DOI: 10.11883/bzycj-2018-0009

高速破片撞击充液容器时容器壁面的损伤*

马丽英[1],李向东[1],周兰伟[1],蓝肖颖[1],宫小泽[2],姚志军[2]
(1. 南京理工大学机械工程学院,江苏 南京 210094;
2. 中国白城兵器试验中心,吉林 白城 137001)

摘要: 为研究高速破片(钨球)撞击充液容器(贯穿前后壁面)时容器壁面的毁伤情况,利用 ANSYS/LS-DYNA 对该过程进行了数值模拟,分析了破片撞击动能对充液容器前后壁面毁伤程度的影响,并进行实验验证。结果表明:高速破片撞击充液容器形成的液压水锤对充液容器前后壁面的破坏程度可分为 3 个等级,即前后壁面均未出现裂纹、前壁面没有出现裂纹后壁面出现裂纹和前后壁面均出现裂纹且后壁面呈花瓣式开裂;破片撞击充液容器过程中,前后壁面的最大变形量和前后壁面的裂纹总数随破片撞击动能的增加而增大。

关键词: 兵器科学与技术;高速破片;充液容器;液压水锤;壁面破坏;撞击;损伤
中图分类号: O385 **国标学科代码:** 13035 **文献标志码:** A

当高速侵彻体(如子弹或战斗部的破片)穿透装有液体容器(如油箱、油罐车、输油管道等[1-3])壁面并进入液体时,在液体中形成很强的压力脉冲,并以冲击载荷的形式作用于容器结构上,使容器结构所受载荷突升,如果容器结构的强度不够,就会出现变形、裂纹或者解体破坏,这就是液压水锤现象。液压水锤效应[4]是引起油箱失效一个重要因素,而油箱是飞机的重要功能部件之一,所以液压水锤效应是飞机油箱设计者需要考虑的重要问题。

20 世纪 70 年代就有学者对液压水锤现象进行研究并建立工程计算模型,用以预测箱体内的压力。Ball 等[5]重点讨论了冲击阶段的箱体响应情况,并用 SATANS 代码计算了箱体的响应情况。但是 SATANS 代码对液压水锤的计算具有一定局限性,它没有考虑材料的非线性和剪切效应,只分析一种理想材料在水锤作用下的动态响应问题。Disimile 等[6]对水锤效应的各个阶段进行了分析,在液体中布置传感器,结合高速摄像技术,得到 3 种不同材料破片以 300~400 m/s 速度撞击充液容器形成液压水锤作用的各个阶段压力分布规律、大小及作用方式,但未对液体与固体之间的耦合关系进行分析。Charles 等[7]使用 EUROPLEXUS 代码模拟油箱在遭受破片撞击之后,水中气腔膨胀和坍塌的过程,并进行了实验验证。这些成果可以用来评估破片传递给水的能量多少及对油箱结构造成的破坏程度,但由于计算模型简化太多,导致负载各向异性,造成能量丢失。Varas 等[8-11]通过用速度为 600~900 m/s 的钢质球形破片(直径为 12.5 mm)撞击充液的铝合金(6063-T5)方管,模拟了机翼油箱受到撞击的情况,但没有揭示破片动能对方管变形的影响。Nishida 等[12]研究了破片直径和箱体材料特性对水锤作用下壁面裂纹和破坏的影响,得到铝合金管壁面上出现裂纹的极限速度与箱体的极限强度、破片直径有关。该研究主要集中于速度为 20~400 m/s 的破片,未对高速破片撞击下的箱体响应进行研究。Kwon 等[13-14]对充液油箱在破片撞击下的动态响应问题进行了一系列的数值模拟,重点研究了破片撞击油箱后没有穿透油箱后壁面的情况下油箱结构的响应过程,分析了油箱液面高度、液体密度、油箱材料性能、破片质量和速度等参数对箱体结构动态响应的影响,但没有对该过程进行实验验证。国内,蒋运华等[15]、张伟等[16]和郭子涛等[17]主要研究了弹体的水中弹道轨迹、气腔形状及弹体头部形状对入水弹道稳定性的影响。而近年来,关于水锤效应对容器结构的毁伤研究逐渐增多,李典等[18]和仲强等[19]研究

* **收稿日期:** 2018-01-08; **修回日期:** 2018-04-13
基金项目: 国家自然科学基金面上项目(11572159)
第一作者: 马丽英(1990—),女,硕士, maliying10102013@163.com;
通信作者: 李向东(1969—),男,博士,教授, lixiangd@njust.edu.cn。

了圆柱形钝头破片撞击液舱后液舱内的压力变化及破片变形情况。

以上研究均未涉及破片动能大小与容器壁面毁伤程度的关系，故本文中主要研究充液容器在不同动能破片撞击下的容器壁面所受载荷、容器壁面的响应及毁伤程度，建立破片撞击动能与容器壁面毁伤的关系，为战场目标、油箱、民用设施（油罐车、输油管道等）的设计与防护提供参考。

1　高速破片撞击充液容器的数值计算及实验

1.1　有限元模型的建立

为了研究破片撞击充液容器后其前后面板的响应特性，对充满水的容器建立有限元模型，如图 1 所示，模型中充液容器由压盘、前后面板、圆筒组成。其中，圆筒材料为钢，外径为 130 mm，内径110 mm，高 98 mm。圆筒前后壁面为 180 mm×180 mm×4 mm 的2024 T4 铝合金板。用压盘将铝合金板固定在圆筒两侧，压盘内径为 105 mm，外径 180 mm，厚度 14 mm，破片是钨球。使用 LS-DYNA 对高速破片撞击充液容器的过程进行数值计算。

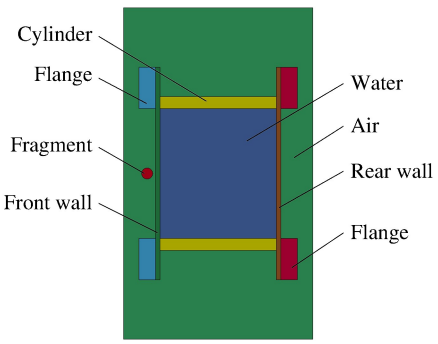

图 1 有限元模型

Fig. 1 Finite element model

数值模拟时，采用 Johnson Cook 模型和 Grüneisen 状态方程描述充液容器的前后面板材料，面板材料和状态方程参数表 1 和 2；采用 Plastic Kinematic 模型描述破片材料，材料参数见表 3。

表 1 前后面板材料参数

Table 1 Material parameters of front and rear walls

材料	ρ/(kg·m^{-3})	E/GPa	μ	A/MPa	B/MPa	C	n	m
铝 2024-T4	2797	69.63	0.33	265	462	0.015	0.34	1.0

注：ρ—密度，E—弹性模量，μ—泊松比，A—屈服强度，B—应变硬化洗漱，C—应变率相关系数，n—应变硬化指数，m—温度相关系数.

