

聚能射流穿甲后超高强度钢靶板的损伤特征及其机理*

尹志新^{1,2)} 马常祥¹⁾ 李守新²⁾ 刘燕林³⁾

1) 东北大学理学院, 沈阳 110006

2) 中国科学院金属研究所沈阳材料科学国家(联合)实验室, 沈阳 110016

3) 五二研究所, 包头 014000

摘要 超高强度钢靶板在聚能射流穿甲后损伤特征的研究表明, 在穿甲过程中, 弹孔周围白层的温度超过了相变点, 形成了晶粒尺度在 20 nm 左右的马氏体 + 残余奥氏体混合组织. 绝热剪切带 (ASB) 中的剪切仅发生在相当窄的层面上, 其宽度约为 2 μm , 平均切应变量为 110, 应变速率 $\geq 2.24 \times 10^6 \text{ s}^{-1}$, 光学显微镜下显示的剪切带宽度是集中剪切变形区 (LSDZ) 及其热影响区 (HAZ) 的总宽度. 聚能射流穿甲过程中, 靶板材料破坏包含了如下几个相互重叠的过程: 与射流接触的靶板周围局部区域材料沿射流方向上的整体协调变形; 射流与靶板之间的剪切断裂和弹孔表面部分靶材的熔化; 集中在极薄层面上高度局域化的剪切变形; 应力波在靶表面反射造成的正向开裂.

关键词 聚能射流, 穿甲, 超高强度钢靶板, 绝热剪切带

中图法分类号 TG135.1

文献标识码 A

文章编号 0412-1961(2002)11-1210-05

CHARACTERISTIC AND MECHANISM OF DAMAGING OF ULTRA-HIGH STRENGTH STEEL TARGET PENETRATED BY SHAPED CHARGED JET

YIN Zhixin^{1,2)}, MA Changxiang¹⁾, LI Shouxin²⁾, LIU Yanlin³⁾

1) School of Sciences, Northeastern University, Shenyang 110006

2) Shenyang National Laboratory for Materials Science, Institute of Metal Research, The Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016

3) Institute 52, Baotou 014000

Correspondent: YIN Zhixin, Tel: (024)83978779, E-mail: zhixin5586@sina.com

Supported by National Key Basic Research and Development Programme of China (No.

G19980615) and National Natural Science Foundation of China (No.59971058)

Manuscript received 2002-01-25, in revised form 2002-04-28

ABSTRACT The characteristic and mechanism of damaging of ultra-high strength steel target penetrated by shaped charged jet are investigated. The results show that the temperature of the white etching layer near the punching hole of the target is above the transformation point during penetrating. So the mixing structure of the martensite and austenite with about 20 nm is formed. The severe shearing in the adiabatic shearing band (ASB) occurs only within 2 μm in thickness. The average shear strain of localizing shearing deformation zone (LSDZ) of a ASB is estimated as 110 and its minimum strain rate $2.24 \times 10^6 \text{ s}^{-1}$. Usually the thickness of the ASB observed by microscope consists of the LSDZ and its heat affect zone (HAZ). During the penetration of the shaped charged jet, several processes take place as follows: total flow plastic deformation near the punching hole along the direction of shaped charged jet moving, shearing fracture and partly melting of the target material on the interface between the target and shaped charged jet, shearing deformation located in a very narrow region as well as tensile fracture due to stress wave reflection on the surface of the target.

KEY WORDS shaped charged jet, penetration, ultra-high strength steel target, adiabatic shearing bands

* 国家重点基础研究发展规划项目 G19980615 和自然科学基金项目 59971058 资助

收到初稿日期: 2002-01-25, 收到修改稿日期: 2002-04-28

作者简介: 尹志新, 男, 1960 年生, 满族, 博士

目前在火炮速度范围内 (500—2000 m/s) 穿甲过程中高强度钢靶板的组织响应及其损伤特征的研究已有很多报道^[1-6], 当超高强度钢靶板被高速聚能射流穿甲时, 其过程属于超高速穿甲, 这时, 靶板的组织响应及其破坏过程有自己的特点^[7-9]. 利用一端有凹槽的装药可

以在凹槽的轴向上获得具有极高能量的高速射流, 这是有凹槽装药爆炸时的聚能效应, 破甲弹就是依靠炸药爆炸的这种聚能效应来完成穿甲作用的. 当凹槽的表面放有药型罩时, 聚能射流头部的速度可超过 10^4 m/s, 因而其穿甲能力大幅度提高. 为了提高靶板抵抗破坏的能力, 有必要对这种超强冲击载荷作用下破坏的过程与机理进行全面深入的了解.

