

# 机场消防车穿刺系统技术研究

庄裕锋<sup>1,2</sup> 张宝海<sup>1,2</sup> 李军<sup>1,2</sup>

1.江苏徐工工程机械研究院有限公司 江苏 徐州 221004

2.徐工集团高端工程机械智能制造国家重点实验室 江苏 徐州 221004

**【摘要】**：开展穿甲理论研究，设计一种液压储能+弹射穿刺的机场消防车穿刺机构；开展弹射穿刺仿真分析，通过模拟飞机机舱蒙皮，验证在不同动能下刺针对机舱蒙皮的破穿能力；搭建台架试验台，对钢板和铝材进行穿刺试验，验证了设计方案的可行性。

**【关键词】**：机场消防车；弹射穿刺；试验

DOI:10.12417/3083-5526.26.01.072

机场消防车作为机场消防救援的主力装备，具有“功率大、加速快、载重大、喷射能力强、追机灭火”等突出技术优势，能够实现机场高速行驶、草地越野、护栏越障、防水（油）堤爬坡、高速转弯等极端工况，并且能够进行机舱外行进灭火、举升臂灭火、机舱内穿刺灭火等<sup>[1,2]</sup>。其中机舱穿刺灭火是飞机救援之中最重要的环节，因此进行穿刺系统技术研究是非常必要的。

## 1 穿刺理论研究

破拆飞机与炮弹穿甲原理类似，可借鉴炮弹穿甲原理进行研究。炮弹穿甲主要依赖于弹丸的动能和材料的硬度，穿甲弹是一种典型的动能弹，依靠弹丸的强度、重量和速度来穿透装甲。穿甲弹的主要性能要求有：比动能大，弹丸砸击装甲时的动能与弹丸横剖面面积之比，成为比动能，比动能越大，穿甲能力越强，弹丸的速度、质量和弹径直接影响比动能值；弹体强度应大，穿甲时弹体不应先破坏，通常都用合金钢制造，新式穿甲弹还采用高密度钨合金甚至铀合金制造，采用高密度合金不仅提高了弹体强度，更主要的是有利于提高其比动能<sup>[3]</sup>。

穿甲现象和应力分析，在穿甲过程中，弹丸的动能消耗于多个方面，主要包括破坏装甲、弹丸本身的变形、装甲板的弹性振动、碰撞及摩擦发热等，其中破坏装甲做功是主要的，装甲破坏的应力包括延性挤压、环形剪切、张应力破裂等。

实际的穿甲现象包括以下几种类型：

- (1) 延性扩孔：主要由于挤压应力作用，金属受挤压塑性流动，孔径约等于弹径；
- (2) 冲塞穿孔：主要是剪切应力，装甲被冲出一块圆柱形塞子；
- (3) 花瓣形孔：主要是周向张应力作用，出现径向裂纹；
- (4) 整块崩落：主要是径向应力作用，产生圆周形裂纹；

(5) 背后碎块：当装甲强度足够而韧性不足时，震动应力波可使装甲背面崩落碎块。

穿甲计算的公式有两种，分别为克虏伯（Krupp）公式和德马尔（Jacob de Marre）公式<sup>[4]</sup>。

(1) 克虏伯（Krupp）公式

$$W = \pi * \tau * d * b^2 / 2$$

式中： $\tau$ —材料许用剪切应力，MPa；

$d$ —炮弹最大直径，mm；

$b$ —装甲壁厚，mm

(2) 德马尔（Jacob de Marre）公式

$$W = K^2 * d^{1.5} * b^{1.4} / 2$$

式中： $K$ —装甲抗弹能力系数， $N^{0.5}/dm$ ；

$d$ —炮弹最大直径，mm；

$b$ —装甲壁厚，mm

克虏伯（Krupp）公式适用于弹丸直径大，装甲壁薄， $b/d$ 值较小时，破坏形式为冲塞穿孔，装甲被冲出一块大体呈圆柱形塞子；德马尔（Jacob de Marre）公式适用于装甲厚度大于弹径，穿甲之初不是冲塞，而是以挤压为主。

