

doi: 10.7690/bgzd.2025.12.001

近红外光谱分析技术在发射药安定性检测中的应用

徐 银, 邹 坚, 黄露婷, 马玲玲, 白一帆
(中国人民解放军 32228 部队 25 分队, 南京 211133)

摘要: 为解决传统化验方法检测发射药安定性存在的不足, 利用近红外光谱分析技术对其进行检测。基于化学计量学软件建立典型单基药和双基药的定量分析模型, 并对模型进行实际应用及验证。结果表明: 校正样品相关系数(RC)均为 0.98, 外部验证和内部验证的相对偏差均在 5%以下, 校正模型的准确性较好。与传统检测分析方法相比, 近红外光谱分析技术在分析速度、成本、环保等方面有质的提升, 可实现快速、准确、环保的检测发射药安定剂含量, 判断发射药安定性。

关键词: 近红外光谱; 发射药; 安定性

中图分类号: TJ410 **文献标志码:** A

Application of Near-infrared Spectroscopy Analysis Technology in Stability Testing of Propellants

Xu Yin, Zou Jian, Huang Luting, Ma Lingling, Bai Yifan
(No. 25 Team of No. 32228 Unit of PLA, Nanjing 211133, China)

Abstract: In order to address the shortcomings of traditional laboratory methods for detecting the stability of propellants, this study explores the use of near-infrared spectroscopy analysis technology for its detection. Establish quantitative analysis models for typical single base and double base drugs based on chemometric software, and apply and validate the models in practical situations. The results showed that the correlation coefficient (RC) of the calibration samples was 0.98, and the relative deviation between external and internal validation was below 5%. The accuracy of the calibration model was good. Compared with traditional detection and analysis methods, near-infrared spectroscopy analysis technology has a qualitative improvement in analysis speed, cost, and environmental protection, achieving rapid, accurate, and environmentally friendly detection of propellant stabilizer content and judgment of propellant stability.

Keywords: near infrared spectroscopy; propellant; stability

0 引言

发射药是弹药的重要组成部分, 为弹药的发射提供能源, 各组分含量是衡量发射药质量好坏、弹药储存安全性以及使用可靠性的重要指标^[1-2]。因发射药本身具有自行缓慢分解、水解的倾向, 在长期储存中, 这种不断的分解促使其各组分含量发生改变, 进而引起物理、化学性能逐渐发生变化, 使得发射药能量减少, 机械强度减弱, 燃烧规律性变差, 导致弹道性能遭到破坏, 安定性变差, 最后甚至可能引起自燃或自爆, 对弹药的存储和使用带来危害。为确保弹药质量的绝对可靠, 适时开展发射药质量检测成为世界各国火炸药生产单位和弹药技术保障部门工作中的重要部分, 发射药组分含量是安定性试验中监测的重要内容。

我军的火炸药生产、研制和弹药质量管理部门, 经过多年的努力探索总结出了多项发射药组分测定

方法、规范和标准, 在众多的分析测试项目中, 大部分采用经典的化学分析方法或者诸如气相色谱、维也里等仪器分析方法。这些方法的共同特点是需要将样品破坏, 或者将样品溶解在特定的溶剂中才能进行测试^[3-8]。样品的前处理过程较长、耗时较多, 单批次准备时间至少 4~8 h, 且每次只能对样品的某个表征参数进行测定, 使得发射药检测工作量大、效率低, 且不利于开展野战条件下发射药的现场机动检测, 无法满足现代化战争对弹药快速检测的需要, 制约部队战斗力的进一步提高。

近红外光谱分析技术是近年来迅速发展崛起的综合分析技术, 是通过近红外光对样品进行照射, 通过光谱的吸收, 反映出样品中 C-H、O-H、N-H、S-H 等化学键信息, 从而得出相应成分含量的先进技术。具有在几秒至几分钟内, 同时测定样品中多种成份的含量或者特征性质参数的能力^[9-11]。用近

收稿日期: 2024-10-06; 修回日期: 2024-11-06

基金项目: 陆军武器装备军内科研基金(WG2014NJ030008)

