

爆炸金属管绝热剪切断裂的细观研究

胡八一 董庆东 韩长生 胡海波 王德生

(中国工程物理研究院流体物理研究所 成都 610003)

摘要 介绍了正火及调质后45号钢、TC4钛合金和钨合金四种金属管在内部高能炸药加载下,破片宏观剪切断口的细观断裂形貌;观察到这四种金属管不同的细观剪切断裂机制。根据金相研究及物理分析表明,金属材料的热导率越低,晶粒越细,则越容易产生绝热剪切,生成相变带。

关键词 破片 金相分析 绝热剪切带

1 引言

金属管在内部强脉冲加载下的动态响应及断裂问题,普遍存在于常规兵器研究、航空航天等工程技术领域,因此,研究金属管在内部爆炸脉冲下的损伤及断裂机理具有实际意义。我们知道,在一定条件的爆炸作用下,金属管的损伤和破裂总是伴随着绝热剪切现象的产生。所以,我们曾对45号钢、TC4钛合金及钨合金(W-Fe-Ni)圆管的绝热剪切断裂在宏观尺度上作了一些探讨^[1]。但是,对这一问题的研究仅在宏观尺度范围是远不够的,因为这一特定的断裂过程很复杂,它不仅与载荷强度、圆管几何尺寸有关,而且与管子材料本身的物理、冶金学特性及细观组织结构等密切相关^[2]。

因此,本文准备在宏观研究的基础上,着重考察金属细观组织结构对绝热剪切响应的影响,对文献[1]中得到的几种金属的典型破片进行细观分析,以期了解上述几种金属材料在相同加载条件下各自特殊的剪切断裂机理,从而探寻它们与这些材料的细观组织结构(如晶粒度)的潜在关系。

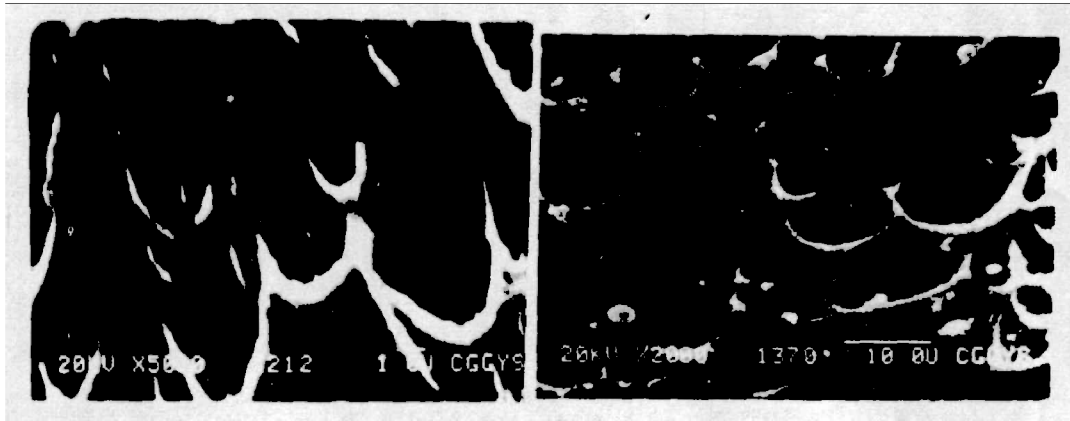
2 实验及结果

2.1 断口金相

高速分幅摄影研究管子破裂^[3]表明,金属管在内部爆轰加载下,沿管子轴线方向首先出现裂纹,因此,破片的轴向剪切断裂面必然载有管子初期损伤破裂的力学信息,反映管子剪切断裂的实际细观过程,所以我们对回收破片作断口观察时,就应该研究这一剪切断裂面。

在扫描电镜下,我们对上述四种金属破片的断裂面作了大量细致的观察和比较。结果发现,45号钢及TC4钛合金,在我们实验的载荷强度范围内,只要是剪切断裂,其细观断裂特征均为微孔聚合型剪切韧窝,如图1所示。在所有的破片中,靠近圆管内表面的韧窝氧化严重,且窝口斜长,显示出明显的剪切方向性;而邻近管子外表面的韧窝则几乎没有氧化,且窝口正圆,这表明在内部爆炸载荷下,管子内表附近的材料承受剪切要剧烈些,因此

