

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2021.02.004

# 固化温度及固化剂种类对模拟 PBX 浇注炸药力学性能的影响\*

马慧<sup>①</sup> 刘玉存<sup>②</sup> 柴涛<sup>②</sup> 郭嘉昀<sup>②③</sup> 张勤<sup>①</sup> 李强林<sup>①</sup>  
陆一新<sup>①</sup> 孙静<sup>①</sup> 郑桂花<sup>①</sup> 白杨<sup>①</sup>

①成都工业学院材料与环境学院(四川成都,611730)

②中北大学化工与环境学院(山西太原,030051)

③四川科技职工大学(四川成都,610101)

[摘要] 测试了端羟基聚丁二烯-异佛尔酮二异氰酸酯-三苯基铋(HTPB-IPDI-TPB)和端羟基聚丁二烯-六亚甲基二异氰酸酯三聚体-亚乙基二胺(HTPB-HDI-trimer-DABCO)两种黏结剂在不同固化温度下对模拟 PBX 浇注炸药的力学性能的影响。实验结果表明,随着固化温度的升高,HTPB-IPDI-TPB 和 HTPB-HDI-trimer-DABCO 制备的模拟 PBX 浇注炸药药柱的力学性能增强。固化剂 IPDI 和 HDI-trimer 对药柱的机械性能有较大影响,与含 IPDI 炸药相比,含 HDI-trimer 的炸药药柱的剪切强度在 35 ℃增大 50.27%,45 ℃增大 34.30%,55 ℃增大 44.83%;抗拉强度在 35 ℃降低 82.66%,45 ℃降低 78.73%,55 ℃降低 82.22%;抗压强度在 35 ℃增大 54.85%,45 ℃增大 45.25%,55 ℃增大 53.38%。HDI-trimer 形成三维网状结构降低了药柱的抗拉强度。

[关键词] 固化温度;力学性能;黏结剂;HDI-trimer;DABCO;模拟 PBX 浇注炸药

[分类号] TQ564.4

## Effect of Curing Temperature and Curing Agent on Mechanical Properties of Simulated PBX Pouring Explosive

MA Hui<sup>①</sup>, LIU Yucun<sup>②</sup>, CHAI Tao<sup>②</sup>, GUO Jiahu<sup>②③</sup>, ZHANG Qin<sup>①</sup>,  
LI Qianglin<sup>①</sup>, LU Yixin<sup>①</sup>, SUN Jing<sup>①</sup>, ZHENG Guihua<sup>①</sup>, BAI Yang<sup>①</sup>

① School of Materials and Environmental Engineering, Chengdu Technological University (Sichuan Chengdu, 611730)

② School of Environment and Safety Engineering, North University of China (Shanxi Taiyuan, 030051)

③ Sichuan Staff University of Science and Technology (Sichuan Chengdu, 610101)

[ABSTRACT] Effects of two binders, HTPB-IPDI-TPB and HTPB-HDI-trimer-DABCO, on the mechanical properties of simulated PBX pouring explosives at different curing temperatures were tested. Experimental results show that, as the curing temperature increase, mechanical properties of simulated PBX pouring explosive containing the two binders enhance. Curing agent, IPDI or HDI-trimer, has a great influence on mechanical properties of the grain. Compared with explosive containing IPDI, shear strength of HDI-trimer system increases by 50.27% at 35 ℃, 34.30% at 45 ℃, and 44.83% at 55 ℃; tensile strength of HDI-trimer system decreases by 82.66% at 35 ℃, 78.73% at 45 ℃, and 82.22% at 55 ℃; and compressive strength of HDI-trimer system increases by 54.85% at 35 ℃, 45.25% at 45 ℃, and 53.38% at 55 ℃. HDI-trimer forms a three-dimensional mesh structure to reduce the tensile strength of the grain.

