文章编号：1003-1480（2025）05-0029-08

# 直列式爆炸箔起爆及点火技术标准发展综述

韩克华[1]，简昊天[2,3]，褚恩义[1]，朱 朋[3]，吴琴钟[1]，杨 康[1]，郭 凯[1]，王丽萍[1]

（1. 陕西应用物理化学研究所，陕西 西安，710061； 2. 中国航天科技集团有限公司第四研究院第四十一研究所，陕西 西安，710025； 3. 南京理工大学化学与化工学院，江苏 南京，210094）

**摘 要：**针对直列式爆炸箔起爆及点火技术国内外相关标准的发展及梳理和对比分析需求，本文主要针对电子安全与解除保险装置、爆炸箔起爆器和直列式许用含能药剂 3 个方面，综述直列式爆炸箔起爆与点火系统国内外标准发展现状，总结梳理相关标准的制定、修订及变更情况，对比分析相关指标变化情况，展望标准的发展方向及需求，为固化直列式爆炸箔起爆及点火技术成果、促进直列式爆炸箔新技术应用和保障武器装备性能、建立直列式爆炸箔起爆及点火技术标准体系提供参考。

**关键词：**直列式起爆及点火序列；电子安全与解除保险装置（ESAD）；爆炸箔起爆器（EFI）；军用标准

**中图分类号：**TJ450.3 **文献标识码：**A **DOI：**10.3969/j.issn.1003-1480.2025.05.003

## Development and Comparative Analysis of Domestic and International Standards for In-Line Exploding Foil Initiation and Ignition Technologies

HAN Ke-hua[1], JIAN Hao-tian[2,3], CHU En-yi[1], ZHU Peng[3], WU Qin-zhong[1], YANG Kang[1], GUO Kai[1], WANG Li-ping[1]

（1. Shaanxi Applied Physics and Chemistry Research Institute, Xi'an,710061；2. The Fourth Institute of the Fourth Academy of China Aerospace Science and Industry, Xi'an, 710025；3. School of Chemistry and Chemical Engineering，Nanjing University of Science and Technology, Nanjing, 210094）

**Abstract：**In response to the need for the development, organization, and comparative analysis of domestic and international standards related to in-line exploding foil initiation and ignition technology, this paper focuses on three key aspects: electronic safety and arming devices, exploding foil initiators, and in-line permitted energetic materials. It reviews the current status of domestic and international standards for in-line exploding foil initiation and ignition systems, summarizes the formulation, revision, and updates of relevant standards, conducts a comparative analysis of changes in related technical indicators, and prospects the future development trends and requirements of these standards. The study aims to provide a reference for consolidating the technological achievements of in-line exploding foil initiation and ignition, promoting the application of new in-line exploding foil technologies, ensuring the performance of weapon systems, and establishing a comprehensive standard system for in-line exploding foil initiation and ignition technology.

**Key words：**In-line initiation and ignition train；Electronic safety and arming devices (ESADs)；Exploding foil initiators (EFIs)；Military standard

直列式爆炸箔起爆及点火系统主要由电子安全与解除保险装置（Electronic safe and arm device, ESAD）和爆炸箔起爆器（Exploding foil initiator, EFI）组成。其工作原理为：在窄脉冲强电流（峰值电压 kV 级、峰值电流 kA 级、作用时间小于μs 级、电流上升速率 $di/dt \geqslant 10^{10}\ A \cdot s^{-1}$）激励下，爆炸箔发生电爆炸，

收稿日期：2025-03-07

作者简介：韩克华（1981-），男，研究员，主要从事直列式爆炸箔起爆和点火技术、高新火工品技术研究。

通讯作者：简昊天（1997-），男，博士，主要从事直列式爆炸箔起爆和点火技术研究。

基金项目：国家技术基础项目（JZX7J202311BZ003000）。

引用本文：韩克华，简昊天，褚恩义，等. 直列式爆炸箔起爆及点火技术标准发展综述[J]. 火工品, 2025(5): 29-36.

产生高温高压等离子体，在加速膛约束下剪切并驱动飞片冲击直列式许用钝感含能药剂，实现安全可靠的起爆或点火输出。直列式爆炸箔起爆及点火系统具备优异的抗静电、抗射频、抗杂散电流能力，能够在复杂电磁环境下稳定工作，显著提升武器系统的安全性与可靠性。同时，该技术还具有可小型化与信息化集成、可执行多功能多任务的优点，已成为实现新一代武器装备直列式安全起爆与点火的重要途径[1-3]。

为保障该技术的规范化研制与工程化应用，亟需建立科学、完整、协调的标准体系。依据系统构成，相关标准主要涵盖 3 大核心领域：（1）ESAD 控制模块；（2）基于爆炸箔的 EFI 及冲击片发火管；（3）直列式许用含能药剂。按标准类型划分，可进一步归为 6 大类[4]：通用基础标准（如术语符号、尺寸系列和产品型谱）、产品设计、鉴定与通用要求类标准、试验及鉴定方法类标准、具体型号产品规范、原材料与专用零部件标准，以及装配、生产、包装、运输与贮存规范。伊若等[5]曾对国内外直列式爆炸序列标准进行对比分析，指出了当时国内在设计、生产、试验与验收环节的标准缺失与修订需求。近年来，随着直列式爆炸箔技术在国内的快速发展与广泛应用，相关标准已逐步制定、修订和完善。然而，针对该技术领域国内外标准的整体发展脉络、演进趋势及系统性对比分析仍较为缺乏。