大塑性剪应变而导致局部高温氧化现象也就非常明显。由此我们认为绝热剪切损伤的产生和发展是由管子内壁向外表面演进的。



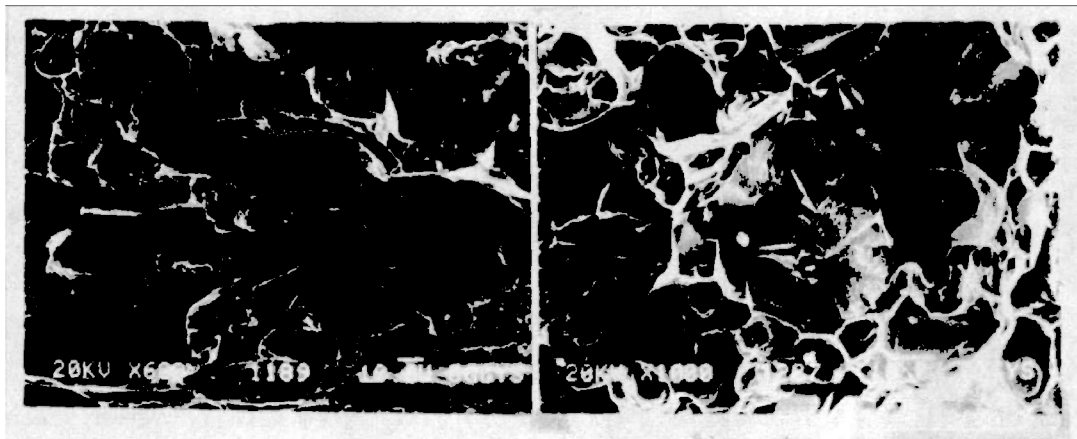
(a) 45 号钢
(a) AISI 1045 steel

(b) TC4 钛合金
(b) Ti-6Al-4V

图 1 剪切断面的韧窝形貌

Fig. 1 The morphology of dimples in shear surfaces

钨合金破片的宏观剪切断裂面远不象上述几种金属的剪切面那样光洁平滑,几乎与拉伸断口相类似,但在扫描电镜下,发现其细观特征是一种全新的金相形貌,如图 2(a)所示,对它还没有恰当的金相或断裂术语来描绘。为了比较,我们将该合金在爆炸加载下典型拉伸断口的细观形貌列于图 2(b),从中可以看到前者的方向性特征十分明显,后者以穿晶断裂为主,粘结相为塑性特征。



