

[文章编号] 1004-0609(2002)02-0338-04

6066 铝合金弹体破片形成机理^①

罗兵辉¹, 柏振海¹, 施国昌², 江国金²

(1. 中南大学 材料科学与工程系, 长沙 410083; 2. 中国船舶工业公司 710 研究所, 宜昌 443003)

[摘 要] 以挤压及热处理(T6 态)工艺制备 6066 铝合金圆管型模拟炸弹, 进行了力学性能测试、砂坑中爆破试验及扫描电镜断口形貌观察。研究表明: 随着应变速率的提高, 6066 铝合金强度升高, 塑性下降, 断口从韧性向脆性转变。爆破破片断口形貌由拉伸断裂、剪切断裂及其过渡区组成, 但以拉伸断裂为主。6066 铝合金作为弹体材料密度小、装药量大、爆轰力大, 故而破片率及破片初速大, 杀伤力大。通过破片的断裂特征, 分析了与材料动态断裂行为相关的形貌特征, 研究了该弹体材料的膨胀断裂行为。

[关键词] 6066 铝合金; 破片机理; 力学性能

[中图分类号] TJ 5

[文献标识码] A

炸弹爆破时弹体的破碎与弹体的结构、装药的种类和弹体材料性能等密切相关^[1]。鉴于榴弹破片效应在军事上的重要意义, 多年来, 人们对榴弹的破片机理进行了大量的研究^[1~4], 提出了许多关于破片质量分布、壳体破裂半径和破片初速的公式, 这些研究主要是针对应用广泛的高强度钢, 如 D60 钢、50SiMnV 钢、58SiMn 钢等。近年来, 国外榴弹的杀伤威力、破片率都有了很大提高, 特别是提高单发炮弹的威力, 其主要措施是改进弹体的材料。当采用合适的弹体材料时, 可以减薄壁厚, 多装炸药, 或使弹丸结构更加合理, 以使爆炸所产生的破片质量轻、数量多、飞散速度大、杀伤动力增加, 充分提高弹丸的杀伤威力。我国自 20 世纪 50 年代至今一直采用钢作为弹体材料, 但存在诸多问题, 最主要的是破片率小。本实验中作者采用铝合金作为爆破壳体, 对 6066 铝合金圆管在内部强爆轰力加载作用下的破碎机理进行研究。从破片形貌及断口分析研究出发, 对 6066 铝合金的破裂过程、机理及其与材料组织和性能的关系进行探讨。

1 实验

实验用材料为 6066 铝合金。经挤压(挤压温度 440~460 °C, 挤压比 12:1)加工后, 进行热处理。热处理工艺为: 530 °C, 4 h 固溶 → 水淬 → 175 °C, 8 h 时效。实验用材料分别加工成拉伸试样、U 型缺

口冲击试样及圆管型模拟炸弹。圆管规格为: 外径 80 mm, 内径 70 mm, 长 250 mm。将试样内部装满炸药, 在专用砂坑中作爆破实验。爆破后对收集的破片在 KYKY2800 扫描电镜上进行断口形貌观察。

所有的力学性能测试都在室温下进行, 在 CSS-44200 Instron 试验机上进行静态拉伸试验, 拉伸速度为 2 mm/min, 应变速率为 0.04 s^{-1} 。在 GIEEBIE 1500 热模拟试验机上进行瞬时拉伸试验, 应变速率为 50 s^{-1} 。

2 结果及讨论

6066 铝合金化学成分如表 1 所示。经挤压及热处理后, 显微组织如图 1 所示。可见晶粒细小, 晶粒尺寸大约为 100 μm。晶间析出相为 Mg_2Si 及 FeAlMnSi 相。应变速率为 $\dot{\epsilon} = 0.02 \text{ s}^{-1}$ 及 $\dot{\epsilon} = 50 \text{ s}^{-1}$ 时的力学性能如表 2 所示, 可见随应变速率增加, 试样强度显著增高, 塑性下降。爆破时是在更高应变速率 ($1 \times 10^3 \sim 1 \times 10^4 \text{ s}^{-1}$) 下使材料断裂, 其力学性能无法测出。对其破片断口进行观察, 几种不同应变速率下的断口形貌如图 2 所示。