[KEYWORDS] curing temperature; mechanical properties; binders; HDI-trimer; DABCO; simulated PBX pouring explosive

\* 收稿日期:2020-07-28

基金项目:国家自然科学基金委员会和中国工程物理研究院联合基金(U1330131);成都工业学院人才引进项目(2019RC010)

第一作者:马慧(1984-),女,讲师,主要从事含能环保高分子材料的研究。E-mail:mahui20032011@163.com

通信作者:刘玉存(1961-),男,教授,主要从事含能材料与火炸药的研究。E-mail:lyc2ct@sina.com

## 引言

传统的 PBX 浇注炸药需在高温条件下固化,高温固化易产生热应力<sup>[1-6]</sup>,在不改变原有配方的基础上很难实现室温固化。因此,需要调整浇注炸药固化体系配方。浇注炸药固化体系中加入的成分种类较多,其中,黏结剂对浇注炸药固化体系的固化速率及最终产物的力学性能有很大的影响<sup>[7-9]</sup>。研究黏结剂中不同组成成分及用量对体系药柱力学性能的影响,对设计、实现浇注炸药室温固化有非常重要的作用<sup>[10-14]</sup>。

本文中,对比了含端羟基聚丁二烯-异佛尔酮二异氰酸酯-三苯基铋(HTPB-IPDI-TPB)黏结剂和端羟基聚丁二烯-六甲亚甲基二异氰酸酯三聚体-亚乙基二胺(HTPB-HDI-trimer-DABCO)黏结剂的模拟浇注炸药药柱在不同固化温度下的力学性能,分析了固化温度和黏结剂配方对药柱力学性能的影响,为室温固化 PBX 浇注炸药配方优化提供基础数据。

## 1 室温固化体系药柱力学性能测试

### 1.1 材料与仪器

HTPB,工业纯,洛阳黎明化工研究设计院;IPDI、HDI-trimer,工业纯,德国拜耳股份有限公司;DABCO,分析纯,天津市光复精细化工研究所;己二酸二辛酯(DOA),中国科学院上海有机化学研究所;癸二酸二辛酯(DOS),工业纯,山东科兴化工有限责任公司;无水硫酸钠  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ,工业纯,成都联合化工试剂研究所。

Mettler Toledo AL 201-IC 型电子天平,美国;Sartorius BSA224S 分析天平,德国;BUICH V-700 型真空泵,瑞士;DESIK-SHORE A 型邵氏硬度计,德国;HH-SA 型数显恒温油浴锅,常州赛普实验仪器厂;AM 90L-H 型数显电动搅拌机,上海昂尼仪器仪表有限公司;聚四氟乙烯模具,太原仪城实验室设备有限公司;DHG303-2 恒温干燥箱,上海一恒科学仪器有限公司;GMT6140 微机控制电子万能试验机,深圳新三思材料检测有限公司。

### 1.2 试样制备及测试

模拟 PBX 浇注炸药药柱制备工艺包括以下 5 道工序:

1) 原材料脱水。制备模拟 PBX 浇注炸药药柱的原材料中如含有水分,会在固化反应时与固化剂

反应,生成脲和二氧化碳,在药柱中留下微小气孔,影响药柱的力学性能。为了尽可能地避免副反应的发生,制备药柱前,将 HTPB 在 105 °C、0.05 MPa 条件下抽真空、脱水 2 h,并密封避光保存,对炸药替代物无水硫酸钠、铝粉及其他组分在 50 ~ 55 °C 烘干处理,增塑剂采用分子筛去除水分。

在制作药柱过程中,需使用捏合机将黏结剂与炸药、铝粉等均匀捏合。但试验中使用的捏合机空隙较大,且未做防爆处理,炸药与黏结剂在捏合过程中容易发生爆炸。无水硫酸钠的粒径、形貌与炸药组分较为相似,因此,使用无水硫酸钠替代炸药组分。同时,为了避免替代物对药柱力学性能产生影响,选用现有 PBX 浇注炸药的黏结剂,用等量无水硫酸钠代替炸药组分,测试各项力学性能,将其作为标准与新配方的力学性能进行对比。

2) 黏结剂配制。按设计方案模拟 PBX 浇注炸药。称量 HTPB、固化剂(IPDI 或 HDI-trimer)、催化剂(TPB 或 DABCO)、增塑剂(DOA 或 DOS),混合并高速搅拌均匀,配制成 HTPB-LPDI-TPB 和 HTPB-HDI-trimer-DABCO 黏结剂,放置在  $(35.0 \pm 0.5)^\circ\text{C}$  烘箱中待用。

