

文章编号: 1003-1480 (2021) 03-0001-04

# 高膛压、高转速、高过载条件下的新型曳光管

刘永刚, 杨旗, 王海军, 郭攀峰, 贾军华, 王文豪

(北方特种能源集团西安庆华公司, 陕西 西安, 710025)

**摘要:** 为满足武器系统的需求, 针对传统曳光管在高膛压、高转速、高过载条件下出现曳光剂脱落、短光、断火等问题, 设计了一种新型曳光管结构。基于其结构组成和工作原理, 进行了总体结构、点传火序列、压药压力和药面形状等方面的设计。通过设计金属膨胀环、凸型台阶药面以及在点传火序列中设计过渡药, 以解决存在的问题。验证试验结果表明: 在高膛压 440MPa、高转速 92 018 r·min<sup>-1</sup> 及高过载 99 180g·s<sup>-1</sup> 的条件下, 该曳光管能满足发光强度不小于 18 000cd 和燃烧时间不小于 3.5s 的指标要求, 实现了弹头飞行 2 500m 显示弹道轨迹的功能。

**关键词:** 曳光管; 高膛压; 高转速; 高过载; 发火强度; 结构

中图分类号: TJ53<sup>+</sup>4 文献标识码: A DOI: 10.3969/j.issn.1003-1480.2021.03.001

## A New Tracer Tube under High Chamber Pressure, High Rotating Speed and High Overload

LIU Yong-gang, YANG Qi, WANG Hai-jun, GUO Pan-feng, JIA Jun-hua, WANG Wen-hao

(Xi'an Qinghua Company, North Special Energy Group, Xi'an, 710025)

**Abstract:** In order to meet the requirement of weapon system, aimed at the problems of tracer composition fall out, shortened light and deflagration cut off of traditional tracer tube, a new structure of tracer tube was designed. Based on the structure and working principle, the overall structure, ignition sequence, charge pressure and charge surface shape were designed. By designing the metal expansion loop, convex step type charge surface and intermediate charge in the ignition sequence, the existed problems would be solved. Verification test results show that under the conditions of high chamber pressure of 440MPa, high rotating speed of 92 018 r·min<sup>-1</sup> and high overload of 99 180 g·s<sup>-1</sup>, the new tracer tube can meet the requirements of luminous intensity not less than 18 000cd and combustion time not less than 3.5s, and realizes the function of displaying trajectory of warhead flying 2 500m.

**Key words:** Tracer tube; High chamber pressure; High rotating speed; High overload; Luminous; Structure

曳光管主要用于曳光弹药在光源不足或黑暗中显示弹道轨迹, 协助射手进行弹道修正及某些导弹的制导、跟踪测试<sup>[1]</sup>。随着武器系统的发展, 弹药发射过程中膛压、转速、过载均已大幅提高, 发射药产生的高温高压气体的冲击力、高过载的惯性力以及弹头高转速的离心力作用, 会导致曳光产品发生断火、短光、曳光剂脱落等问题, 已不能满足武器系统的使用环境要求。笔者基于以往的相关研究, 从曳光管的结

构、点传火序列、压药压力及药面形状等方面进行研究分析, 研制一种在高膛压、高转速、高过载条件下可靠作用的新型曳光管。

## 1 曳光管作用原理及技术要求

### 1.1 作用原理

曳光管是影响曳光弹药性能的核心发光元件, 通

收稿日期: 2021-02-22

作者简介: 刘永刚(1987-), 男, 工程师, 主要从事火工品的设计研发。

常采用直接将曳光管安装在弹头内,再用堵螺压装的安装方式。常见的曳光弹头结构见图1,主要由弹头、曳光管、堵螺组成。

在曳光弹发射时,火炮膛内发射药会产生高温高压气体,弹头在高温高压气体作用下沿火炮内膛线旋转前进,同时高温高压气体冲破密封片,点燃曳光管内的微光引燃剂;弹头飞出炮口后在惯性的作用下沿轴线高速旋转前进,在距离炮口约15~150m的过程中,弹头内部进行由引燃剂点燃传火剂、传火剂再点燃曳光剂的燃烧过程,曳光管内曳光剂燃烧发出红色、黄色或白光随弹头飞行,完成指示弹道轨迹的功能<sup>[2]</sup>。