表 2 Grüneisen 状态方程参数

Table 2 Parameters of Grüneisen EOS

体积声速/(m·s^{-1})	u_s-u_p 曲线斜率	Grüneisen 常数
5 286	1.4	2.0

表 3 破片材料参数

Table 3 Material parameters of fragment

材料	密度/(kg·m^{-3})	弹性模量/GPa	泊松比
钨	17 600	350	0.284

用 Null 模型和 Grüneisen 状态方程描述水。用 Null 模型和 Linear Polynomial 状态方程描述空气，其中压力由式(1)定义：

$$p=C_0+C_1\mu+C_2\mu^2+C_3\mu^3+(C_4+C_5\mu+C_6\mu^2)E \tag{1}$$

式中：C_0～C_6 为常数；$\mu=1/V-1$，V 为相对体积；E 为初始体积内能。当 $C_0=C_1=C_2=C_3=C_4=C_5=0$，$C_4=C_5=\gamma-1$ 时，即用符合 γ 律状态方程的气体模型来表征空气，γ 为比热系数。主要材料参数见表 4。

用刚体模型来描述压盘和圆筒。钨球、前后面板、压盘和圆筒为 Lagrange 网格，水和空气为 Euler 网格且共节点。水和空气与圆筒和前后壁面之间用 ALE（Arbitrary Lagrange-Euler）方法进行耦合。

表 4 水和空气的主要材料参数表

Table 4 Material parameters of water and air

材料	密度/(kg·m^{-3})	体积声速/(m·s^{-1})	u_s-u_p 曲线斜率	C_4	C_5
水	1 000	1 480	1.979	—	—
空气	1.25	—	—	0.4	0.4

1.2 高速破片撞击充液容器实验

1.2.1 实验系统

实验布置如图 2 所示。实验时,用弹道枪发射球形破片撞击充液容器。用测速靶和计时仪测破片撞击容器时的速度,并用高速相机记录破片穿出容器后的运动状态。由于破片直径小于弹道枪口径,为了使用弹道枪加速驱动破片获得一定速度,采用弹托来密闭火药气体压力;同时,在测速靶前增加了挡托装置,防止弹托干扰测速和撞击壁板。充液容器后布置了一块白色背景布,便于高速相机捕捉破片的运动状态。实验所用充液容器如图 3 所示,充液容器由压盘、前后面板、圆筒和螺杆组成。容器尺寸同上,用压盘将铝合金板固定在圆筒两侧,通过螺栓压紧固定。

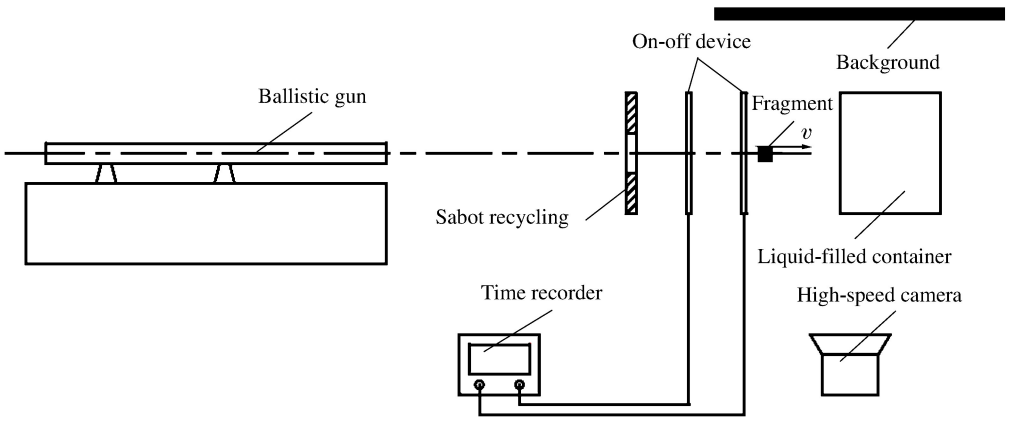

图 2 实验装置及布置示意图

Fig. 2 Experiment device and layout diagram



图 3 充液容器实物图

Fig. 3 Liquid-filled vessel

1.2.2 实验情况及结果分析

共进行 25 发试验,剔除无效实验(如破片命中位置偏离容器中心较远和测试数据不全等)后剩余 17 发,实验情况及结果如表 5 所示(部分)。

撞击动能为 1 191、4 667 和 9 792 J 破片撞击充满水的容器后,容器前后壁面的试验照片与三维激光扫描图如图 4 所示。可以看出,破片命中位置处的容器壁面的变形量不是以破片撞击点为中心的,而是与水接触的壁面均有变形。破片动能较低时,壁面的最大变形出现的破片撞击点周围,但随着破片撞击动能的增加破片撞击点对液压水锤的影响减小。图 4(e)壁面上有 2 个弹孔,远离面板中心的弹孔为弹托撞击面板造成的(由于铝制弹托质量较小速度较低,到达时间较晚,对水锤效应的影响较小,所以可以忽略)。

表 5 部分实验情况及结果表

Table 5 Part of the experimental situation and results

日期-发序	m/g	v_0/(m·s^{-1})	v_r/(m·s^{-1})	E_0/J	δ_f/cm	δ_r/cm
2016.12.23-2	4.04	768	453	1 191.44	0.17	0.61
2016.12.23-3	4.03	1 049	699	2 217.31	0.48	0.98
2016.12.23-4	4.04	1 097	757	2 430.87	0.64	1.23
2016.12.23-5	4.01	1 399	933	3 924.19	0.68	2.87
2016.12.23-8	4.05	1 560	1 066	4 928.04	0.98	2.48
2017.03.26-1	8.10	1 028	755.8	4 279.98	0.69	2.69
2017.03.26-2	8.04	1 077.5	772.8	4 667.25	0.56	1.77
2017.03.26-3	8.14	1 026.7	740.1	4 290.24	0.59	21.9
2017.03.26-7	8.09	885.7	594.14	3 173.16	0.44	1.65
2017.03.26-8	8.08	1 130	808	5 158.68	0.70	3.14
2017.04.15-1	8.11	724.8	551.9	2 130.23	0.49	1.67
2017.04.15-2	8.06	1 238	948.1	6 176.56	1.19	4.12
2017.04.15-5	8.12	1 417	1 010	8 152.03	1.35	4.36
2017.04.15-6	8.11	1 554	1 082	9 792.48	1.31	4.07

