

doi: 10.7690/bgzdh.2023.08.009

# 空中气压环境对爆炸冲击波的影响研究

谭力犁, 汪 衡, 刘俞平, 王昭明, 刘宗伟, 蔡金良

(重庆红宇精密工业集团有限公司, 重庆 402760)

**摘要:** 为获取不同气压环境下的爆炸冲击波传播规律, 实现对不同气压环境下的爆炸冲击波性能快速预估, 采用非线性动力学软件 AUTODYN 进行数值模拟, 对数据进行分析与拟合, 并通过低气压环境冲击波传播试验对拟合公式进行精度验证。结果表明: 在同一对比距离下, 冲击波超压峰值随着大气压力降低显著下降, 低气压环境不利于冲击波的正常传播; 基于数值模拟结果拟合考虑大气压力和温度效应的计算模型, 对比试验结果, 拟合公式计算误差小于 15.0%, 平均误差小于 ±7.8%。

**关键词:** 气压环境; 冲击波; 超压峰值; 快速预估

**中图分类号:** TP391.9 **文献标志码:** A

## Influence of Air Pressure Environment on Explosion Shock Wave

Tan Lili, Wang Heng, Liu Yuping, Wang Zhaoming, Liu Zongwei, Cai Jinliang

(Chongqing Hongyu Precision Industry Group Co., Ltd., Chongqing 402760, China)

**Abstract:** In order to obtain the propagation law of explosion shock wave in different pressure environments and realize the rapid prediction of the performance of explosion shock wave in different pressure environments, the nonlinear dynamics software AUTODYN was used to carry out numerical simulation, and the data were analyzed and fitted, and the accuracy of the fitting formula was verified by the propagation test of shock wave in low pressure environment. The results show that at the same contrast distance, the peak overpressure of shock wave decreases significantly with the decrease of atmospheric pressure, and the low pressure environment is not conducive to the normal propagation of shock wave. Based on the numerical simulation results, the calculation model considering the effects of atmospheric pressure and temperature is fitted. Compared with the test results, the calculation error of the fitting formula is less than 15.0%, and the average error is less than ±7.8%.

**Keywords:** pressure environment; shock wave; peak overpressure; fast prediction

## 0 引言

随着现代科技和军事技术的不断演化, 同时我国边境冲突愈发频繁, 高原高寒地区环境对武器装备性能的影响研究显得尤为重要。冲击波威力参量作为武器系统的重要性能指标, 已有大量学者对空气中的冲击波参数开展了研究并提出了相应的经验预估公式。常见的计算模型有 Brode<sup>[1]</sup>, Henrych<sup>[2]</sup>, Tolba<sup>[3]</sup>, 华雨等<sup>[4]</sup>对不同学者提出的计算模型进行了对比分析, 总结出能较好描述冲击波超压峰值与当量比例距离关系的表达式, 结合静爆试验对实测值与理论值进行了对比。辛春亮等<sup>[5]</sup>采用 AUTODYN 和 LS-DYNA 对 TNT 空气自由场爆炸冲击波压力衰减过程进行了数值模拟, 其中 AUTODYN 数值计算曲线与工程计算曲线吻合程度最高。这类研究通常是在常温常压下开展, 在高海拔环境下, 空气稀薄, 大气压力和温度随海拔高度增加而降低, 炸药的爆轰性能也会随之变化。谢雪

腾<sup>[6]</sup>利用仿真手段比较了 0~4 500 m 高度下的冲击波参数变化规律, 冲击波超压衰减程度可达 20%以上, 并通过海拔 200 和 4 500 m 的静爆试验证实了高原效应对爆炸冲击波的衰减作用。受环境限制, 在高原/高空开展爆炸冲击波试验耗费巨大, 目前对空中气压环境对冲击波参数的影响研究尚不足, 如何提出空中气压环境下的冲击波参数精确预测方法, 并通过试验充分验证, 是当前急需解决的问题。

笔者采用非线性动力学软件 AUTODYN 开展不同气压下爆炸冲击波传播特性的数值模拟研究, 基于数值计算结果拟合出适用于不同气压下的冲击波计算公式, 并通过低气压冲击波衰减试验装置进行验证。为更好地将武器装备应用于高原/高空环境提供了理论支撑。