第一作者: 徐 银(1994—), 女, 安徽人, 硕士。

红外光谱进行分析时,无需对样品作任何预处理,可实现无损测量,且无需化学试剂,对样品或者环境不会造成污染;因此,与传统分析技术相比,近红外光谱分析技术具有高效、快速、成本低和环保等特点,不仅可用于实验室分析,而且也可用于现场检测^[12-15]。

探索采用近红外光谱分析技术对发射药组分进行分析的技术手段,对我军库存弹药的发射药分析方法是一种全新的突破,可为完善我军弹药质量监控体系,促进我军弹药检测技术的发展奠定基础。同时,也为野战弹药的检测、事故弹药的现场鉴定,以及火炸药的生产,乃至对其他领域中同类其他产品的检测提供了新的途径,均具有较强的应用意义,其军事效益和社会效益明显。

1 实验部分

1.1 样品的准备和定值

选取 9/7 单基发射药和双芳-3 16/1 双基发射药各 60 个不同批次,通过粉碎、筛分、称量、浸泡处理后,利用气相色谱法分析单基药二苯胺含量和双基药中定剂含量,样品化学分析值分别如表 1 和 2 所示。

表 1 单基发射药样品的化学分析值 %

序号	二苯胺	序号	二苯胺	序号	二苯胺	序号	二苯胺
1	1.49	16	1.42	31	1.27	46	1.27
2	1.52	17	1.35	32	1.27	47	1.13
3	1.41	18	1.45	33	1.15	48	1.28
4	1.36	19	1.44	34	1.30	49	1.20
5	1.45	20	1.38	35	1.16	50	1.25
6	1.46	21	1.46	36	1.26	51	1.42
7	1.38	22	1.39	37	1.24	52	1.58
8	1.28	23	1.52	38	1.30	53	1.59
9	1.32	24	1.42	39	1.34	54	1.42
10	1.33	25	1.35	40	1.22	55	1.53
11	1.27	26	1.46	41	1.38	56	1.67
12	1.53	27	1.44	42	1.40	57	1.54
13	1.42	28	1.33	43	1.28	58	1.70
14	1.38	29	1.32	44	1.33	59	1.51
15	1.29	30	1.42	45	1.37	60	1.60

表 2 双基发射药样品的化学分析值 %

序号	中定剂	序号	中定剂	序号	中定剂	序号	中定剂
1	2.33	16	2.41	31	2.26	46	1.77
2	2.36	17	2.42	32	2.29	47	1.62
3	2.40	18	2.46	33	2.13	48	1.61
4	2.23	19	2.44	34	2.23	49	1.59
5	2.26	20	2.41	35	2.28	50	1.52
6	2.36	21	2.36	36	2.23	51	1.49
7	2.31	22	2.36	37	2.22	52	1.54
8	2.37	23	2.39	38	2.23	53	1.56
9	2.44	24	2.35	39	2.23	54	1.54
10	2.41	25	2.37	40	2.30	55	1.55
11	2.31	26	2.36	41	2.29	56	1.54
12	2.46	27	2.39	42	2.32	57	1.58
13	2.41	28	2.41	43	2.19	58	1.62
14	2.49	29	2.40	44	2.14	59	1.55
15	2.42	30	2.44	45	2.14	60	1.64

1.2 样品的老化

将 6 个样品放入恒温加热仪中,90℃加热老化,控制老化时间分别为 24、48、72 h,得到 18 个不同浓度梯度的单基药二苯胺含量和双基药中定剂含量。老化后样品的化学分析值如表 3 和 4 所示。

表 3 老化后单基发射药样品的化学分析值 %

序号	二苯胺	序号	二苯胺	序号	二苯胺
1	1.24	7	1.06	13	0.90
2	1.21	8	1.12	14	0.84
3	1.14	9	1.02	15	0.80
4	1.18	10	1.00	16	0.83
5	1.10	11	0.96	17	0.78
6	1.08	12	0.88	18	0.73