(a) 剪切断口
(a) Shear fracture surface

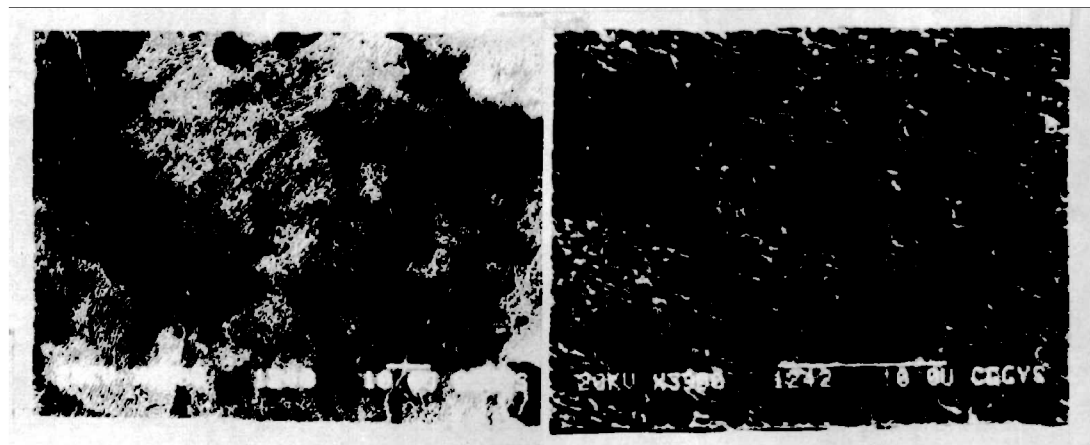
(b) 拉伸断口
(b) Tensile fracture surface

图 2 钨合金的剪切、拉伸断口比较

Fig. 2 The comparison of the shear and tensile surfaces in Tungsten alloy

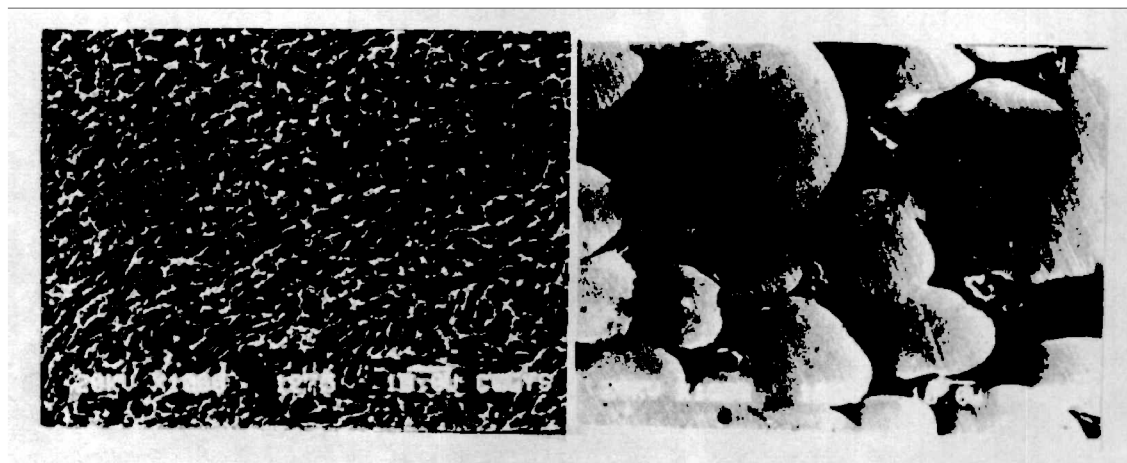
2.2 截面金相

为了便于分析比较,先将未经爆轰加载的四种金属的原始棒材组织列于图3。正火态45号钢的组织是珠光体及铁素体,晶粒粗大不均匀;而调质后其组织变为索氏体,晶粒均匀细小。TC4钛合金的晶粒极为细小均匀;而钨合金的晶粒则最为粗大不均匀。



(a) 45号钢(正火)
(a) AISI 1045 steel in normal

(b) 45号钢(调质)
(b) AISI 1045 steel heat treated



(c) TC4 钛合金
(c) Ti-6Al-4V

(d) 钨合金
(d) Tungsten alloy

图3 原始金相形貌

Fig. 3 Micrograph of specimen before loading

从爆炸后回收到的破片中,挑选典型破片进行垂直管子轴线的切割,再打磨抛光制成样品,经浸蚀后在扫描电镜下进行研究。结果表明:正火态45号钢的各种破片,剪切裂纹尖端均是绝热变形带,其特征是带内金属的初始结构仍然保留,但晶粒被高度扭曲,如图4(a)所示。测量这类变形带的宽度一般在100~400 μm 之间,带内珠光体和渗碳体组织都发生了剧烈变形,重新排列成平行于该剪切带方向的晶粒族,如图4(b)所示。从带内渗碳

体的变形,可推断高温热变形机制是该绝热变形带形成的物理基础。这与 Marchand^[4]采用钨化钢探头测得 HY-100 钢中绝热剪切带上最高温升达 590℃ 是一致的。调质后的 45 号钢破片中,我们找到一条不同于基体组织形貌的细长塑流带,带内晶粒取向强烈一致,而两旁晶粒却未错开,因此我们认为它就是所谓的绝热相变带,如图 5(a)所示。