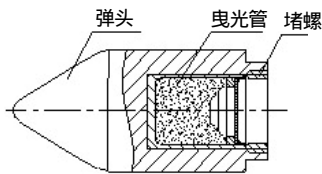


图1 曳光弹头结构图

Fig.1 Structure diagram of tracer warhead

## 1.2 技术要求

根据某武器系统的研制要求,在最高膛压440 MPa、最高转速 $9.2 \times 10^4 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 及最大过载 $1 \times 10^5 \text{ g} \cdot \text{s}^{-1}$ 的条件下,曳光管应满足发光强度不小于18000cd和燃烧时间不小于3.5s的指标要求,以实现弹头飞行2500m显示弹道轨迹的功能。

## 2 产品设计

在高膛压、高转速、高过载环境下曳光管需可靠完成其弹道指示功能,其设计应包含以下几方面。

### 2.1 总体结构设计

针对传统结构曳光管在高膛压、高转速、高过载条件下,作用可靠度不高,容易出现曳光剂脱落、短光、断火等问题,设计了金属膨胀环结构的曳光管,并对点传火序列、压药压力和药面形状等方面进行了优化设计。该结构曳光管包括管壳、曳光剂、传火剂、引燃剂、密封片、金属膨胀环6部分,如图2所示。

为保证曳光管可靠作用,曳光管内药剂的机械强度必须足够大,根据武器系统使用条件不同,其压药压力可达到500~1000MPa,因此曳光管壳材料必须

具有强度高、韧性好的优点。一般可选用低碳钢冷轧钢带或覆铜钢片材料,以保证曳光管在压药和发射过程中不变形,同时管壳表面进行镀锡,以提高产品的防腐蚀性能。

曳光装药结构设计为引燃剂-传火剂-曳光剂,以保证曳光管点传火序列的可靠作用;通过多次装药及口部密封设计,确保曳光管内各类药剂结合紧密、药剂密度均匀并具有足够的机械强度和密封性。

为解决曳光剂脱落和短光问题,在曳光管引燃剂和密封片之间压制金属膨胀环,综合考虑材料热膨胀系数和加工工艺性因素,选用2mm的铝合金板材料加工而成金属膨胀环。在火炮膛内的高温高压环境下,由于金属环的热膨胀系数大于曳光管壳的热膨胀系数,金属环发生膨胀变形后会卡紧在曳光管壳内壁,避免了高温高压气体对曳光剂与曳光管壳结合处的直接冲击,从而解决了曳光剂侧面燃烧导致的短光技术问题;另一方面金属膨胀环在高过载惯性力和高转速离心力条件下,对曳光剂起阻挡保护作用,解决了曳光剂脱落问题。

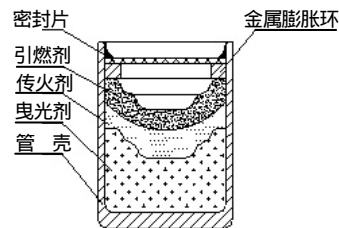


图2 曳光管结构图

Fig.2 Structure diagram of tracer tube

### 2.2 点传火序列设计

曳光管点传火时,要求其引燃剂在较大压药密度和低温条件时,容易被发射药火焰可靠点燃。因此引燃剂需要选用火焰感度高、点火能力强的点火药。

表1为引燃剂典型配方。

表1 引燃剂典型配方及性能<sup>[3]</sup>

Tab.1 Typical formulation and properties of kindling agent

| 点火药 | w/%   |
|-----|---|
| 配方1 | BaO <sub>2</sub> 80, Mg18, 黏合剂 2  |
| 配方2 | BaO <sub>2</sub> 30, Ba(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> 48, Mg13, 酚醛树脂 9 |

由于曳光弹头飞行时,会在弹底形成空气稀薄区,并产生涡流,加之曳光管尺寸较小,其产生的火焰也小,飞行过程中散热快,易于冷却,因而容易造成曳光断火。为保证点传火的可靠性,在引燃剂和曳

光剂之间设计了过渡药,形成引燃剂-传火剂(过渡药)-曳光剂的点传火序列<sup>[4]</sup>。过渡药由引燃剂和曳光剂按 1:1 混合而成,这种设计一方面通过在曳光剂中增加引燃剂,增加了曳光剂的引燃能力和火焰感度;另一方面由于过渡药的存在,使得点传火序列各段药剂燃速跳跃减少,实现热能、燃速能量的逐级过渡,从而保证点传火的燃烧稳定性和可靠性。