表 4 老化后双基发射药样品的化学分析值 %

序号	中定剂	序号	中定剂	序号	中定剂
1	2.21	7	1.90	13	1.77
2	2.25	8	1.95	14	1.62
3	2.28	9	1.88	15	1.61
4	2.18	10	1.82	16	1.59
5	2.08	11	1.79	17	1.52
6	2.05	12	1.81	18	1.49

1.3 光谱的采集

将近红外光谱检测仪开机预热 30 min,取适量样品于直径为 36 mm 的样品池中,样品高度约为样品池高度的 2/3,轻轻摇动后用压重砝码压实,使底面均匀平整,然后在仪器上以漫反射方式采集光谱。光谱采集过程中样品杯匀速旋转,以减小由于装样及样品颗粒不均匀带来的误差。光谱分辨率为 8 nm,扫描范围为 1 300~2 600 nm,每个试样平行采集 3 次,得到的光谱集合用于建模。9/7 单基发射药及双芳-3 16/1 双基发射药的近红外光谱分别如图 1 和 2 所示。

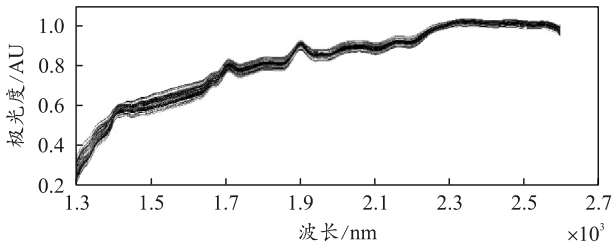


图 1 9/7 单基发射药的近红外光谱

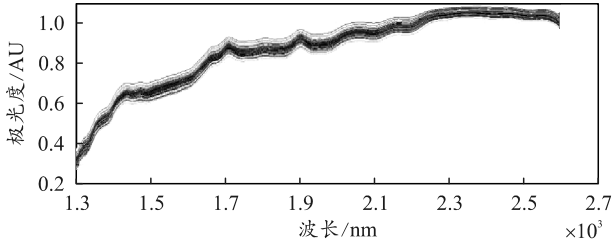


图 2 双芳-3 16/1 双基发射药的近红外光谱

1.4 模型的建立和评价

利用通用化学计量学软件分别对单基药二苯胺

含量和双基药中定剂含量建立校正模型，校正方法选择偏最小二乘法(PLS)，谱图预处理根据光谱特性进行优化选择，涉及到的谱图预处理方法包括：SG 卷积平滑、SG 卷积求导、多元散射校正，波长区间选择根据官能团性质和相关系数进行优化选择，主因子数的选择以软件推荐值为主导，适当微调，评价分析模型建立效果采用校正样品预测标准偏差(SEC)和校正样品相关系数(RC)，上述 2 项统计学指标计算方式按照 ASTM-1655 标准执行。

1.5 模型的验证

对建立的校正模型进行验证：1) 用建立的校正模型结合测得的近红外光谱分别预测出 20 个 9/7 单基发射药的二苯胺含量及 20 个双芳-3 16/1 双基发射药的中定剂含量，与色谱方法测量值进行比较，计算出相对偏差，从而验证模型的准确性。2) 重新采集 5 个用于建模样品的近红外光谱并得出单基药二苯胺含量或者双基药中定剂含量近红外预测值，与色谱方法测量值进行比较，计算出相对偏差；另外选取不参与建模的 5 个不同批次的 9/7 单基发射药及 5 个不同批次的双芳-3 16/1 双基发射药，用近红外仪器采集光谱得到安定剂含量预测值，与色谱方法测量值进行比较，计算出相对偏差，验证校正模型的可行性。

2 近红外检测关键技术研究

2.1 研究样品形态对近红外光谱稳定性的影响

1) 选取 5 个 9/7 单基发射药，对其形态不做任何处理，直接连续采集 3 次近红外光谱，并计算出 3 次光谱的标准偏差光谱以判断谱图的稳定性，结果如图 3 所示。