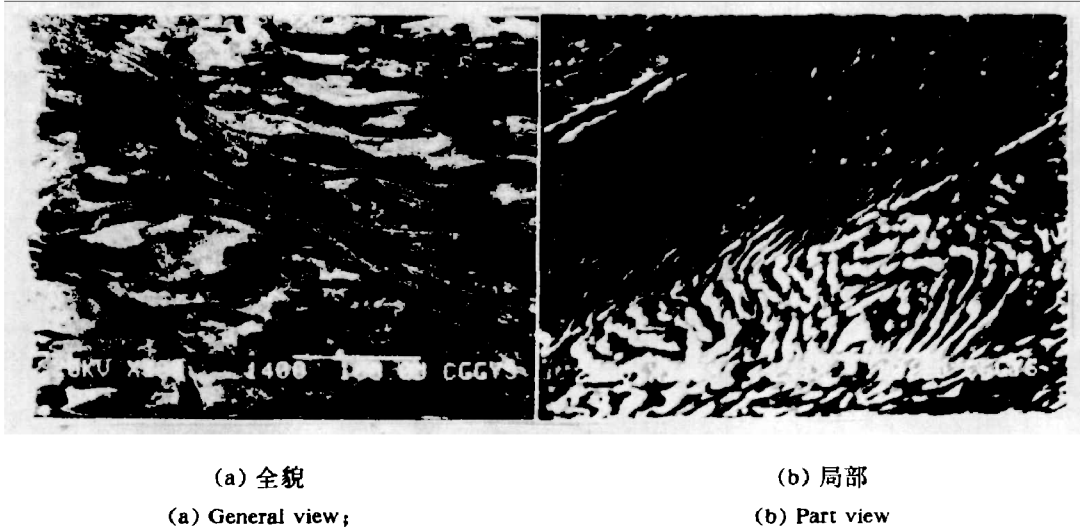


图 4 45 号钢的典型绝热变形带
Fig. 4 Typical deformed band of AISI 1045 steel

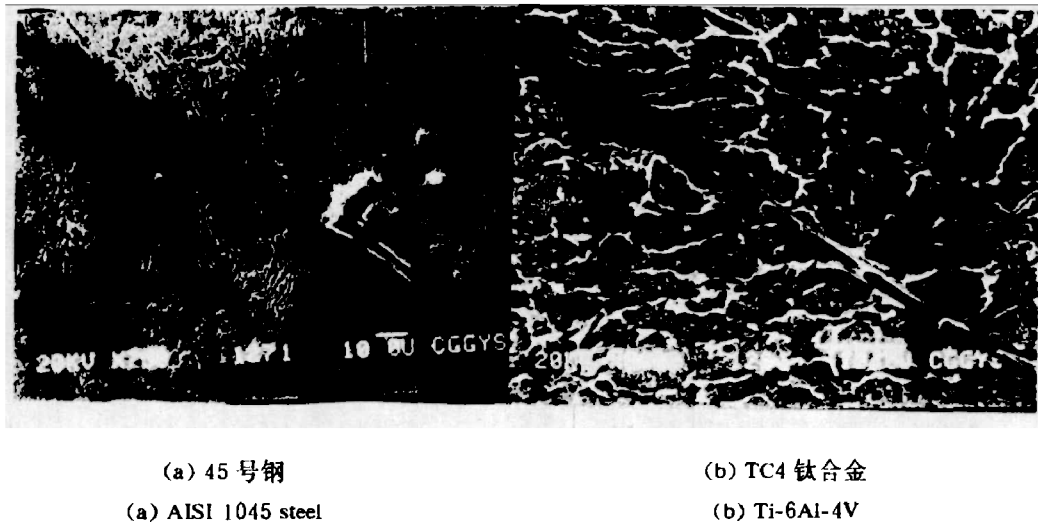


图 5 45 号钢及 TC4 钛合金的绝热相变带
Fig. 5 The transformed bands of two kinds of metals

对于 TC4 钛合金破片的观察表明,每条剪切裂纹的前方总是有一条绝热相变带,如图 5(b)所示,其宽度仅 1~5 μm ,有些相变带中部还有一串椭圆形空洞,带内晶粒形貌已完全不同与两侧基体组织,无晶界可辨。从图 5(b)上可见这种相变带呈河水急流状,表明