## 2 穿刺方案设计

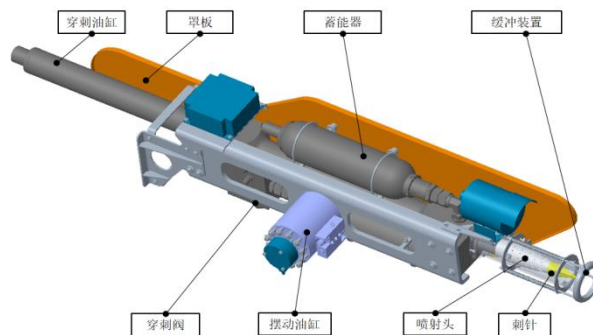


图1 穿刺机构

作者简介：庄裕锋（1985.11-），男，硕士，工程师，福建福州人，研究方向：液压系统设计。

基金项目：国家重点研发计划【项目名称：基于数字孪生的灾变结构智能应急救援技术与装备。（项目编号：2024YFC3016300-）】

穿刺机构拟采用“液压储能+弹射穿刺”，主要由穿刺油缸、穿刺阀、蓄能器、喷射头、刺针、缓冲装置、摆动油缸和罩板组成。穿刺油缸缸径 $\Phi 80\text{mm}$ ，杆径 $\Phi 60\text{mm}$ ，缸杆采用空心结构，中间通道方便灭火剂经过，穿刺油缸最大伸出速度大于 $10\text{m/s}$ ，行程 $\geq 700\text{mm}$ ；喷射头采用高强度材料，周圈布置有若干组射流孔，使灭火剂喷出时形成伞状，扩大灭火范围，喷射流量 $\geq 20\text{L/s}$ ；刺针采用高强度材料，参考破碎锤钎杆要求进行表面淬火处理，提高强度与硬度，形状为四棱边结构，提高穿刺时对机舱壁的割裂能力；缓冲装置由压块、撑杆、弹簧和法兰盘组成，其主要功能为挤压飞机机外蒙皮，通过弹簧收缩使法兰盘后移触发检测信号，使操作员确认具备弹射穿刺条件；摆动油缸采用螺旋摆动马达，转动行程为 $0\sim 180^\circ$ 。

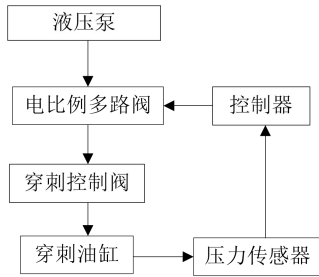


图2 穿刺液压原理框图

### 3 穿刺仿真分析

分析对象：机场消防车穿刺针及机舱工装结构。

分析目的：分析弹射下的穿刺针对机舱工装材料的穿刺性能，评估穿刺针和被穿刺的机舱工装材料是否满足穿透要求。

模型处理：该分析结构含穿刺针及机舱工装材料，穿刺针采用实体单元，机舱工装材料采用壳单元。

材料属性：该穿刺结构穿刺针材料为42CrMo（相当于钢板4140），机舱工装材料为铝合金7075，相关材料基本参数见下表<sup>[5]</sup>。

表1 材料属性表

材料名称	弹性模量 (MPa)	密度 ( $\text{t/mm}^3$ )	泊松比	屈服强度 (MPa)
42CrMo	210000	7.85E-9	0.28	930
铝合金 7075	71700	2.81E-9	0.33	480

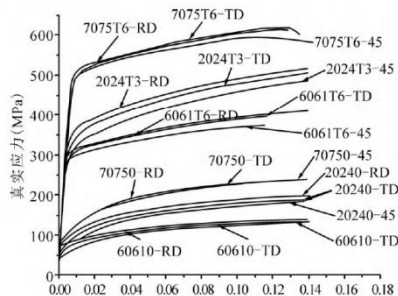


图3 铝合金7075应力-应变曲线

### (1) 工况及约束(边界)条件

分析气动弹射下的穿刺针对机舱工装材料的穿刺性能，机舱工装材料为铝合金7075，穿刺速度为 $10\text{m/s}$ 。对机舱工装的约束如下：全方位约束。穿刺有限元模型如下图所示。

