

# 猎雷遥控艇抗爆性能试验方法与风险评估

张 臣, 谢君红

(中国人民解放军91439部队, 辽宁 大连 116041)

**摘要:**基于猎雷遥控艇海上抗爆性能试验需求,提出了试验实施方法,并针对不同工况下水雷对猎雷遥控艇的威胁,计算分析了水雷威胁半径分布,建立了航迹控制精度和控位误差影响下的毁伤风险概率模型,有关试验与评估方法可为靶场试验和部队作战提供指导和参考。

**关键词:**猎雷;遥控艇;抗爆性能;试验;评估

**本文引用格式:**张臣,谢君红.猎雷遥控艇抗爆性能试验方法与风险评估[J].兵器装备工程学报,2017(11):13-16.

**Citation format:**ZHANG Chen, XIE Junhong. Test and Evaluation Methods of Anti-Explosion Performance for Remote Mine-hunting Boats[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2017(11):13-16.

中图分类号:TJ610.1

文献标识码:A

文章编号:2096-2304(2017)11-0013-04

## Test and Evaluation Methods of Anti-Explosion Performance for Remote Minehunting Boats

ZHANG Chen, XIE Junhong

(The No. 91439<sup>th</sup> Troop of PLA, Dalian 116041, China)

**Abstract:** Based on the demand of anti-explosion performance test on the sea for minehunting remote control boat, the implement method of test is advanced in this paper. It is aimed at the threat of minehunting remote control boat from mine at different conditions, and the distribution of mine threat radius is calculated and analyzed, and the damage probability model under the influence of path automatic control accuracy and control error is established. It is important that the test and evaluation methods can be reference provided to range test and army operations.

**Key words:** minehunting; remote-control boat; anti-explosion performance; test; evaluation

反水雷是一种重要的海上作战形式,在现代海战中具有十分重要的地位<sup>[1]</sup>。同时,反水雷作战也是一项极其危险的作战任务,安全性一直是反水雷装备的重要指标。USV、AUV以及ROV等各种无人平台可以替代载有作战人员的反水雷舰艇进入雷区<sup>[2]</sup>,从而确保人员和舰艇的安全,成为各国海军反水雷装备建设发展的方向。猎雷遥控艇作为一种猎雷USV,主要用来布放回收拖曳声纳或作为发射平台,也可用于回收AUV或ROV。其作战特点是由反水雷母舰远距离操控猎雷作业,自动执行探测识别水雷,并对水雷目标进行投弹灭雷或控制灭雷具灭雷等。猎雷遥控艇实现了无人系统猎雷,解决了作战人员安全问题,但其自身在雷区中作业,在利用各种探测设备进行水雷探测过程中,难以实现发现所有的水雷目标,遗漏的水雷对猎雷遥控艇具有非常大的

威胁。虽然猎雷遥控艇采取了消磁降噪措施以减少声磁辐射物理场,但仍可能被高灵敏度的水雷所打击。因此,抗爆性能是猎雷遥控艇一项重要的战术技术指标。本文基于某型猎雷遥控艇海上抗爆性能试验需求,研究试验实施方法,指导试验开展,分析不同工况下水雷对猎雷遥控艇的威胁,尤其是实航状态下航迹控制精度对猎雷遥控艇的毁伤风险影响,为试验分析与评估提供依据。

### 1 猎雷遥控艇抗爆性能试验方法

猎雷遥控艇抗爆性能一般以某深度和某距离条件下一定当量的沉底雷或锚雷对猎雷遥控艇的毁伤程度描述。因此,猎雷遥控艇抗爆性能试验的重难点包括:爆源的定位布

放与起爆、被试艇航路控制与爆距的测量、被试艇所受冲击强度的测量与毁伤评估等几个方面。

### 1.1 爆源的定位布放与起爆

爆源可采用专用标准爆源,加装水声应答器和起爆电缆,试验时在预定布放点采用吊布方式布放,同时测量布放点水深和水面坐标,采用水面 GPS 与水声联测方法<sup>[3]</sup>,对爆源进行定位。当猎雷遥控艇机动到预定爆距时,使用起爆装置通过起爆电缆加电起爆爆源。