## 1 数值模型与计算方法

### 1.1 计算模型

笔者运用 AUTODYN 软件开展不同空气环境

收稿日期: 2023-04-07; 修回日期: 2023-05-05

作者简介: 谭力犁(1993—), 男, 重庆人, 硕士。

下的冲击波传播规律仿真研究<sup>[7]</sup>。对于球形炸药自由场爆炸的数值模拟研究，采用 1 维楔形数值模型可在提高计算效率的同时满足计算精度要求。计算采用 Euler 方法<sup>[8]</sup>，模型如图 1 所示，采用 mm-mg-ms 单位制，网格尺寸控制在 1 mm 左右。装药选用 200 gTNT 炸药，空气域半径为 10 m，模型边界采用 AUTODYN 中的 Flow-out 自由流出边界。

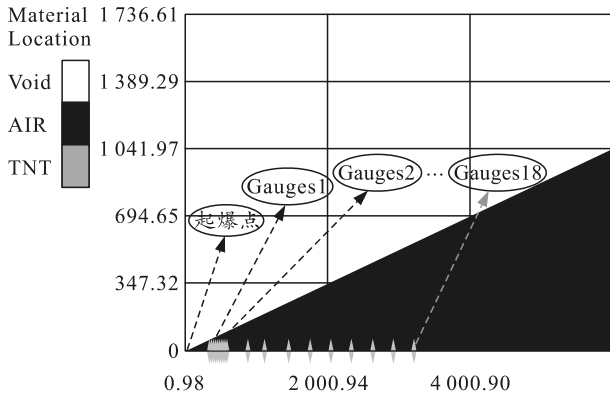


图 1 炸药自由场爆炸的球心对称楔形数值模型

爆心距离  $R$  根据式(1)及对比距离  $\bar{R}$  计算得出<sup>[9]</sup>，具体如表 1 所示。

表 1 冲击波超压观测点位置

编号	$\bar{R} / (m \cdot kg^{-3})$	$R/m$	编号	$\bar{R} / (m \cdot kg^{-3})$	$R/m$	编号	$\bar{R} / (m \cdot kg^{-3})$	$R/m$
1	0.60	0.35	7	0.90	0.53	13	3.00	1.75
2	0.65	0.38	8	0.95	0.56	14	3.50	2.05
3	0.70	0.41	9	1.00	0.58	15	4.00	2.34
4	0.75	0.44	10	1.50	0.88	16	4.50	2.63
5	0.80	0.47	11	2.00	1.17	17	5.00	2.92
6	0.85	0.50	12	2.50	1.46	18	5.50	3.22

据上表依次设置 Gauges 监测点，共设 18 个监测点。

$$\bar{R} = \frac{R}{\sqrt[3]{\omega_e}} \quad (1)$$

式中： $\bar{R}$  为对比距离； $\omega_e$  为炸药 TNT 当量； $R$  为爆心距离。

### 1.2 材料模型与状态方程

装药选取 TNT 典型炸药，炸药爆炸产物压力用 JWL 模型进行描述，此模型可用于计算炸药爆轰波的传播规律<sup>[10]</sup>，状态方程如下<sup>[11]</sup>：

$$P = A\left(1 - \frac{\omega}{R_1 V}\right)e^{-R_1 V} + B\left(1 - \frac{\omega}{R_2 V}\right)e^{-R_2 V} + \frac{\omega E_0}{V} \quad (2)$$

式中： $\omega$  为状态方程独立参数； $P$ 、 $E_0$ 、 $V$  分别为爆轰产物压力、炸药比内能和比容。该方程能精确地描述爆轰气体产物的体积、压力、能量等特性<sup>[12]</sup>。炸药主要参数如表 2 所示<sup>[13]</sup>。

表 2 炸药主要参数

爆速/(m/s)	爆压/GPa	$\rho/(kg/m^3)$	$A/GPa$	$B/GPa$	$\omega$
6 930	21.0	1.630	373.77	3.75	0.35