注：m—破片质量，v_0—破片撞击速度，v_r—破片穿出容器后剩余速度，E_0—破片撞击动能，δ_f—前壁面最大变形量，δ_r—后壁面最大变形量

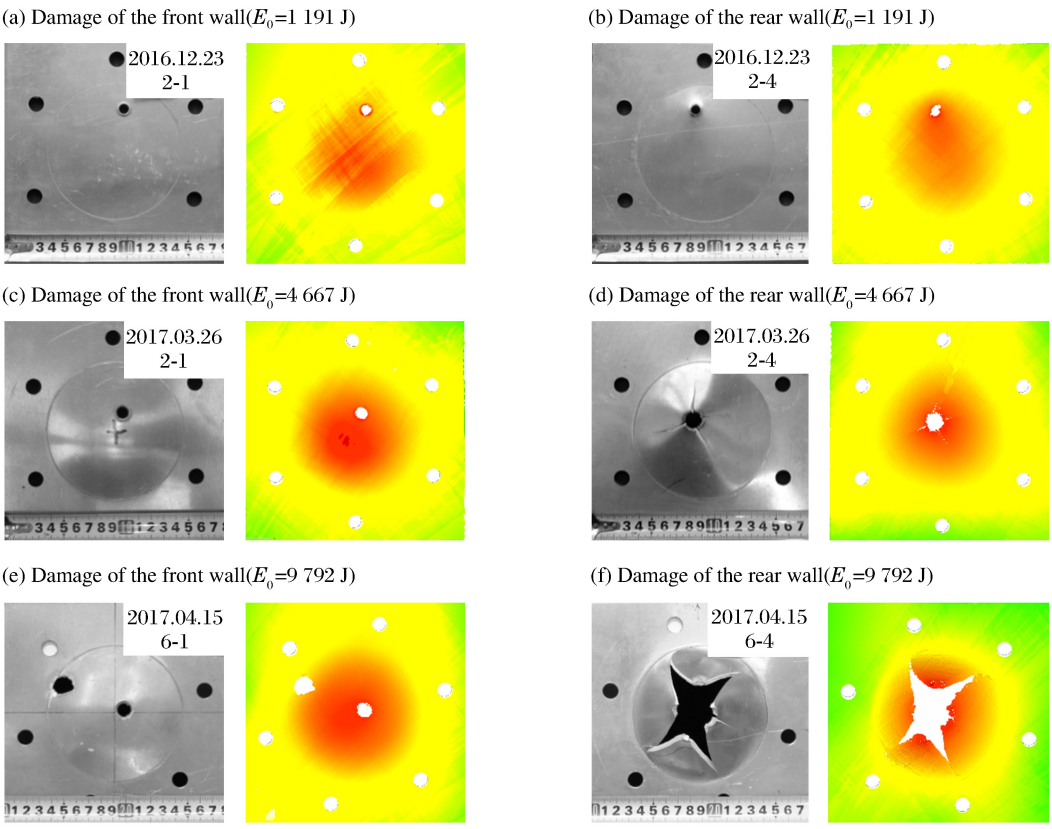

图 4 前后面板毁伤情况(实验和三维扫描)

Fig. 4 Front and rear walls damage (experiment and three-dimensional scan)

1.3　实验与数值计算结果对比

选取撞击动能为 1 191、4 667 和 9 792 J 的破片撞击充液容器的过程进行计算，并和实验结果进行了对比，结果如表 6 所示，破片穿出容器后壁面的剩余速度最大误差为 5.3%，实验与数值仿真结果具有较好的一致性，说明有限元模型的建立和材料参数的选取比较合理。

表 6　试验与数值仿真中破片剩余速度对比

Table 6　Comparison of residual velocities in experiment and numerical simulation

日期-发序	E_0/J	v_r/(m·s^{-1})		误差/%	δ_f/cm		误差/%	δ_r/cm		误差/%
		实验	计算		实验	计算		实验	计算	
2016.12.23-2	1 191	453	429	5.3	0.17	0.19	−11.76	0.61	0.66	−8.20
2017.03.26-2	4 667	772.8	761	1.4	0.56	0.63	−12.5	1.77	1.57	11.29
2017.04.15-6	9 792	1 082	1123.9	−3.9	1.31	1.29	1.5	4.07	3.49	14.25

撞击动能为 1 191、4 667 和 9 792 J 破片撞击充满水的容器后，实验与数值模拟中充液容器前后壁面的破坏情况如图 5 所示。可以看出沿破片入射方向，破片撞击动能为 1 191 J 时，充液容器的前后壁面上只有圆孔没有出现裂纹的现象；破片撞击动能为 4 667 J 时充液容器前壁面向外凸起但圆孔周围没有出现裂纹，后壁面不仅向外凸起并且圆孔周围出现裂纹；破片撞击动能为 9 792 J 时（前面板上靠近边缘的弹孔为铝制弹托打在铝靶上，由于铝制弹托的质量小、速度低，到达时间较晚，所以忽略不计），充液容器的前壁面外凸并在圆孔周围出现小裂纹且后壁面呈花瓣式开裂。可见，随着破片撞击动能的增加，前后壁面的破坏越来越严重。实验与仿真结果中的壁面毁伤情况吻合。