为此，本文聚焦电子安全与解除保险装置、爆炸箔起爆器及直列式许用含能药剂 3 个关键技术方向，系统梳理国内外相关标准的发展现状，总结其制定、修订与变更历程，对比关键性能指标与技术要求的差异，分析不足并展望未来，为固化技术成果、推动新技术应用、保障装备性能稳定及构建科学合理的直列式爆炸箔起爆与点火技术标准体系提供参考与支撑。

## 1 直列式起爆及点火技术国内外标准发展分析

### 1.1 国外标准进展及分析

通过长期跟踪与调研，梳理了直列式爆炸箔起爆及点火系统相关的国外技术标准，如表 1 所示。

**表 1 国外直列式爆炸箔起爆及点火技术标准分类与明细**
**Tab.1 Classification and details of international standards for in - line exploding foil initiation and ignition technologies**

| 序号 | 类别 | 标准号 | 标准名称 | 国别 |
|---|---|---|---|---|
| 1 | ESAD | MIL-STD-331D[6] | 引信、点火安全装置及其他相关部件的环境与性能试验 | 美军标 |
| 2 | | MIL-STD-1316F[7] | 引信设计安全准则 | 美军标 |
| 3 | | MIT-STD-1901A[8] | 弹药、火箭和导弹发动机点火系统设计安全准则 | 美军标 |
| 4 | EFI | MIL-STD-1512[9] | 电爆炸子系统（电起爆型）设计要求与试验方法 | 美军标 |
| 5 | | MIL-STD-1592[10] | 飞行器发动机模型构造与检验 | 美军标 |
| 6 | | MIL-DTL-23659F[11] | 电起爆器通用设计规范 | 美军标 |
| 7 | | MIL-HDBK-83578[12] | 航天器用爆炸系统与装置设计准则 | 美军标 |
| 8 | | AIAA S-113A-2016[13] | 航天及发射运载器用爆炸系统与装置设计准则 | 美国航天标准 |
| 9 | | AOP-43[14] | 电爆炸装置评估与试验方法 | 北约标准 |
| 10 | | STANAG 4560[15] | 电爆炸装置评估与表征方法 | 北约标准 |
| 11 | | WD/ISO 14300-2[16] | 空间系统——项目管理 | 国际标准 |
| 12 | 直列式许用含能药剂 | MIL-STD-1751A[17] | 爆炸物（高能炸药、推进剂和烟火剂）资格鉴定的安全与性能试验 | 美军标 |
| 13 | | MIL-E-82903[18] | 爆炸物 HNS-IV 和 HNS-V | 美军标 |
| 14 | | MIL-P-46994B[19] | 硼/硝酸钾颗粒 | 美军标 |
| 15 | | MIL-B-51092 [20] | 无定型硼粉 | 美军标 |

由表 1 可见，公开可查的国外直列式爆炸箔起爆及点火系统相关标准共 15 项，其中美军标 11 项（占比约 73%），美国航天标准 1 项，北约标准 2 项，国际标准 1 项。按技术领域划分，涉及 ESAD 的标准 3 项，EFI 相关标准 8 项，直列式许用含能药剂标准 4 项。从标准类型看，设计规范类 7 项，试验与方法类 8 项。

#### 1.1.1 ESAD 相关标准

与 ESAD 相关的 3 项标准中，MIL-STD-1316F 引信设计安全准[7]则是核心标准。该标准最初于 1967 年由美国海军发布（MIL-STD-1316 NAVY），2017 年修订为 F 版，适用范围扩展至海、陆、空三军。修订版新增了大量的新内容，其中引用了多项北约标准化协议（如 STANAG 4157、STANAG 4170、AOP-7 等）、联合武器试验程序以及新型的国防部标准与海军武器规范，系统性地提升了引信安全设计要求，并明确规定了直列式起爆序列中可使用的含能药剂。

MIL-STD-1901A 弹药、火箭和导弹发动机点火系统设计安全准则（2002 年版）[8]替代了 1992 年旧版，适用于弹药、发射药等武器点火系统的设计安全标准。该标准适用于直列式点火器提出了 500 V 安全电压试验以及用于测试发火装置的最大允许电感和电烤爆试验的要求。此外，标准明确规定传火序列中火药感度不得高于硼/硝酸钾（B/$KNO_3$）的感度水平，为点火药的选择提供了基准。

1.1.2 EFI 相关标准

在 EFI 领域，MIL-DTL-23659（A~F）系列标准 电起爆器通用设计规范[11]是最具代表性的技术规范。该标准自 1972 年 A 版发布以来，历经多次修订，至 2010 年形成 F 版。其中，2003 年 D 版首次在附录中增加了爆炸箔起爆器（EFI）的鉴定要求；2007 年的 E 版补充了回路电感、桥区电阻等指标要求；2010 年 F 版将附录 A 名称由“爆炸箔起爆器”更新为“直列式起爆器”，并增加了点火技术要求及“试验后密封完整性”等内容。值得注意的是，尽管标准不断演进，其关于 EFI 的发火电容（0.1 μF ±20%）和系统等效电感（15~35 nH）的要求保持稳定。MIL-DTL-23659F 附录 A 对直列式起爆器的适用范围、试验程序、设备要求及技术指标进行了详细规定，是国内研究与应用参考最广泛的美军标之一。