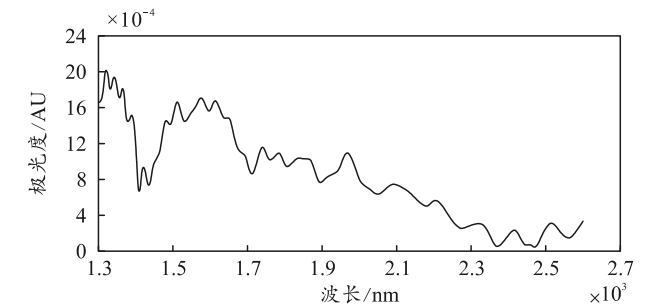


图 3 整粒样品标准偏差

由图 3 可以看出：波长在 1 300~2 000 nm 范围内的标准偏差较多都在 1 %以上。表 5 是 5 个样品连续采集 3 次光谱的最大标准偏差，变化范围在 0.001 8~0.002 1。

表 5 整粒样品最大标准偏差

序号	最大标准偏差	序号	最大标准偏差
1	0.002 1	4	0.002 0
2	0.002 2	5	0.001 8
3	0.002 5		

由于 9/7 单基发射药的药粒较大，在样品池中混合时接触不充分，彼此之间存在的缝隙较大，不利于获得稳健的光谱，所以采集得到的光谱标准偏差较大。

2) 将相同样品进行粉碎后重新连续采集 3 次近红外光谱，并计算出 3 次光谱的标准偏差光谱，结果如图 4 所示。

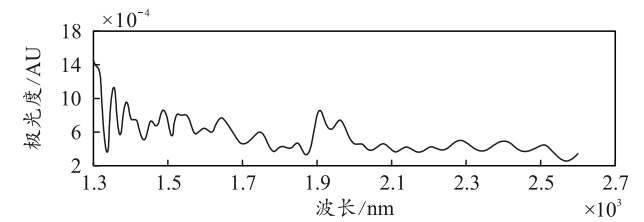


图 4 粉碎样品标准偏差

从图 4 中可以看出：与不粉碎的样品相比，粉碎后样品标准偏差在 1 %以上的波长范围大大减少，光谱的标准偏差有所降低。

表 6 是 5 个样品连续采集 3 次光谱的最大标准偏差，变化范围在 0.001 4~0.001 7。

表 6 粉碎样品最大标准偏差

序号	最大标准偏差	序号	最大标准偏差
1	0.001 5	4	0.001 5
2	0.001 6	5	0.001 7
3	0.001 4		

与不粉碎的样品相比，粉碎后样品的标准偏差有所降低。由于粉碎后的样品药粒较小，在样品池中混合时接触更充分，彼此之间存在的缝隙较小，有利于获得稳健的光谱，所以采集得到的光谱标准偏差降低。但最大标准偏差也还均在 1 %以上，光谱集合在某些波长区间波动性较大，光谱稳健性还达不到建模标准。

3) 为了进一步提高光谱的稳定性，将粉碎后的样品进一步进行筛分，筛取直径为 2~3 mm 的药粒，得到尺寸更加均匀的样品，同条件下采集光谱。图 5 是粉碎、筛分后样品的标准偏差光谱结果。

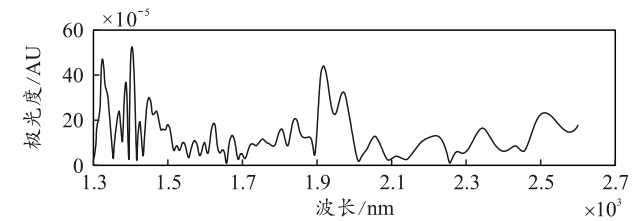


图 5 粉碎、筛分样品标准偏差

从图 5 中可以看出: 单个样品 3 次采集波长全区间的标准偏差均在 1% 以内, 与没有筛分的样品相比, 光谱的标准偏差进一步降低了。

表 7 是 5 个样品连续采集 3 次光谱的最大标准偏差, 变化范围在 0.000 57~0.000 81, 最大标准偏差均在 1% 以内, 光谱稳健性较好, 符合建立校正模型标准。

