文章编号：1000-5773(2006)01-0034-05

AF1410 钢的层裂断裂特性研究*

桂毓林，刘仓理，王彦平，孙承纬

（中国工程物理研究院流体物理研究所冲击波物理与爆轰波物理实验室，四川绵阳 621900）

摘要：利用一级轻气炮作为加载手段，对 AF1410 钢的层裂特性进行了研究，获得了 AF1410 钢的 Hugoniot 关系、塑性应变率、层裂强度以及层裂片厚度等动态力学参数。对回收的 AF1410 钢样品进行了断口分析和金相分析，从宏、微观角度分析了 AF1410 钢在不同应变率下的断裂特性。

关键词：冲击动力学；AF1410 钢；层裂断裂；金相分析

中图分类号：O347.3 **文献标识码**：A

1 引 言

层裂现象自二战以来一直引起研究工作者浓厚的兴趣，主要由于其研究成果被大量地应用于军事，如装甲防护、反装甲以及侵彻弹等[1]。AF1410 钢是一种美国航天用材中的高强高韧钢，一般作为攻击坚硬目标的侵彻弹战斗部壳体用材，但目前还没有公开文献报道过有关它的冲击响应数据。侵彻弹弹体在侵彻目标过程中主要受到冲击载荷的作用，壳体材料的冲击响应以及层裂特性直接关系到侵彻能力及装药安定性的评估。侵彻弹一般以 600～800 m/s 的速度侵彻目标靶，在侵彻体内产生 10～20 GPa的冲击压力，因此，研究壳体材料在该压力区间的冲击响应和层裂特性是至关重要的。

利用口径为 100 mm 的一级轻气炮作为加载手段，使用 PZT 压电陶瓷片测量弹性先驱波速度，用 VISAR 测量自由面速度剖面[2-4]。根据自由面速度剖面反映的冲击波结构和层裂信息，确定了 Hugoniot关系，并得到了不同应变率下的层裂参数。通过对回收样品的断口分析和金相分析，从宏、细观角度分析了不同应变率下 AF1410 钢的层裂断裂特性。

2 层裂实验

在飞片撞击靶的实验中，由于飞片自由面产生的稀疏波进入到样品中，与由样品自由面反射的稀疏波相互作用而产生拉伸应力，如果这个拉伸应力超过材料的动态强度，将启动样品的层裂断裂[1]。本实验利用一级轻气炮作为加载手段，采取飞片对称碰撞法。使用 PZT 陶瓷片测量弹性波速度 C_e，并用激光速度干涉仪——VISAR，记录样品自由面速度剖面。实验样品设计为台阶式样品，样品厚度为飞片厚度的 2.5 倍。轻气炮实验装置示意图如图 1 所示。

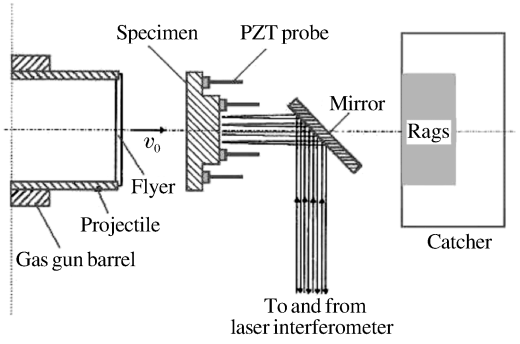


图 1 实验装置简图

Fig. 1 Schematic of the experimental configuration

共进行了 6 发实验，由 VISAR 测量的自由面速度剖面如图 2 所示。图中，数字“1”～“6”分别表示

* **收稿日期**：2004-09-01；**修回日期**：2005-01-17

作者简介：桂毓林(1973—)，男，博士研究生，主要研究方向为材料动态力学及常规战斗部设计.
E-mail：guiyulin@21cn.com

不同冲击压力下样品自由面速度剖面。从图 2 可以看出,所有样品均发生了层裂。

为了帮助分析自由面速度历史图像所反映的冲击波结构及层裂断裂信息,将图 2 归结为图 3。结合图 3,首先确定弹性先驱波到达自由面时间 $t_e=h/C_e$,其中 h 为样品厚度,然后根据这个时间将自由面速度历史曲线重新归零,从而确定塑性波到达自由面的时间 t_p。于是,塑性波速度 $C_{pl}=h/t_p$,塑性波波后粒子速度 $u_p=U_p/2$,其中 U_p 为塑性波到达自由面时的自由面速度。将塑性波速度 C_{pl} 和粒子速度 u_p 数据组进行线性拟合,拟合关系式为