MIL-HDBK-83578 航天器用爆炸系统与装置设计准则[12]明确提出，EFI 的发火电压须大于 500 V，且电子安全与解除保险装置（ESAD）的工作电压应高于 EFI 全发火电压的 20%，以确保系统可靠性。

AIAA S-113A-2016 航天及发射运载器用爆炸系统与装置设计准则[13] 由美国航空航天学会于 2016 年发布，规定了爆炸箔火工品的通用设计、鉴定要求及试验与评估方法，但未针对直列式系统提出特殊要求。

北约标准 STANAG 4560 电爆炸装置评估与表征方法[15]（2006 年发布）系统规定了 EFI 的性能鉴定评估方法和程序，重点评估其电特性、机械设计合理性、输出性能和对有害使用环境的耐受性，以协助评估 EFI 的安全性和适用性。其新增的试验项目包括：

（1）最大不损坏电流：确定在电磁辐射等外部效应下导致 EFI 故障的最小直流电流，用于评估其射频敏感性；

（2）最大允许电感度：确定 EFI 的电感度阈值，用于判断其是否适用于非隔断爆炸序列，要求此类起爆器不能被低于 500 V 的电压意外激发；

（3）电烤爆试验：要求 EFI 在直流与交流电烤爆条件下不发生功能性爆炸；

（4）高发火电压试验：在达到发火系统能力极限或设计电压 150%（取较低值）时，EFI 仍应满足功能要求；

（5）可靠性要求：明确 ESAD 工作电压不低于 EFI 全发火电压加 100 V。

AOP-43[14] 是 STANAG 4560[15]的具体实施指南，其附件 D 详细规定了 EFI 鉴定试验的具体实施方法。该标准要求最大不损坏电流试验施加持续时间远大于 1 min 的直流刺激，以确定导致 EFI 损坏的最小直流电流（故障阈值），试验后可通过发火性能测试或观测桥区外观与电阻参数判断是否损坏，其要求与 MIL-DTL-23659[11]（A~F）附录 A 基本一致。其余有关 EFI 的标准[13-16]均为通用型的相关试验要求和方法。

1.1.3 直列式许用含能药剂标准

表 1 中涉及直列式许用含能药剂的标准共 4 项，主要针对 HNS-IV 和硼/硝酸钾（BPN）点火药的设计要求和鉴定方法。MIL-STD-1316F[7]和 MIL-STD-1901A[8]均规定，直列式序列所用含能药剂不得通过研磨、重结晶、改变密度或添加其他材料等方式提高感度。药剂需通过 MIL-STD-1751A 爆炸物（高能炸药、推进剂和烟火剂）资格鉴定的安全与性能试验[17]的鉴定试验，或满足 OD44811 [8]“传爆药合格要求”及“热桥丝点火试验”，也可选用在感度、稳定性与老化性能上不低于 BPN 的含能药剂。

高纯、超细 HNS-IV 是 MIL-STD-1316[7]规定的直列式传爆序列许用传爆药，其技术要求由 MIL-E-82903 爆炸物 HNS-IV 和 HNS-V[18]规范。该标准于 1994 年发布，取代 WS 32972 A[18]，规定 HNS-IV 为超细颗粒，比表面积为 5~25 $m^2 \cdot g^{-1}$，压装药柱密度为（1.570±0.005）$g \cdot cm^{-3}$。2017 年 MIL-STD-1316F 修订时，新增 RSI-007（WS35173 爆炸物 RSI-007）[7]为许用传爆药，但规定单元最大使用量限制为 3 g。

BPN 是 MIL-STD-1901A[8]中唯一许可的直列式点火药，其他点火药需证明其安全性不低于 BPN。MIL-P-46994B 硼/硝酸钾颗粒[19]（含 4 号修订案）是 BPN 的军用规范，自 1964 年首次发布以来，历经多次修订。该规范根据药粒形状将 BPN 分为 9 类，每类按尺寸划分级别，并对各类型号的物理性能、弹道

性能及配方作出详细规定。主要成分要求如下：无定形硼粉需符合 MIL-B-51092[20]，硼含量 90%~92%，最大粒径≤1.5 μm；硝酸钾需符合 MIL-P-156 硝酸钾[21]，最大粒径≤15 μm；混药过程应使用无水溶剂在研磨型搅拌器中均匀混合。