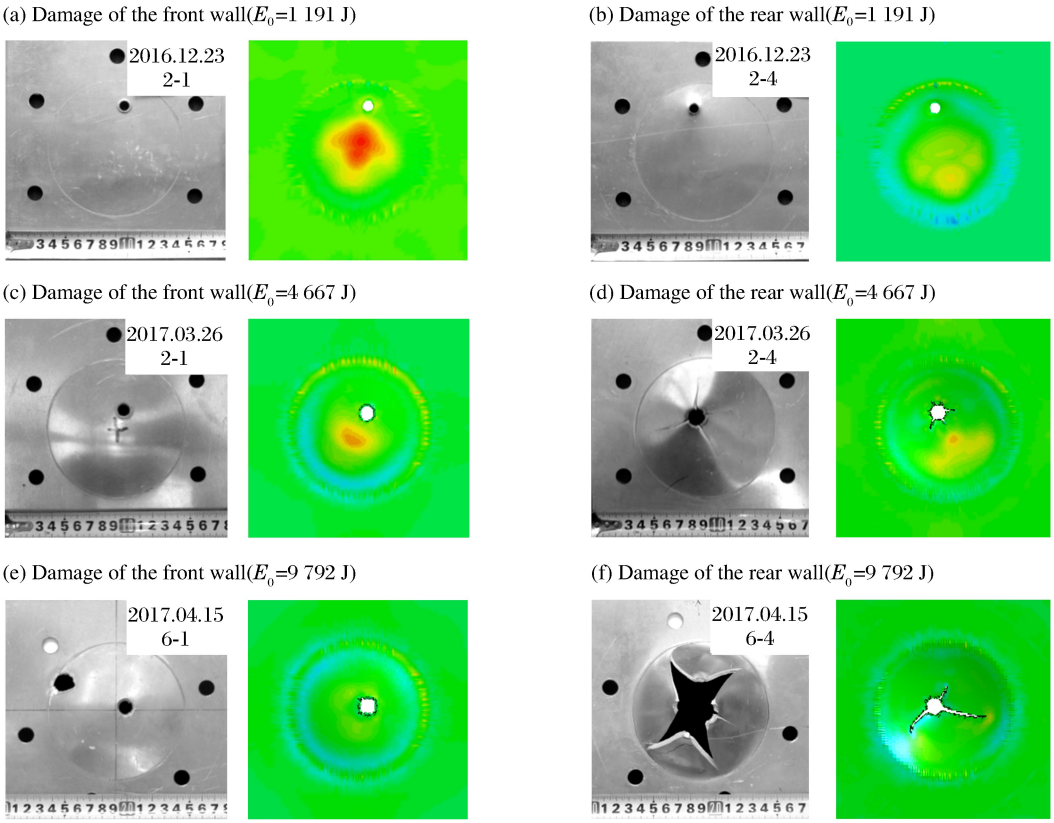

图 5　前后面板毁伤情况（实验与仿真）

Fig. 5　Front and rear walls damage (experiment and numerical simulation)

2　高速破片撞击充液容器过程中前后壁面所受载荷及分布

为研究充液容器在不同动能破片撞击作用下容器前后壁面的响应，下面通过改变破片速度计算不同动能(2 000～10 000 J，间隔为 1 000 J)破片撞击充满水的容器的过程。

2.1　破片撞击充液容器时前后壁面上的载荷分布

撞击动能为 7 000 J 的高速破片撞击充水容器过程中，前后壁面上距离破片撞击点不同距离处单元的峰值压力如图 6 所示。从图中可以看出，作用于前后壁面的峰值压力都是随壁面位置与破片入射点间距离的增加而减小，所以距离破片入射点和出射点较近的位置处，壁面的变形较大；距离破片入射点和出射点较远的位置处，壁面变形较小。容器前后壁面上距离破片入射点相同距离处，作用于后壁面峰值压力大于前壁面上的峰值压力，所以水锤效应对后壁面的破坏严重于前壁面。

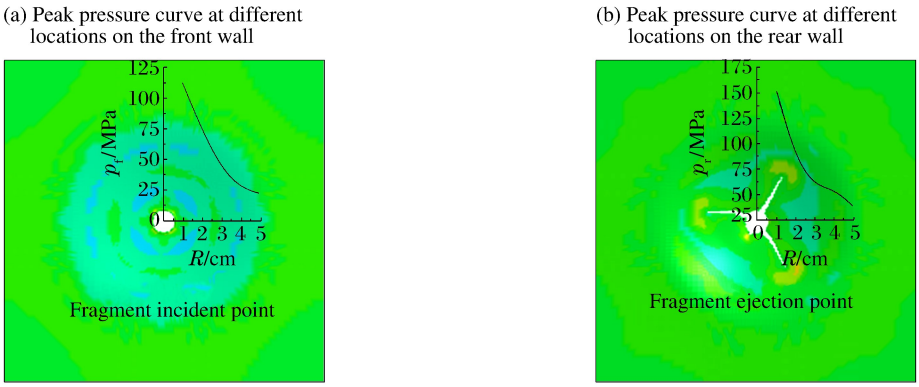

图 6　前后壁不同位置处峰值压力曲线

Fig. 6　Front and rear wall pressure changes with distance

前后壁面上距破片入射点 3 cm 处压力随时间变化曲线如图 7 所示，其中阶段Ⅰ为破片对充液容器前壁面的侵彻阶段，撞击作用在前面板中形成一个应力波，该应力波在前壁面与水的分界面处发生透射，在水中形成扰动，该扰动作用于距破片入射点 3 cm 处单元上时具有 2.7 MPa 压力。阶段Ⅱ为冲击阶段，即破片撞击水介质形成初始冲击波(冲击波在水中运动速度大于破片速度)，初始冲击波传播至前壁面 3 cm 处的最大压力为 13 MPa。破片入水冲击形成的冲击波(压力波)与壁面间存在强的耦合作用，压力作用于壁面导致壁面运动，壁面运动又会在水中形成稀疏波，导致压力降为 0。阶段Ⅲ为拖拽阶段，即破片在水中运动阶段，破片压缩水介质而在破片头部形成一个高压区。因此初始冲击波在边界处(圆筒)发生反射并与水中压力波发生干涉后，使得距破片入射点 3 cm 处压力在 50.5 μs 时下降为 0。随着破片的运动，容器内压力升高并趋于平衡，损失的动能转换成了容器内液体的压力势能和其他的能量。67.5 μs 时破片头部高压区内压力开始作用于容器后壁面，此时液体压力为 75.8 MPa，大于初始冲击波压力。高压区内压力波在液体与后壁面的交界面处发生反射，使得作用于后壁面的压力迅速下降，后壁面的第 2 个压力波为破片即将到达容器后壁面时破片头部高压区内压力作用于后壁面。阶段Ⅳ为破片对后壁面的侵彻阶段，破片侵彻后壁面时破片动能主要用于侵彻容器后壁面，不再传递能量给水，所以作用于后壁面的压力降低。阶段Ⅴ为破片穿出充液容器后阶段，容器中的水还具有动能使容器内气腔继续膨胀，所以前后壁面上的压力逐渐增大，气腔膨胀至其体积最大后，作用于容器前后壁面上的压力开始下降。