1 实验方法

采用标准破甲弹对屈服强度大于 1600 MPa 的超高强度钢多层靶板按有关标准进行穿甲实验, 每层靶板厚度约为 20 mm, 靶板的显微组织为板条马氏体和一定量的下贝氏体组成. 对靶板弹孔进行宏观测定和观察. 对第一块靶板和穿透的最后一块靶板在弹孔处沿纵向进行解剖, 并对靶板弹孔周围的显微组织进行光学显微镜分析. 用 HCX-1 型超显微硬度计对最后一块穿透靶板弹孔周围的显微硬度进行测试, 测试条件为: 载荷 50 g, 加载时间 10 s. 用透射电子显微镜对弹孔边缘的显微组织进行观察分析. 用 DPM-810Q 能谱仪对弹孔边缘及其附近绝热剪切带内的合金元素进行电子探针测试.

2 实验结果

2.1 宏观损伤特征

穿甲实验的总穿深约为 $4 \times 20 = 80.00$ (mm). 聚能射流穿甲后弹孔宏观特征参见图 1. 从图中可以看到, 第一块靶板弹孔中有残留的纯铜杵体, 正面 (对着射流的面) 弹孔直径约为 22 mm, 背面弹孔直径约为 7 mm. 此外, 在靶板上可以看到靶板正面弹孔周围有许多小冲击坑. 图 2 为第一块靶板横向剖面, 从中可以看到, 弹孔周围裂纹很多, 且总体上呈旋转状分布. 穿透的最后一块 (即第四块) 靶板正面弹孔平均直径约为 6 mm, 靶板背面发生较

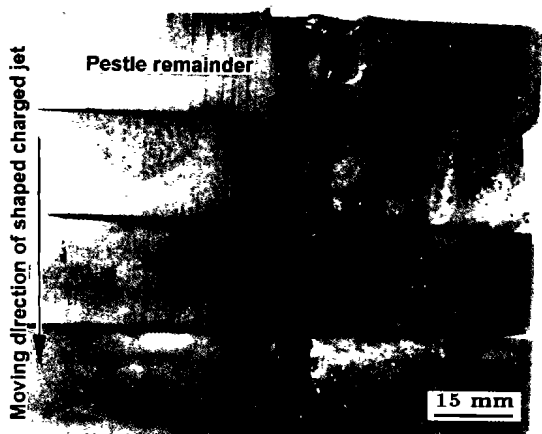


图 1 聚能射流穿甲后超高强度钢靶板弹孔的宏观特征

Fig.1 The macroscopic characteristic of punching hole of the ultra-high strength steel target after being penetrated by shaped charged jet

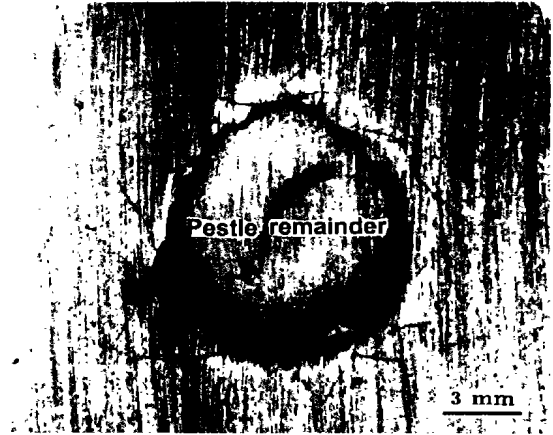


图 2 第一块靶板横向剖面上弹孔周围裂纹分布

Fig.2 Distribution of the cracks about punching hole on the cross section of the first target

大崩落, 崩落坑平均直径约为 31 mm.

2.2 微观损伤特征

图 3 为第一块靶板纵向剖面用硝酸酒精溶液腐蚀后所显示的弹孔周围组织特征, 在图中除可以看到弹孔附近较大区域内基体带状组织的整体协调变形外, 还可以看到, 弹孔边缘有白层且周围有大量白亮的绝热剪切带, 剪切带互有交叉但总体分布趋向一致, 与射流前进的反向呈 45° 左右, 有很多裂纹分布在弹孔的两侧, 这些裂纹有些与剪切带相交叉, 有些与射流方向平行. 最后一块靶板纵向剖面经同样腐蚀液腐蚀后显示在弹孔边缘也有白层. 弹孔周围分布的剪切带数量相对第一块靶板明显减少. 图 4 为最后一块靶板经苦味酸过饱和溶液腐蚀后在较低倍数下观察到的白层和剪切带形态. 从照片中可以看到原始带状组织的错动仅发生在绝热剪切带内极薄的层面上, 而在白层内和剪切带内其它地方的原始带状组织依然保持着