这种相变带曾经历了高温熔化态,然后在剪应力作用下带内热熔体被迫发生高速流动,从而导致宏观上的剪切滑移运动及剪切台阶的出现,如图 6(a)所示。图 1 中的剪切韧窝就是在剪切带形成后剪切滑移运动过程中形成的,当这种剪切滑移运动发展到圆管外表面时,破片的断裂面就形成了。同时我们还注意到,钛合金相变带的前方常伴有变形带为先导,如图 6(b)所示,这种变形带与钛合金用低能炸药加载时产生的剪切带类似,这就说明绝热剪切是从变形带开始的,相变带是绝热剪切发展的最终形态。虽然在某些金属或合金中未必能达到这一最终阶段。

在钨合金破片中,我们没有找到任何绝热剪切的迹象,故更不会有剪切带出现了。

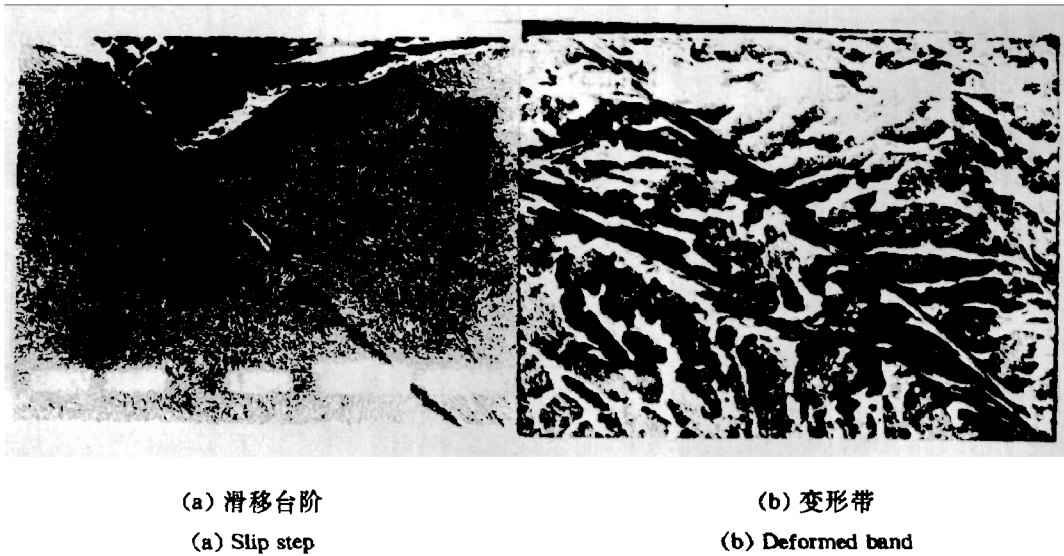


图 6 TC4 钛合金的剪切滑移台阶及变形带

Fig. 6 Shear slip step and deformed band in Ti-6Al-4V

3 分析和讨论

为了能解释上述实验结果,我们将金属材料的某些物理特性同绝热剪切的关系联系起来进行分析。将试验用的四种金属及工业纯铜的部份物理参数列于表 1,以便讨论。

表 1 试验金属及 Cu 的部份物理参数^[6]

Table 1 Physical properties of some metals^[6]

参数 材料	$k/(W/m^2K)^{1)}$	晶粒大小	变形或断裂机制
TC4 钛合金	6.80	极细	绝热相变带
45# 钢(正火)	48.15	较粗	绝热变形带
45# 钢(调质)	48.15	较细	绝热相变带及变形带
钨合金	75.36	粗大	脆性断裂
纯铜 T1	390.00	粗大	延性断裂