选取作用于容器前壁面上距破片撞击点 2、3 和 4 cm 处的压力时间曲线如图 8 所示。从图中可以看出 2 cm 处的初始冲击波强度最大。实际上，破片头部每一点撞击液面时，都在撞击点前产生一个半球形冲击波，并以半球面波形式在液体中传播。因此靠近撞击中心位置所受载荷是由多个脉冲组成的。3 和 4 cm 处单元拖拽阶段的压力大于初始冲击波传播至该位置处的压力，说明随着破片在容器内运动

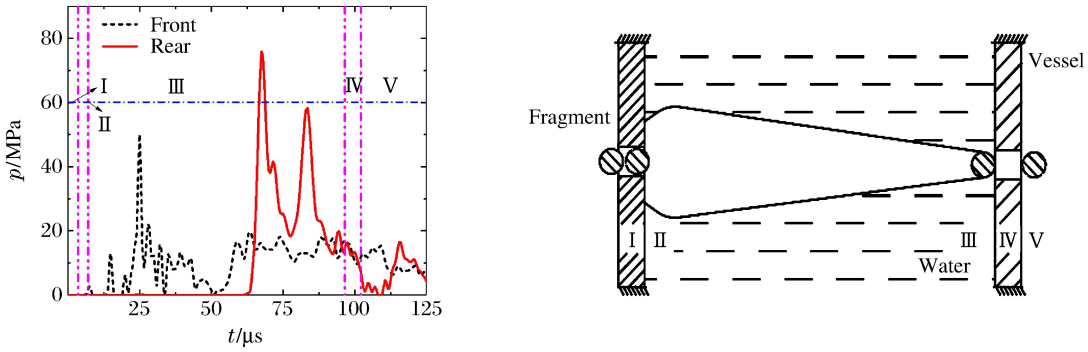

图 7　不同阶段压力变化曲线

Fig. 7　Pressure change curve in different stages

时间的增加液体内压力是增大的。

作用于容器后壁面距破片撞击点 2、3 和 4 cm 处的压力时间曲线如图 9 所示，可以看出距离对作用于容器后壁面的第一个压力波的影响较明显。随所处位置与破片撞击点距离的增加，作用于后壁面的压力是减小的。其中，距离破片撞击点 2 cm 处压力为 4 cm 处的 1.31 倍。说明液压水锤效应对容器后壁面破片出口位置破坏作用大于其他位置。由于受到容器边界效应的影响，后面作用于壁面 4 cm 处的压力大于 3 cm 处的压力。

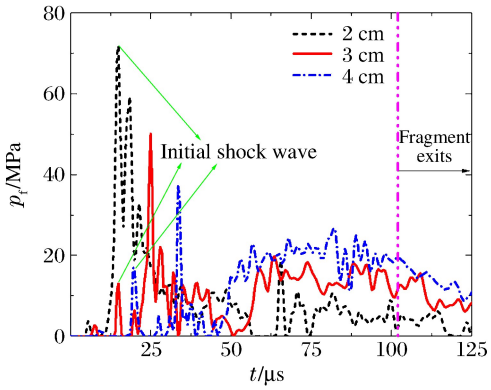

图 8　前壁面不同位置处压力时间曲线

Fig. 8　Pressure time curve at the different positions of the front wall

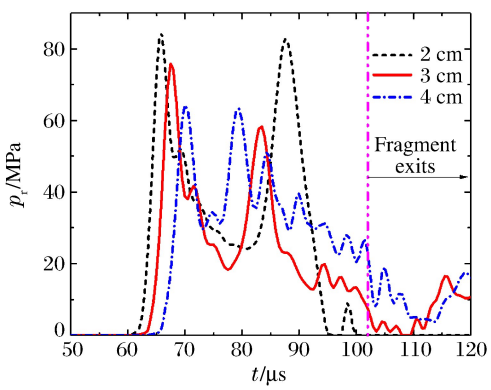

图 9　后壁面不同位置处压力时间曲线

Fig. 9　Pressure time curve at the different positions of the rear wall

2.2　破片动能对容器前后壁面所受最大载荷的影响

作用于充液容器前后壁面距破片入射点 3 cm 处最大压力曲线如图 10 所示，可以看出随着破片动能的增加，作用于充液容器前后壁面的最大压力是增大的。并且作用于容器后壁面最大压力增加的幅度大于容器的前壁面。在破片撞击动能小于 4 000 J 时，容器前壁面的最大压力大于容器后壁面的压力；破片撞击动能大于 6 000 J 时后壁面的最大压力大于其前壁面的最大压力，所以后壁面的变形与破坏程度大于前壁面（破片动能小于 10 000 J）。

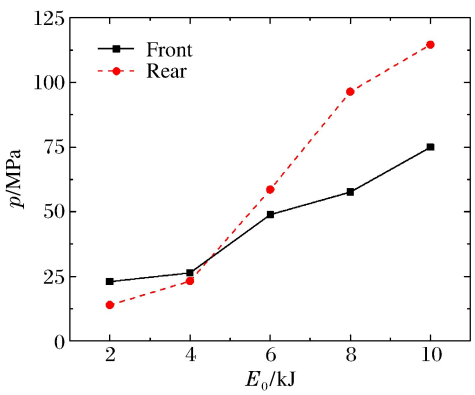

图 10　压力动能曲线

Fig. 10　Pressure-kinetic energy curve

3　容器壁面的响应

3.1　前后壁面的变形情况

图 11 为撞击动能为 7 000 J 的破片撞击充液容器过程中容器前后壁面的变形情况，可以看出 9 μs 时破片刚穿透容器前壁面进入水中，容器的前后壁面的变形量为 0，即容器的前后壁面均无变形，9 μs 后前壁面开始产生外凸变形。66 μs 后（破片在充液容器中），容器后壁面开始出现变形，前壁面变形量为 2.74 mm。容器前壁面的最大变形量出现于破片穿出充液容器后 90 μs，最大变形量为 11.42 mm。破片穿出容器 163 μs 时，后壁面的最大变形量最大，为 20.15 mm，是前壁面最大变形量的 1.76 倍，而此时前壁面变形与其变形量最大值相比变小了。说明高速破片撞击充液容器过程中，容器前壁面先开始出现变形，也最先出现最大变形，后壁面的变形大于前壁面。

