



编者按 本期开辟这一“力学诊断室”子栏目,主要是介绍以力学手段诊断产品和工程的合格与否、进行事故分析,介绍与力学有关的医疗诊断手段。

身管炸膛事故的力学诊断

陈光南¹⁾ 吴臣武 罗耕星 张坤 彭青 肖京华

(中国科学院力学研究所,北京 100190)

摘要 在勘察断口特征和弹道痕迹的基础上,分析了某型号武器身管炸膛事故的力学过程,揭示该事故缘于连续射弹的累积热,以及留膛弹头和继发弹头压缩膛内残存气体形成的高温高压。

关键词 高温,高压,身管,弹头,气体

引言

作为需要反复承受高温高压载荷的枪炮类武器身管,炸膛是其可能出现的最严重事故,它不仅会毁损武器本身,还有可能造成操作者甚至周边人员的伤亡。

本文作者参与调查的某型号武器身管炸膛事故,发生在该武器的常规射击训练过程中连续射击40余发后。所使用的弹为穿燃弹(注:为提高穿甲效果,该弹头带有一定剂量的火药)。调查发现,这起事故的不同寻常之处在于,炸膛部位在身管的前端,距离其出口不远,在扭曲的身管事故部位,罕见地出现了1大2小3个穿透型孔洞(见图1)。

鉴于前期调查结果已认定,该身管所用材料及制造工艺均符合相关标准和规范,故我们自介入此项事故调查伊始,便将工作的重心聚焦于事故身管的破坏特征和形貌勘查,以及形成它们的力学条件分析。

1 身管事故勘查

1.1 穿孔部分基本情况

由图1可知:在身管轴线上,I号和II号以及II号和III号穿孔的中心距离分别为 $3d$ 和 $6d$ 。I号穿孔和III号穿孔分别位于相邻的两散热槽内,其中心位置距离内膛出口分别为 $13d$ 和 $22d$ 。II号穿孔贯穿了4个散热槽,所在部位管径的最大膨胀率超过40%。在身管的轴向投影上,II号穿孔与另外两个穿孔的周向位置相差约 180° 。

1.2 I号穿孔形态

I号穿孔大致成四边形,其长度和宽度分别为身管内径的1.7倍和0.7倍(见图2)。管壁向外鼓胀,断口呈现剪切和撕裂特征(图2(a)),并且两个横向断口向弹头前进方向倾斜(图2(b))。穿孔周边内膛(图2(b))存在撞击坑和擦伤痕迹。

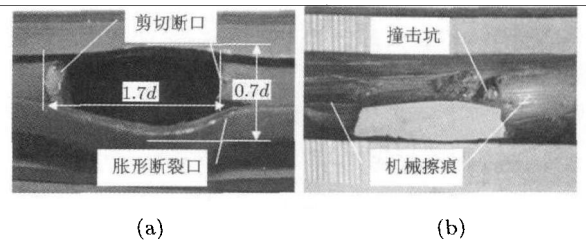


图2 I号穿孔内外形貌

1.3 II号穿孔形态

II号穿孔尺寸最大,其气爆特征也最为明显,其长度和宽度分别达到身管内径的4.3倍和2.3倍(图3(a)),其边沿存在严重的烧蚀痕迹(图3(b)和图3(c)),并且在穿孔前方(即I号与II号穿孔之间)的内壁上留有椭圆形压痕(图2(b))。

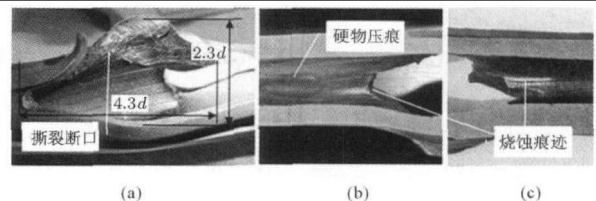


图3 II号穿孔内外形貌

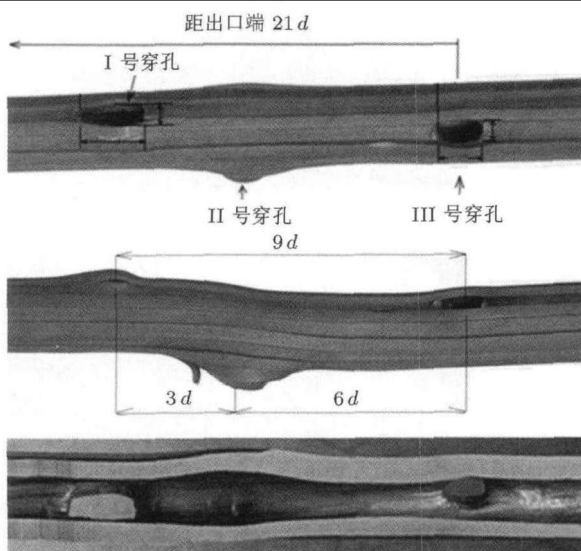


图1 某武器事故身管穿孔部分内外形态(d 为身管内径)