比较 3 种应变速率下的断口形貌可见, 低应变速率拉伸时韧窝深, 大部分是穿晶断裂; 应变速率提高至 50 s^{-1} 时, 韧窝浅且少, 明显为沿晶断裂。断裂以脆性断口为主, 断口形貌属准解理型。对于 6066 铝合金爆破破片, 断口由 3 个部分组成, 即外

① [基金项目] 国家“九五”军工配套项目(中色科技(2000)0016)
[作者简介] 罗兵辉(1965-), 男, 副教授, 博士研究生。

[收稿日期] 2001-10-19; [修订日期] 2001-12-03

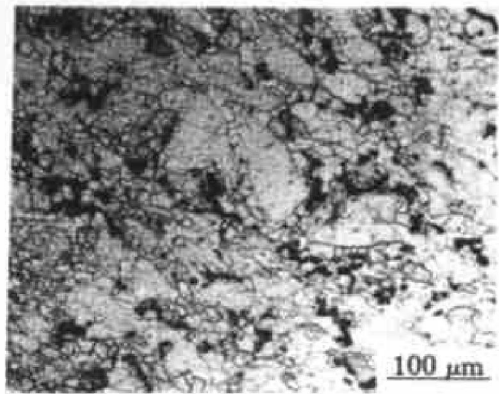


图 1 6066 铝合金在 T6 状态下的显微组织

Fig. 1 Microstructure of 6066 aluminum alloy (T6 treatment)

表 1 6066 铝合金成分

Table 1 Composition of 6066Al alloy (mass fraction, %)

Cu	Fe	Mg	Mn	Si
1.14	0.21	1.43	0.80	1.64
Ni	Ti	Zn	Cr	Al
0.01	0.05	0.06	0.05	Bal.

壁拉伸区、内壁剪切区及它们之间的过渡区。拉伸区形状不规则,但存在一些拉长或撕裂的韧窝,裂纹扩展速度慢,剪切区呈锯齿形放射状,扩展速度快,对破片进行断口观察可知,断口以拉伸断裂为主,约占 80%。拉伸区及剪切区均呈河流花样,属解理型断口。

圆管壳体的破裂过程包括圆管在内部爆轰作用力下产生的膨胀、变形和破裂 3 个阶段。开始阶段为膨胀过程,图 3 所示为 6066 铝合金破片外表面,由于膨胀使其表面产生大量裂纹。弹丸大约可膨胀到原始直径的 1.5~2 倍^[5]。在强大的爆轰压力作用下,弹丸的内壁产生压缩变形,同时由于弹丸的膨胀,外壁产生周向拉伸应力,从而迫使弹丸处于高应力应变状态。当瞬时应变率达到某特定值时,弹丸外表附近在周向拉伸应力作用下,弹丸壁最薄弱的区域出现裂纹源(见图 2(c)),随后裂纹迅速成长成拉伸断裂。此间,内表面在剪切应力作用下,在最大剪切应力面上极快的形成剪切裂纹源,并迅

速向外表面扩展,由于拉伸裂纹与剪切裂纹生核速度和扩展速度的差异,导致不同类型的各种形态的破片断口。

对于不同的壳体材料,强度、韧性不同,所以膨胀时所需的能量亦不相同,壳体膨胀到破裂时的半径也不相同。根据 Taylor 理论可计算出壳体的膨胀速度 v_r , 破裂半径 r_f 和初始速度 v_f ^[3]:

$$v_r = \left\{ \frac{4p_0}{\rho(3n-2)\left(\frac{R_0^2}{r_0^2-1}\right)} \left[1 - \left(\frac{r_0}{r}\right)^{3n-2} \right] - \frac{2.3Y_S}{\rho} \ln \frac{r}{r_0} \right\}^{1/2} \tag{1}$$

$$r_f = r_0 \left(\frac{p_0}{1.15Y_S} \right)^{\frac{1}{3n}} \tag{2}$$

$$v_f = \left\{ \frac{4p_0}{\rho(3n-2)\left(\frac{R_0^2}{r_0^2-1}\right)} \left[1 - \left(\frac{1.15Y_S}{p_0}\right)^{1-\frac{2}{3n}} \right] - \frac{2.3Y_S}{\rho} \ln \left(\frac{p_0}{1.15Y_S} \right)^{\frac{1}{3n}} \right\}^{1/2} \tag{3}$$