$$C_{pl}=C_0+\lambda u_p \tag{1}$$

式中:$C_0=4.45$ km/s,$\lambda=1.477$。

各发实验得到的冲击压力、层裂强度、Hugoniot 弹性极限、塑性应变率以及裂片厚度等参数[2-4]在表 1 中列出。

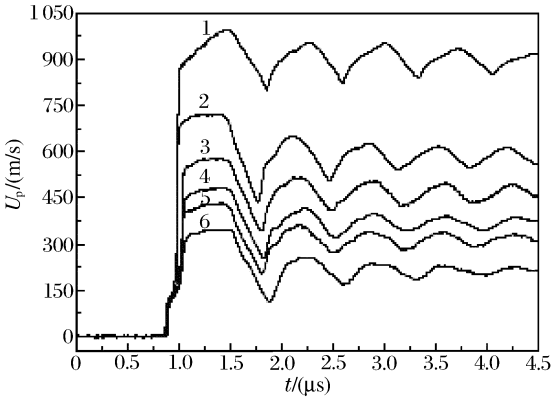


图 2　VISAR 测得的 AF1410 钢的自由面速度

Fig. 2　Free-surface velocity profiles for AF1410 steel

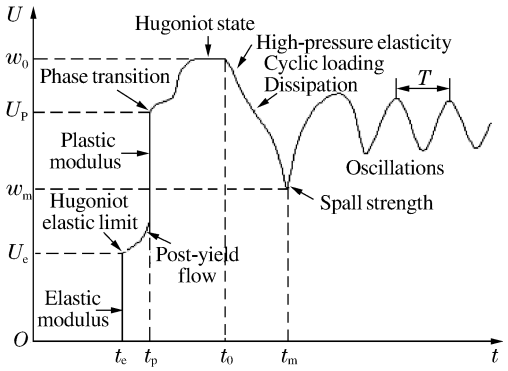


图 3　样品中的冲击波结构图像

Fig. 3　The shock-wave structure profile

表 1　由实验得到的 AF1410 钢层裂参数

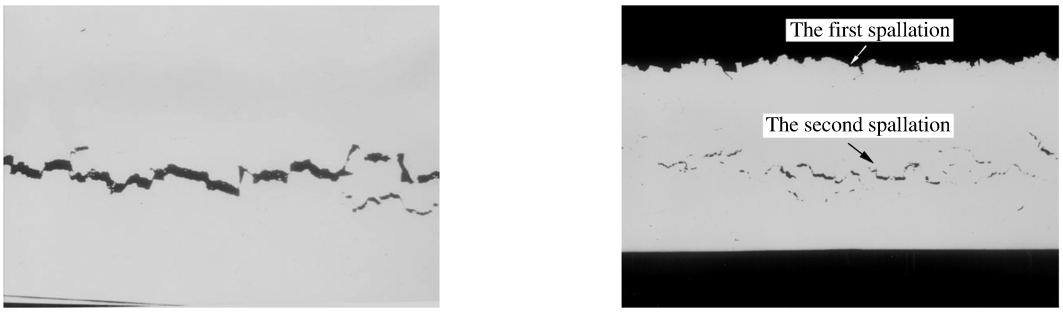
Table 1　The spall parameters of AF1410 steel obtained from each experiment

Shot No.	Flyer thickness /(mm)	Specimen thickness /(mm)	Shock pressure /(GPa)	Hugoniot elastic limit /(GPa)	Plastic strain rate /(10^5 s^{-1})	Spall strength /(GPa)	Spall thickness /(mm)
1	1.991	5.016	22.63	2.81	65.20	3.96	2.095
2	1.998	5.020	16.22	2.04	33.59	5.68	1.990
3	2.000	5.045	12.69	3.10	13.13	4.60	2.031
4	2.049	5.028	10.38	2.76	6.36	4.56	2.069
5	1.992	5.019	9.08	2.69	5.04	4.44	1.997
6	2.011	5.041	7.37	3.06	3.79	4.79	2.027

3　层裂断裂机制

3.1　宏观断裂特征

对回收的样品进行了断口分析,随着应变率提高,样品经历“变形—破坏—严重破坏”三个不同阶段。AF1410 钢在 3.79×10^5 s^{-1} 应变率下(这里指的是塑性应变率,下同),从外观上看没有破坏,但实际上已经发生了层裂破坏,如图 4(a)所示。AF1410 钢在应变率为 33.6×10^5 s^{-1} 的样品出现了二次层裂现象,如图 4(b)所示,图中的一次层裂片已经破碎掉,断面上观察到二次层裂,宏观断口粗糙不平。