### 2.3 压药压力设计

由于曳光管内各类药剂直接承受发射药高温高压气体冲击和高过载惯性力的影响,同时弹丸在飞行时因高速旋转(小口径弹丸转速每分钟可达十万转),产生很大离心力作用,因此曳光管内各药剂的机械强度必须足够大<sup>[5]</sup>。为保证曳光药剂机械强度,其压药压力理论上应大于膛内发射药燃烧生成气体的最大膛压,经过长期摸索,压药压力一般为最大膛压的 1.5~2.0 倍,此时曳光剂的密度可达到  $2.1 \sim 2.6 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 。如果压药压力过小,会导致曳光剂机械强度和密度不足,曳光剂会在炮口瞬间燃烧殆尽发生短光问题,或弹头飞行过程中发生曳光剂碎裂脱落问题。

### 2.4 药面形状设计

根据帕克斯燃烧模型,在静止条件下,曳光药面的燃烧面是一个平面或略带低凹的面;在高速旋转条件下,燃烧面则是凸面<sup>[6]</sup>,这一结论已被拍摄的燃烧波阵面照明所证实。

曳光药面形状对曳光性能有明显的影响,曳光管压药时,药面可以设计为平面、球面、凸型台阶面等形状,通过改变药面形状调整燃烧面来控制曳光剂燃烧时间。平面药面面积最小,凸型台阶药面面积最大,而点传火药面面积越小,越不易引燃,且引燃后易出现断火现象。为了达到最好的曳光效果,在设计过程中采用凸型台阶药面,可以降低曳光剂在高速旋转时燃烧速度加快,同时提高发光光强和点传火可靠性。

### 2.5 曳光剂的选择

曳光剂介于照明剂与信号剂之间,曳光剂一般由氧化剂、金属可燃物和粘合剂组成<sup>[7]</sup>。曳光剂受到发射药高温高压气体的冲击力、高过载的惯性力及弹头高转速的离心力的共同作用,同时要求其燃烧持续时间不缩短。由于高氯酸盐和氯酸盐燃速过快,易造成

曳光剂速燃,因此不宜作为曳光剂的氧化剂。氧化剂一般选用  $\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$  或  $\text{BaO}_2$ ,可燃物选用镁粉或镁铝合金粉,因铝粉难以点燃,不建议使用。黏合剂常用虫胶、松脂酸钙和酚醛树脂等。

在高海拔低气压环境下,曳光剂宜选用金属钙、硝酸钠、聚乙烯或西硝基咪唑作成分。试验证明,在 33km 高空使用含钙 20%和硝酸钠 80%的曳光剂,具有良好的燃烧性能;含硝酸锶的曳光剂在此条件下则难以点火和稳定燃烧。表 2 为曳光剂典型配方及性能。

表 2 曳光剂典型配方及性能<sup>[8]</sup>

Tab.2 Typical formulation and properties of tracer composition

| 光色 | 配方成分/%  | 燃速/<br>( $\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$ ) | 质量光量<br>( $\text{lm} \cdot \text{s} \cdot \text{g}^{-1}$ ) |
|----|---|--|--|
| 白光 | $W_{\text{Ba}(\text{NO}_3)_2}$ 25<br>$W_{\text{Mg}}$ 10<br>$W_{\text{酚醛树脂}}$ 65   | 3.1  | 55 000   |
| 白光 | $W_{\text{Ba}(\text{NO}_3)_2}$ 39<br>$W_{\text{BaO}_2}$ 3<br>$W_{\text{Mg}}$ 44<br>$W_{\text{Na}_2\text{C}_2\text{O}_4}$ 8<br>$W_{\text{虫胶}}$ 6 | 4.0  | 87 500   |
| 红光 | $W_{\text{Sr}(\text{NO}_3)_2}$ 60<br>$W_{\text{Mg}}$ 30<br>$W_{\text{干性油}}$ 10  | 3.1  | 55 000   |
| 红光 | $W_{\text{Sr}(\text{NO}_3)_2}$ 62<br>$W_{\text{Mg}}$ 8<br>$W_{\text{Mg-Al}}$ 22<br>$W_{\text{松脂酸钙}}$ 2<br>$W_{\text{PVC}}$ 10                   | 2.8  | 50 000   |