2012-05-02 收到第1稿,2012-06-11 收到修改稿。

1) E-mail: gnchen@imech.ac.cn

1.4 III 号穿孔形态

III 号穿孔呈椭圆形,其长宽分别为内径的 1.2 倍和 0.6 倍(见图 4(a)),其断口也向前倾斜。需要特别指出的是,在其后端的内膛表面(图 4(b)的右侧)也有明显的压痕,以及爆炸物穿孔而出时留下的摩擦痕迹。

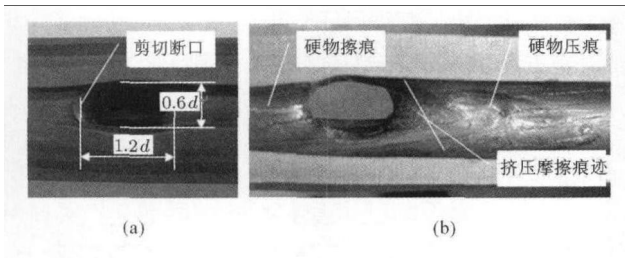


图 4 III 号穿孔内外形貌

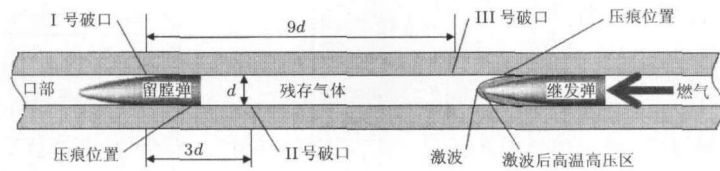


图 5 事故前夕身管内膛状态推测示意图

爆,于是产生了 I 号和 III 号穿孔。

现在的问题是:在连续发射过程中为什么会出现弹头留膛的情况?身管事故部位发生炸膛的条件是什么?在前方有弹头留膛的情况下,内膛残存气体的温度与压力能否以及如何达到炸膛所需的程度?下面我们分别予以讨论。

2.1 关于弹头留膛的原因

弹头滞留身管内膛的根本原因是其运行阻力大于燃气推力。一般讲,导致这种情况出现有两种可能的原因:其一是发射药量不足或药力减退,其二是身管的前端变形或被堵塞^[1]。

关于第 1 种可能,相关单位提供的质检和试验验证报告已经给出了肯定的结论,即已认定事故身管使用的是过期弹,且该过期弹弹头确实可因推力不足滞留内膛。但有弹头留膛并不意味着身管必然炸膛,除非还同时存在上述第二种可能,即该弹头的运行阻力大于燃气推力。

据调查,为了提高某型号武器机动性和灵活性,大幅降低了其设计重量,身管减重,当然包括减薄其壁厚,而这必然降低身管的热容量和弯曲刚度。换句话说,在相同射击条件下,薄壁身管的温升会更高,软化会更严重,由振动导致的弯曲变形和弹头运行阻力也会更大,也更容易出现弹头滞留内膛的情况。因此,身管的热容量和刚度不足,或许是导致该事故发生的更重要的原因。

2.2 身管事故部位极限承载能力估算

假定身管为锥形圆管,其内径 d 为常数,其厚度沿轴线

2 炸膛原因分析

根据上述勘查结果,特别是穿孔的形态和位置关系,考虑到身管炸膛事故发生在其连续射击过程中,这期间除弹头之外不可能有其他物体出入内膛,我们推测该事故的形成与发展过程如下(见图 5)。

在发射 40 余发弹后,在身管前端的基础温度很高的情况下,因某种原因,该身管发射的倒数第 2 发弹的弹头(留膛弹)停留在了内膛的前端,即 I 号穿孔所在位置;随后,该身管发射的最后一发弹(继发弹)点火,其弹头在火药燃气的推动下加速压缩其前方的残存气体,使其温度和压力不断升高;该部位的管壁在其内应力超过材料的屈服强度后向外鼓胀;当内应力继续升高,达到甚至超过其极限承载能力时,管壁爆裂,形成 II 号穿孔;在该爆炸产生的冲击波的激励下,分别处于该封闭段两头的留膛弹头和继发弹头也被引