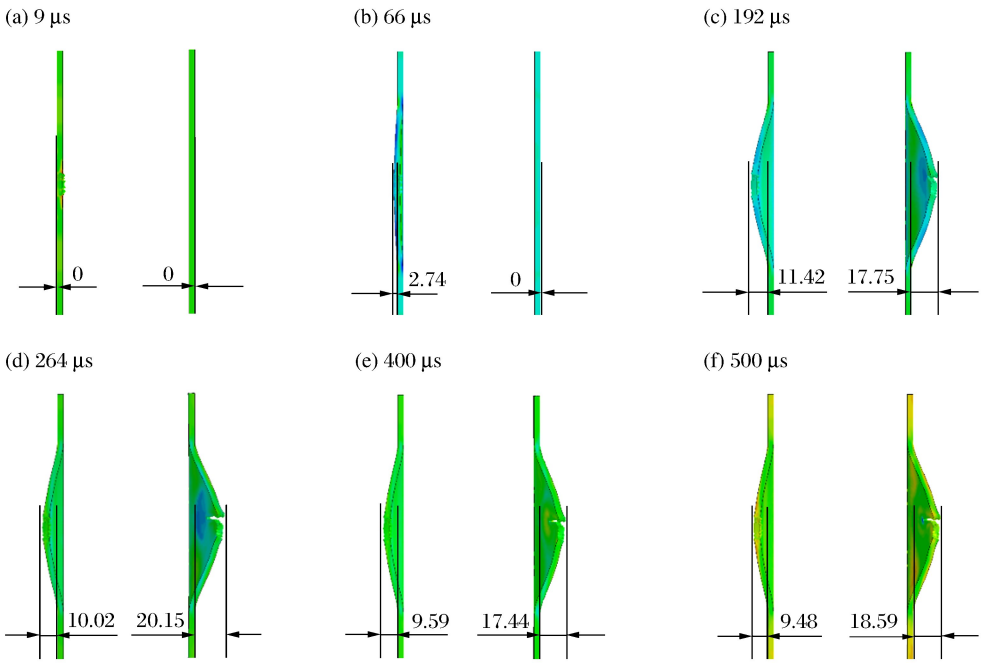

图 11　容器前后壁面的变形情况（单位：mm）

Fig. 11　Deformation of the front and rear walls change with time (unit: mm)

3.2　破片动能对前后壁面距破片撞击点 3 cm 处变形量的影响

破片撞击动能为 7 000 J 时容器前后壁面上距离破片撞击点 3 cm 处变形量随时间变化曲线如图 12 所示，容器在破片撞击充液容器的侵彻和冲击阶段前后壁面几乎无变形，破片进入水中并在水中运动时，容器的前壁面先开始发生变形，随着破片水中运动时间的增加前壁面的变形逐渐增大。破片在水中运动一段时间后（破片未穿出容器），后壁面开始发生变形。前后壁面的最大变形均出现在破片穿出容器后，并且后壁面的最大变形量大于前壁面的变形量，约为前壁面变形量的 1.6 倍。前后壁面变形量达到最大值后，变形量随时间小幅下降后逐渐趋于平缓。

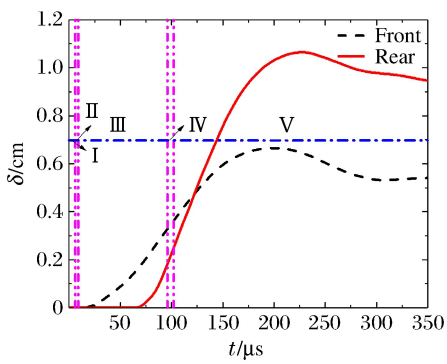

图 12　前后壁面变形量时间曲线

Fig. 12　Front and rear walls displacement time curve

充液容器前壁面距破片入射点 3 cm 处变形量时间曲线如图 13 所示，可以看出破片撞击动能对容器前壁面变形量随时间的变化规律影响不大。随破片撞击动能的增加前壁面的最大变形是逐渐增大的，破片撞击动能为 10 000 J 时，前壁面的变形为 0.79 cm 为破片撞击动能为 2 000 J 时的 2.63 倍。破片撞击动能较低时，随破片动能的增加前壁面变形量增加的较为明显；破片动能较高时，随破片动能的增加前壁面变形量增加量减小。而且前壁面最大变形量出现的时间较为相近，时间最大相差 27 μs。

后壁面距破片入射点 3 cm 处变形量时间曲线如图 14 所示，图中可以看出破片撞击动能越高容器后壁面的变形量越大，破片撞击动能为 10 000 J 时，后壁面的变形为 1.27 cm，约为前壁面变形量的1.61 倍。且后壁面达到最大变形量的时间随破片撞击动能的增加而减小。壁面变形的增加幅度随破片撞击动能的增加是减小的。

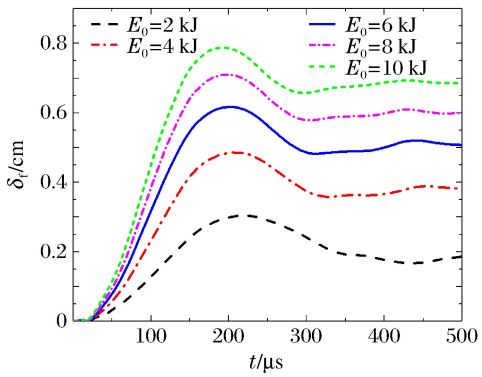

图 13　前壁面变形量时间曲线

Fig. 13　Front wall displacement time curves

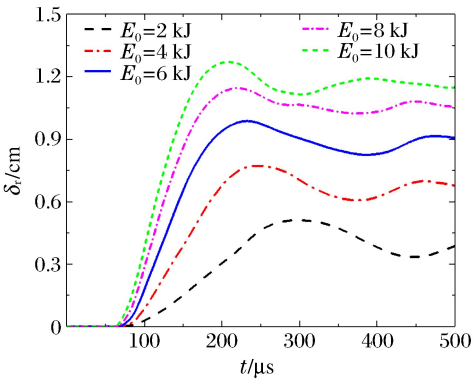

图 14　后壁面变形量时间曲线

Fig. 14　Rear wall displacement time curves

3.3　破片动能对容器前后面板的最大变形量的影响

图 15 为不同动能破片撞击充液容器后前后壁面最大变形量与能量关系图，其中 δ_f 为充液容器前壁面的变形量，δ_r 为充液容器后壁面的变形量。从图中可以看出充液容器的前后壁面的最大变形量随破片动能的增加而增大。在 1 191 J＜E_0＜10 756 J，前壁面的变形量由 0.17 cm 增加到 2.58 cm，后壁面的变形量由 0.66 cm 增加到 5.06 cm。可见与前壁面相比，后壁面的变形量随能量的增加而增加的幅度更大。充液容器后壁面在 E_0＝2 130 J 时就已经出现裂纹，而前壁面在 E_0＝8 152 J 时才开始出现裂