式中 ρ 为壳体材料的密度; Y_S 为材料的动态屈服极限; p_0 为装药的爆轰压力,与装药密度和装药爆速有关; n 为爆炸产物的多方指数,是瞬时爆轰压的函数; R_0 为壳体的外半径; r_0 为壳体的内半径; r 为 $r_0 \sim R_0$ 之间的 1 个值。

可见弹体金属材料主要是通过材料的屈服强度、断面收缩率等力学性能来影响破片的。随着弹体材料的塑性、韧性增大,弹丸的破碎性下降,破片数目减少,平均质量增大,质量分布不均,但弹丸在破裂时的膨胀量较大,聚能较高,使破片的飞行速度提高;反之,随弹体材料强度提高,韧性下降,材料脆性增大,破片的形成较规则,破片的弹道性能也较好,但因其在破裂时没有很大的膨胀变形过程,故炸药传给破片的能量较小,破片的飞行速度降低。破片断口分析结果表明^[6,7],断口形貌与破片质量(或数量)密切相关,全剪切断口的破片较粗大,破片数量少;全拉伸型破片细小,数量多。对于混合型的破片断口,断口表面剪切型占的比例越大,则破片越粗大,破片数量相应减少;反之破

表 2 T6 态下 6066 铝合金的力学性能

Table 2 Mechanical properties of 6066 aluminum alloy (T6 treatment)

$a_K/$ ($J \cdot cm^{-2}$)	$\dot{\epsilon} = 0.02 s^{-1}$				$\dot{\epsilon} = 50 s^{-1}$			
	E/GPa	$\sigma_{0.2}/MPa$	σ_b/MPa	$\delta/\%$	E/GPa	$\sigma_{0.2}/MPa$	σ_b/MPa	$\delta/\%$
12.8	72.1	351	401	12.0	72.6	496	574	9.1