3) 稀浆配制。将铝粉加入制备好的黏结剂中,充分搅拌,使黏结剂均匀地包覆在铝粉表层。将铝粉与后期加入的炸药组分离,降低混药过程的危险性。

4) 药浆捏合。用无水硫酸钠代替炸药组分,按配方分次加入捏合机中进行搅拌,使药浆各组分充分混合,配制成具有一定黏度和流动性的药浆。

5) 药柱固化成型。将制备好的药浆浇入圆柱形的模具中(图 1),脱出气泡,放入 35 °C 的烘箱中恒温固化。待药浆固化成型后,退模取出药柱。



图 1 模拟药柱

Fig. 1 Simulated charge

在 3 种不同固化温度(35、45、55 °C)下,对含 HTPB-HDI-trimer-DABCO 黏结剂的模拟 PBX 浇注炸药药柱的力学性能(剪切强度、抗压强度、抗拉强

度)进行测试。与现在工业生产中使用的 HTPB-IPDI-TPB 黏结剂配方制成的模拟 PBX 浇注炸药药柱的力学性能进行对比。每种固化温度下,测试 5 次,取平均值。

## 2 结果与讨论

### 2.1 模拟 PBX 浇注炸药药柱的剪切强度

将以 HTPB-IPDI-TPB 作为黏结剂的模拟 PBX 浇注炸药配方简称为 M1,以 HTPB-HDI-trimer-DABCO 作为黏结剂的配方简称为 M2。M1、M2 体系不同固化温度时药柱的剪切强度如表 1、表 2 所示。

由表 1 和表 2 可知,随着固化温度的升高,M1、M2 体系药柱的剪切强度增大。固化温度从 35 °C 升高到 55 °C,M1 药柱的剪切强度增大 23.84%。其中,35 °C 升高到 45 °C,剪切强度增大了 16.99%;45 °C 升高到 55 °C,剪切强度增大了 6.85%。M2 药柱的剪切强度增大 19.36%。其中,35 °C 升高到 45 °C,剪切强度增大了 4.56%;45 °C 升高到 55 °C,剪切强度增大了 14.80%。

由此可知,固化温度对药柱的剪切强度有影响。在一定范围内,固化温度升高可以增大药柱的剪切强度,但温度对剪切强度的增大亦不是非常明显。

对 M1 体系而言,从 35 °C 升高到 45 °C,剪切强度增大了 16.99%;而从 45 °C 升高到 55 °C,仅增大 6.85%,温度增长对药柱剪切强度的影响呈现明显的下降趋势。印证了模拟结果,黏结剂的力学性能随温度升高而增大,在 45 °C 时增长明显减弱。由此可知:固化温度低于 45 °C 时,温度对药柱的力学性能影响较大;高于 45 °C 后,温度对药柱的力学性能影响明显减弱。

对比表 1 和表 2 中相同固化温度条件下 M1、M2 体系药柱的剪切强度,在 3 种不同的温度下,M2 的剪切强度均大于 M1。M2 与 M1 相比,剪切强度增大比例为:35 °C 时增大了 50.27%,45 °C 时增大了 34.30%,55 °C 时增大了 44.83%。由此可知,黏结剂配方对药柱的剪切强度有影响。在黏结剂中,当异氰酸酯与活泼氢进行固化时,随着反应的进行,异氰酸酯与活泼氢的浓度降低,体系的黏度增大,异氰酸酯与活泼氢碰撞反应的几率也减小,两者更难发生反应。温度升高使分子运动更加活跃,异氰酸酯与活泼氢碰撞概率增加,固化反应更完全。因此,温度升高,药柱剪切强度略有提升。

对比 M1 和 M2 体系,M2 体系药柱的剪切强度优于 M1,M1 和 M2 体系黏结剂配方中,不同之处为固化剂的种类及催化剂的种类和用量。由相关文献

表 1 不同固化温度时 M1 体系药柱的剪切强度

Tab. 1 Shear strength of the charge of M1 system at different curing temperatures

