

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2018.03.008

LLM-105 炸药在超高温射孔弹中的应用^{*}

赖康华 雷新华 赵世华 杜明章 付代轩 刘玉龙
四川石油射孔器材有限责任公司(四川隆昌,642177)

[摘 要] 对 LLM-105 炸药进行耐热分析试验,研究了其感度和热安定性。对 LLM-105 炸药与弹壳、药型罩进行了相容性测试,结果表明:LLM-105 炸药完全可以与弹壳和药型罩相容。在同等条件下分别用 LLM-105 炸药和 S992 炸药作为主炸药压制了 83 型和 121 型超高温射孔弹,并对柱状混凝土靶进行打靶试验。试验显示:采用 LLM-105 装药的 83 型超高温射孔弹平均穿深比 S992 装药的射孔弹提高 21.6%;采用 LLM-105 装药的 121 型超高温射孔弹平均穿深比 S992 装药的射孔弹提高 25.7%,孔径也均有所提高。

[关键词] LLM-105;超高温;射孔弹;测试;穿深

[分类号] TJ510.6

Application of LLM-105 Explosive in Ultra-high Temperature Perforating Charge

LAI Kanghua, LEI Xinhua, ZHAO Shihua, DU Mingzhang, FU Daixuan, LIU Yulong
Sichuan Petroleum Perforating Materials Co., Ltd. (Sichuan Longchang, 642177)

[ABSTRACT] Sensitivity and thermal stability of LLM-105 explosives were detected by heat resistance test. Its compatibility with shells and liner were also tested, indicating that LLM-105 explosives are fully compatible with shells and liner. Two high-temperature perforating charges, Type 83 and Type 121, were produced by assembling with LLM-105 explosives and S992 explosive under the same conditions. The target tests were carried out on the columnar concrete target. The average depth of Type 83 high-temperature perforating charge containing LLM-105 was higher than that of containing S992 by 21.6%. The average depth of Type 121 high-temperature perforating charge containing LLM-105 was higher than that of containing S992 by 25.7%, with increased hole size of the target.

[KEYWORDS] LLM-105; ultra-high temperature; perforating charge; test; depth

引言

射孔弹一般由弹壳、药型罩、装药药柱 3 部分组成^[1]。弹壳与弹架直接接触,确定其装枪中的方位,主要作用是固定药柱、确定装药结构、减缓稀疏波的入侵以及产生一次反射波^[2]。炸药主要是为射孔弹提供爆轰穿孔能量,炸药的性能在一定程度上影响着射孔弹的穿孔性能。药型罩被炸药爆炸驱动产生金属射流,冲击靶体产生孔道。影响射孔弹穿孔指标的主要因素有:炸高、药型罩材料和结构、炸药类型、起爆能量、壳体结构、成型工艺等^[3]。

随着深部油气藏的勘探和开发,深井和超深井数量大幅增加,地层的温度达到 160 ~ 200 ℃,并且在井下的时间经常超过 24 h,对射孔弹的耐温性能

也提出了更高的要求,超高温射孔弹的需求越来越大。传统超高温射孔弹主要采用 2,6-双苦胺基-3,5-二硝基吡啶(PYX)或者六硝基芪(HNS)装药,由于受超高温炸药性能的影响,穿透深度和孔径只有同型号常温射孔弹的 70% ~ 75%,小型号的超高温射孔弹经常不能有效穿透钻井污染带,大大降低了储层与井筒的沟通能力,严重制约了超高温、深部储层的勘探开发效果。

2,6-二氨基-3,5-二硝基吡嗪-1-氧化物(简称 ANPZO,LLM-105)是近年来合成出的一种能量和安全性能优良的新型超高温炸药。LLM-105 的分子结构式为 C₄H₄O₅N₆,分子量 216.04,外观为亮黄色的针状晶体,在常用有机溶剂中不溶解,但溶于二甲基亚砩^[4-6]。该炸药是一种相当钝感的含能材料,故引起了国际炸药界的极大兴趣。国外已经研究了