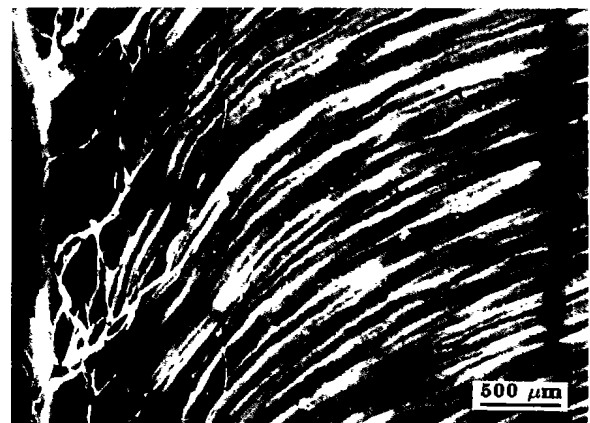


图 3 硝酸酒精溶液腐蚀以后第一块靶板弹孔周围低倍显微组织

Fig.3 The lower magnified structure near the punching hole of the first target etched by nital

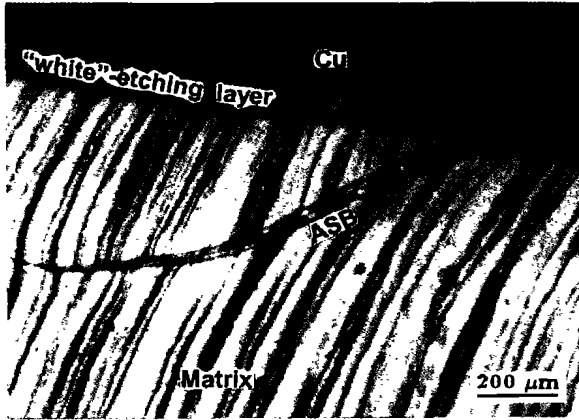


图4 苦味酸过饱和溶液腐蚀后最后一块靶板纵向剖面弹孔周围显微组织

Fig.4 Microstructure near the punching hole of the last target etched by solution of supersaturation picric acid

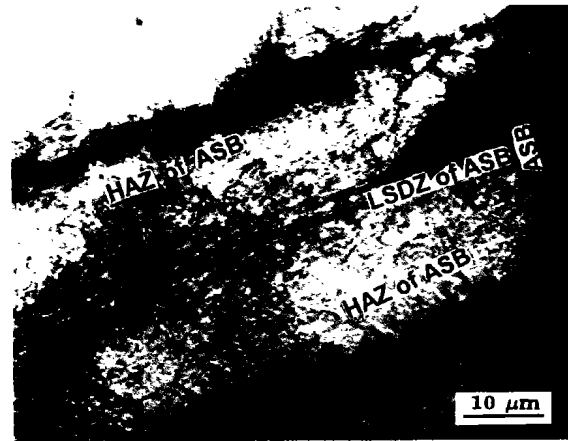


图6 绝热剪切带中的奥氏体晶粒形态及其晶界特征

Fig.6 Morphologies of grain and interface of the austenite in the adiabatic shear band

原来的连接,只是方向略有变化.进一步观察则可看到,弹孔与白层之间还有一层薄的熔化后凝固的铜层,这是药型罩形成射流后在弹孔边缘的残留物.而在白层中,靠近弹孔一侧的实际奥氏体晶粒大小极不均匀,最小奥氏体晶粒尺寸仅为 $3-4\ \mu\text{m}$,最大奥氏体晶粒尺寸与基体中的晶粒相当,为 $20-30\ \mu\text{m}$,白层与基体交界处的奥氏体晶粒形状并未发生改变,只是变得不像基体晶界那样明锐,见图5.在绝热剪切带内也显示出了与基体中大小相当的奥氏体晶粒,其与基体交界处的奥氏体晶界形态与白层中的相似,见图6.

2.3 弹孔周围显微硬度测试

选择穿透的最后一块靶板进行显微硬度的测试.结果显示靶板基体的硬度范围为: $\text{HV}500-\text{HV}523$.在弹孔附近各组织中的硬度值分散度较大,白层的硬度范围为:

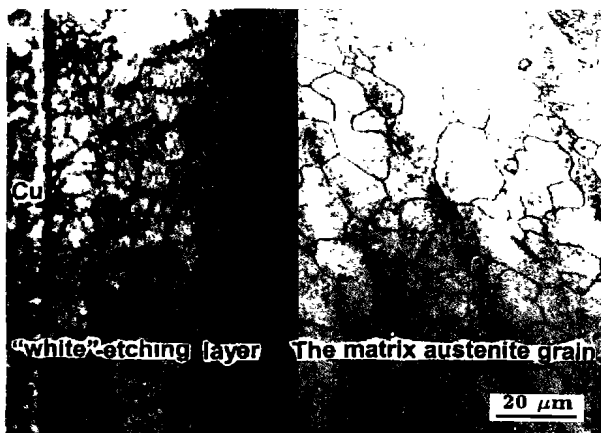


图5 白层和基体中的奥氏体晶粒形态及其晶界特征

Fig.5 Grain characteristics of the austenite in the "white"-etching layer and matrix

$\text{HV}565-\text{HV}641$,绝热剪切带的硬度范围为 $\text{HV}569-\text{HV}664$,两者的硬度均明显高于基体的硬度.但是,它们均低于靶板材料未经回火的淬火马氏体硬度 ($\text{HV}645-\text{HV}686$):此外,靠近白层的基体平均硬度偏低,远低于白层的靶板基体平均硬度.