### 1.2 猎雷遥控艇航路控制与爆距的测量

被试艇由母舰进行遥控控制,按规划航路逆流航行,艇上加装 GPS,定位测量系统实时解算被试艇与爆源正横距离,并指挥母舰修正被试艇航路,保证被试艇在正横经过爆源时爆距符合试验要求。为保证被试艇不发生不可修复性损伤,试验时应采取由远及近的原则,当接近被试艇抗爆性能极限时停止试验。试验态势见图 1。

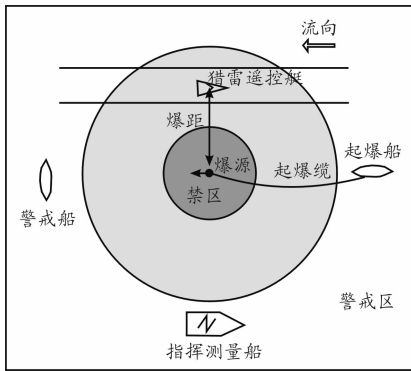


图 1 试验态势图

### 1.3 冲击强度测量与抗爆性能评估

在被试艇上对壳体、拖体等重要部位和薄弱部位,加装压力、应变、加速度等冲击测量传感器,安装数据采集系统和无线传输控制系统。爆源起爆前,爆炸测量系统无线启动数据采集系统,爆炸结束后,回收测量数据。试后,检查和测试猎雷遥控艇各设备工作状态以及艇体、拖体等破损情况。依据检查情况、爆距数据、爆炸冲击测量数据等综合评估猎雷遥控艇的抗爆性能。

## 2 水雷对猎雷遥控艇的威胁

### 2.1 装药水中爆炸作用

装药在无限场水中爆炸后,装药能量主要以冲击波及气泡脉动两种形式向外传播<sup>[3-5]</sup>,对于 TNT 装药,冲击波能、气泡能分别占爆轰总能量的 53% 和 47%;对一些非理想炸药(如含铝炸药),气泡能则超过冲击能<sup>[6]</sup>,成为杀伤目标的主要能量。对远场非接触爆炸,尤其是爆距远大于气泡最大半径时,冲击波的破坏起着决定性作用。

### 2.2 水雷爆炸毁伤计算

处在海底的沉底雷(静态)或水中锚雷(准静态)爆炸对猎雷遥控艇的破坏,大致可分为两种情况:一种是近距离爆

炸,即装药与目标距离小于气泡的最大半径,这时冲击波、气泡能作用于目标,会引起艇体局部的严重破坏;另一种是较远距离处爆炸,即装药与目标的距离大于气泡的最大半径,目标主要受到冲击波的作用,艇体可能产生变形、裂缝等破坏。考虑猎雷遥控抗爆性能试验工况,在计算毁伤概率时,只计及冲击波的破坏力<sup>[7]</sup>,即

$$P_m = 533(\sqrt[3]{G/R_g})^{1.13} \quad (1)$$

式(1)中:  $P_m$  为冲击波峰值压强( $\text{kg}/\text{cm}^2$ );  $G$  为水雷 TNT 当量装药量( $\text{kg}$ );  $R_g$  为非接触炸点与目标的距离( $\text{m}$ )。

一般认为,当  $P_m > 450 \text{ kg}/\text{cm}^2$  时,水雷可毁伤舰艇;  $P_m > 300 \text{ kg}/\text{cm}^2$  时,可击沉潜艇;当  $P_m = 100 \text{ kg}/\text{cm}^2$  时,可造成舰艇部分机械毁伤和外壳变形。一般船舶的安全距离应保证船舶所受冲击波压强小于  $50 \text{ kg}/\text{cm}^2$  至  $60 \text{ kg}/\text{cm}^2$ ,而反水雷舰艇抗爆性能优于一般舰船。