^{*} 收稿日期:2017-08-01
作者简介:赖康华(1984 -),男,硕士,工程师,主要从事射孔器材研究。E-mail:wanmly84@sina.com

近 10 种 LLM-105 混合炸药配方^[7]。LLM-105 已被美国防部和劳伦斯利弗莫尔国家实验室(LLNL)列为研究计划中的重点目标之一^[8-9]。超高温炸药 LLM-105 的优良性能也引起我国研究人员的广泛关注。本文中,着重介绍 LLM-105 炸药在超高温射孔弹上的应用。

1 LLM-105 炸药性能

1.1 LLM-105 炸药的感度

文献[9-10]报道了 LLM-105 的合成路线、放大量级的方法和基本的感度,通过小量试验得出 LLM-105 热安定性好,能量比 HMX 低 15%、比 TATB 高 20%。

Tran 等^[11]通过试验发现,LLM-105 的热感度介于 HMX 和 TATB 之间。在 463.55 K 时,在 86.400 s 内没有反应,这个温度位于 LLM-105 炸药的临界温度之下。

1.2 热安定性和相容性测试^[12]

热安定性是炸药运用的必要条件,只有热安定性较好的炸药才能保证其制造的产品在较长的储存时间内性能不改变,同时能确保生产、运输、储存和使用的安全。因此,采用热失重法对 LLM-105 炸药进行耐热分析试验。同时,按照 GJB 5891.17—2006 的要求,对 LLM-105 炸药与射孔弹壳体、药型罩等混合体系进行相容性检测。

检测仪器:德国耐驰公司 204 F1 差示扫描量热仪(DSC),升温速率 3℃/min;瑞士梅特勒-托利多公司 TGA/SDTA851 热分析仪,升温速率 5℃/min。测试结果见图 1~图 3。

图 1 是 LLM-105 炸药的 TGA 曲线,可以看出,炸药在 280℃左右才发生分解失重,并且随着温度的增加,迅速失重,在 340℃以后失重超过 80%。

图 2 为 LLM-105 混合炸药的 DSC 曲线,可以看出,放热峰温为 349.53℃。经 DSC 和 TGA 测试结果表明,LLM-105 炸药的热分解温度较高,因此可以判定该炸药的热安定性较好,可以满足超高温环境的使用条件。

由图 3 可知,在 3℃/min 升温速率条件下,LLM-105 炸药与弹壳、药型罩的混合体系中,峰值 348.13℃为 LLM-105 混合炸药的分解峰温度。对比图 2 可知,LLM-105 炸药在与药型罩、弹壳的混合体系中的分解峰较 LLM-105 单独体系的峰值前移了 1.4℃,小于 2℃。根据 GJB 5891.17—2006,判定 LLM-105 炸药和射孔弹弹壳药型罩相容性好,相容性等