### 1.2 国内标准进展及分析

针对直列式起爆及点火技术，目前国内现行主要标准具体如表 2 所示。

表 2 直列式爆炸箔起爆及点火技术国内相关标准

Tab.2 Domestic standards for in-line exploding foil initiation and ignition technologies

| 序号 | 类别 | 标准号 | 标准名称 |
|---|---|---|---|
| 1 | ESAD | GJB 373B-2019[22] | 引信安全性设计准则 |
| 2 | | GJB 573B-2020[23] | 引信及引信零部件环境与性能试验方法 |
| 3 | | GJB 7073-2010[24] | 引信电子安全与解除安保装置电磁环境与性能实验方法 |
| 4 | EFI | GJB 344A-2020[25] | 钝感电起爆器通用规范 |
| 5 | | GJB 345A-2019[26] | 引信用电起爆爆炸元件鉴定试验 |
| 6 | | GJB 736.28-2022[27] | 火工品试验方法 第 28 部分：电烤爆试验 |
| 7 | | GJB 736.31-2023[28] | 火工品试验方法 第 31 部分：B 类钝感电起爆器 1A1min 最大不损坏电流试验 |
| 8 | | GJB 1307A-2004[29] | 航天火工装置通用规范 |
| 9 | | GJB 1579-1993[30] | 电起爆器的电爆分系统通用规范 |
| 10 | | GJB 2865A-2020[31] | 火箭和导弹固体发动机点火系统安全性设计准则 |
| 11 | | GJB 4377-2002 [32] | 弹药、导弹用火工品安全性要求 |
| 12 | | GJB 11687-2024[33] | 冲击片雷管规范 |
| 13 | | GJB 11688-2024[34] | 爆炸箔起爆器规范 |
| 14 | | GB/T 40542-2021[35] | 航天火工系统及装置设计要求 |
| 15 | | WJ 20492-2018[36] | 爆炸箔起爆器 75V、500V 电安全性试验方法 |
| 16 | | WJ 20493-2018[37] | 爆炸箔起爆器发火试验方法 |
| 17 | | WJ 20494-2018[38] | 钝感电起爆器热烤爆试验方法 |
| 18 | 直列式许用含能药剂 | GJB 297B-2020[39] | 钝化黑索今规范 |
| 19 | | GJB 737 -1993[40] | 火工品药剂试验方法 |
| 20 | | GJB 2178A-2020[41] | 传爆药安全性试验方法 |
| 21 | | GJB 4165-2001[42] | 引信传爆药通用规范 |
| 22 | | GJB 8139-2013[43] | 超细六硝基芪炸药规范 |
| 23 | | WJ 2497-1997[44] | 硼/硝酸钾点火药规范 |

由表 2 可见，我国现行直列式爆炸箔起爆及点火系统相关标准共计 23 项，其中涉及 ESAD 的 3 项，EFI 相关标准 14 项，直列式许用含能药剂标准 6 项。从标准类型看，设计规范类 13 项，试验与方法类 10 项。

#### 1.2.1 ESAD 相关标准

在 ESAD 领域，GJB 373B-2019 引信安全性设计准则[22]是核心标准。该标准前身为 1987 年发布的 GJB 373-1987，历经两次修订，最新版与美军标 MIL-STD-1316F[7]相对应。新版标准结合爆炸箔起爆器、半导体桥火工品及激光火工品等新技术，新增“隔离装置”“解除隔离”等术语定义，并修订了“解除保险”“起爆器”等概念。同时，增加了非隔离型爆炸序列控制、电爆装置不发火阈值安全裕度、引信许用导爆/传爆药清单以及安全控制逻辑装置的使用要求等内容。标准中，“隔离装置”指引信安全与解除保险装置中用于隔断作用能量（如爆轰能、电能或光能）的传输通路，并能在发射后预定时机传递作用能量的机构、电路或其组合，例如机械安全系统中的滑块或转子，电子安全系统中的动态能量开关与高压变压器组合。“解除隔离”则定义为由隔断状态向导通状态转换的过程。

GJB 2865A-2020 火箭和导弹固体发动机点火系统安全性设计准则[31]于 2020 年发布，其前身为 1997 年等效采用 MIL-STD-1901（1992 版）制定的标准。2015 年启动修订，采用重新起草法修改采用 MIL-STD- 1901A[8]（2002 版）。此次修订新增了点火系统危险性状态分析、“点火保险装置性能”的一般要求、制造与试验过程中的解除/恢复保险要求，以及点火系统与保险装置的综合安全性设计内容。标准明确要求电起爆器应满足爆炸箔起爆器的鉴定要求，且不能被低于 500 V 的任何电压起爆。

#### 1.2.2 EFI 相关标准

GJB 344A-2020 钝感电起爆器通用规范[25]是 EFI 领域的核心标准。其前身为 1987 年发布的 GJB 344-1987，对标 MIL-DTL-23659C，但未涵盖爆炸箔火工品。为适应技术发展，2016 年立项修订，新版标准对标 MIL-DTL-23659F[11]，于 2020 年实施。标准明确了 A 类与 B 类钝感电起爆器的分类：A 类指在施加≥1 A、功率≥1 W 的直流电流时，5 min 内不发火（简称“1A1W5min”）；B 类指不被低于 500 V 的任何电压激发。标准删除了原版中的设计内容，增加了爆炸箔起爆器的相关内容，并将直列式起爆器的范围、要求、鉴定检验及方法列入附录 A，作为规范性附录。

GB/T 40542-2021 航天火工系统及装置设计要求[35]对 B 类钝感电起爆器的安全性与可靠性指标进行了量化规定：工作电压为最小全发火电压的 1.2 倍；经 1 A 直流电流 1 min、75 V 专用发火电路放电后性能应满足要求；在 500 V 专用发火电路、28 V 直流或 380 V 交流电作用后无爆轰性输出。