空气采用线性多项式 LINEAR\_POLYNOMIAL 状态方程，方程与参数如下所示：

$$P = (\gamma - 1)\rho/e \quad (3)$$

式中： $\gamma$  为理想气体常数； $\rho$  为空气初始密度； $e$  为空气比内能。

典型气压下的大气参数如密度、温度、海拔高度通过查表获取<sup>[14]</sup>，对应的空气绝热指数  $\gamma$  由经验式(4)计算得出<sup>[15]</sup>，不同气压环境下的空气主要参数具体如表 3 所示。

$$\gamma = 1 + 0.402 p/p_0 \quad (4)$$

表 3 不同气压环境下的空气主要参数

气压/atm	$\rho/(kg \cdot m^{-3})$	温度/K	$\gamma$	海拔高度/m
1.0	1.226	288.00	1.402	0
0.8	1.023	276.04	1.322	1 840
0.6	0.811	261.35	1.241	4 100
0.4	0.584	241.91	1.161	7 090
0.2	0.327	216.50	1.080	11 700

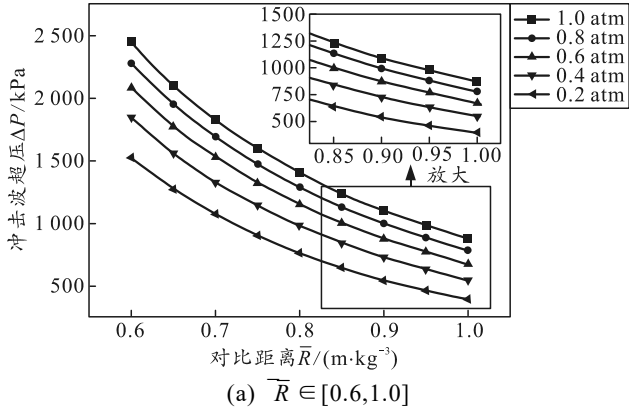
## 2 结果与讨论

### 2.1 不同气压环境下的冲击波衰减规律

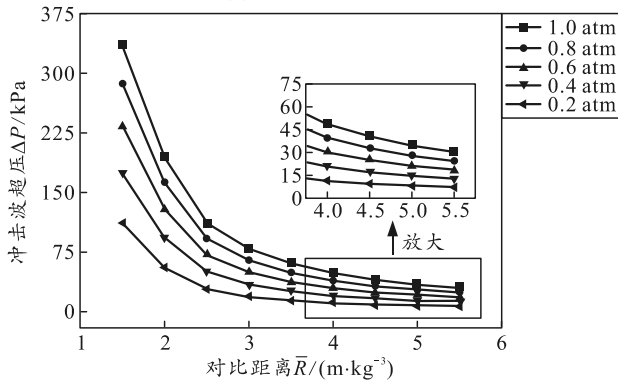
常用的爆炸空气冲击波超压计算公式通常按对比距离进行分段表达，笔者选取常用对比距离  $\bar{R} \in [0.6, 1.0]$  与  $\bar{R} \in [1.0, 5.5]$  分别研究。

当  $\bar{R} \in [0.6, 1.0]$  时，不同气压下  $\Delta P - \bar{R}$  曲线如图 2(a) 所示，可以看出：气压环境的改变，不影响冲击波超压峰值  $\Delta P$  随对比距离增加而下降的总体规律。当对比距离保持不变，随着气压环境逐渐降低，冲击波超压峰值  $\Delta P$  也随之降低。以对比距离  $R=0.6$  为例，在标准气压环境下冲击波超压峰值为 2 448 kPa，当气压环境下降至 0.8、0.6、0.4、0.2 atm 时，对应的冲击波超压峰值分别为 2 278、2 080、1 841、1 521 kPa，相比标准气压环境分别下降了 7.0%、15.0%、24.8%、37.9%。