表 7 粉碎、筛分样品最大标准偏差

序号	最大标准偏差	序号	最大标准偏差
1	0.000 57	4	0.000 75
2	0.000 53	5	0.000 81
3	0.000 68		

2.2 研究发射药安定剂含量区间对校正模型的影响

1) 利用化学计量学软件对仅经过粉碎、筛分等处理的 60 个 9/7 发射药扫描光谱和相同的 60 个 9/7 发射药用气相色谱法测得的二苯胺含量建立校正模型如图 6 所示。

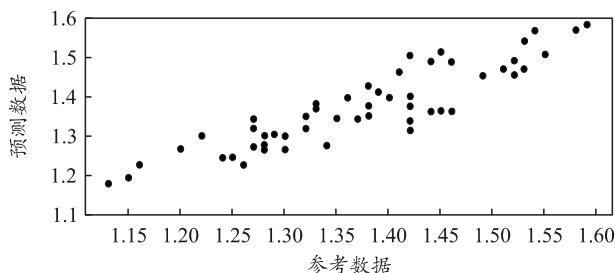


图 6 校正模型

校正模型的校正样品 SEC 和 RC 分别为 0.075、0.90, 校正标准偏差较大, 相关系数不高。校正样品定向系数 (RPDC) 为 2.17, 也较低。由于用于建模的该组含量数据最大值为 1.59%, 最小值为 1.13%, 含量区间变化范围小, 不利于建立有效的模型, 故模型的预测结果较差。

2) 根据近红外建模和分析操作规范中的样品收集影响因素之样品的浓度变化范围, 采用对选取样品中的 12 个样品进行老化处理, 老化时间为 72 h, 同条件下利用气相色谱法测得化学分析值, 近红外分析仪采集光谱, 利用化学计量学软件建立校正模型如图 7 所示。

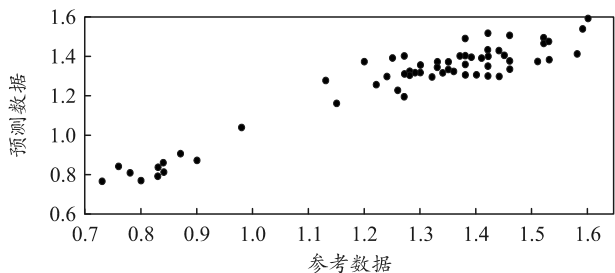


图 7 校正模型

校正模型的 SEC、RC、RPDC 分别为 0.051、0.95、3.15, 与没有加入老化样品建立的模型相比, 该模型的校正标准偏差降低, 并且相关系数和定向系数也有所增大。这是因为用于建立模型的该组样品含量区间变化范围加大, 有利于建立有效的模型, 故模型的预测准确性有所提高; 但是结果还不是很理想, 含量在 0.9%~1.1% 范围是空白状态。

3) 从只加入老化 72 h 的样品所建立的校正模型图中可以观察到: 谱图呈两极分散状态, 模型中间呈断层状态, 根据近红外建模和分析操作规范中的样品收集影响因素之样品的组分浓度均匀性, 采用控制不同的老化时间, 形成梯度浓度。老化时间分别为 24、48、72 h, 样品数均为 6 个, 同条件下利用气相色谱法测得分析值, 近红外分析仪采集光谱, 利用化学计量学软件建立校正模型如图 8 所示。

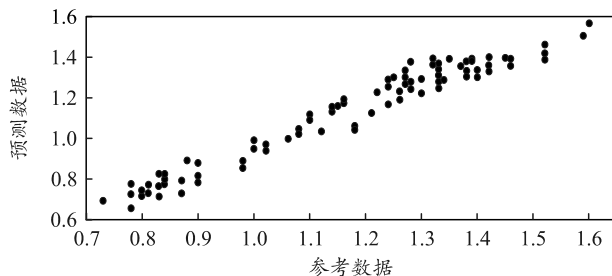


图 8 单基药校正模型

可以观察到: 模型数据呈连续分散, 且 SEC 为 0.049, RC 为 0.98, RPDC 为 4.82。与仅加入老化 72 h 的样品所建立的校正模型相比, 该模型的校正标准偏差降低了, 并且相关系数和定向系数也增大了。可以推测, 模型的准确性也会大大提高。