随着 EFI 技术的发展，相关的试验标准逐步完善：

GJB 736.28-2022 火工品试验方法 第 28 部分：电烤爆试验[27]：适用于安全电压≥500 V 的 B 类起爆

器直流电烤爆和交流电烤爆试验，考核其在 28 V 直流与 380 V 交流电下的用电安全性；GJB 736.31-2023 火工品试验方法 第 31 部分：B 类钝感电起爆器 1A1min 最大不损坏电流试验[28]：用于 B 类起爆器 1 A1 min 不发火电流试验或最大不损坏电流试验，评估抗直流能力和射频敏感性的可靠性以及潜在的安全性危险；WJ 20492-2018 爆炸箔起爆器 75V、500V 电安全性试验方法[36]：规定 75 V（可靠性）与 500 V（安全性）电性能试验方法；WJ 20493-2018 爆炸箔起爆器发火试验方法[37]：规范爆炸箔起爆器发火试验的仪器和设备、试验条件及试验要求、试验准备、试验程序、试验结果说明、注意事项以及爆炸箔起爆器发火试验的专用发火装置的组成、结构参数要求和输出性能标定方法；WJ 20494-2018 钝感电起爆器热烤爆试验方法[38]：规定钝感电起爆器的热烤爆试验方法，在 3.3 ℃·$h^{-1}$ 温升条件下的响应状态、反应时环境温度及耐受时间条件下，钝感电起爆器装填的含能材料发生的反应类型（爆炸、燃烧还是热分解反应），用于评估钝感火工品在慢速热烤爆条件下的安全性。

此外，针对 GJB 2002A-2019 电雷管通用规范[45]不适用于冲击片雷管的制造与验收等问题，基于 GJB 344A-2020[25]，新制定了 GJB 11687- 2024 冲击片雷管规范[33]，适用于战斗部用直列式引信安全起爆控制装置。GJB 11688-2025 爆炸箔起爆器规范[34]同样基于 GJB 344A-2020[25]，面向航天火工装置，满足火箭发动机、宇航火工装置及点火做功类产品的安全需求。

1.2.3 直列式许用含能药剂标准

根据 GJB 373B-2019[22]和 GJB 2865A-2020[31]规定，直列式许用含能药剂需通过 GJB 2178A-2020 传爆药安全性试验方法[41]的安全性鉴定试验。典型许用药剂包括：钝黑-5（DH-5C）、聚黑-6（JH-6C）、聚黑-14（JH-14C）、聚奥-9（JO-9C）、聚奥-10（JO-10C）、超细六硝基芪（HNS），以及感度不高于 WJ 2497-1997 硼/硝酸钾点火药规范[44]要求的硼/硝酸钾（BPN）点火药。现行有效标准主要包括：GJB 297B-2020 钝化黑索今规范[39]、GJB 737 -1993 火工品药剂试验方法[40]、GJB 2178A-2020 传爆药安全性试验方法[41]、GJB 4165-2001 引信传爆药通用规范[42]、GJB 8139-2013 超细六硝基芪炸药规范[43]和 WJ 2497-1997 硼/硝酸钾点火药规范[44]。

GJB 8139-2013[42]超细六硝基芪炸药规范[43]：与美军标 MIL-E-82903[18]基本对应，但存在差异：（1）真空稳定性测试时间为 140 min（MIL-E-82903 分为前 20 min 与后 120 min 两阶段），允许释放气体体积更大；（2）起爆感度方面，GJB 8139-2013 规定 50% 发火电流≤1.7 kA，而 MIL-E- 82903 规定飞片平均速度为 2.70~3.00 mm·$\mu s^{-1}$。该标准通过附录 C 飞片起爆感度试验方法统一了试验参数（桥箔、飞片、反射片、加速膛和炸药柱），使“50%发火电流≤1.7 kA”可作为短脉冲冲击感度的量化指标。

WJ 2497-1997 硼/硝酸钾点火药规范[44]：为国内 BPN 点火药的有效规范，参考美军标并结合国内实际，将 BPN 按药粒形状分为 4 类，每类按尺寸分级，规定了各类型号的性能与配方。对主要成分要求：无定形硼粉硼含量 90%~92%，最大粒径≤1.5 μm，过氧化氢不溶物≤1.5%，镁含量≤8.2%，水分≤0.5%；硝酸钾的粒度则分为 I、II 两类，I 类平均粒度（60 ± 20）μm，II 类平均粒度≤15 μm。

## 2 国内外标准对比及分析

国内外直列式爆炸箔起爆及点火技术相关标准对照表如表 3 所示。目前，国内在直列式爆炸箔起爆及点火技术领域广泛采用的核心标准为 GJB 373B-2019 引信安全性设计准则[22]与 GJB 344A-2020 钝感电起爆器通用规范[25]，其对应的主要国外标准分别为美军标 MIL-STD-1316F[7]与 MIL-DTL-23659F[11]。

### 2.1 ESAD 标准对比

GJB 373B-2019[22]与 MIL-STD-1316F[7]在整体框架和技术要求上高度对应，内容基本一致。主要差异体现在以下两方面：（1）安全控制逻辑装置要求：GJB 373B-2019[22]在附录中新增了对实现安全控制的逻辑装置的技术要求，明确规范了可编程逻辑器件、复杂可编程逻辑器件、现场可编程门阵列等在安全控