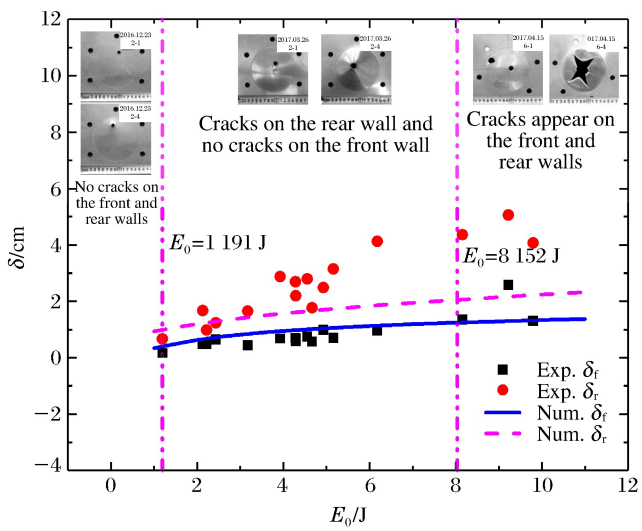

图 15　破片撞击动能与充液容器前后壁面变形量的关系图

Fig. 15　Relationship between the kinetic energy of the fragment and the deformation of the front and rear wall

纹。且在 $E_0<8\,152$ J 时充液容器后壁面的变形量约为前壁面变形量的 3.36 倍；$E_0>8\,152$ J 时，充液容器后壁面的变形量约为前壁面变形量的 3.17 倍。说明在 $E_0<8\,152$ J 时，充液容器后壁面的破坏程度比前壁面严重；在 $E_0\geqslant 8\,152$ J 即充液容器前壁面出现裂纹后，后壁面的变形量虽然也在增加，但与前壁面没有出现裂纹的情况相比变形量增加的幅度减小。

3.4　破片动能对前后面板上出现的裂纹数量的影响

如图 16 所示为前后壁面裂纹数量与能量的关系图，试验中除了破片动能为 1 191 J 时充液容器后壁面没有出现裂纹外，其他能量（$E_0>1\,191$ J）的破片撞击充液容器后，充液容器后壁面全部出现外凸并开裂，壁面裂纹数量也与破片撞击动能有关。破片撞击动能越高，壁面出现的裂纹数量越多。充液容器的后壁面出现裂纹所需要的能量较小，约为1 191 J；充液容器前壁面出现裂纹的临界能量约为8 152 J。说明破片撞击充液容器过程，后壁面更容易破坏，且后壁面的损伤比前壁面的损伤更严重。

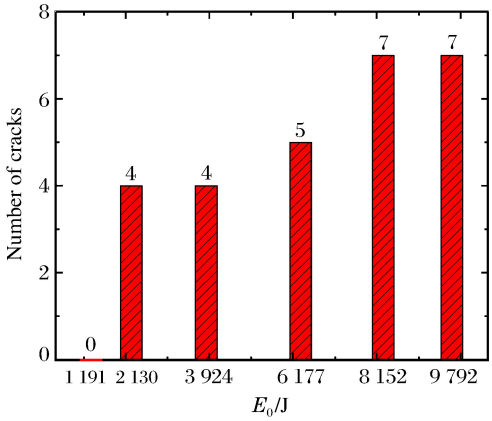

图 16　充液容器前后壁面的裂纹数量与破片撞击动能关系

Fig. 16　Relationship between the kinetic energy of the fragment and the number of cracks in the front and rear walls

充液容器的毁伤程度主要是通过容器的漏液量来衡量的。高速破片撞击充液容器过程中，充液容器前后壁面均未出现裂纹时，容器通过前后壁面上的小孔向外漏液；充液容器只有后壁面出现裂纹时，容器通过前壁面的小孔和后壁面的大孔向外漏液；前后壁面均出现裂纹时，油箱则通过前后壁面上大孔向外漏液，所以，充液容器前后壁面均出现裂纹时，充液容器的毁伤程度更高。同时，影响液压水锤效应的因素很多，本文只通过改变破片撞击速度的角度来研究破片撞击动能对对壁面毁伤的影响，其他因素（如壁面材料、壁面厚度，容器充液量、破片尺寸、形状及容器边界）对壁面的毁伤的影响将在后续的研究中进行。

4　结　论

通过对高速破片撞击前后壁面为 4 mm 厚的 Al 2024 T4 的圆筒形充液容器形成液压水锤的数值计算和实验研究，可得到如下结论：(1) 高速破片撞击充液容器形成液压水锤过程中，水锤效应对充液容器前后壁面的破坏程度可分为 3 个等级，即充液容器前后壁面均未出现裂纹、前壁面出现裂纹而后壁面没有出现裂纹和前后壁面均出现裂纹且后 0.壁面呈花瓣式开裂的情况；(2) 液压水锤作用过程中，充液容器的前后壁面的最大变形量随破片撞击动能（E_0）的增加而增大。在 $1\,191\text{ J}<E_0<8\,152$ J 时充液容器后壁面的变形量约为前壁面变形量的 3.36 倍；$E_0>8\,152$ J 时，充液容器后壁面的变形量约为前壁面变形量的 3.17 倍。充液容器后壁面比前壁面的破坏更严重；(3) 破片撞击动能越高，充液容器壁面出现的总裂纹数量越多。

参考文献：

[1] D'ALESSANDRO V. Modeling of tank vehicle dynamics by fluid sloshing coupled simulation [D]. Italy, 2012.