### 2.3 水雷对猎雷遥控艇的威胁半径

水雷对猎雷遥控艇的威胁取决于爆距  $R_g$ ,但无论从作战航路规划还是从抗爆试验安全控制,我们更加关心水雷能够毁伤猎雷遥控艇的最大横距,可定义其为水雷威胁半径  $R$ 。水雷威胁半径是水雷对猎雷遥控艇这一特定目标的毁伤半径,即不同水深  $H$  条件下,  $R_g$  在水面的投影,如图 2 所示。

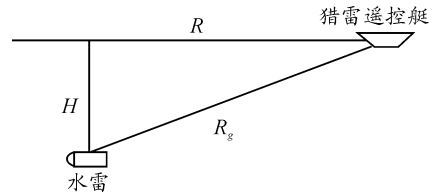


图 2 水雷威胁半径示意图

根据几何关系,可以得出:

$$R = \sqrt{R_g^2 - H^2} \quad (2)$$

对于沉底水雷,不同的水深对应不同的水雷威胁半径。对于水中一定深度上的锚雷,其雷位深度随海流缓慢改变,水雷危险半径也在缓慢变化,可用其偏降值极值计算。本文以猎雷遥控艇所受冲击波峰值压强为  $60 \text{ kg}/\text{cm}^2$  作为边界值,对不同工况下水雷威胁进行计算与分析。不同装药水雷威胁半径相对不同,为保证计算分析的一致性,均以水雷 TNT 当量表征。

#### 2.3.1 500 kg TNT 当量沉底水雷威胁半径

设沉底水雷为 500 kg TNT 当量,水雷爆炸深度分别为 20 m、30 m、40 m 时,爆距  $R_g$  为 40 ~ 100 m,依据式(1)和式(2)可计算得出猎雷遥控艇所受冲击波峰值压强和水雷威胁半径(见表 1),对比分析可以发现:随爆距增加,水雷爆炸能量按指数衰减,随深度增加,水雷威胁半径呈减小趋势。以 30 m 水深为例,  $R_g$  为 60 m,  $P_m$  为  $54.20 \text{ kg}/\text{cm}^2$ ,  $R$  仅为 52 m,猎雷遥控艇相对安全;当  $R_g$  为 50 m,  $P_m$  为  $66.60 \text{ kg}/\text{cm}^2$ ,  $R$  为 40 m,猎雷遥控艇将有毁伤风险。

表1 不同深度水雷威胁半径分布( $G=500\text{ kg}$ )

$H=20$							
$R_g$	100	90	80	70	60	50	40
$P_m$	30.43	34.2	39.1	45.54	54.20	66.60	85.71
$R$	97.98	87.7	77.46	67.08	56.57	45.83	34.64
$H=30$							
$R$	95.39	84.85	74.16	63.25	51.96	40.00	26.46
$H=40$							
$R$	91.65	80.62	69.28	57.45	44.72	30.00	0

## 2.3.2 1 000 kg TNT 当量沉底水雷威胁半径

设沉底水雷为1 000 kg TNT 当量,水雷爆炸深度 $H$ 分别为30 m、40 m、50 m时,爆距 $R_g$ 为50~100 m,计算得出猎雷遥控艇所受冲击波峰值压强和水雷威胁半径(表2),与表1对比可以发现:当爆距 $R_g$ 为70 m时, $P_m$ 为59.12 kg/cm<sup>2</sup>,达到猎雷遥控艇威胁边界, $R$ 为63.25 m( $H=30\text{ m}$ )。同样深度条件下,水雷装药量越大,水雷威胁半径也越大,危险性大大增强。

表2 不同深度水雷威胁半径分布( $G=1\ 000\text{ kg}$ )

$H=30$						
$R_g$	100	90	80	70	60	50
$P_m$	39.51	44.51	50.84	59.12	70.37	86.48
$R$	95.39	84.85	74.16	63.25	51.96	40.00
$H=40$						
$R$	91.65	80.62	69.28	57.45	44.72	30.00
$H=50$						
$R$	86.60	74.83	62.45	48.99	33.17	0