制中的应用，并从保险装置性能设计、冗余设计、定时功能、解除保险逻辑等方面提出了 15 项具体要求。（2）许用炸药清单：MIL-STD-1316F[7]在附录 A 中详细列出了适用于非隔离爆炸序列的 15 种炸药及其对应标准，而 GJB 373B-2019[22]仅推荐 6 种许用炸药。

表 3 国内外直列式爆炸箔起爆及点火技术相关标准对照表

**Tab.3 Comparative analysis of standards for in-line exploding foil initiation and ignition technologies**

| 序号 | 类别 | 标准号 | 标准名称 | 对应美军标 |
|---|---|---|---|---|
| 1 | | GJB 373B-2019[22] | 引信安全性设计准则 | MIL-STD-1316F[7] |
| 2 | | GJB 573B-2020[23] | 引信及引信零部件环境与性能试验方法 | MIL-STD-331D[6] |
| 3 | ESAD | GJB 7073-2010[24] | 引信电子安全与解除安保装置电磁环境与性能实验方法 | - |
| 4 | | GJB 344A-2020[25] | 钝感电起爆器通用规范 | MIL-DTL-23659(F)[11] |
| 5 | | GJB 345A-2019[26] | 引信用电起爆爆炸元件鉴定试验 | MIL-STD-1592[10] |
| 6 | | GJB 736.28-2022[27] | 火工品试验方法 第28部分：电烤爆试验 | - |
| 7 | | GJB 736.31-2023[28] | 火工品试验方法 第31部分：B类钝感电起爆器1A 1min最大不损坏电流试验 | - |
| 8 | | GJB 1307A-2004[29] | 航天火工装置通用规范 | AIAA-113A-2016[13] |
| 9 | | GJB 1579-1993[30] | 电起爆器的电爆分系统通用规范 | MIL-STD-1512[9] |
| 10 | EFI | GJB 2865A-2020[31] | 火箭和导弹固体发动机点火系统安全性设计准则 | MIT-STD-1901A[8] |
| 11 | | GJB 4377-2002 [32] | 弹药、导弹用火工品安全性要求 | - |
| 12 | | GJB 11687-2024[33] | 冲击片雷管规范 | - |
| 13 | | GJB 11688-2024[34] | 爆炸箔起爆器规范 | - |
| 14 | | GB/T 40542-2021[35] | 航天火工系统及装置设计要求 | - |
| 15 | | WJ 20492-2018[36] | 爆炸箔起爆器 75 V、500 V 电安全性试验方法 | - |
| 16 | | WJ 20493-2018[37] | 爆炸箔起爆器发火试验方法 | - |
| 17 | | WJ 20494-2018[38] | 钝感电起爆器热烤爆试验方法 | - |
| 18 | | GJB 297B-2020[39] | 钝化黑索今规范 | - |
| 19 | 直列式 | GJB 737 -1993[40] | 火工品药剂试验方法 | - |
| 20 | 许用含 | GJB 2178A-2020[41] | 传爆药安全性试验方法 | MIL-STD-1715A[17] |
| 21 | 能药剂 | GJB 4165-2001[42] | 引信传爆药通用规范 | - |
| 22 | | GJB 8139-2013[43] | 超细六硝基芪炸药规范 | MIL-E-82903[18] |
| 23 | | WJ 2497-1997[44] | 硼/硝酸钾点火药规范 | MIL-P-46994B[19] |

## 2.2 EFI 标准对比

GJB 344A-2020[25]与 MIL-DTL-23659F[11]在技术内容上较为接近。在此基础上，我国结合爆炸箔火工品和冲击片雷管的实际应用需求，制定了更具针对性的产品规范：GJB 11687-2024[33] 冲击片雷管规范与 GJB 11688-2024[34]爆炸箔起爆器规范。4 者技术要求对比见表 4。

由表 4 可知，GJB 344A-2020[25]在 MIL- DTL-23659F[11]核心要求的基础上，结合国内工程实践，增加了尺寸、重量、绝缘电阻、介质耐受电压、75 V 不发火、500 V 不发火等检验项目，进一步强化了产品的一致性与安全性控制。