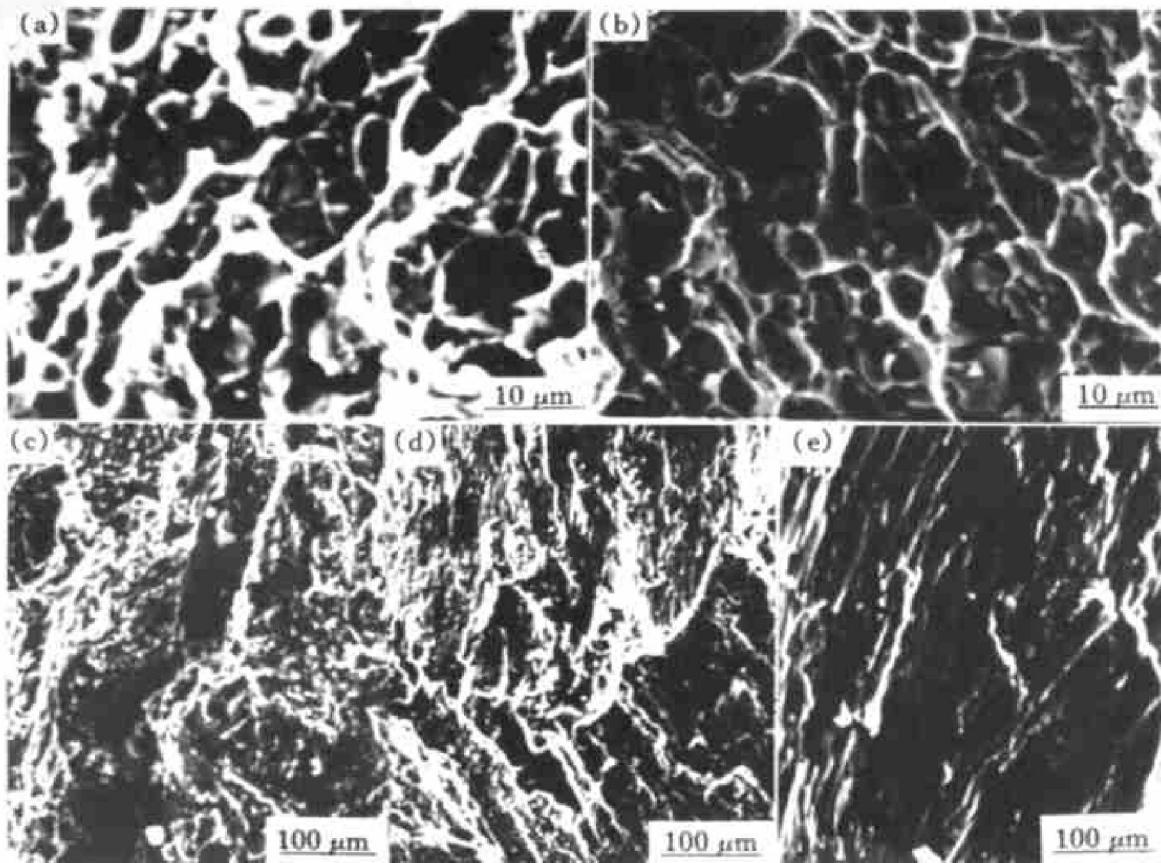


图 2 3 种不同应变速率下的断口形貌

Fig. 2 SEM fractograph of 6066 aluminum alloy at different strain rates

(a) $\dot{\epsilon} = 0.02 \text{ s}^{-1}$; (b) $\dot{\epsilon} = 50 \text{ s}^{-1}$; (c), (d), (e) $\dot{\epsilon} = 1 \times 10^3 \sim 1 \times 10^4 \text{ s}^{-1}$,
corresponding to tensile fracture area, transition area, shear fracture area respectively

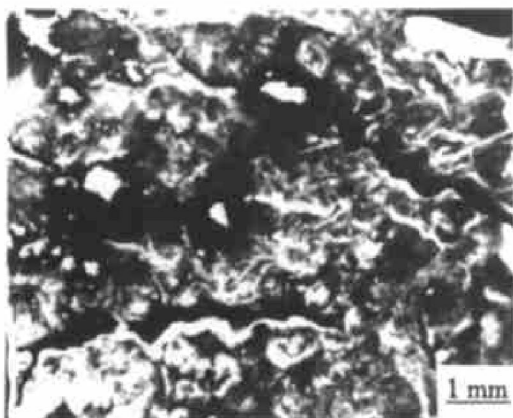


图 3 6066 铝合金外表面由于膨胀产生的裂纹

Fig. 3 Expanding crack on outer surface of 6066 aluminum alloy when

片数量增多。6066 铝合金壳体在低应变速度下, 强度低, 塑性、韧性高, 随应变速率提高, 强度将大幅提高, 塑性、韧性降低(见表 2)。所以爆破时, 从开始加载到断裂的整个过程中, 断裂面附近单位体积上的塑性变形功较小, 膨胀至破裂时形成的破片数量较多、质量较小, 且以拉伸断裂为主。

材料的组织结构对弹体的破碎性亦有很大的影响^[8], 对于传统的钢制弹体材料, 珠光体有利于裂

纹扩展, 铁素体韧性相对较高, 对裂纹扩展有抑制作用。6066 铝合金 T6 态下强化相 Mg_2Si 或 FeAlMnSi 相大多沿晶界析出, 如图 1 所示。但这些相数量少、尺寸小, 因此, 对弹体爆破时裂纹扩展的影响小, 但由于其沿晶界分布有利于裂纹扩展, 因而裂纹扩展时产生分叉, 如图 4 中箭头 A 所示。

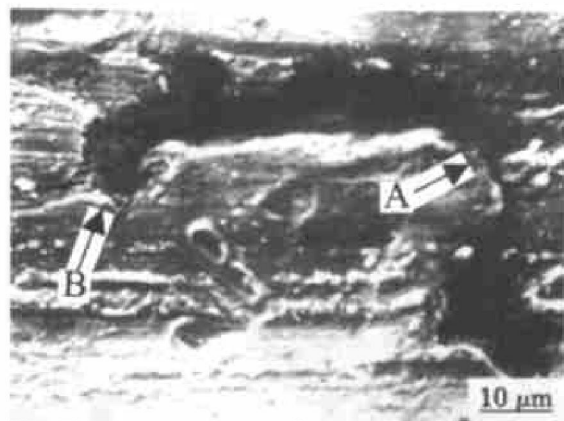


图 4 6066 铝合金弹体材料爆破后裂纹分布

Fig. 4 Crack distribution of 6066 aluminum fragments

A—Crack branch; B—Crack acme dulled

同时基体 α 相韧性较好, 有少量裂纹扩展时尖端发生钝化, 陷入晶粒内部, 如图 4 中箭头 B 所示。但是, 因为铝合金作为爆破壳体材料密度小, 强韧性比钢小, 同时壳体装药量大, 爆破时爆轰压力大, 膨胀时所需能量较小, 裂纹扩展速度快, 阻力小, 故裂纹分叉或尖端钝化现象均较少, 破片断口属解理型断口。