线性增加,则其极限承载能力可由如下经验公式^[2]求出

$$p_b = \frac{2\sigma_s}{\sqrt{3}} \left(2 - \frac{\sigma_s}{\sigma_b} \right) \ln t$$

式中, σ_s 和 σ_b 分别为材料的屈服强度和极限强度,二者皆是温度的函数, t 为穿孔所在部位身管的外径 D 与内径 d 之比,这里 $t = D/d \approx 1.70$ 。

显然,当材料、位置和结构都确定时,影响身管极限承载能力的主要因素是温度。依据事故发生时 II 号穿孔处管壁的温度约为 773 K (500°C)^[3]、管壁材料的 σ_s 和 σ_b 分别为 400 MPa 和 500 MPa^[4] 等条件,可以求出此时管壁的极限承载能力

$$p_b \approx 294 \text{ MPa}$$

若事故发生时穿孔处的管壁温度达到 973 K (700°C),则身管材料的性能会进一步下降,其 σ_s 和 σ_b 分别降低为 110 MPa 和 132 MPa^[4],此时

$$p_b \approx 78.6 \text{ MPa}$$

考虑到膛线以及散热槽和加强筋等几何突变更容易引起应力集中,身管管壁的实际极限承载能力应该低于上述估计值。

对比该型号身管的正常膛压和弹速曲线^[3](见图 6)可知,在身管的 69d 至 77d 区段(即身管事故部位),即使管壁的温度达到了 773 K,只要此时的膛压不高于 293 MPa,该身管依然可以安全工作;但若继续升高温度,哪怕只升高 200 K,即达到 973 K,此时该部位管壁,因其极限承载能力明显下降,仅为 78.6 MPa,不要说超高膛压,就连正常的膛

压 (130~150 MPa) 都难以承受了. 温度对于身管安全性的影响由此可见一斑.

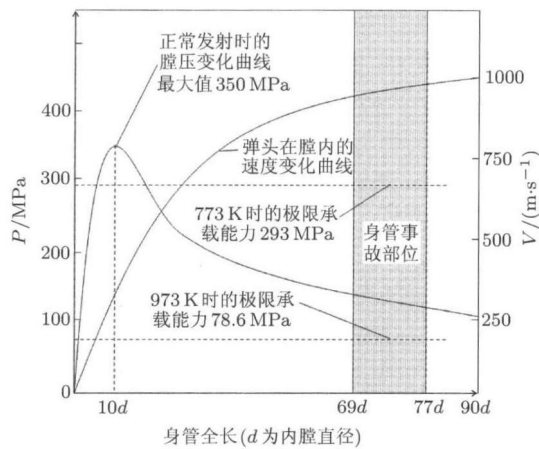


图6 该型号身管的正常膛压和弹速曲线

2.3 残存气体的高压和高温形成机制

根据空气动力学, 在前有留膛弹堵塞的情况下, 内膛残存气体的压力和温度水平与继发弹头的速度关系密切.

为讨论问题方便, 不妨设残存气体的初始压力、温度和密度分别为 p_0 , T_0 和 ρ_0 , 当地音速 $c_0 = \sqrt{\gamma RT_0}$, 其中 γ 为绝热指数 (取 $\gamma = 1.4$), R 为气体常数 (取 $R = 287 \text{ J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$).

在继发弹头以亚声速前行的阶段, 假定残存气体的压缩过程为等熵过程, 考虑残存气体的体积压缩比 $V_0/V_1 \approx 10$, 则该阶段残存气体的状态参数变化为

$$\begin{aligned} p_1 &= p_0 \left(\frac{V_0}{V_1} \right)^\gamma \approx 25.0 p_0 \\ \rho_0 &= \rho_0 \left(\frac{V_0}{V_1} \right) \approx 10.0 \rho_0 \\ T_1 &= T_0 \left(\frac{V_0}{V_1} \right)^{\gamma-1} \approx 2.5 T_0 \\ c_1 &= c_0 \left(\frac{T_1}{T_0} \right)^{0.5} \approx 1.6 c_0 \end{aligned}$$

若其初始条件为 $p_0 = 1 \text{ MPa}$, $T_0 = 373 \text{ K}$, $\rho_0 = p_0/RT_0$, 则在该阶段结束时, 残存气体的压力和温度值可达: $p_1 = 25 \text{ MPa}$, $T_1 \approx 933 \text{ K}$. 考虑到事故发生时, 身管事故部位的基础温度已相当高, 残存气体的温度和压力上升到这种程度, 显然会大大加剧身管发生事故的风险.