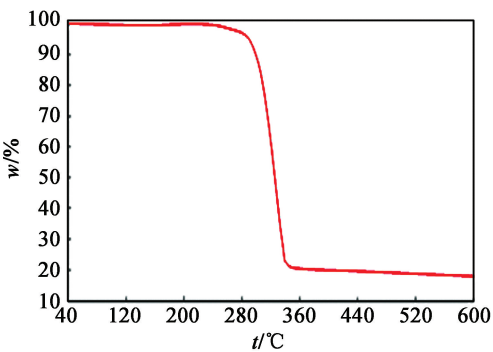


图 1 LLM-105 的 TGA 曲线
Fig. 1 TGA curve of LLM-105

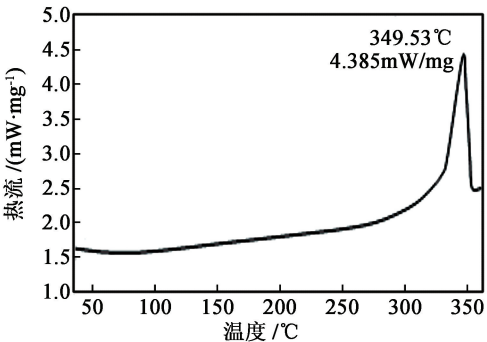


图 2 LLM-105 的 DSC 曲线
Fig. 2 DSC curve of LLM-105

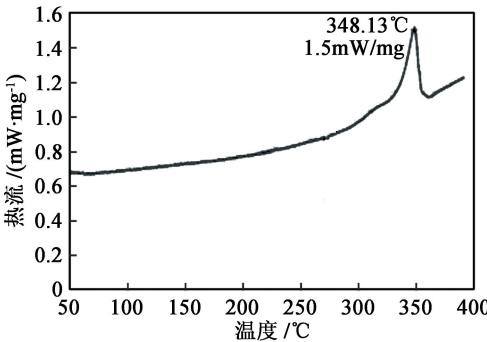


图 3 LLM-105 炸药与弹壳、药型罩混合体系的 DSC 曲线
Fig. 3 DSC curve of LLM-105 Explosive with shell and liner

级为一级。

2 装药工艺

根据炸药厂家提供的数据,采用 GJB772A 方法中的 402.3,检测到 LLM-105 炸药的堆积密度是 0.86 g/cm³。为了研究该炸药的成型性能,分别在 150、200、250、300、350 MPa 压强下,压制∅15 mm×15 mm 的药柱,分别检测药柱密度,具体数据如表 1 所示,密度趋势如图 4 所示。

表 1 压力-密度关系

Tab. 1 Pressure-density relationship

压强/ MPa	密度/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)		平均密度/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	相对密度/ %
150	1.721	1.723	1.722	90.10
200	1.757	1.756	1.757	91.94
250	1.773	1.769	1.771	92.67
300	1.782	1.780	1.781	93.20
350	1.789	1.788	1.789	93.62

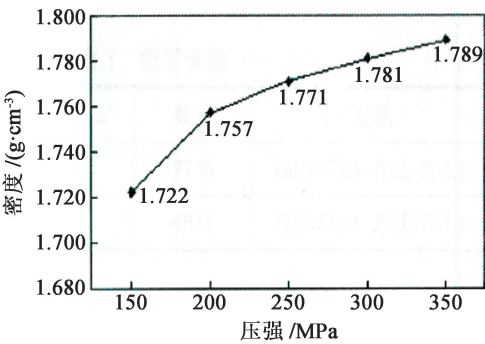


图 4 压强-密度曲线

Fig. 4 Specific pressure-density curve

从图 4 可知,随着压强的增大,炸药密度增加;压强继续增大,炸药密度逐渐向理论密度靠近,但是增加幅度放缓;继续增大压强的效果不明显。根据压弹机的参数计算,考虑到实际操作,压强在 250 MPa 左右比较合适。因此,确定 35 mm 口径的压弹压力为 6 MPa,44 mm 口径的压弹压力为 12 MPa。

为了研究 LLM-105 炸药的性能,选用超高温 S992 炸药进行对比。S992 炸药是以 HNS 为基础的另一种耐超高温混合炸药,其耐热性能为 220 ℃,48 h,不燃不爆。两种炸药的部分性能对比如表 2。

表 2 炸药基本参数

Tab. 2 Basic parameters of explosives

炸药类型	密度/($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	爆速/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)
LLM-105	1.91	8 560
S992	1.73	7 019

3 穿孔试验

3.1 83 型超高温射孔弹穿孔试验

83 型超高温弹是常用的一类射孔弹,选取本弹型研究具有一定的代表性。超高温射孔弹压制过程中,同种型号射孔弹采用相同的药量和压制工艺参数,压弹压力为 6 MPa。分 2 组进行试验:传爆药都采用 HNS,主炸药分别为 LLM-105 的混合炸药(95.5% LLM-105,3.5% 黏结剂,1.0% 钝感剂)和