## 2.3.3 水中锚雷威胁半径

设锚雷为240 kg TNT 当量,定深为6 m、12 m、16 m(含偏降极值),考察其威胁半径分布。由表3中数据可知,水雷威胁半径约为50 m,且随着定深增大,变化不大。水中锚雷相比沉底雷对猎雷遥控艇构成的威胁更大。

表3 不同定深锚雷威胁半径分布( $G=240\text{ kg}$ )

$H=6$						
$R_g$	100	90	80	70	60	50
$P_m$	23.08	26.00	29.70	34.54	41.66	50.52
$R$	99.82	89.80	79.77	69.74	59.70	49.64
$H=12$						
$R$	99.28	89.20	79.09	68.96	58.79	48.54
$H=16$						
$R$	98.71	88.57	78.38	68.15	57.83	47.37

## 3 猎雷遥控艇毁伤风险与控制方法

## 3.1 猎雷遥控艇毁伤风险概率

猎雷遥控艇毁伤风险概率是其所受冲击波峰值压强不小于60 kg/cm<sup>2</sup>条件下,由于控位精度或航迹误差影响使其小于水雷威胁半径 $R$ 的概率。取猎雷遥控艇中心点为坐标原点,逆流方向为 $x$ 轴,水面垂直于 $X$ 轴为 $Y$ 轴(如图3所示)。设随机点落在圆周上任一小段等长的弧上的概率相同,即可求出此点横坐标的概率密度。

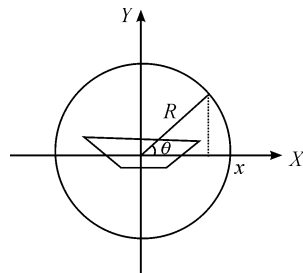


图3 猎雷遥控艇毁伤风险概率圆

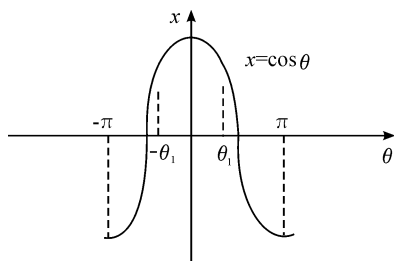
$$X = R \cos \theta$$

$$f(\theta) = \begin{cases} \frac{1}{2\pi}, & -\pi \leq \theta \leq \pi \\ 0, & \text{其他} \end{cases}$$

$x = \cos \theta$  在 $[-\pi, \pi]$ 上是分段单调函数,如图4所示。

$$\{X \leq x\} = \{-\pi \leq \theta \leq -\theta_1\} \cup \{-\theta_1 \leq \theta \leq \pi\}$$

其中  $\theta_1 = \arccos \frac{x}{R}$ 。

图4  $[-\pi, \pi]$ 分段单调函数

$$F(x) = P\{X \leq x\} =$$

$$P\{-\pi \leq \theta \leq -\theta_1\} + P\{-\theta_1 \leq \theta \leq \pi\} =$$

$$\int_{-\pi}^{-\arccos \frac{x}{R}} \frac{1}{2\pi} d\theta + \int_{\arccos \frac{x}{R}}^{\pi} \frac{1}{2\pi} d\theta = 1 - \frac{1}{\pi} \arccos \frac{x}{R}$$

当 $x = \pm R$ 时, $F(x)$ 不存在。得出 $X$ 的概率密度为:

$$f(x) = \frac{dF(x)}{dx} = \begin{cases} \frac{1}{\pi \sqrt{R^2 - x^2}}, & \text{当 } |x| < R \\ 0, & \text{其他} \end{cases}$$

考虑航迹控制精度或控位误差影响,利用概率密度求随机变量 $X$ 落入某一区间的概率为:

$$P\{a < X \leq b\} = \int_a^b f(x) dx \quad (3)$$

式(3)中, $a$ 为下限值, $b$ 为上限值。例如, $R=60$  m,航迹控制精度为10 m,则 $a=50$ , $b \leq 60$ ,若取 $b=59$  m,由式(3)可得:

$$P\{a < X \leq b\} = \int_{50}^{59} \frac{dx}{\pi\sqrt{R^2 - x^2}} = \frac{1}{\pi} \left[ \arcsin \frac{x}{R} \right]_{50}^{59} = \frac{1}{\pi} \left[ \arcsin \frac{59}{60} - \arcsin \frac{50}{60} \right] = 0.128 2$$