### 2.6 防潮设计

曳光管中的曳光剂、引燃剂所含组分不易吸湿,且药剂压药压力大、密度高,药剂本身具有一定防潮能力。为保证曳光产品贮存后的可靠性,应进行密封设计。曳光管设计时在保证密封性的同时需考虑能够被发射药可靠点燃。综合考虑材料密封性、可燃性后,选用厚度为 0.1~0.5mm 的铝箔或锡箔作为密封片材料。在压完引燃剂和金属膨胀环后,将密封片放置在金属膨胀环的上端面,并在密封片与曳光管壳结合位置涂密封胶以保证产品的密封性。

## 3 试验验证

验证试验的曳光管装药直径为 16.0mm、高度 24.0mm,引燃剂选用表 1 中的过氧化钡、镁粉、硝酸钡、酚醛树脂混制,曳光剂选用表 2 中的硝酸锶、镁粉、干性油混制,压药压力 600~700MPa,压药保压时间 5s,总体结构、点传火序列及药面形状等采用上述设计。确定装配参数后在 4 500mm 高海拔低气压环境下,曳光管被装入坦克炮穿甲弹训练弹中,进

行高、低、常温射击试验验证,试验结果见表3。

由表3试验结果可知,采用金属膨胀环、过渡药点传火等技术设计的曳光管,在高膛压 440MPa、高过载  $99\ 180\ \text{g} \cdot \text{s}^{-1}$ 、高转速  $92\ 018\ \text{r} \cdot \text{min}^{-1}$  条件下,未发生断火、短光及曳光剂脱落问题,满足了发光强度不小于  $18\ 000\text{cd}$  和燃烧时间不小于  $3.5\text{s}$  的指标要求,实现了弹头飞行  $2\ 500\text{m}$  显示弹道轨迹的功能。

表3 曳光管射击试验结果

Tab.3 Results of tracer tube firing test

| 弹药贮存条件   | 数量/发 | 平均膛压/MPa | 平均转速/( $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$ ) | 平均过载/( $\text{g} \cdot \text{s}^{-1}$ ) | 平均时间/s | 平均光强/cd |
|----------|------|----------|---|---|--------|---------|
| 50℃/48h  | 20   | 440      | 92 018                                    | 99 180                                  | 4.4    | 22 373  |
| -40℃/48h | 20   | 340      | 89 030                                    | 90 636                                  | 4.5    | 21 174  |
| 15℃/48h  | 25   | 383      | 91 140                                    | 96 038                                  | 4.5    | 21 174  |

## 4 结论

针对传统曳光管在高膛压、高转速、高过载条件下出现的曳光剂脱落、短光、断火等问题,通过分析原因并设计了一种新型曳光结构,得出以下结论:

(1) 高膛压下高温高压气体对曳光剂的直接冲击是导致曳光剂短光的主要原因;高过载惯性力和高转速离心力是曳光剂脱落的主要原因;点传火序列设计不合理导致各组分药剂点传火时热能、燃速剧烈变化,是曳光剂断火的主要原因。

(2) 通过在曳光管中设计一种金属膨胀环,解决了曳光剂脱落、短光问题;通过对管壳材料、点传火序列、压药压力、药面形状、曳光剂等方面进行优化设计,解决了曳光剂燃烧不稳定和断火问题。

(3) 新结构设计的曳光管在高膛压 440MPa、高过载  $99\ 180\ \text{g} \cdot \text{s}^{-1}$ 、高转速  $92\ 018\ \text{r} \cdot \text{min}^{-1}$  条件下均可靠作用,能够满足发光强度不小于  $18\ 000\text{cd}$  和燃烧时间不小于  $3.5\text{s}$  的指标要求,实现了弹头飞行  $2\ 500\text{m}$  显示弹道轨迹的功能。

## 参考文献:

- [1] 刘伟钦.火工品制造[M].北京:国防工业出版社,1981.
- [2] 江蔚.影响曳光弹曳光性能因素的探讨[J].兵工学报,2007(6):29-31.
- [3] 王凯民.火工品工程[M].北京:国防工业出版社,2014.
- [4] 高元科.某型发烟装置发烟药的选择及装药结构的设计[J].火工品,2012(4):24-28.
- [5] 霸书红,焦清介,任慧.闪光烟火药过载能力的实验研究[J].含能材料,2007,15(2):162-164.
- [6] 潘功配,杨硕.烟火学[M].北京:北京理工大学出版社,1997.
- [7] 潘功配.烟火药的创新与发展[J].含能材料,2011(5):55-58.
- [8] 焦清介,霸书红.烟火辐射学[M].北京:国防工业出版社,2009.