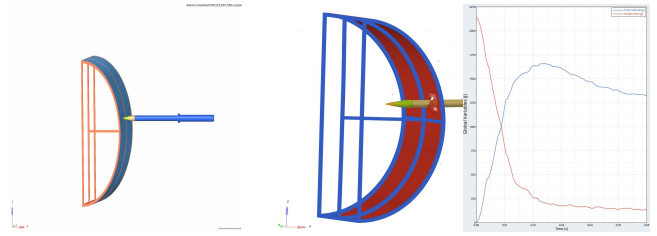


图4 穿刺结构有限元模型示意图 图5 穿透结果图(左)、穿刺动能内能变化图(右)、( $V=10\text{m/s}$ )

### (2) 穿刺针对铝合金材料的穿刺分析结果

机舱工装材料为铝合金7075，穿刺针穿刺速度为 $10\text{m/s}$ 时的穿透结果图、穿刺动能内能变化图、穿刺接触力变化图和穿刺速度变化图如下图所示。

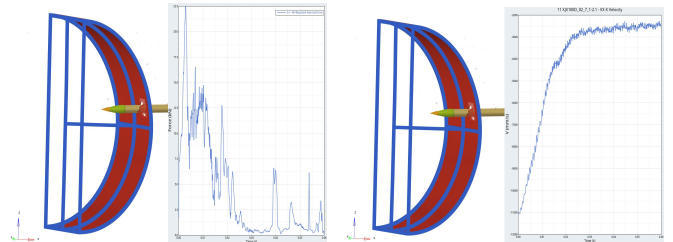


图6 穿刺接触力变化图 图7 穿刺过程中速度变化图

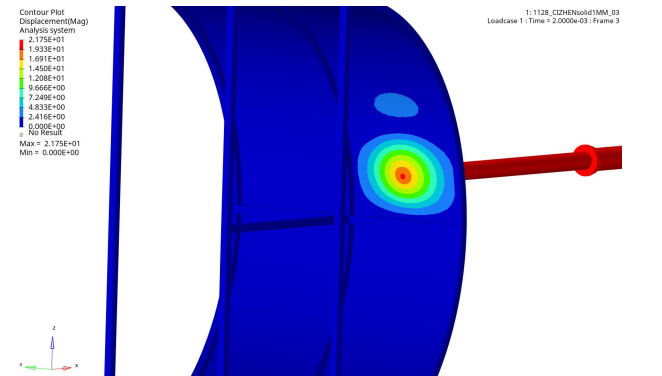


图8 穿透前位移云图

由穿刺动能内能变化图可知，该保守系统中能量总体守恒，穿刺针的冲击动能转化为机舱工装材料的内能，说明该动态冲击分析结果可信。初始穿刺速度为 $10\text{m/s}$ 工况下，初始动能为 $2150\text{J}$ ，最大的穿透力为 $22.5\text{KN}$ ，此时穿刺针能完全穿透机舱工装。

### (3) 结论

穿刺针和机舱工装材料的材料数据中部分数据参数为分析人员根据经验拟合添加，计算存在一定误差。因此在不考虑

上述影响下，通过其穿透结果示意图、穿刺动能内能变化图、穿刺接触力变化图和穿刺速度变化图等可知：在分析气动弹射下的穿刺针对机舱工装材料的穿刺性能时，本次分析穿刺速度为10m/s，冲击能量为2150J时，刺针能完全穿透机舱工装。

#### 4 穿刺性能台架试验

##### (1) 台架试验设计方案

设计底部支撑架，将穿刺油缸组件固定在支撑架上，设计可移动框架，通过螺栓装配在底部支撑架上，框架上安装不同材质、不同厚度的钢制蒙皮和铝合金蒙皮，通过调整框架前后安装位置可调整刺针与蒙皮之间距离，验证不同距离下刺针的穿刺能力。钢制蒙皮选用3mm厚度Q235、Q355、BS700MC三种，铝合金蒙皮选用5mm厚度5052、2024、7075三种；研究刺针在相同速度下对不同材料的穿刺能力。

