**图片包含 游戏机

描述已自动生成**

第二届麻雀山国际青年学生学者论坛

基于蒙罗效应的钽合金水下成型与作用研究

蔡子卓  
自动控制教研室  
莫斯科鲍曼国立技术大学  
莫斯科, 俄罗斯  
[lucien@njust.edu.cn](mailto:lucien@njust.edu.cn)

# 摘 要

# 目 的

钽合金的高密度、良好的延展性决定了其优异的性能。基于蒙罗效应的爆炸成型工艺已经被广泛应用于弹药工程领域。钽合金水下成型与作用涉及爆炸、冲击耦合于一体的复杂系统，包括高温、高压、高能量输运和“气—流—固”耦合以及高速撞击、高应变破碎等，涉及力学的几乎所有分支。目前，水下钽合金爆炸成型与作用的研究较少，本研究将其作为主要研究对象，设计了一种基于蒙罗效应的钽合金爆炸成型结构，模拟对舰船的打击效果，对水下兵器研究具有较高的参考价值。

# 方 法

根据水下作用特点和蒙罗效应的原理[1]–[3]，确定了钽合金的目标形状与长径比，根据目标反向选择爆炸成型的结构参数，决定采用变壁厚球缺型搭接结构模型，利用ANSYS AUTODYN进行有限元仿真，并根据正交设计对结构进行优化。

钽合金在爆轰产物作用下获得速度并产生形变，侵彻靶板。由于在成型、侵彻两个阶段分析重点和模型性质不同，本研究将成型和侵彻分两阶段进行研究，主要采用Lagrange、Euler和ALE算法。成型阶段中，主要考虑爆轰产物作用下钽合金变形情况。由于结构外壳在炸药爆炸后易产生严重的网格畸变的问题，因此炸药、壳体选用Euler算法。为更好地研究钽合金结构界面和应力应变状态，因此钽合金选用Lagrange算法，可以很好的模拟其动态行为。两种算法之间选用流固耦合的方法相结合。钽合金爆炸成型后，对水介质靶板侵彻过程主要研究钢靶的开孔及钽合金在水介质中的形变。当成型钽合金接触前靶板时，速度可达2000 m/s，因此前靶板选用ALE算法来解决靶板侵彻这种大变形的接触碰撞和材料断裂问题。考虑到当钽合金进入水介质后，水介质若选用Lagrange算法，网格将产生极大畸变，同时钽合金在水中产生的波能够使靶板弯曲甚至折断，因此水介质和后靶板选用Euler算法。采用正交设计方法对变壁厚球缺型搭接结构进行优化。通过对钽合金侵彻水介质靶板的效果分析，应重点研究壁厚、内曲率半径、外曲率半径、装药高度*L*，并对正交优化结果进行极差分析，得出最优结构。

# 结 果

采用点聚焦法形成具有密实头部的成型钽合金结构在接触、挤压、侵彻前靶板过程中，在钽合金头部会残留前靶板的部分材料，形成二次破片。当成型钽合金进入水介质后，头部不断挤压水介质，并受水介质阻碍和侵蚀，导致头部速度、质量减小。尾部不会与水介质接触，所以在头部速度衰减时，尾部仍以较大速度挤压头部，保持低阻运动。在水介质侵蚀阻碍和尾部的持续挤压下，钽合金长径比逐渐减小，侵彻性能越来越差。钽合金在水介质中高速运动产生压力波，压力波持续作用于靶板，靶板中心产生塑性形变。未经优化的结构无法完成战术指标，经优化后钽合金具有更高初速和更小的长径比，在水介质中运动状态更好，能够完成战术指标。

# 结 论

（1）钽合金在水介质中运动过程中，水介质会降低钽合金的速度、质量，并使之发生形变。头尾质量和速度不同会产生速度梯度，尾部极易与主体分离。具有密实头部、较小尾部的成型钽合金具有更好的侵彻性能。

（2）爆炸成型的钽合金对水介质靶板毁伤元由前靶板产生的二次破片、压力波和钽合金材料本身组成。二次破片兼有钽合金头部高速度和锐利的外形，是侵彻后靶板的重要毁伤元。

（3）前靶板产生二次破片具有一定条件，具有良好外形和速度的成型钽合金也可能无法完成对水介质靶板的侵彻。在设计时，应综合考虑三种毁伤元的综合作用，合理安排结构参数结构，才能完成对水介质靶板的完全侵彻。

（4）钽合金结构参数对速度影响的顺序是*L*>>>；对长径比影响的顺序是>*L*>>。

# 关 键 词

钽合金，蒙罗效应，水下爆炸

# 正文概括

本研究主要工作如下：

（1）确定了爆炸成型钽合金应具有的性质，包括密实头部、小长径比等。

（2）通过理论计算，确定了如下参数：钽合金材料、壁厚、曲率半径、搭接结构和成型方式；炸药材料、结构和起爆方式；壳体材料与结构。

（3）通过ANSYS AUTODYN数值仿真软件对设计的钽合金成型、侵彻进行数值仿真，并对其成型、在水中运动情况和靶板破坏情况进行分析。

（4）利用正交设计对钽合金结构参数和装药高度进行了优化，确定了各因素对钽合金速度、长径比的影响。提出了最优的参数与其影响顺序，并对优化后钽合金成型、侵彻进行了数值仿真与分析。

# 参考文献

##### G. Birkhoff, D. P. MacDougall, E. M. Pugh, and S. G. Taylor, “Explosives with lined cavities,” Journal of Applied Physics, vol. 19, no. 6, pp. 563–582, 1948.

##### V. P. Alekseevskii, “Penetration of a rod into a target at high velocity,” Combustion, explosion and shock waves, vol. 2, no. 2, pp. 63–66, 1966.

##### A. Tate, “A theory for the deceleration of long rods after impact,” Journal of the Mechanics and Physics of Solids, vol. 15, no. 6, pp. 387–399, 1967.