序号	35 °C		45 °C		55 °C	
	最大力/N	抗剪强度/MPa	最大力/N	抗剪强度/MPa	最大力/N	抗剪强度/MPa
1 <sup>#</sup>	345.00	1.098	388.15	1.235	432.25	1.376
2 <sup>#</sup>	356.70	1.135	419.70	1.336	455.55	1.450
3 <sup>#</sup>	361.30	1.150	421.45	1.341	459.05	1.461
4 <sup>#</sup>	348.95	1.111	440.50	1.402	438.90	1.397
5 <sup>#</sup>	352.99	1.124	395.80	1.260	401.20	1.277
平均值	352.99	1.124	413.12	1.315	437.39	1.392

表 2 不同固化温度时 M2 体系药柱的剪切强度

Tab. 2 Shear strength of the charge of M2 system at different curing temperatures

序号	35 °C		45 °C		55 °C	
	最大力/N	抗剪强度/MPa	最大力/N	抗剪强度/MPa	最大力/N	抗剪强度/MPa
1 <sup>#</sup>	595.30	1.895	530.90	1.690	596.35	1.898
2 <sup>#</sup>	580.70	1.848	541.70	1.724	710.90	2.263
3 <sup>#</sup>	502.00	1.598	534.25	1.701	656.85	2.091
4 <sup>#</sup>	466.00	1.483	554.75	1.766	584.95	1.862
5 <sup>#</sup>	508.45	1.619	611.80	1.947	618.30	1.968
平均值	530.49	1.689	554.68	1.766	633.47	2.016

报道及前期实验得知,催化剂的浓度变化对黏结剂力学性能的影响非常小。M1、M2 剪切强度的差异,主要由固化剂结构决定。相同  $R$  值下,固化剂 HDI-trimer 使体系的硬段含量升高,且其含有脲基,不但具有较大的内聚能,还能使体系中氢键化程度提高,故 HDI-trimer 制得的药柱剪切强度较大,而 IPDI 结构上不含有刚性的苯环,使用 IPDI 制得的药柱剪切强度较低。

## 2.2 模拟 PBX 浇注炸药药柱的抗拉强度

在 35、45、55  $^{\circ}\text{C}$  3 种固化温度条件下,对 M1、M2 体系药柱的抗拉强度进行测试,结果如表 3、表 4 所示。

由表 3 和表 4 可知,随着固化温度升高,M1、M2 体系药柱的抗拉强度增大。固化温度从 35  $^{\circ}\text{C}$  升高到 55  $^{\circ}\text{C}$ ,M1 药柱的抗拉强度增大 10.31%。其中,35  $^{\circ}\text{C}$  升高到 45  $^{\circ}\text{C}$ ,抗拉强度降低了 13.95%;45  $^{\circ}\text{C}$  升高到 55  $^{\circ}\text{C}$ ,抗拉强度增大了 24.32%。M2 药柱的抗拉强度增大 13.15%。其中,35  $^{\circ}\text{C}$  升高到 45  $^{\circ}\text{C}$ ,抗拉强度增大 5.57%;45  $^{\circ}\text{C}$  升高到 55  $^{\circ}\text{C}$ ,抗拉强度增大 7.58%。固化温度对药柱的抗拉强度有影响,在一定范围内固化温度升高可以增大药柱的抗拉强度,但温度对抗拉强度增大的影响不明显。

对比表 3 和表 4,相同固化温度条件下 M1、M2

体系药柱的抗拉强度,在 3 种不同温度下,M2 药柱的抗拉强度均小于 M1。M1 与 M2 相比,抗拉强度增大比例为:35  $^{\circ}\text{C}$  时增大 82.66%,45  $^{\circ}\text{C}$  时增大 78.73%,55  $^{\circ}\text{C}$  时增大 82.22%。由此可知,黏结剂配方对药柱的抗拉强度影响非常明显,并随着固化温度的升高影响略有减小。这是因为温度升高后反应更为彻底,体系内部软段与硬段之间的排列趋于规整。