当  $\bar{R} \in [1.0, 5.5]$  时，不同气压下  $\Delta P - \bar{R}$  曲线如图 2(b) 所示。以对比距离  $\bar{R}=5.5$  m 为例，在标准气压环境下冲击波超压为 30 kPa，当气压环境下降至 0.8、0.6、0.4、0.2 atm 时，对应的冲击波超压分别为 24、18、13、7 kPa，相比标准气压环境分别下降了 19.4%、38.8%、58.2%、77.6%，不难发现对比距离  $\bar{R} \in [1.0, 5.5]$  区段，气压环境对冲击波超压的衰减作用更加显著。



(a)  $\bar{R} \in [0.6, 1.0]$



(b)  $\bar{R} \in (1.0, 5.5]$

图 2 不同气压下  $\Delta P-\bar{R}$  曲线

2.2 经验公式拟合

为快速有效地预估不同气压环境下的冲击波超压峰值, 笔者对数值模拟结果进行数据拟合。通过数据分析, 大气压力与温度共同影响冲击波的传播, 拟合公式应考虑大气压力和温度参数。为使计算模型精简准确, 通过反复尝试与迭代, 在公式中引入压力-温度因子  $g$ , 如式(5)所示。

$$g = (P_a / P_0)^{1/3} \times (T_0 / T_a)^{1/3} \quad (5)$$

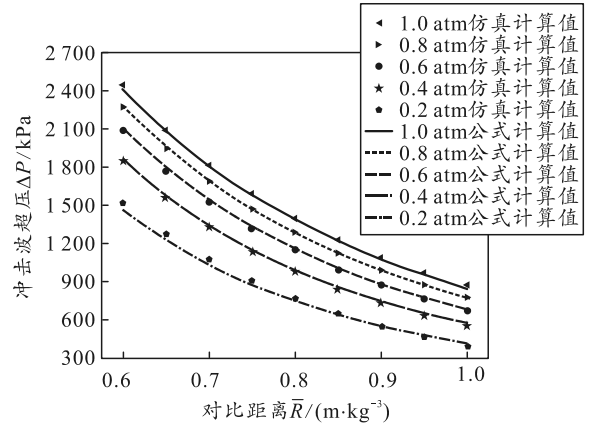
式中:  $P_a$ 、 $T_a$ 、 $P_0$ 、 $T_0$  分别为爆炸位置处的环境压力、环境温度、标准大气压力、标准大气温度。

采用麦夸特法 (levenberg-marquardt) 进行分段拟合<sup>[16]</sup>。当比例距离  $\bar{R} \in [0.6, 1.0]$  时, 拟合公式如式(6)所示, 当比例距离  $\bar{R} \in (1.0, 5.5]$  时, 拟合公式如式(7)所示。

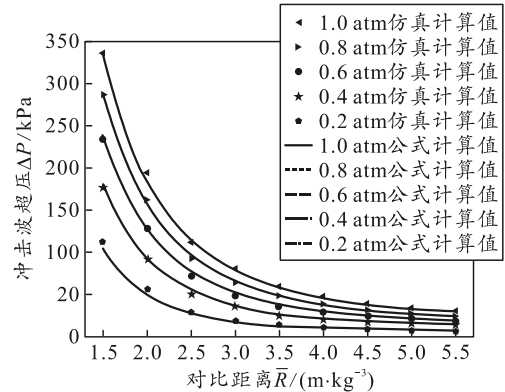
$$\left. \begin{aligned} \Delta P &= 5.474\eta_1 g / \bar{R} + 1252g^2 / \bar{R}^2 - 409.4g^3 / \bar{R}^3 \\ \eta_1 &= 106.8\bar{R}^{-1.197} - 105.6, 0.6 \leq \bar{R} \leq 1 \end{aligned} \right\}; \quad (6)$$

$$\left. \begin{aligned} \Delta P &= 7.335\eta_2 g / \bar{R} + 1551g^2 / \bar{R}^2 - 444.4g^3 / \bar{R}^3 \\ \eta_2 &= 40.42\bar{R}^{0.3897} - 93.47, 1 < \bar{R} \leq 5.5 \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