(a) 3.79×10^5 s^{-1} (b) 33.6×10^5 s^{-1}

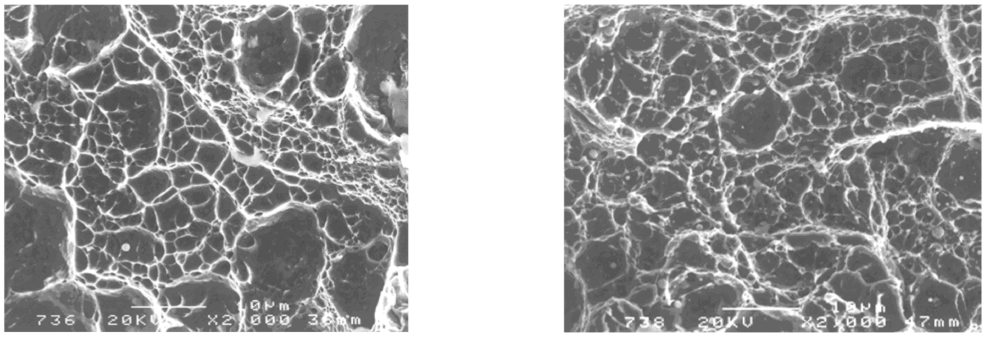
图 4 AF1410 钢低倍显微照片观察到的层裂破坏

Fig. 4 Spall damage observed in AF1410 steel specimen at low-power microscope

3.2 微观断裂特征

对回收样品的金相分析表明:AF1410 钢是两种机制的混合断裂,在中低应变率下,绝热剪切带为变形和破坏的主要机制;随着应变率提高,绝热剪切变形和破坏减少,主要以小塑性变形的韧性断裂为主。绝热剪切带的现象容易在冲击压缩、冲塞或冲击剪切中观察到,但在飞片撞击实验中,能观察到绝热剪切带的产生在国内外文献中还尚未报道过。随着应变率提高,绝热剪切趋势越不明显,最后变成微孔聚集型韧性破坏,与传统的应变率愈高愈容易产生绝热剪切带的机理不同,这也是值得深入研究的地方。

从断口观察,AF1410 钢断口粗糙不平,高倍下观察属微孔汇聚型韧性断裂,如图 5 所示。



(a) 13.1×10^5 s^{-1} (b) 33.6×10^5 s^{-1}

图 5 AF1410 钢断口 SEM 形貌

Fig. 5 The SEM pattern of the fracture in AF1410 specimen

对应变率为 3.79×10^5 s^{-1} 和 5.04×10^5 s^{-1} 的 AF1410 钢样品微观组织进行观察发现,绝热剪切成为 AF1410 钢变形和破坏的主要机制。由完整的沿绝热剪切带形成的主层裂面,如图 6 所示。裂纹沿绝热剪切带扩展的微观形貌如图 7 所示。

沿与冲击波扩展方向成 45°方向出现的绝热剪切带,使不在同一平面的损伤汇聚后产生破坏,相应的断口粗糙不平。图 8 为沿与冲击波扩展方向成 45°角的绝热剪切及相关损伤形貌例证了这一点。

对在较高应变率下的样品观察表明:随着应变率的提高,相应的变形和破坏机制有一定的变化,应变率为 13.1×10^5 s^{-1} 的样品有绝热剪切带出现,但

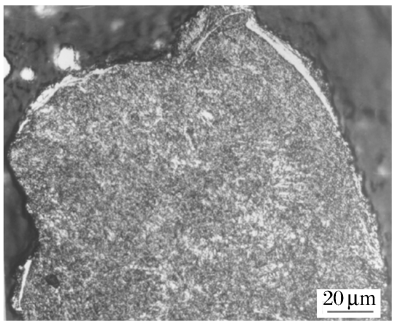


图 6 在 3.79×10^5 s^{-1} 应变率下由绝热剪切带形成的主层裂剖面

Fig. 6 The main spall section formed by adiabatic shear band at strain rate of 3.79×10^5 s^{-1}