同时, 选取其中 56 张图谱作为外部验证, 外部验证-预测结果如图 9 所示。

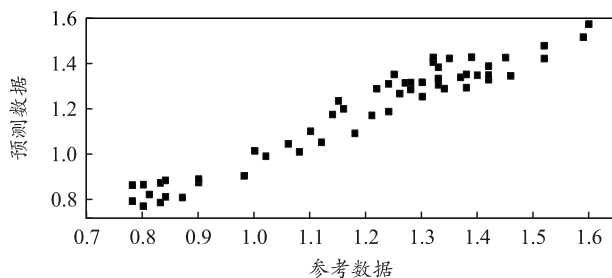


图 9 外部验证-预测结果

从图 9 中可以看出: 外部验证的验证样品 SEV、RV 及 RPDV 分别是 0.056、0.970、4.130, 证明了校正模型的准确性较高。

结合上面的探究结果, 采用同样梯度老化的方法建立双芳-3 16/1 双基发射药的校正模型, 结果如图 10 所示。

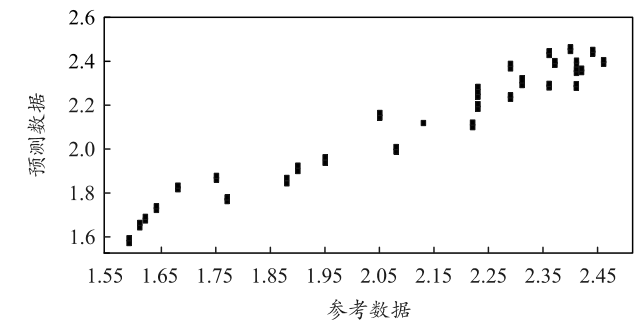


图 10 双基药校正模型

从图 10 中可以看出：模型的 SEC 为 0.052，RC 为 0.98，RPDC 为 4.65。

同时，选取其中 30 张图谱作为外部验证，外部验证-预测结果如图 11 所示。

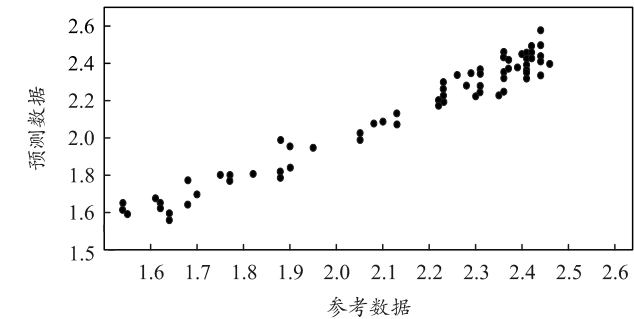


图 11 外部验证-预测结果

从图 11 中可以看出：外部验证的验证样品 SEV、RV 及 RPDV 分别是 0.059、0.970、4.210，证明了校正模型的准确性较高。

2.3 典型单基、双基发射药校正模型验证

为了验证校正模型的准确性、稳定性及可行性，采用内部验证和外部验证 2 种方式。

2.3.1 内部验证

用建立的校正模型并结合测得的近红外光谱分别预测出 20 个 9/7 单基发射药的二苯胺含量和 20 个双芳-3 16/1 双基发射药的中定剂含量，与色谱方法测量值进行比较，计算出相对偏差，其中相对偏差=(预测值-真实值)/真实值。相对偏差值分别如表 8 和 9 所示。从表中可以看出：相对偏差均在 5% 以内，说明模型的准确性较高。

2.3.2 外部验证

随机选取 9/7 单基发射药和双芳-3 16/1 双基发射药用于建模样品集中各 5 个发射药重新采集光谱，分别用其校正模型得出预测值并与气相色谱法的分析值计算相对偏差。相对偏差值分别如表 10 和 11 所示。