对比 M1 和 M2 体系,M1 体系药柱的抗拉强度优于 M2。M1 和 M2 体系抗拉强度差异主要考虑为固化剂对力学性能的影响。由于 HDI-trimer 是含有三官能度的固化剂,3 个异氰酸酯基与 HTPB 中的一 OH 基团反应并生成三维网状结构。与 IPDI 形成的直链型药柱相比,三维网状结构不利于无定型链重新取向、排列,不利于微相分离,从而使伸长率降低。因此,M2 制得的药柱抗拉强度降低。

## 2.3 模拟 PBX 浇注炸药药柱的抗压强度

在 35、45、55  $^{\circ}\text{C}$  3 种固化温度条件下,M1、M2 体系药柱的抗压强度如表 5、表 6 所示。

由表 5 和表 6 可知,随着固化温度的升高,M1、M2 体系药柱的抗压强度增大。固化温度从 35  $^{\circ}\text{C}$  升高到 55  $^{\circ}\text{C}$ ,M1 药柱的抗压强度增大 6.43%。其中,35  $^{\circ}\text{C}$  升高到 45  $^{\circ}\text{C}$ ,降低 10.69%;45  $^{\circ}\text{C}$  升高到

表 3 不同固化温度下 M1 体系药柱的抗拉强度

Tab. 3 Tensile strength of the charge of M1 system at different curing temperatures

序号	35 $^{\circ}\text{C}$		45 $^{\circ}\text{C}$		55 $^{\circ}\text{C}$	
	最大力/N	抗拉强度/MPa	最大力/N	抗拉强度/MPa	最大力/N	抗拉强度/MPa
1 <sup>#</sup>	2 091.15	6.656	1 874.75	5.968	2 500.20	8.010
2 <sup>#</sup>	2 058.40	6.552	1 767.80	5.627	2 486.30	7.914
3 <sup>#</sup>	2 109.60	6.715	1 774.45	5.648	2 231.25	7.102
4 <sup>#</sup>	2 063.70	6.565	1 778.10	5.660	2 168.70	6.903
5 <sup>#</sup>	2 079.46	6.623	1 755.85	5.589	2 071.70	6.594
平均值	2 080.46	6.622	1 790.19	5.698	2 291.63	7.305

表 4 不同固化温度下 M2 体系药柱的抗拉强度

Tab. 4 Tensile strength of the charge of M2 system at different curing temperatures

序号	35 $^{\circ}\text{C}$		45 $^{\circ}\text{C}$		55 $^{\circ}\text{C}$	
	最大力/N	抗拉强度/MPa	最大力/N	抗拉强度/MPa	最大力/N	抗拉强度/MPa
1 <sup>#</sup>	364.15	1.159	383.15	1.220	423.40	1.348
2 <sup>#</sup>	368.85	1.174	378.95	1.206	403.25	1.284
3 <sup>#</sup>	357.20	1.137	400.70	1.275	400.45	1.275
4 <sup>#</sup>	362.45	1.154	386.80	1.231	404.65	1.288
5 <sup>#</sup>	351.20	1.118	354.20	1.127	408.80	1.301
平均值	360.75	1.148	380.75	1.212	408.10	1.299

表 5 不同固化温度下 M1 体系药柱的抗压强度

Tab. 5 Compressive strength of the charge of M1 system at different curing temperatures

序号	35 °C		45 °C		55 °C	
	最大力/N	抗压强度/MPa	最大力/N	抗压强度/MPa	最大力/N	抗压强度/MPa
1 <sup>#</sup>	1 567.30	4.989	2 161.60	6.881	2 799.55	8.911
2 <sup>#</sup>	2 074.55	6.603	2 055.10	6.542	2 266.75	7.215
3 <sup>#</sup>	1 766.75	5.624	2 065.38	6.574	1 859.55	5.919
4 <sup>#</sup>	2 076.90	6.611	635.60	2.025	1 775.55	5.652
5 <sup>#</sup>	2 197.25	6.994	1 729.45	5.503	1 604.25	5.107
平均值	1 936.55	6.164	1 729.43	5.505	2 061.13	6.561

表 6 不同固化温度下 M2 体系药柱的抗压强度

Tab. 6 Compressive strength of the charge of M2 system at different curing temperatures