扩展不充分,如图 9 所示;应变率为 $33.6\times10^5\ s^{-1}$的样品绝热剪切现象明显减少,但微孔汇聚型韧性断裂明显增多,如图 10(a)所示;应变率为 $65.2\times10^5\ s^{-1}$的样品的一次层裂已经破碎,但在剩下的二次层裂上也没有观察到绝热剪切带,如图 10(b)所示。

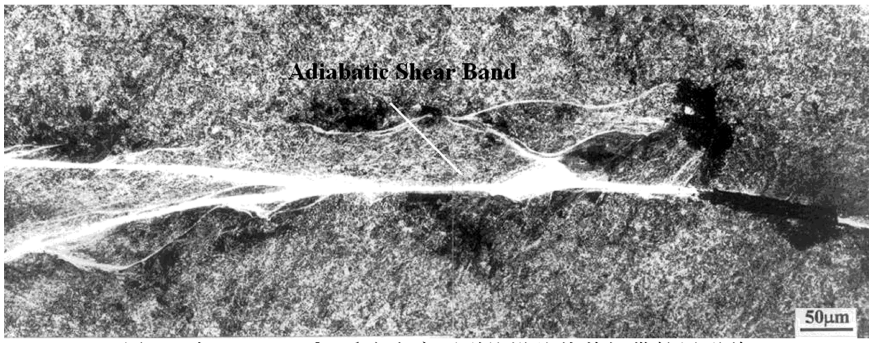


图 7　在 $5.04\times10^5\ s^{-1}$应变率下裂纹沿绝热剪切带扩展形貌

Fig. 7　The pattern of crack propagation along adiabatic shear band at strain rate of $5.04\times10^5\ s^{-1}$

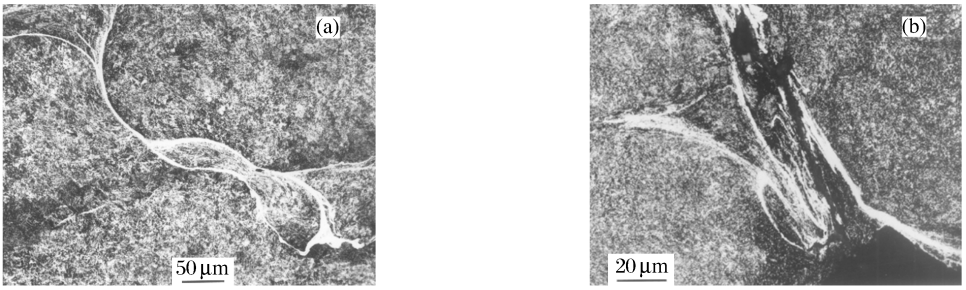


图 8　在应变率下沿 45°方向的绝热剪切及相关损伤形貌

Fig. 8　45°-direction adiabatic shear band and damage pattern at strain rate of $3.79\times10^5\ s^{-1}$

因此,AF1410 钢的韧性断裂特征为,随着应变率提高,绝热剪切现象逐渐消失,而材料破坏的主要机制变为较小塑性应变引起韧性断裂,损伤面积扩大、损伤度增加。



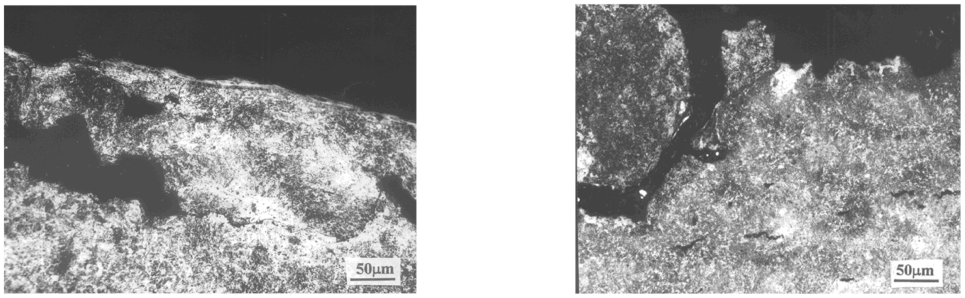
图 9　在 $13.1\times10^5\ s^{-1}$应变率下未充分扩展的绝热剪切带

Fig. 9　The insufficient-propagation adiabatic shear band at strain rate of $13.1\times10^5\ s^{-1}$

3.3　AF1410 钢变形与破坏差异分析

从上面的金相分析可知,AF1410 钢随着应变率提高,其变形和破坏存在明显的差异,即在中低应变率下以绝热剪切带变形与破坏为主导机制,在较高应变率下以微孔汇聚型韧性断裂为主导机制。现在就这两种差异作初步分析。