注:1)k 为金属的热导率。

从表 1 看到, k 值越小, 金属越易产生绝热剪切, 这与目前对绝热剪切的肯定性认识是一致的^[6,7], 即绝热软化与应变硬化间的竞争是决定绝热剪切产生的关键性因素。对纯铜, 因其 k 值很大, 故局部塑性变形产生的热量很快扩散, 难以形成局部高温热软化, 加上纯铜本身的应变硬化能力很强, 故在这类纯金属中, 较难出现绝热剪切带。而对于 45 号钢及 TC4 钛合金, 因 k 值很小, 故局部塑性变形产生的热量可使晶粒达到或接近熔点温度, 这样热软化占主导地位, 强烈的局部塑性变形最终导致剪切带的形成。

从表 1 还看到, 金相观察的结果初步印证了我们实验前的一个物理直觉, 这就是金属的晶粒越细, 对绝热剪切就越敏感, 也就更易达到绝热剪切的最高阶段——生成相变带。如 45 号钢调质成索氏体组织后, 不仅宏观上剪切断裂比例增大^[1], 而且细观上还观察到相变带, 而正火态的 45 号钢则只产生变形带。TC4 钛合金的晶粒更细, 结果它生成了相变带。粉末烧结的钨合金由于晶粒粗大且不均匀, 故在同样应变率下没有出现任何局部化塑性剪切迹象。

对其他有关绝热剪切的实验研究的文章加以分析, 亦可证实我们上述认识的正确性。文献[8]~[10]中钢的马氏体晶粒远比 45 号钢中的珠光体及铁素体组织细小均匀, 所以在压缩加载下其绝热剪切带是相变带。当粗大片状结构的珠光体被处理成细小球粒状的珠光体时, 文献[11]的铅淬火高碳钢里亦观察到了相变带。在文献[12]、[13]中报道了钢的硬度越高, 剪切带活动越频繁的事实, 这也与前述认识是一致的, 因为钢的晶粒越细越均匀, 其硬度也就越高。其实 Lee^[14]等在滚轧 2024 铝合金中也发现, 在同样加载条件下, 时效硬化铝(133 VHN)中产生了剪切带, 而退火铝(59 VHN)中则没有。Costin^[15]发现热轧钢(晶粒较大)抑制剪切带的形成, 而相近成份的冷轧钢(晶粒细小)则不抑制剪切带的发展。Fargette^[16]对黄铜的研究也是单位体积中剪切带的数量随晶粒尺度增大而减少。Dubois^[17]则明确指出支配剪切带产生和发展的重要因素是金属材料的堆错能和晶粒大小。

实际上对此现象, 王礼立^[18]等曾有过相近的认识, 他们对 TB-2 钛合金的剪切带形成研究中就发现“看来, 粗大晶粒和预塑性变形将减缓绝热剪切带的形成和发展”。

对于晶粒越细就越易生成绝热相变带的原因, 我们认为这是晶界强化的结果。晶界是位错运动的最大障碍之一, 由于晶界两旁的原子排列方位不同, 一个晶粒中的滑移带不能越过晶界传播到相邻晶粒中去, 要使相邻晶粒产生滑移必须启动它本身的位错源。因此晶粒越细, 晶界越多, 阻塞位错滑移的作用就越大。在这种条件下, 滑移并非沿任何方向都那么容易传播, 只在最大剪应力方向, 因极大的剪力作用使位错沿此方向滑动, 结果 Lüders 带也只能在此方向扩展, 不能遍及整个管子, 于是试样(管子)的加工硬化仅出现在这狭长的塑性滑移带中, 整个试样没有加工硬化效应产生。此时如果试样的热导率又低, 故塑性变形产生的热量只能滞留于这狭长的带内, 结果热软化效应必然大大超过该狭区内的材料应变硬化效应, 促使绝热剪切加剧, 使该狭区内的温度急剧上升, 达到或接近其熔点或相变点, 结果当变形结束时, 该热塑性剪切狭带内的晶粒被两旁基体组织快速淬火, 结果便形成了前面那些形貌的剪切带了。

