *Blasting*, 2016, 33(3): 114-117.
- [11] 罗宁, 李晓杰, 王小红, 等. 几种乳化炸药的热分解动力学行为 [J]. *含能材料*, 2009, 17(4): 463-466.
LUO Ning, LI Xiao-jie, WANG Xiao-hong et al. Thermal decomposition kinetic behavior of emulsion explosives [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials(Hanneng Cailiao)*, 17(4): 463-466.
- [12] WANG X, LI X, YAN H, et al. Research of thermal decomposition kinetic characteristic of emulsion explosive base containing Fe and Mn elements [J]. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 2007, 91(2): 545-550.
- [13] 于谦, 郭子如, 何志伟, 等. 典型工业炸药耐热性实验研究 [J]. *爆破器材*, 2019, 48(1): 47-51+57.
YU Qian, GUO Zi-ru, HE Zhi-wei, et al. Experimental study on heat resistance of typical industrial explosives [J]. *Explosive Materials*, 2019, 48(1): 47-51+57.
- [14] 林谋金, 刘畅, 马宏昊, 等. 水浴加热对乳化炸药爆炸威力的影响 [J]. *含能材料*, 2016, 24(12): 1214-1218.
LIN Mou-jin, LIU Chang, MA Hong-hao et al. Effect of water-bath heating on the explosion power of emulsion explosive [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials(Hanneng Cailiao)*, 2016, 24(12): 1214-1218.
- [15] 张阳, 汪旭光, 王阳, 等. 乳胶基质老化过程中的临界现象分析 [J]. *火工品*, 2018, 6: 42-45.
ZHANG Yang, WANG Xu-guang, WANG Yang, et al. Analysis of critical phenomenon in the aging process of emulsion explosive matrix [J]. *Initiators & Pyrotechnics*, 2018, 6: 42-45.
- [16] JONES D E G, FENG H, MINTZ K J, et al. Parameters affecting the thermal behaviour of emulsion explosives [J]. *Thermochimica Acta*, 1999, 331(1): 37-44.
- [17] OXIEY J C, KAUSHIK S M, GILSON N S. Thermal stability and compatibility of ammonium nitrate explosives on a small and large scale [J]. *Thermochimica Acta*, 1992, 212: 77-85.
- [18] LI J, WANG X, HU R, et al. The thermal behavior of powder emulsion explosives [J]. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 1995, 45(1-2): 261-268.
- [19] XU Z, LIU D, HU Y, et al. Influence of iron ion on thermal behavior of ammonium nitrate and emulsion explosives [J]. *Central European Journal of Energetic Materials*, 2010, 7(1): 77-93.
- [20] XU Z X, WANG Q, FU X Q. Thermal stability and mechanism of decomposition of emulsion explosives in the presence of pyrite [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2015, 300: 702-710.
- [21] 陈寿如, 柳健康, 史秀志, 等. 高温控制爆破中新型隔热材料的试验研究 [J]. *爆破器材*, 2002, 05: 32-35.
CHEN Shou-ru, LIU Jian-kang, SHI Xiu-zhi, et al. The experimental study of a new type of heat insulation material used in high temperature control blasting [J]. *Explosive Materials*, 2002, 05: 32-35.
- [22] 李建彬. 高温钢筋混凝土基础爆破拆除 [J]. *工程爆破*, 2007, 01: 66-68.
LI Jian-bin. Blasting demolition of reinforced concrete foundation high temperature [J]. *Engineering Blasting*, 2007, 01: 66-68.
- [23] 崔晓荣. 高温爆破中自适应型耐温护筒炸药设计 [J]. *工程爆破*, 2017, 23(6): 43-47+67.
CUI Xiao-rong. Design of self-adapting and heat-resisting bungalow for high-temperature blasting [J]. *Engineering Blasting*, 2017, 23(6): 43-47+67.
- [24] 林谋金, 石文才, 郑炳旭, 等. 应用于火区爆破的耐火隔热套筒设计 [J]. *爆破*, 2017, 34(4): 133-136.
LIN Mou-jin, SHI Wen-cai, ZHENG Bing-xu, et al. Designing of refractory insulating sleeve for fire area blasting [J]. *Blasting*, 2017, 34(4): 133-136.
- [25] 马宏昊; 王飞; 沈兆武. 一种胶体隔热保护结构及其制备方法与应用: ZL201410738225.7 [P], 2015.
MA Hong-hao, WANG Fei, SHEN Zhao-wu. A colloidal heat insulation protective structure and its preparation method and application: ZL201410738225.7 [P], 2015.
- [26] 范志强, 马宏昊, 沈兆武, 等. PVDF 压力计在结构表面爆炸压力测量中的应用技术研究 [J]. *兵工学报*, 2014, s2: 27-32.
FAN Zhi-qiang, MA Hong-hao, SHEN Zhao-wu. Investigation on application of PVDF gauges in blast pressure measurement on structure surfaces [J]. *Acta Armamentarii*, 2014, s2: 27-32.
- [27] GB/T 32064-2015, 建筑材料导热系数和热扩散系数瞬态平面热源测试法 [S].
- [28] 亨利奇. 爆炸动力学及其应用 [M]. 北京: 科学出版社, 1987.