首先,与钢自身的形变强化能力有关。由于绝



(a) $33.6\times10^5\ s^{-1}$　　(b) $65.2\times10^5\ s^{-1}$

图 10　在高应变率下的微孔汇聚型韧性断裂

Fig. 10　Microvoid-coalescence-pattern ductile fracture at high strain rate

热温升的软化效应超过钢自身的形变强化能力时发生绝热剪切，而形变强化能力主要体现在屈服比（$\sigma_{0.2}/\sigma_b$）上，屈服比较小的钢形变强化能力较大[6-8]。AF1410 钢的屈服比为 0.95，其值相对较大，形变强化能力较弱，因此容易发生绝热剪切。

其次，绝热温升与材料导热性能有关，导热性能较差的材料更容易发生绝热剪切。AF1410 钢含有较多的合金元素使其导热性能下降，相应在高应变率加载下塑性变形绝热温升较高，其相应的软化效应必定较强，故 AF1410 钢对绝热剪切比较敏感。

4 结 束 语

通过层裂实验和样品的金相分析，可得出以下初步结论：

(1) 确定了 AF1410 钢的 Hugoniot 关系，得到了层裂参数。

(2) AF1410 钢在高应变率下是以两种机制混合发生的断裂，即在中低应变率下以绝热剪切带变形与破坏为主导机制，在较高应变率下以微孔汇聚型韧性断裂为主导机制。

感谢张克明、虞德水、方茂林、汪小松、王 为、陈 宏、叶素华等同志对实验工作的支持。

References:

[1] Tarabay H A, Seaman L, Curran D R. Dynamic Failure of Materials Volume 1—Experiments and Analyses [R]. DSWA-TR-96-77-V1, 1998.

[2] Grady D E. Steady-Wave Risetime and Spall Measurements on Uranium [R]. SAND-85-0233C, 1985.

[3] Chen G H, Li Z R, Liu Y K, et al. Flyer Velocity Measurement Using Double-Sensitivity VIASR [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2001, 15(1): 70-74. (in Chinese)
陈光华，李泽仁，刘元坤，等. 用双灵敏度 VISAR 测量飞片自由面速度 [J]. 高压物理学报，2001，15(1)：70-74.

[4] Zhang L, Zhang Z G, Qin X Y, et al. Dynamic Fracture and Mechanical Property of D6A, 921 and 45 Steels under Low Shock Pressure [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2003, 17(4): 301-304. (in Chinese)
张 林，张祖根，秦晓云，等. D6A、921 和 45 钢的动态破坏与低压冲击特性 [J]. 高压物理学报，2003，17(4)：301-304.

[5] Kanel G I, Razorenov S V, Utkin A V. Spallation in Solids Under Shock-Wave Loading: Analysis of Dynamic Flow, Methodology of Measurements, and Constitutive Factors [A]. //Lee D L, Grady D E. High-Pressure Shock Compression of Solid Ⅱ: Dynamic Fracture and Fragmentation [C]. Shahinpoor: Springer, 1996: 4-8.

[6] Blazynski T Z. The Material at High Strain Rate [M]. Translated by Tang Zh P. Hefei: USTC, 1992. (in Chinese)
Blazynski T Z. 高应变率下的材料 [M]. 唐志平等译. 合肥：中国科学技术大学，1992.

[7] Zener C, Hollomon J H. Effect of Strain Rate upon Plastic Flow of Steel [J]. J Appl Phys, 1944, 15: 22-32.

[8] Meyers M A, Wittman C L. Effect of Metallurgical Parameters on Shear Band Formation in Low-Carbon Steels [J]. Metallurgical Transactions A, 1990, 21A: 3153-3164.

Spall Fracture Properties of AF1410 Steel

GUI Yu-Lin, LIU Cang-Li, WANG Yan-Ping, SUN Cheng-Wei

(*Laboratory for Shock Wave and Detonation Physics Research, Institute of Fluid Physics, CAEP, Mianyang* 621900, *China*)

Abstract: The spall properties of AF1410 steel are studied with the loading by gas gun. The Hugoniot relationship, plastic strain rate, spall strength, spall thickness and other dynamic parameters are obtained from experimental measurement. By the fracture analysis and metallographic analysis, the spall fracture mechanism at different strain rate is discussed.

Key words: shock dynamics; AF1410 steel; spall fracture; metallographic analysis