3 结论

1) 随着应变速率的增大, 6066 铝合金强度升高, 塑性、韧性降低。6066 铝合金作为弹体材料爆破时破片数量多、质量较小。

2) 爆破后 6066 铝合金破片断口分为 3 个区域: 外壁的拉伸断裂区, 内壁的剪切断裂区及它们之间形成的过渡区。但以拉伸断裂为主, 拉伸断裂约占 80%。

3) 6066 铝合金作为炸弹弹体材料, 密度小, 壳体可多装炸药, 从而提高破片的初速, 使杀伤作用更大, 故适合作为爆破壳体材料。

[REFERENCES]

- [1] 王儒策, 赵国志. 弹丸终点效应 [M]. 北京: 北京科技大学出版社, 1993. 79.
WANG Ru-ce, ZHAO Guo-zhi. Terminal Effect of Bombs [M]. Beijing: Beijing Science and Technology University Press, 1993. 79.
- [2] Zukas J A, Nicholas T, Swift H F, et al. 碰撞动力学 [M]. 北京: 兵器工业出版社, 1989. 409–418.
Zukas J A, Nicholas T, Swift H F, et al. Collision Dy-

namics [M]. Beijing: Weapons Industry Press, 1989. 409–418.

- [3] 马晓青. 冲击动力学 [M]. 北京: 北京科技大学出版社, 1992. 282–308.
MA Xiao-qing. Shock Dynamics [M]. Beijing: Beijing Science and Technology University Press, 1992. 282–308.
- [4] Hoggatt C R, Recht R F. Fracture behavior of tubular bombs [J]. Journal of Applied Physics, 1968, 39(3): 1856–1862.
- [5] 华 忝. 弹丸作用和设计理论 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1976. 58.
HUA Tian. Action and Design Theory of Bombs [M]. Beijing: Defense Industry Press, 1976. 58.
- [6] 胡八一, 董庆东, 韩长生. 内部爆轰加载下的钢管膨胀断裂研究 [J]. 爆炸与冲击, 1993, 13(1): 49–54.
HU Ba-yi, DONG Qing-dong, HAN Chang-seng. Studies of expansion and fracture of explosive-filled steel cylinders [J]. Explosion and Shock Waves, 1993, 13(1): 49–54.
- [7] 李永池, 李大红, 魏志刚. 内爆炸载荷下圆管变形、损伤和破坏规律的研究 [J]. 力学学报, 1999, 31(4): 442–448.
LI Yong-chi, LI Da-hong, WEI Zhi-gang. Research on the deformation, damage and fracture rules of circular tubes under inside-explosive loading [J]. Acta Mechanica Sinica, 1999, 31(4): 442–448.
- [8] 赵文宣. 弹丸设计原理 [M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1988. 265.
ZHAO Wen-xuan. Design Theory of Bombs [M]. Beijing: Beijing University of Technology Press, 1988. 265.

Fracture behavior of 6066 aluminum alloy bomb casings

LUO Bing-hui¹, BO Zhen-hai¹, SHI Guo-chang², JIANG Guo-jin²

(1. Department of Materials Science and Engineering, Central South University,
Changsha 410083, China;

2. China Ship Industry Corporation, Yichang 443003, China)

[Abstract] Tubular bomb casings of 6066 aluminum alloy were manufactured by extrusion and T6 heat-treatment. The strength of 6066 aluminum alloy was increased and the ductility was decreased with the increase of strain rate. The fracture behavior was investigated in consideration of fragment rate. The result shows that shear deformation occurs at the interior surface of the casing and tensile deformation at the outer surface under high explosive detonation pressure. Expansion and fracture of explosive-filled 6066 aluminum alloy cylinders were analyzed. The relations between material characters combining with loading-strength and deformation character were also discussed.

[Key words] 6066 aluminum alloy; fracture behavior; mechanical property

(编辑 陈爱华)