图 3 为不同气压下冲击波超压峰值仿真计算结果与文中拟合公式计算结果的对比, 拟合公式计算值与仿真计算结果的总体变化趋势一致且吻合较好。



(a)  $\bar{R} \in [0.6, 1.0]$



(b)  $\bar{R} \in (1.0, 5.5]$

图 3 不同气压下数值模拟结果和拟合公式结果对比

运用平均相对偏差式(8)和相关系数式(9)对拟合公式计算结果与仿真结果进行数据分析, 在对比距离  $\bar{R} \in [0.6, 1.0]$  时, 拟合公式计算值平均相对偏差为 1.7%, 相关系数  $r$  为 0.999 3; 在对比距离  $\bar{R} \in (1.0, 5.5]$  时, 拟合公式计算值平均相对偏差为 5.2%, 相关系数  $r$  为 0.999 1。充分证明拟合公式计算结果与仿真结果有较高的相关性。

$$\delta = \frac{\sum_{i=1}^n |\Delta P_{si} - \Delta P_{ei}| / \Delta P_{si}}{n} \times 100\% \quad (8)$$

式中:  $\Delta P_{si}$  为第  $i$  个冲击波超压仿真计算值;  $\Delta P_{ei}$  为第  $i$  个冲击波超压拟合公式计算值;  $n$  为数据点总量。

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (\Delta P_{si} - \overline{\Delta P_s})(\Delta P_{ei} - \overline{\Delta P_e})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (\Delta P_{si} - \overline{\Delta P_s})^2 \sum_{i=1}^n (\Delta P_{ei} - \overline{\Delta P_e})^2}} \quad (9)$$

式中:  $\overline{\Delta P_s}$  为  $n$  个冲击波超压仿真计算结果的算术平均值;  $\overline{\Delta P_e}$  为  $n$  个冲击波超压拟合公式计算结果的算术平均值。

### 2.3 试验验证

为进一步验证拟合公式的精度，开展低气压环境冲击波传播试验。试验装置如图 4 所示，腔内尺寸为  $\Phi 2\text{ m} \times 12\text{ m}$ ，腔内气压环境通过真空泵系统控制，分别设置 101.3、61.6、19.3 kPa 作为试验环境气压。参试炸药采用熔铸型炸药，爆热 TNT 当量约为 1.80，药量分别为 50、100 g。超压传感器总共布置 3 个，分别距爆心 1.1、1.6、2.1 m。根据国防工程设计规范中的计算公式<sup>[17]</sup>，在文中工况条件下可忽略腔壁反射作用，近似作为自由场空间爆炸。

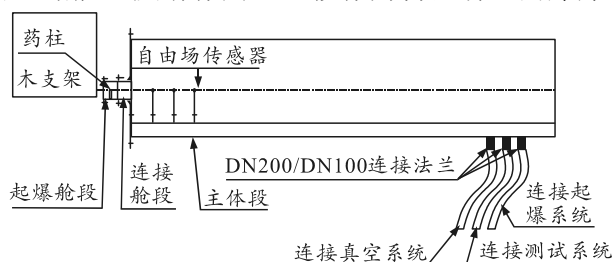
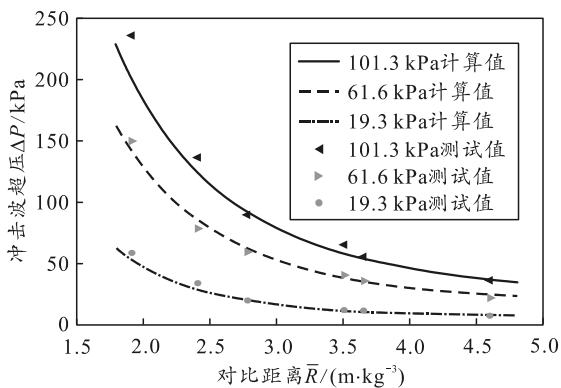
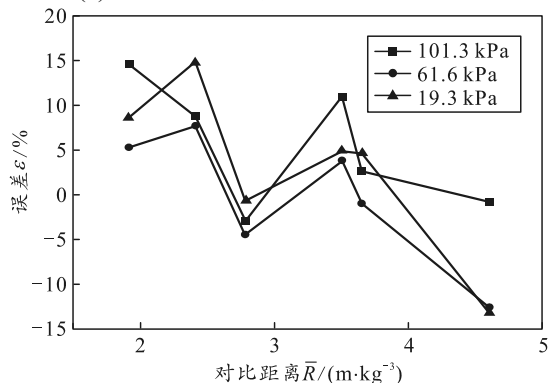