[2] LINGENFELTER A J, LIU D, REEDER M F. Time resolved flow field measurements of orifice entrainment during a hydrodynamic ram event [J]. Journal of Visualization, 2017,20(1):63-74. DOI: 10.1007/s12650-016-0378-2.

[3] FOUREST T, LAURENS J M, DELETOMBE E, et al. Confined Rayleigh-Plesset equation for hydrodynamic ram analysis in thin-walled containers under ballistic impacts[J]. Thin-Walled Structures, 2015,86:67-72. DOI: 10.1016/j. tws. 2014. 10. 003.

[4] MOUSSA N A. The potential for fuel tank fire and hydrodynamic ram from uncontained aircraft engine debris: DOT/FAA/AR-96/95 [R]. Springfield: National Technical Information Service, 1997.

[5] BALL R E, POWER H L, FUHS A E. Fuel tank wall response to hydraulic ram during the shock phase [J]. Journal of Aircraft, 1973,10(9):571-572. DOI: 10.2514/3.44393.

[6] DISIMILE P J, DAVIS J, TOY N. Mitigation of shock waves within a liquid filled tank [J]. International Journal of Impact Engineering, 2011,38(2):61-72. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2010.10.006.

[7] CHARLES A, DELETOMBE E, DUPAS J. A numerical study on cavity expansion in water: hydraulic ram under ballistic impacts [J]. Structures Under Shock and Impact XII, 2013,126:203. DOI: 10.2495/SU120181.

[8] VARAS D, LÓPEZ-PUENTE J, ZAERA R. Numerical analysis of the hydrodynamic ram phenomenon in aircraft fuel tanks [J]. AIAA journal, 2012,50(7):1621-1630. DOI: 10.2514/1.J051613.

[9] VARAS D, LÓPEZ-PUENTE J, ZAERA R. Experimental analysis of fluid-filled aluminium tubes subjected to high-velocity impact [J]. International Journal of Impact Engineering, 2009,36(1):81-91. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2008.04.006.

[10] VARAS D, ZAERA R, LÓPEZ-PUENTE J. Numerical modelling of partially filled aircraft fuel tanks submitted to hydrodynamic ram[J]. Aerospace Science and technology, 2012,16(1):19-28. DOI: 10.1016/j.ast.2011.02.003.

[11] VARAS D, ZAERA R, LÓPEZ-PUENTE J. Numerical modelling of the hydrodynamic ram phenomenon[J]. International Journal of Impact Engineering, 2009,36(3):363-374. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2008.07.020.

[12] NISHIDA M, TANAKA K. Experimental study of perforation and cracking of water-filled aluminum tubes impacted by steel spheres[J]. International Journal of Impact Engineering, 2006,32(12):2000-2016. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2005.06.010.

[13] KWON Y W, YANG K, ADAMS C. Modeling and simulation of high-velocity projectile impact on storage tank [J]. Journal of Pressure Vessel Technology, 2016,138(4):041303. DOI: 10.1115/1.4032447.

[14] KWON Y, YUN K. Numerical parametric study of hydrodynamic ram[J]. International Journal of Multiphysics, 2017,11(1):15-47. DOI: 10.21152/1750-9548.11.1.15.

[15] 蒋运华，徐胜利，周杰. 运动体小扰动下入水空泡试验研究[J]. 弹道学报，2016，28(1)：81-86. DOI：10.3969/j.issn.1004-499X.2016.01.015.
JIANG Yunhua, XU Shengli, ZHOU Jie. Experimental study on water entry cavity for vehicle with small perturbation[J]. Journal of Ballistics, 2016,28(1):81-86. DOI: 10.3969/j.issn.1004-499X.2016.01.015.

[16] 张伟，郭子涛，肖新科，等. 弹体高速入水特性实验研究[J]. 爆炸与冲击，2011，31(6)：579-584.
ZHANG Wei, GUO Zitao, XIAO Xinke, et al. Experiment investigation on behaviors of projectile high-speed water entry[J]. Explosion and Shock Waves, 2011,31(6):579-584.

[17] 郭子涛. 弹体入水特性及不同介质中金属靶的抗侵彻性能研究[D]. 哈尔滨：哈尔滨工业大学，2012.

[18] 李典，朱锡，侯海量，等. 高速杆式弹体侵彻下蓄液结构载荷特性的有限元分析[J]. 爆炸与冲击，2016，36(1)：1-8. DOI：10.11883/1001-1455(2016)01-0001-08.
LI Dian, ZHU Xi, HOU Hailiang, et al. Finite element analysis of load characteristic of liquid-filed structure subjected to high velocity long-rod projectile penetration[J]. Explosion and Shock Waves, 2016,36(1):1-8. DOI: 10.11883/1001-1455(2016)01-0001-08.

[19] 仲强，侯海量，朱锡，等. 陶瓷/液舱复合结构抗侵彻数值分析[J]. 爆炸与冲击，2017，37(3)：510-519. DOI：10.11883/1001-1455(2017)03-0510-10.
ZHONG Qiang, HOU Hailiang, ZHU Xi, et al. Numerical analysis of penetration resistance of ceramic/fluid cabin composite structure[J]. Explosion and Shock Waves, 2017,37(3):510-519. DOI: 10.11883/1001-1455(2017)03-0510-10.

Study on wall damage of vessel in high-speed fragment impact liquid-filled vessel

MA Liying[1], LI Xiangdong[1], ZHOU Lanwei[1], LAN Xiaoying[1],
GONG Xiaoze[2], YAO Zhijun[2]
(1. *School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing* 210094, *Jiangsu, China*;
2. *Weapons Experimental Center, Baicheng* 137001, *Jilin, China*)

Abstract: We analyzed the influence of the impact energy on the damage degree of the front and rear walls and verified it by experiments. The results show that the hydrodynamic ram formed by a high-speed fragment impacting the liquid-filled vessel affects the vessel's front and rear walls and that the degree of the damage can be divided into three levels: the cracks are not observed on the front and rear walls; cracks are observed on the rear wall surface but on the front wall surface; cracks are observe on both front and rear walls and the rear wall is petal-type cracked. The maximum deformation of the front and rear walls and the total number of cracks in the front and rear walls increase with the increase of the impact energy of the fragments during the fragment impact process of the liquid-filled vessel.

Keywords: ordnance science and technology; high speed fragment; liquid-filled vessel; hydrodynamic ram; wall damage; impact; damage

(责任编辑　王小飞)