当继发弹头的速度超过音速后, 它会推动其前方的残存气体形成一系列相对于波前气体为超音速传播的压缩波, 并逐渐迭加形成激波. 波前气体经过激波后其状态参数将发生突变, 波后气体与波前气体的压强、密度和温度等状态参数存在如下关系^[5]

$$\begin{aligned} \frac{p_2}{p_1} &= \frac{2\gamma}{\gamma+1} M_1^2 - \frac{\gamma-1}{\gamma+1} \\ \frac{\rho_2}{\rho_1} &= \frac{\gamma+1}{2} M_1^2 \\ &= \frac{\gamma+1}{1 + \frac{\gamma-1}{2} M_1^2} \end{aligned}$$

$$\frac{T_2}{T_1} = \frac{2}{(\gamma+1)M_1^2} \left(\frac{2\gamma}{\gamma+1} M_1^2 - \frac{\gamma-1}{\gamma+1} \right) \left(1 + \frac{\gamma-1}{2} M_1^2 \right)$$

$$M_1 = \frac{V_1}{c_1}$$

式中, γ 为绝热系数, M_1 , V_1 和 c_1 分别为波前来流的马赫数、气体宏观运动速度和当地声速. 以图5中继发弹头弹尖的正前方作为参照, 当该处的残存气体受到来自右边的激波扰动时, 继发弹头速度 (体现为来流速度) 对波前 (用下标 1 表示) 和波后 (用下标 2 表示) 气体状态参数的影响如表1所示.

表1

M_1	$p_2/p_1, p_2/p_0$	$\rho_2/\rho_1, \rho_2/\rho_0$	$T_2/T_1, T_2/T_0$
1	1, 25.0	1, 10.0	1, 2.5
2	4.50, 113	2.67, 26.7	1.69, 4.23
3	10.3, 258	3.86, 38.6	2.68, 6.70

当然, 表1中所列关系在继发弹的速度达到和超过音速时才有实际意义. 由图6可知, 正常弹头到达事故部位时的速度接近3倍音速. 粗略估算表明: 压缩残存气体 (如图5) 需要消耗的能量大约比火药燃气赋予继发弹的动能小一个数量级. 换句话说, 残存气体的阻力对继发弹头的速度有影响, 但不至于使其由3倍音速降为亚音速. 因此, 我们可以推断, 继发弹运行到事故部位之前的速度仍然会超过音速 (当地音速约为 619 m/s), 即会在其前端产生激波. 根据表1中给出的关系以及上述初始条件, 此时继发弹前端激波波后气体的压强和温度值可以达到 113 MPa 和 1578 K .

虽然, 激波波后气体的作用区域不大, 其对管壁的作用时间也不长, 但在基础温度和激波波前残存气体的温度和压力均很高的情况下, 如此高强度的波后气体很可能成为压垮身管管壁的“最后一根稻草”.

3 结论

- (1) 本案中的身管事故, 起源于其内膛前端有弹头留膛, 且该留膛弹头的阻塞力足以抵御其后方的燃气推力.
- (2) 炸膛是连续射弹的积累热能, 以及由继发弹头和留膛弹头高速压缩残存气体产生的高温高压联合作用的结果.
- (3) 事故部分的明显塑性变形和穿孔的剪切破坏特征表明, 该型号身管管壁的高温强度和刚度需要进一步加强.

参考文献

- 1 金志明, 翁春生, 张国强. 炸膛模式及其机理分析. 兵工学报, 2001, 22(4): 448-451
- 2 范钦珊. 压力容器的应力分析与强度设计. 北京: 原子能出版社, 1979. 53-58
- 3 卓穗如. 机枪枪管寿命预测技术论文集. 北京: 中国兵器工业第二零八所, 1996. 35
- 4 张祖贤. 兵器黑色金属材料手册. 北京: 兵器工业出版社, 1989. 451
- 5 吴望一. 流体力学. 北京: 北京大学出版社, 1995. 447