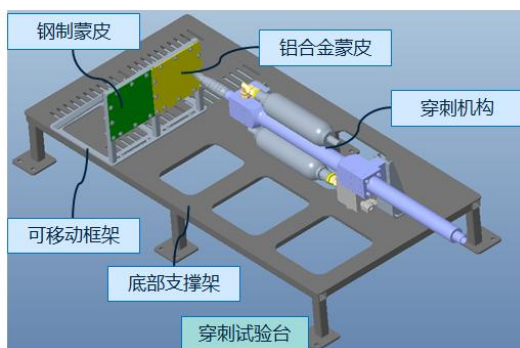


图9 穿刺台架试验台

##### (2) 台架试验

###### (a) 试验台搭建

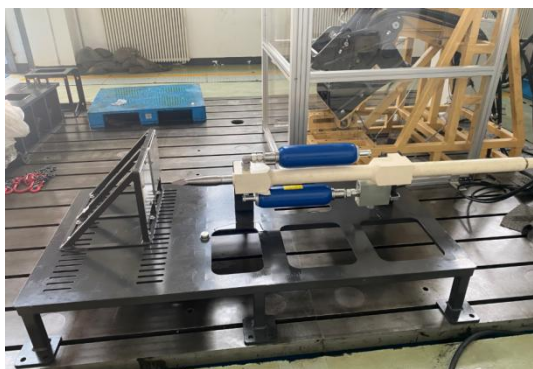


图10 穿刺台架试验台搭建

#### 参考文献：

- [1] 吕志豪, 刘全义, 孙中正. 机场消防车刺臂技术进展研究[J].中国民航飞行学院学报, 2019.No.6:5-7.
- [2] 魏娟. 机场消防车刺臂技术进展[J].今日消防, 2020(5):26-27.
- [3] 董恒, 黄风雷, 陈叶青. 异形弹体高速浸彻/穿甲机理研究进展[J].兵工学报, 2024(09):2864-2867
- [4] 吕晓森. 利用德马尔公式确定枪支杀伤威力方法的研究[J].中国刑警学院学报, 1999(04):32-34
- [5] 仝朋艳, 张鹏, 王永军. 航空常用铝合金板料拉伸性能参数及应力-应变曲线拟合[J].工具技术, 2019年第53卷 No.10:42-44.

##### (b) 铝合金蒙皮穿刺试验

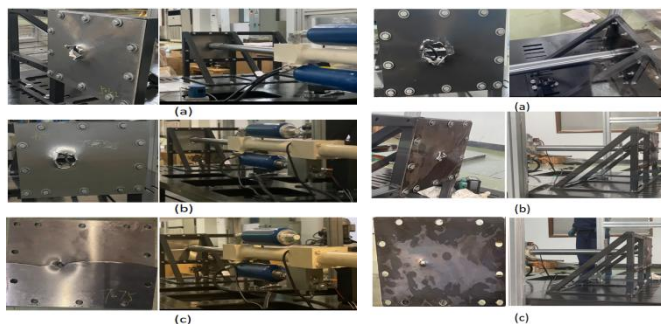


图11 铝合金蒙皮穿刺

图12 钢制蒙皮穿刺

##### (3) 试验结果分析

通过以上实验可知，穿刺机构刺针在最高速度10m/s时，单次穿刺即可顺利穿透3mm厚度Q235钢板、5mm厚度5052铝板；多次穿刺可穿透3mm厚Q355钢板、5mm厚2024铝板；5mm厚7075铝板经多次穿刺后发生断裂，3mm厚BS700MC钢板经多次穿刺仅能留下一个小孔，无法完全穿透。

#### 5 结论

本文通过开展穿甲理论研究，设计一种液压储能+弹射穿刺的穿刺机构；开展弹射穿刺仿真分析，通过模拟飞机机舱蒙皮，验证在不同动能下刺针对机舱蒙皮的破穿能力，为设计提供指导；搭建台架试验台验证设计方案，分别对3种不同材质钢板和3种不同材质铝合金板进行穿刺试验，进一步验证了设计方案的可行性。

弹射穿刺灭火技术是未来援救装备发展的一个重要方向，弹射机构目前采用液压储能+弹射穿刺，受制于油缸制造工艺及液压系统被压等问题，刺针速度难以继续提高，故弹射动能无法再提高；可开展电磁弹射技术研究，利用新能源车自身配备的高压平台，提高弹射穿刺动能，使破拆能力进一步增强。