序号	35 °C		45 °C		55 °C	
	最大力/N	抗压强度/MPa	最大力/N	抗压强度/MPa	最大力/N	抗压强度/MPa
1 <sup>#</sup>	840.65	2.676	949.55	3.023	973.70	3.099
2 <sup>#</sup>	875.60	2.787	897.80	2.858	961.45	3.060
3 <sup>#</sup>	873.30	2.780	957.70	3.048	954.80	3.039
4 <sup>#</sup>	904.40	2.879	982.05	3.126	932.05	2.967
5 <sup>#</sup>	877.10	2.792	947.35	3.016	983.25	3.130
均值	874.20	2.783	946.90	3.014	961.05	3.059

55 °C, 增大 17.13%。M2 药柱的抗压强度增大 9.92%。其中, 35 °C 升高到 45 °C, 增大 8.30%; 45 °C 升高到 55 °C, 增大 1.62%。由此可知, 固化温度对药柱的抗压强度有影响, 在一定范围内, 固化温度升高可以增大药柱的抗压强度, 但温度对抗压强度增大的影响不明显。对 M2 体系, 从 35 °C 升高到 45 °C, 抗压强度增大了 8.30%; 而从 45 °C 升高到 55 °C, 增大 1.62%; 温度增长对药柱抗压强度的影响呈现明显的下降趋势。45 °C 前, 温度对药柱力学性能影响较大; 45 °C 后, 温度对药柱力学性能影响明显减弱。

对比表 5 和表 6, 相同固化温度条件下 M1、M2 体系药柱的抗压强度, 在 3 种不同温度下, M2 药柱的抗压强度均小于 M1。M1 与 M2 相比, 抗压强度增大比例为: 35 °C 增大了 54.85%, 45 °C 增大了 45.25%, 55 °C 增大了 53.38%。由此可知, 黏结剂配方对药柱的抗压强度影响非常明显, 并随着固化温度的升高影响略有减小。

由以上论述可知, M2 体系药柱虽然能满足 35 °C 条件下 7 d 固化的要求, 但其力学性能不能满足需要。力学性能较差的原因为 HDI-trimer 形成三维网状结构, 使调整空间有限。可通过调整黏结剂的 R 值, 加入小分子扩链剂(炭黑或纳米氧化锌等)提高炸药的力学性能。

### 3 结论

1) 对以 HTPB-IPDI-TPB 或 HTPB-HDI-trimer-DABCO 为黏结剂制成的模拟 PBX 浇注炸药 M1 和 M2 药柱力学性能测试得到, 随着固化温度的升高, 两种炸药药柱的剪切强度、抗拉强度、抗压强度均增大。主要是由于温度升高后, 异氰酸酯与活泼氢的反应更为彻底, 体系内部软段与硬段之间的排列趋于规整。力学性能的决定因素主要在于硬段含量、氢键化程度、微相分离程度; 其并没有发生较大变化, 故增长幅度不明显。温度对药柱力学性能的改变不明显。

2) 固化剂对药柱的机械性能(剪切强度、抗拉强度、抗压强度)影响很大, 并随着固化温度的升高影响略有减小。M2 体系药柱的剪切强度优于 M1, 但抗拉强度、抗压强度远低于 M1。固化剂 HDI-trimer 剪切强度较好, 因 HDI-trimer 含有脲基, 具有较大的内聚能, 同时由于硬段含量的增大, 使得由 HDI-trimer 制得的药柱具有很大的硬度。HDI-trimer 抗拉强度、抗压强度较差, 由于 HDI-trimer 是含有三官能度的固化剂, 3 个异氰酸酯基与 HTPB 中的一 OH 基团反应生成三维网状结构, 不利于无定型链重新取向、有序排列, 不利于微相分离。从而使制得