S992,均为 22.5 g。根据 Q/SY 1819—2015 试验方法对射孔弹进行柱状混凝土靶性能测试。靶板的材料是按照 API 19B 的标准配方制作的直径 110 mm、高 1 m 的柱状混凝土靶。83 型超高温射孔弹试验打靶条件:炸高为 12 mm,间隙为 18 mm,模拟枪管厚度为 10 mm,模拟套管厚度为 10 mm,模拟装枪情况如图 5 所示。打靶数据如表 3 所示。



图 5 模拟装枪打靶

Fig. 5 Gun shooting simulation

表 3 83 型超高温射孔弹穿混凝土靶性能

Tab. 3 Penetration of concrete target of Type 83 ultra-high temperature perforating charge

主炸药 类型	穿深/ mm	孔径/ mm	平均穿深/ mm	平均孔径/ mm
LLM-105	760	7.8	737	7.4
	730	7.0		
	720	7.5		
S992	610	6.8	606	6.5
	590	6.3		
	620	6.5		

在 83 型超高温射孔弹中,使用主炸药为超高温炸药 S992 装药时,对柱状混凝土靶的平均穿深为 606 mm,套管平均孔径为 6.5 mm;使用主炸药为 LLM-105 装药时,对柱状混凝土靶的平均穿深为 737 mm,套管平均孔径为 7.4 mm;LLM-105 装药平均穿深比 S992 装药提高 21.6%,孔径提高 13.8%。

3.2 121 型超高温射孔弹穿孔试验

为了深入研究 LLM-105 炸药的效果,用 121 型超高温射孔弹继续做试验,选择同种结构和药型罩。射孔弹的压制过程中,同种型号射孔弹采用相同的药量和压制工艺参数,压弹压力为 12 MPa,各分 2 组进行试验:传爆药都采用 HNS,主炸药分别为 LLM-105 和 S992,均为 44.0 g。靶板的材料是按照 API 19B 的标准配方制作的直径 110 mm、高 1 m 的柱状混凝土靶。121 型超高温射孔弹打靶炸高 14 mm,间隙 18 mm,模拟枪管厚度为 10 mm,模拟套管厚度为 10 mm。试验数据如表 4 所示。

在 121 型射孔弹中,当主炸药为超高温炸药 S992 时,对柱状混凝土靶的平均穿深为 748 mm,套

表 4 121 型超高温射孔弹穿混凝土靶性能
Tab.4 Penetration of concrete target of Type 121
ultra-high temperature perforating charge

炸药类型	穿深/ mm	孔径/ mm	平均穿深/ mm	平均孔径/ mm
LLM-105	900	13.1	940	12.7
	980	12.8		
	940	13.0		
S992	735	12.8	748	12.2
	770	12.1		
	740	11.8		

管平均孔径为 12.2 mm;当主炸药为 LLM-105 装药时,对柱状混凝土靶的平均穿深为 940 mm,套管平均孔径为 12.7 mm;LLM-105 装药平均穿深比 S992 装药提高 25.7%,孔径提高 4.1%。

射孔弹中药型罩形成射流的主要能量依靠炸药提供,而理论分析和试验研究都表明,虽然影响药柱破甲威力的因素较多,但是主要因素是爆压,按照流体力学理论知:

$$p_{CJ}=\rho_0\frac{D^2}{4}。$$

(1)

式中: p_{CJ} 为爆压; ρ_0 为装药密度; D 为爆速。

根据式(1)可知,爆轰压力随着装药密度的提高而线性提高,并且与爆速的平方成正比关系,因此,提高装药密度和爆速都有利于提高药柱的破甲威力。本试验中采用的 LLM-105 炸药的密度和爆速均大于 S992 炸药,所以 LLM-105 炸药产生的爆压大于 S992 炸药。因此,在其他条件基本一致的情况下,用 LLM-105 混合炸药装填的石油射孔弹穿透柱状混凝土靶能力更强一些,这与试验得到的结论相一致。射孔孔径的性能提升不是很明显,主要原因是影响孔径大小的因素是药型罩口径和药型罩结构。本研究主要是使用不同主炸药,没有改变射孔弹的口径和结构。