图 4 低气压冲击波衰减试验装置

相同条件下的冲击波超压峰值试验结果与拟合公式计算结果对比如图 5(a)所示，数据分布吻合度较高。试验与公式计算结果误差如图 5(b)所示，对比分析结果表明，文中拟合公式计算值与试验测试值的误差小于 15%，平均误差小于  $\pm 7.8\%$ 。



(a) 拟合公式计算值与试验结果对比



(b) 拟合公式计算值误差

图 5 公式计算值与试验测试值

### 3 结论

笔者基于 AUTODYN 有限元软件分析典型气压环境下的冲击波超压衰减规律，并拟合基于温度和气压效应的冲击波超压快速预估公式，通过低气压冲击波超压试验进行分析与验证，得出以下 3 点结论：

1) 同一对比距离下，冲击波超压峰值随着大气压力下降而减小，低气压环境会给冲击波传播带来负增益；

2) 文中基于 AUTODYN 数值模拟结果，拟合了考虑大气压力与温度效应的冲击波超压计算模型，拟合公式能够快速有效地预估不同气压环境下的冲击波传播规律；

3) 通过低气压环境冲击波传播试验对拟合公式进行了精度验证，计算误差小于 15%，平均误差小于  $\pm 7.8\%$ ，具有一定的工程应用价值。

### 参考文献：

- [1] BRODE H L. Blast wave from a spherical charge[J]. Phys Fluids, 1959, 2(2): 217.
- [2] HENRYCH J. 爆炸动力学及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 1987: 127.
- [3] TOLBA A F F. Response of FRP-retrofitted reinforced concrete panels to blast loading[D]. Ottawa: CarletonUniversity, 2002.
- [4] 华雨, 于纪言, 张庆. 静爆冲击波在空气中的传播规律[J]. 兵器装备工程学报, 2016(7): 168-172.
- [5] 辛春亮, 王俊林, 余道建. TNT 空中爆炸冲击波的工程和数值计算[J]. 导弹与航天运载技术, 2018(3): 98-102.
- [6] 谢雪腾. 高原环境爆炸冲击波传播特性的数值模拟与实验研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2017: 31-56.
- [7] 石磊, 杜修力, 樊鑫. 爆炸冲击波数值计算网格划分方法研究[J]. 北京工业大学学报, 2010, 36(11): 1465-1470.
- [8] 张波. 用一种改进的 Euler 方法模拟凝聚炸药的爆轰过程[J]. 含能材料, 2006, 14(3): 195-198.
- [9] 冯海龙. 爆炸冲击波的简化计算方法概述[J]. 山西建筑, 2010, 36(21): 69-70.
- [10] 张先锋, 赵晓宁. 夹层装药的超压爆轰研究综述[J]. 含能材料, 2011, 19(3): 352-360.
- [11] 畅博, 谷鸿平, 牛晨伟. 运动炸药近地爆炸冲击波场特性研究[J]. 爆破, 2018, 35(3): 53-58.
- [12] LEE E, HORNING H, KURY J. Adiabatic expansion of high explosive detonation products[R]. Lawrence National Laboratory Report UCRI-50422, 1968.
- [13] DOBRATZ B M, CRAWFORD P C. LLNL explosives

handbook properties of chemical explosives and explosive stimulants[M]. California: Lawrence Livermore National Laboratory, UCRL-52997, 1985.

[14] 钱翼稷. 空气动力学[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2004: 18-21.

[15] 赵铎. 空气的绝热指数的大气压修正[J]. 大学物理, 2003, 22(7): 30-31.

2003, 22(7): 30-31.

[16] 杨柳, 陈艳萍. 求解非线性方程组的一种新的全局收敛的 Levenberg-Marquardt 算法[J]. 计算数学, 2008(4): 388-396.