药柱的伸长率和抗拉强度降低。

3) M2 体系药柱虽然能满足 35 °C 条件下 7 d 固化的要求,但其力学性能有待进一步提高。

### 参 考 文 献

- [1] FRONTINI P M, RINK M, PAVAN A. Development of polyurethane engineering thermoplastics. I. Preparation and structure [J]. Journal of Applied Polymer Science, 1993, 48(11): 2003-2022.
- [2] 赵娟, 徐洪涛, 封雪松. 黏结剂相对分子质量对浇注 PBX 固化应力的影响 [J]. 爆破器材, 2016, 45(2): 6-10.
- ZHAO J, XU H T, FENG X S. Effects of binder with different relative molecular mass on curing stresses of casting polymer bonded explosives [J]. Explosive Materials, 2016, 45(2): 6-10.
- [3] 邹鹏. 二醇扩链剂对热塑性聚氨酯性能的影响 [J]. 科技情报开发与经济, 2005, 15(14): 141-142.
- ZOU P. The influence of the diol chain-extension agent on the performance of TPU [J]. Science and Technology Information Development and Economy, 2005, 15(14): 141-142.
- [4] LI J H, HONG R Y, LI M Y, et al. Effects of ZnO nanoparticles on the mechanical and antibacterial properties of polyurethane coatings [J]. Progress in Organic Coatings, 2009, 64(4): 504-509.
- [5] 吴凯, 刘玉存, 刘仕瑞. PBX 炸药概述及其发展与前景 [J]. 山西化工, 2012, 32(2): 36-39.
- WU K, LIU Y C, LIU S R. Overview and trends of PBX explosives [J]. Shanxi Chemical Industry, 2012, 32(2): 36-39.
- [6] 陈春燕, 王晓峰, 徐洪涛, 等. 固化温度对浇注 PBX 固化应力的影响 [J]. 含能材料, 2014, 22(3): 371-375.
- CHEN C Y, WANG X F, XU H T, et al. Effects of temperature on curing stresses of casting plastic bonded explosives [J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2014, 22(3): 371-375.
- [7] 陈春燕, 王晓峰, 李巍, 等. 热固性浇注 PBX 力学行为的影响因素探讨 [J]. 爆破器材, 2014, 43(5): 6-10.
- CHEN C Y, WANG X F, LI W, et al. Influence factors of the mechanical behavior of thermoset casting plastic bonded explosive [J]. Explosive Materials, 2014, 43(5): 6-10.
- [8] 郭嘉吻, 刘玉存, 柴涛, 等. HTPB-异氰酸酯黏结剂体系的室温固化及性能研究 [J]. 爆破器材, 2015, 44(3): 7-11.
- GUO J H, LIU Y C, CHAI T, et al. A study on the HTPB-isocyanate binder system curing at room temperature and related properties [J]. Explosive Materials, 2015, 44(3): 7-11.
- [9] 周红萍, 庞海燕, 温茂萍, 等. 3 种粘结剂材料的力学性能对比研究 [J]. 材料导报, 2009, 23(12): 34-36, 52.
- ZHOU H P, PANG H Y, WEN M P, et al. Comparative studies on the mechanical properties of three kinds of binders [J]. Materials Review, 2009, 23(12): 34-36, 52.
- [10] DANIEL M A. Polyurethane binder systems for polymer bonded explosives: DSTO-GD-0492 [R]. Edinburgh, Weapons Systems Division, Australia; Defence Science and Technology Organisation, Australian Government Department of Defence, 2006:1-34.
- [11] 郑世宗. 浇铸 PBX 炸药在战斗部中的应用 [J]. 兵工学报, 1990(3): 70-76.
- [12] 轩春雷, 唐桂芳, 李欣. 浇注 PBX 药浆适用期的研究 [J]. 火炸药学报, 2005, 28(4): 18-20.
- XUAN C L, TANG G F, LI X, et al. Investigation on the pot life of casting PBX [J]. Chinese Journal of Explosives and Propellants, 2005, 28(4): 18-20.
- [13] 刘厚钧. 聚氨酯弹性体手册 [M]. 2 版. 北京: 化学工业出版社, 2012.
- [14] 黄凤军, 赵晋宏. 国外炸药装药新技术的发展 [J]. 水雷战与舰船防护, 2013, 21(2): 55-58.
- HUANG F J, ZHAO J H. Developments of new technologies for foreign explosive charge [J]. Mine Warfare and Ship Self-Defence, 2013, 21(2): 55-58.

## 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