- Henrych J. Explosion dynamics and its application [M]. Beijing: Science Press, 1987.
- [29] COLE R H. Underwater explosions [M]. Dover Publications New York, 1965.
- [30] BJARNHOLT G. Suggestions on standards for measurement and data evaluation in the underwater explosion test [J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 1980, 5(2-3): 67-74
- [31] 王波, 马宏昊, 沈兆武, 等. 贮氢玻璃微球敏化乳化炸药的爆炸特性[J]. 含能材料, 2018, 26(5): 436-440.
- WANG Bo, MA Hong-hao, SHEN Zhao-wuet al. Detonation performance of emulsion explosives sensitized by hydrogen storage glass microspheres[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials(Hanneng Cailiao)*, 2018, 26(5): 436-440.
- [32] 王进. 乳胶体系的稳定性及破乳方法研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2008.
- WANG Jin. Study on stability and demulsification method of emulsion system [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2008.

Thermal Protection and Explosive Performance of Charge Structure with Thermally Insulating Colloid

WANG Fei¹, MA Hong-hao², SHEN Zhao-wu²

(1. State Key Laboratory of Mining Response and Disaster Prevention and Control in Deep Coal Mines, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China; 2. CAS Key Laboratory of Mechanical Behavior and Design of Materials, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

Abstract: In order to study the safety protection issues and explosion characteristics of colloidal charge structure under high temperature environment, the charge structure consisting of a thermally insulating outer layer, an endothermic colloid and an emulsion explosive was designed. The effects of three colloid proportions and two sensitizing modes (emulsion explosives were sensitized by sodium nitrite and expanded perlite respectively) of explosive in the charge structure on thermal insulation and explosion performance were studied by physical property measurement, thermometric analysis, explosion testing technology (underwater explosion, detonation velocity experiment, near-field detonation pressure measurement) and field experiment (sympathetic detonation, blasthole blasting). The results show that the colloidal material containing 0.5% high molecular water-absorbent resin is suitable for the charge structure, attributing to the fire resistance, high specific heat and low thermal conductivity, which extends the thermally insulating protection time to 55 min. In underwater explosion and detonation velocity experiments, as the heating time of 100 °C water bath increases, all detonation parameters (peak shock wave pressure, specific impulse, detonation velocity, and total explosive energy) of the charge of two sensitizing modes decrease. Affected by the demulsification of emulsion explosive and the reduction of sensitization hot spots, the detonation performance of emulsion explosive sensitized by sodium nitrite (EE-SN) is attenuated greater than that of emulsion explosive sensitized by expanded perlite (EE-EP). After heating for 2 hours, the total explosive energy loss of EE-EP and EE-SN is 4.76% and 17.62%, respectively. In the near-field explosion pressure measurement of colloidal medium, the colloidal layer in charge structure will weaken the strength of explosion shock wave. However, the blasting effect is good in the field experiment, and the charge structure has realized the 30 mm sympathetic detonation and the stable detonation propagation in the blast hole, indicating that the colloidal charge structure has a good application prospect for high-temperature blasting.

Key words: high-temperature blasting; colloidal material; thermally insulating charge structure; thermal safety of emulsion explosive; shock wave attenuation

CLC number: TJ55; O38

Document code: A

DOI: 10.11943/CJEM2022199

Grant support: University-level Key Projects of Anhui University of Science and Technology (No.xjzd2020-03), Independent Subject of State Key Laboratory of Mining Response and Disaster Prevention and Control in Deep Coal Mines (No.SKLMRD-PC20ZZ07), Natural Science Foundation of the Anhui Higher Education Institution (No. KJ2021A0461), Anhui Province Natural Science Foundation (No. 2108085QA40)

(责编:王馨逸)