[17] 张国伟. 终点效应及其应用技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2006: 168-169.

\*\*\*\*\*

(上接第 39 页)

### 4 应用实例

以构筑急造军路任务的排除障碍物任务为例, 某作业分队编配多种作业装备, 根据编组需要分析各装备的相似特征, 分别从专业匹配、作业能力、作业时间、时序要求等方面分析分队所属各装备的相似特征, 量化参与编组的工程保障装备的特征指标, 如表 1 所示。

表 1 工程保障装备特征向量

工程装备	特征 1	特征 2	特征 3	特征 4
Z <sub>1</sub>	0.96	0.90	0.60	0.627
Z <sub>2</sub>	0.85	0.60	0.65	0.390
Z <sub>3</sub>	0.95	0.80	0.65	0.546
Z <sub>4</sub>	0.93	0.60	0.96	0.598
Z <sub>5</sub>	0.75	0.60	0.75	0.569
Z <sub>6</sub>	0.21	0.52	0.80	0.600
Z <sub>7</sub>	0.25	0.66	0.80	0.600
Z <sub>8</sub>	0.95	0.77	0.82	0.670
Z <sub>9</sub>	0.50	0.68	0.70	0.563

为避免同类数据聚合, 区分相似性过高的同类设备, 将表 1 中同类数据进行标准化处理, 再将处理后的数据用相关系数法进行聚类, 构建工程保障装备的模糊相似矩阵得到  $R$ :

$$R = \begin{bmatrix} 0.91 & 0.52 & 0.23 & 0.22 \\ 0.75 & 0.38 & 0.05 & 0.248 \\ 0.987 & 1 & 0.1 & 0.878 \\ 0.97 & 0.77 & 0.35 & 0.826 \\ 1 & 0.72 & 0.55 & 0.927 \\ 0.91 & 0.25 & 0.23 & 0.19 \\ 0.92 & 0.25 & 0.35 & 0.235 \\ 0.93 & 0.5 & 0.48 & 0.25 \\ 0.52 & 0.25 & 0.15 & 0.96 \end{bmatrix}。$$

进行传递闭包运算, 将模糊相似矩阵  $R$  转化为

模糊等价矩阵  $R^*$ :

$$R^* = \begin{bmatrix} 1 & 0.87 & \dots & 0.58 & 0.57 \\ & 1 & \dots & 0.65 & 0.62 \\ & & & \vdots & \\ & & \dots & 1 & 0.89 \\ & & \dots & & 1 \end{bmatrix}。$$

选定  $\lambda$  阈值将工程保障装备分成不同类型的“群队”, 计算当阈值  $\lambda=0.9$  时 CH 指标最大, 将装备集合划分为  $\{Z_4, Z_5, Z_6, Z_7\}$ ,  $\{Z_1, Z_2\}$ ,  $\{Z_3, Z_9\}$ ,  $\{Z_8\}$  是某分队所属工程保障装备对于排除障碍物任务的相对最优编组, 形成能够覆盖构筑急造军路任务排除障碍物任务所需的作业“群队”, 为工程保障任务分配提供有效的力量编组方案。

### 5 结论

针对工程保障指挥决策的兵力编组过于依赖主观经验判断的现状, 笔者分析、量化工程作业分队/装备与任务相关的特征, 采用模糊聚类方法对工程保障力量单元进行编组。按照任务需求科学、合理地推荐所属工程保障力量编组方案, 满足工程保障力量根据任务需求灵活编组的需要。

### 参考文献:

[1] 卫东. 陆军工程兵转型建设的若干思考[J]. 中国军事科学, 2017(1): 106-115.

[2] 邓志刚. 工程兵完成多样化军事任务力量运用研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2009.

[3] 李三群, 武永乐, 高健, 等. 基于解聚过程的维修力量编组分析方法[J]. 兵器装备工程学报, 2018, 39(7): 123-126.

[4] 周开乐, 杨善林, 丁帅, 等. 聚类有效性研究综述[J]. 系统工程理论与实践, 2014, 34(9): 2417-2431.