受航迹控制精度影响,猎雷遥控艇将承受12.82%毁伤风险。同理,当精度值为5 m时,可计算得出,猎雷遥控艇毁伤风险降为7.60%,由此可见,控制精度提高了5 m,毁伤风险降低了40%。因此,猎雷遥控艇抗爆性能试验评估中,应充分考虑航迹控制精度带来的被试艇安全风险。

### 3.2 猎雷遥控艇毁伤风险控制方法

试验中爆源为1 000 kg TNT 当量沉底水雷, $H=40$  m, $R=60$  m。

由式(1)、式(2)分别得出 $p_m = 57.17$  kg/cm<sup>2</sup>,  $R_g = 72.11$  m,被试艇安全,但当航迹控制精度为10 m,则 $p_m$ 最大值为65.39 kg/cm<sup>2</sup>,  $R_g = 64.03$  m,猎雷遥控艇将承受13%毁伤风险。

若要保证试验被试艇安全,由被试艇 $p_m = 60$  kg/cm<sup>2</sup>和式(1)得出 $R_g = 69.1$  m,由式(2)得出 $R = 56.34$  m,考虑航迹控制精度为10 m,则 $R$ 不小于66.34 m,试验中,应按照由远及近原则,可依次设置爆炸横距100 m、90 m、80 m、70 m。试验后,通过试验实测 $p_m$ 值、 $R_g$ 值与理论值比对,考虑测量误差、海底反射效应<sup>[8]</sup>等因素,即可推算出被试艇抗爆性能临界值。同时,每次爆炸后检查和测试猎雷遥控艇各设备工作状态以及艇体、拖体等破损情况,综合评估猎雷遥控艇抗爆性能。

## 4 结论

目前,国外已经发展了各种反猎水雷,用于对猎雷艇、猎雷声纳或灭雷具实施攻击,当目标抵近水雷的识别距离时,

自导水雷可根据声纳波束导向被攻击的目标,这对猎雷遥控艇抗爆性能提出了更为严峻的挑战。本文基于猎雷遥控艇抗爆性能试验需求,仅对远场冲击波能作用下猎雷遥控艇所受威胁进行了计算分析与评估,对接触爆炸和近场爆炸条件下,尤其是气泡脉动和海底反射效应下对猎雷遥控艇毁伤影响还需进一步研究。本文提出的猎雷遥控艇抗爆性能试验与评估方法,不同工况下的水雷威胁半径,以及航迹控制精度或控位误差对猎雷遥控艇毁伤风险影响,可为靶场试验和部队作战提供指导和参考。

## 参考文献:

- [1] 马爱民. 猎扫雷作战效果评估与控制[M]. 北京:国防工业出版社,2000:1-2.
- [2] 张鹏,许杰. 基于反水雷母舰的远距离反水雷[C]//反水雷兵器技术与装备发展研讨会论文集.2012:9-10.
- [3] 马锦垠,陈高杰. 舰船抗冲击试验爆源与靶船定位方法研究[J]. 电子测量技术,2012,35(3):42-44.
- [4] COLE R H. Underwater explosion[M]. Princeton University Press,1948.
- [5] 刘建湖. 舰船非接触水下爆炸动力学的理论与应用[D]. 无锡:中国船舶科学研究中心,2003.
- [6] 金辉,张庆明,高春生,赵鹏远. 不同边界条件水下爆炸气泡脉动对比的试验研究[J]. 兵工学报,2009,30(2):213.
- [7] 朱锡,刘燕红,黄祥兵. 水面舰艇结构抗水下爆炸毁伤能力表征方法研究[J]. 海军工程大学学报,2008,20(2):27-32.
- [8] 高建华,陆林,何洋洋. 浅水中爆炸及其破坏效应[M]. 北京:国防工业出版社,2010:33-35.

(责任编辑 周江川)