表 8 单基发射药内部二苯胺验证的相对偏差

序号	真实值	预测值	偏差/%
1	1.38	1.37	0.72
2	1.28	1.30	1.56
3	1.32	1.35	2.27
4	1.33	1.30	2.26
5	1.46	1.42	2.74
6	1.39	1.42	2.16
7	1.52	1.47	3.29
8	1.42	1.38	2.82
9	1.35	1.40	3.70
10	1.46	1.42	2.74
11	1.44	1.46	1.39
12	1.33	1.30	2.26
13	1.32	1.35	2.27
14	1.42	1.39	2.11
15	1.24	1.21	2.42
16	1.21	1.18	2.48
17	1.06	1.05	0.94
18	1.12	1.08	3.57
19	0.90	0.93	3.33
20	0.84	0.87	3.57

表 9 双基发射药内部二苯胺验证的相对偏差

序号	真实值	预测值	偏差/%
1	2.33	2.43	4.29
2	2.36	2.30	2.54
3	2.40	2.49	3.75
4	2.23	2.28	2.24
5	2.26	2.20	2.65
6	2.36	2.47	4.66
7	2.31	2.25	2.60
8	2.37	2.30	2.95
9	2.44	2.49	2.05
10	2.41	2.50	3.73
11	2.31	2.37	2.60
12	2.46	2.40	2.44
13	2.41	2.45	1.66
14	2.49	2.42	2.81
15	2.21	2.29	3.62
16	2.25	2.31	2.67
17	1.90	1.87	1.58
18	1.95	1.88	3.59
19	1.77	1.71	3.39
20	1.62	1.65	1.85

表 10 单基发射药外部二苯胺验证的相对偏差

序号(参与建模样品)	真实值	预测值	偏差/%
1	1.49	1.44	3.36
2	1.52	1.55	1.97
3	1.38	1.41	2.17
4	1.60	1.62	1.33
5	1.08	1.12	3.43

表 11 双基发射药外部二苯胺验证的相对偏差

序号(参与建模样品)	真实值	预测值	偏差/%
1	2.41	2.49	3.32
2	2.42	2.36	2.48
3	2.46	2.38	3.25
4	1.88	1.93	2.66
5	1.49	1.43	4.03

另外选取不参与建模的 5 个不同批次的 9/7 单基发射药及 5 个不同批次的双芳-3 16/1 双基发射药，采集光谱分别利用其校正模型得到安定剂含量预测值，与色谱方法测量值进行比较，计算出相对偏差如表 12 和 13 所示。

表 12 单基发射药外部二苯胺验证的相对偏差

序号(参与建模样品)	真实值	预测值	偏差/%
1	1.70	1.68	1.17
2	1.62	1.58	2.47
3	1.51	1.54	1.99
4	1.91	1.83	4.19
5	1.46	1.50	1.88

表 13 双基发射药外部二苯胺验证的相对偏差

序号(参与建模样品)	真实值	预测值	偏差/%
1	2.43	2.50	2.88
2	2.25	2.19	2.93
3	2.38	2.45	2.94
4	2.19	2.29	4.57
5	2.21	2.26	2.23

从表 12 和 13 中可以看出: 外部验证的相对偏差均在 5% 以内, 说明模型的可行性较好。

3 结束语

1) 样品颗粒大小、扫描采集样品面均匀性和平整性对近红外光谱的一致性有影响, 颗粒大小均匀, 扫描采集样品面均匀一致, 光谱的稳定性越好。实验论证样品颗粒在 2~5 mm, 样池装入样品时轻晃摇匀, 利用配置砝码下压 3 mm 后样品量仍超过 2/3 时; 采集光谱的标准偏差在 1‰ 以下, 光谱的稳定性较好。