表 4 MIL-DTL-23659F[11]与国内 EFI 相关标准的比较

**Tab. 4 Comparative analysis of MIL-DTL-23659F and domestic EFI standards**

| 序号 | 项目 | MIL-DTL-23659F[11] | GJB 344A-2020[24] | GJB 11687-2025[32] | GJB 11688-2025[33] |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 外观 | √ | √ | √ | √ |
| 2 | 射线 | √ | √ | √ | √ |
| 3 | 尺寸 | × | √ | √ | √ |
| 4 | 重量 | × | √ | √ | √ |
| 5 | 标志 | × | × | √ | √ |
| 6 | 绝缘电阻 | × | √ | √ | √ |
| 7 | 静电感度 | √ | √ | √ | √ |
| 8 | 介质耐受电压 | × | √ | √ | √ |
| 9 | 杂散电流 | × | × | √ | √ |
| 10 | 桥路电阻 | √ | √ | √ | √ |
| 11 | 泄漏 | √ | √ | × | √ |
| 12 | 常温发火 | √ | √ | √ | √ |
| 13 | 低温发火 | √ | √ | √ | √ |
| 14 | 高温发火 | √ | √ | √ | √ |
| 15 | 不损坏电流 | √ | √ | √ | √ |
| 16 | 75V 不发火 | × | √ | √ | √ |
| 17 | 500V 不发火 | × | √ | √ | √ |
| 18 | 热烤爆 | √ | × | × | √ |
| 19 | 高温暴露 | × | × | × | √ |
| 20 | 电烤爆 | √ | √ | √ | × |
| 21 | 最大无冲击感度 | √ | × | × | × |
| 22 | 跌落 | 1.5 m | 2.0 m | 2.0 m/12 m | 2.0m/12m/13.3m |
| 23 | 温度冲击/湿热 | √ | √ | √ | √ |
| 24 | 温度-湿度-高度 | × | × | × | √ |
| 25 | 真空热循环 | × | × | × | √ |
| 26 | 飞行振动 | √ | √ | √ | √ |
| 27 | 冲击 | √ | √ | √ | √ |
| 28 | 震动 | × | × | √ | √ |
| 29 | 低温贮存 | × | × | √ | × |
| 30 | 高温贮存 | × | × | √ | × |
| 31 | 浸水 | × | × | √ | × |
| 32 | 锤击 | × | × | √ | × |
| 33 | 电磁兼容 | × | × | × | √ |
| 34 | 高压发火电压 | √ | √ | √ | √ |
| 35 | 作用时间 | × | × | √ | × |
| 36 | 输入与输出 | × | × | √ | × |
| 37 | 发火与输出 | × | × | × | √ |
| 38 | 作用后密封承压 | √ | √ | × | √ |

GJB 11687-2024[33]针对武器弹药引信的严苛使用环境，在 GJB 344A-2020[25]基础上取消了“泄漏”与“作用后密封承压”两项要求，转而增加了浸水、高温贮存、低温贮存、震动、锤击、飞行振动及 12 m 跌落等气候与力学环境适应性试验。

GJB 11688- 2024[34]则面向航天火工装置的使用环境和性能要求，在 GJB 344A-2020[25]基础上补充了热烤爆、高温暴露、温度-湿度-高度、真空热循环、震动、电磁兼容及 13.3 m 跌落等要求，充分参考了美国 AIAA S-113A-2016[13]的相关试验环境要求，并进行了补充和完善。

## 2.3 点火系统标准对比

GJB 2865A-2020[31]与 MIL-STD-1901A[8]相对应，

主要规定了火箭和导弹固体发动机使用的点火系统和点火保险装置的安全性设计。但存在以下主要差异：

（1）适用范围：MIL-STD-1901A[8]明确规定其适用于半导体桥起爆器、激光二极管及爆炸箔起爆器等多种钝感起爆器，定义清晰，覆盖范围广；而 GJB 2865A-2020[31]虽提及爆炸箔起爆器，但在适用范围的界定上不如美军标全面。

（2）许用含能药剂表述方式：MIL-STD-1901A[8]在正文中详细列出 13 种直列式点火序列许用含能药剂及其对应标准，信息明确；GJB 2865A-2020[31]则采用概括性描述，要求药剂满足 WJ 2497-1997[44]与 GJB 2178A-2020[41]等通用规范，未提供具体药剂清单。

### 2.4 许用含能药剂标准现状

GJB 373B-2019[21]与 GJB 2865A-2020[31]作为顶层标准，分别规定了直列式许用炸药与点火药。当前国内许用炸药主要包括钝黑系列、聚黑系列、聚奥系列及超细 HNS 等，大致可分为特屈儿（Tetryl）、HNS 及复合炸药 3 大类。在点火药方面，GJB 2865A-2020[30]将硼/硝酸钾（BPN）的规范由符合美军标 MIL-P-46994[19]修改为符合国内标准 WJ 2497-1997[44]。然而，该标准对硼粉和硝酸钾的粒径等关键参数缺乏明确要求，且整体许用含能材料标准体系仍需进一步修订与完善，以支撑直列式技术的持续发展与应用。

## 3 总结与展望

直列式爆炸箔起爆及点火技术作为高安全、高可靠火工系统核心，其标准体系建设已取得重要进展，从系统总体设计到关键器件及许用含能药剂，相关设计规范、试验方法与检验要求逐步完善。然而，现有标准体系存在问题：（1）系统性不足，当前标准多聚焦单一组件或材料，缺乏全链路协同匹配规范，子系统标准关联性弱；（2）适用性有待提升，部分标准参照美军标多，未结合国内实际，指导性和约束力不足；（3）关键环节标准缺失，未建立影响感度一致性核心要素的统一量化标准。

面向未来，建议从 3 方面优化完善标准体系：首先是强化顶层设计，构建全链条标准框架，推动 ESAD、EFI 与含能药剂标准之间的协调统一；其次是立足国内实际，加快自主化标准制修订，增强可操作性与指导价值；最后是聚焦新需求，制定关键技术标准，提升全过程质量控制能力。

**参考文献：**


[1] 韩志伟,褚恩义,王可暄,等.爆炸箔厚度与其电爆性能和冲击片雷管感度的关系研究[J].火工品, 2009(6):8-10.

[2] 简昊天, 汪柯, 高峰, 等. 直列式爆炸箔点火及相关技术研究进展[J]. 含能材料, 2022, 30(4):396-411.

[3] 褚恩义,任西,钱勇,等.爆炸箔冲击片起爆设计参数研究[J].火工品, 2008(3):26-27.