4 结论

- 1) LLM-105 炸药是一种新型耐热混合炸药,热安定性优良,完全可以满足现在超高温射孔弹的耐温性能。
- 2) LLM-105 炸药与射孔弹壳体、药型罩的相容性较好,可满足长时间储存要求。
- 3) 在相同传爆药条件下,地面穿柱状混凝土靶试验表明,83 型超高温射孔弹采用 LLM-105 装药平均穿深比 S992 装药提高 21.6%,孔径提高 13.8%;

121 型超高温射孔弹采用 LLM-105 装药平均穿深比 S992 装药提高 25.7%,孔径提高 4.1%。

参 考 文 献

[1] 陆大卫. 油气井射孔技术[M]. 北京:石油工业出版社,2012:49.

[2] 郭圣延,徐永胜. 影响石油射孔弹穿孔深度的几个主要因素[J]. 测井技术,2005(s1):52-54.

[3] 徐德惠,卢朝喜,周京风,等. 枪内炸高对射孔器技术性能的影响[J]. 测井技术,2005(602):79-80.

[4] PAGORIA P F,LEE G S,MITCHELL AR,et al. Synthesis,scale-up and characterization of LLM-105:UCRL-JC-142918[P]. 2001.

[5] 郭峰波,刘玉存,刘登程,等. 2,6-二氨基-3,5-二硝基-1-氧吡嗪爆炸参数的理论计算[J]. 火工品,2006(2):31-33.

[6] GUO F B,LIU Y C,LIU D C, et al. Theoretical calculation of the detonation parameters of 2,6-diamino-3,5-dinitropyrazine-1-oxide [J]. Initiators & Pyrotechnics, 2006(2):31-33.

[7] TARVER C M,URTIEW P A, TRAN T D. Sensitivity of 2,6-diamino-3,5-dinitropyrazine-1-oxide [J]. Journal of Energetic Materials,2005,23(3):183-203.

[8] TRAN T D,PAGORIA P F,HOFFMAN D M, et al. Small-scale safety and performance characterization of new plastic bonded explosive containing LLM-105[C]//12th International Detonation Symposium. San Diego, 2002.

[9] 张超,杨立波,皮文丰,等. 一种新型高能耐热低感度推进剂[C]//中国化学会第五届全国化学推进剂学术会议论文集. 大连,2011:275-278.

[10] 张超,张晓宏,马亮,等. LLM-105 研究新进展[J]. 科学技术与工程,2015,15(23):75-86.

[11] ZHANG C,ZHANG X H, MA L, et al. The new progress of 2,6-diamino-3,5-dinitropyratine-1-oxide[J]. Science Technology and Engineering, 2015,15(23):75-86.

[12] 吴志远,胡双启. 新型钝感高能炸药 LLM-105 国内外研究进展[J]. 化学工程与装备,2008(12):103-105.

[13] TRAN T D,PAGORIA P F,HOFFMAN D M, et al. Characterization of 2,6-diamino-3,5-dinitropyrazine-1-oxide (LLM-105) as an insensitive high explosive material[C]//Proceedings of 33rd International Annual Conference of ICT. Karlsruhe,Germany,2002.

[14] 徐文新,李必红,李万全,等. 以 LLM-105 为基的耐热混合炸药的应用研究[J]. 火工品,2012,(4):40-43.

[15] XU W X,LI B H,LI W Q, et al. Application of LLM-105 based heat resistance explosive [J]. Initiators & Pyrotechnics,2012,(4):40-43.