2) 安定剂含量区间大小以及含量梯度均匀性对建立校正模型的准确性有影响, 含量区间(包含常规分析含量范围)越大, 含量梯度越均匀, 校正模型越准确。建立的 9/7 单基发射药校正模型的二苯胺含量区间为 0.73%~1.60%, 含量梯度均匀分布, 校正模型的 SEC 为 0.049, RC 为 0.98, RPDC 为 4.82, 双芳-3 16/1 双基发射药校正模型的中定剂含量区间为 1.52%~2.49%, 含量梯度均匀分布, 校正模型的 SEC 为 0.052, RC 为 0.98, RPDC 为 4.65。外部验证和内部验证的相对偏差均在 5% 以下, 校正模型的准确性较好。

3) 单基发射药安定剂二苯胺和双基发射药中定剂的含量在建立准确校正模型的基础上, 可以利用近红外光谱预测其值, 即近红外光谱法测定发射药安定剂含量可行。笔者随机选取了典型的单基发射药和典型的双基发射药各一种(9/7 和双芳-3 16/1) 建立校正模型, 各随机选取 5 个不同批次未知含量的相同种类的发射药作为验证样品扫描近红外光谱预测其安定剂含量值, 同步利用参考方法气相色谱法测得其安定剂含量, 误差均在 5% 以下, 预测值有效, 说明利用近红外光谱法测定发射药安定剂组

分含量方法可行。

4) 与传统分析技术相比, 近红外光谱分析技术具有速度快、成本低和环保等特点。若将该检测方法推广和使用, 将减少大量检测所需要的人力、物力、财力和时间, 并实现到后方仓库、演训场和野战仓库等前沿现场对发射药安定性进行快速准确判断。

参考文献:

- [1] 杨慧群, 王泽山, 魏晓安. 废旧单基药爆轰性能的实验研究[J]. 火炸药学报, 2005, 28(2): 32-34.
- [2] 彭祥龙, 徐贺, 范佃安, 等. 弹药储存安全性及可靠性分析[J]. 时代人物, 2020(26): 280.
- [3] 周帅, 邓国栋, 王志强, 等. 近红外光谱法快速检测单基发药中的二苯胺含量[J]. 火炸药学报, 2016, 39(3): 95-100.
- [4] 杨丽. 发射药安定性试验方法[J]. 山西化工, 2010, 30(5): 33-35.
- [5] 牛加新, 孙贵之, 张余清, 等. 双安定剂发射药化学安定性及安定剂作用机理[J]. 含能材料, 2012, 20(5): 614-617.
- [6] 俞朝晖, 张余清, 李隆瑞. 硝基胍发射药化学安定性的气相色谱测定方法[J]. 色谱, 1999, 17(2): 219-220.
- [7] 张昊, 彭松, 庞爱民, 等. NEPE 推进剂力学性能与化学安定性关联老化行为及机理[J]. 推进技术, 2007, 28(3): 327-332.
- [8] 姜志保, 郑波, 王韶光. 发射药化学安定性检测方法研究[J]. 测试技术学报, 2019, 33(4): 361-364.
- [9] 徐广通, 袁洪福, 陆婉珍. 现代近红外光谱技术及应用进展[J]. 光谱学与光谱分析, 2000, 20(2): 134-142.
- [10] 高荣强, 范世福. 现代近红外光谱分析技术的原理及应用[J]. 分析仪器, 2002(3): 9-12.
- [11] 尼珍, 胡昌勤, 冯芳. 近红外光谱分析中光谱预处理方法的作用及其发展[J]. 药物分析杂志, 2008, 28(5): 824-829.
- [12] 王多加, 周向阳, 金同铭, 等. 近红外光谱检测技术在农业和食品分析上的应用[J]. 光谱学与光谱分析, 2004, 24(4): 447-450.
- [13] 刘锡朋, 汪炼, 王国英, 等. 热脱水纤维素硝化脂含水量近红外在线自动检测[J]. 兵工自动化, 2010, 29(6): 85-86, 96.
- [14] 张建平, 谢雯燕, 束茹欣, 等. 烟草化学成分的近红外快速定量分析研究[J]. 烟草科技, 1999(3): 37-38.
- [15] 彭玉魁, 张建新, 何绪生, 等. 土壤水分、有机质和总氮含量的近红外光谱分析研究[J]. 土壤学报, 1998, 35(4): 553-559.