4 结 论

通过我们的上述实验观察和比较研究分析,我们得到了以下几点认识:

1. 45号钢及TC4钛合金壳体的破片剪切断裂面的细观特征是微孔聚合型剪切韧窝;而钨合金的剪切断裂面则既非剪切型的密排韧窝,也非拉伸断裂的解理及准解理河流花样,而是一种全新型的金相形貌。

2. 正火态的45号钢的剪切断裂均以剪切裂纹前方的绝热变形带为先导,而调质后的45号钢及TC4钛合金则以绝热相变带为先导,这种相变带又往往是由前方的变形带演化而来的。粉末烧结的钨合金是一种对绝热剪切极不敏感的材料。

3. 金属的热导率越低,越有利于绝热剪切;在材料本身对绝热剪切有一定响应的前提下,细化及均匀化其晶粒,可以促进绝热剪切的发展,有利于绝热变形带向相变带的演化。

本工作得到邵乃林副研究员的全力支持和协助,电镜制样得到成都无缝钢管厂的吴瑞光高级工程师和刘义波工程师的帮助。特致谢意!

参 考 文 献

- 1 胡八一,等. 爆炸与冲击,1992,12(4):319~325
- 2 Beetle J C, et al. Proceedings of the Scanning Electron Microscope Symposium, Chicago, 111, 1971, 137~144
- 3 胡八一,等. 爆炸与冲击,1993,13(1):49~54
- 4 Marchand A, et al. J Mech Phys Solids, 1988, 36(3):251~283
- 5 工程材料实用手册. 北京:中国标准出版社,1989.
- 6 Balazynski T Z. Materials at High Strain Rate. Elsevier Applied Science, London and NY, 1987, 1~30
- 7 Grady D E. J Mech Phys Solids, 1992, 40(6):1197~1215
- 8 Backman M E, et al. Metallurgical Effects at High Strain Rates. Rhode R W. et al eds, Plenum NY, 1973, 531~543
- 9 Affouard J L, et al. Papers Presented at 3rd Conf Mech Prop High Rates of Strain. Oxford, 1984, 533~540
- 10 Bedford A J. NASA 73-26915, 1973
- 11 Rogers H C. Ann Rev Mater Sci, 1979, 9:283~311
- 12 Shockey D A, et al. Shock Waves and High Strain-Rate-Phenomena. Murr L E, et al eds. Plenum Press, NY, 1981, 249~261
- 13 Staker M R. Scripta Metallurgica, 1980, 14(6):677~680
- 14 Lee W B, et al. International Journal of Fracture, 1991, 52:207~221
- 15 Costin L S, et al. In Proceedings of the Second Conf on the Behavior of Materials at High Rates of Strain. Oxford, 1979, 90~100
- 16 Fargette B, et al. Memoires et Etudes Sc. Revue de Met. Mars, 1976, 197~203
- 17 Dubois P H, et al. Arch. Mech, 1988, 40(1):35~40
- 18 包合胜,王礼立,卢维娟. 爆炸与冲击,1989,9(2):109~119

**MESOSCOPIC STUDY OF ADIABATIC SHEAR
FRACTURE OF THE METAL TUBES UNDER
INTERNAL EXPLOSIVE LOADING**

Hu Bayi, Dong Qingdong, Hu Haibo, Han Changsheng

(Southwest Institute of Fluid Physics, P. O. Box 523 Chengdu, Sichuan, 610003, P. R. China)

ABSTRACT This paper describes the meso-morphology of shear surface of the fragments produced by four kinds of metal tubes (AISI 1045 steel in normal and heat treat conditions, Ti-6Al-4V and Tungsten alloy) under internal high explosive loading, and reports different meso-mechanism of shear fracture in these metal tubes. The research has shown when the thermal conductivity of the metal is lower, and the grains of the metal is fine, it is more sensitivity to adiabatic shearing and would more easily produce transformed band.

KEY WORDS fragments, metallography analysis, adiabatic shear banding