[4] 赵成森, 任炜, 张蕊, 等. 国外火工品“三化”及标准分析研究[J].航天标准化,2020(4):30-34.

[5] 伊若, 任丽萍. 直列式爆炸序列标准需求分析[J]. 火工品, 2013(1): 53-56.

[6] MIL-STD-331D Fuzes, ignition safety devices and other related components, environmental and performance tests for [S]. United States Department of Defense , 2017.

[7] MIL-STD-1316F Fuze design, safety criteria for [S]. United States Department of Defense , 2017.

[8] MIL-STD-1901A Munition rocket and missile motor ignition system design, safety criteria for [S]. United States Department of Defense, 2002.

[9] MIL-STD-1512 Electro-explosive subsystems, electrically initiated, design requirements and test methods [S].United States Department of Defense, 1972.

[10] MIL-STD-1592 Mockups, Air vehicle engines, construction and inspection [S]. Department of Defense, 1977.

[11] MIL-DTL-23659F Initiators, electric,general design specification for[S].United States Department of Defense, 2010.

[12] MIL-HDBK-83578 Criteria for explosive systems and devices used on space vehicles[S]. United States Department of Defense , 1999.

[13] AIAA S-113A-2016 Criteria for explosive systems and devices

on space and launch vehicles[S]. Reston: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2016.

[14] AOP-43 Electro-explosive devices assessment and test methods for characterization guidelines for STANAG 4560[S]. NATO Standardization Agency , 2006.

[15] STANAG 4560 Electro-explosive devices assessment and methods for characterization[S].NATO Standardization Agency, 2006.

[16] ISO14300-2 Space systems-programme management[S].The International Organization for Standardization, 2023.

[17] MIL-STD-1751A Safety and performance tests for the qualification of explosives (high explosives, propellants, and pyrotechnics)[S]. United States Department of Defense, 2001.

[18] MIL-E-82903 Explosive, HNS-IV and HNS-V[S]. United States Department of the Navy, 1994.

[19] MIL-P-46994B Pellets/granules boron/potassium nitrate[S]. United States Department of Defense, 1982.

[20] MIL-B-51092 Amorphous boron powder [S]. United States Department of Defense, 1997.

[21] MIL-P-156B Potassium nitrate [S]. United States Department of Defense, 1956.

[22] GJB 373B-2019 引信安全性设计准则[S]. 中央军委装备发展部, 2019.

[23] GJB 573B-2020 引信及引信零部件环境与性能试验方法[S]. 中央军委装备发展部, 2020.

[24] GJB 7073-2020 引信电子安全与解除安保装置电磁环境与性能实验方法[S]. 中央军委装备发展部, 2020.

[25] GJB 344A-2020 钝感电起爆器通用规范[S]. 中央军委装备发展部, 2020.

[26] GJB 345A-2019 引信用电起爆爆炸元件鉴定试验[S]. 中央军委装备发展部, 2019.

[27] GJB 736.28-2022 火工品试验方法 第 28 部分：电烤爆试验[S]. 中央军委装备发展部, 2023.

[28] GJB 736.31-2023 火工品试验方法 第 31 部分：B 类钝感电起爆器 1A1min 最大不损坏电流试验[S]. 中央军委装备发展部, 2023.

[29] GJB 1307A-2004 航天火工装置通用规范[S]. 国防科技技术工业委员会, 2004.

[30] GJB 1579-1993 电起爆器的电爆分系统通用规范[S]. 国防科技技术工业委员会, 1993.

[31] GJB 2865A-2020 火箭和导弹固体发动机点火系统安全性设计准则[S]. 中央军委装备发展部, 2020.

[32] GJB 4377-2002 弹药、导弹用火工品安全性要求[S]. 中国人民解放军总装备部, 2002.

[33] GJB 11687-2024 冲击片雷管规范[S]. 中央军委装备发展部, 2025.

[34] GJB 11688-2024 爆炸箔起爆器规范[S]. 中央军委装备发展部, 2025.

[35] GB/T 40542-2021 航天火工系统及装置设计要求[S]. 国家市场监督管理总局及国家标准化管理委员会, 2021.

[36] WJ 20492-2018 爆炸箔起爆器 75V、500V 电安全性试验方法[S]. 国家国防科技工业局, 2018.

[37] WJ 20493-2018 爆炸箔起爆器发火试验方法[S]. 国家国防科技工业局, 2018.

[38] WJ 20494-2018 钝感电起爆器热烤爆试验方法[S]. 国家国防科技工业局, 2018.

[39] GJB 297B-2020 钝化黑索今规范[S].中央军委装备发展部, 2020.

[40] GJB 737-1993 火工品药剂试验方法[S].中央军委装备发展部, 1993.

[41] GJB 2178A-2020 传爆药安全性试验方法[S]. 中央军委装备发展部, 2020.

[42] GJB 4165-2001 引信传爆药通用规范[S]. 中国人民解放军总装备部, 2001.

[43] GJB 8139-2013 超细六硝基芪炸药规范[S]. 中国人民解放军总装备部, 2013.

[44] WJ 2497-1997 硼/硝酸钾点火药规范[S]. 中国兵器工业总公司, 1997.

[45] GJB 2002A-2019 电雷管通用规范[S]. 中央军委装备发展部, 2020.