2.4 弹孔周围白层的透射电子显微镜分析

图7a和b为白层透射电镜的显微组织及其衍射图.由于试样具有很强的磁性,高倍像散很难消除,所以照片不很清晰,但它还是能够反映出白层的晶粒非常细小,电子衍射分析表明,白层中的超细晶为纳米级($20\ \text{nm}$ 左右)粒度的马氏体和残余奥氏体混合组织.

2.5 弹孔边缘及其附近绝热剪切带电子探针测试

用DPM-810Q能谱仪对弹孔边缘白层和附近绝热剪切带以及靶板基体中除C以外的各种合金元素进行线扫描,结果表明,这些元素的浓度均没有发生变化,图8为Si, Mn两种元素的扫描图像.

3 实验结果分析与讨论

靶板横向剖面弹孔周围旋转状分布的裂纹说明靶板在聚能射流穿甲的初期,受沿弹孔横截面切线方向的作用力很大,这反映出聚能射流在开始形成时是以旋转的方式聚焦的.由于惯性力的作用,使爆炸产物发生径向飞散,弹孔周围许多小冲击坑就是由这种径向飞散的爆炸产物造成的.尽管纵向剖面上有些裂纹可能是上述旋转状分布裂纹在纵向剖面的显示,但不排除有些裂纹是应力波反射造成的.

图4中基体带状组织在绝热剪切带内的错动变化特征表明,这里的绝热剪切带由集中变形区和非集中变形区组成,超高强度钢靶板在聚能射流穿甲过程中的剪切变形局域化现象仅发生在集中变形区,它是一个相当薄的严重剪切变形区,其厚度约为 $2\ \mu\text{m}$,据基体带状组织错动情

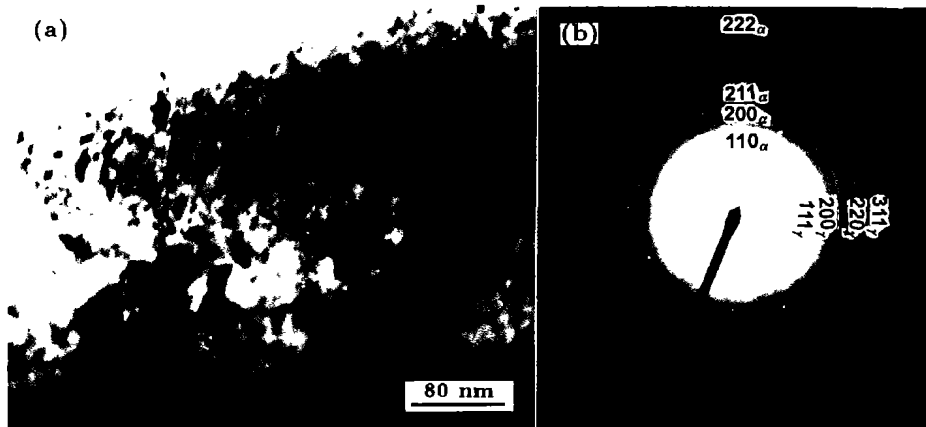


图 7 白层透射电镜的显微组织及其衍射图

Fig.7 TEM structure (a) and diffraction pattern (b) of the "white"-etching layer

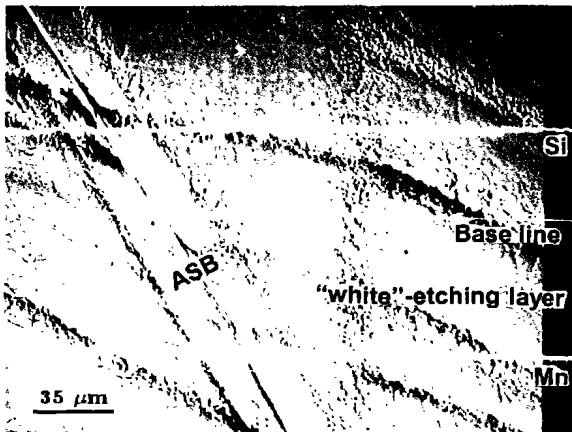


图 8 白层及附近绝热剪切带电子探针扫描图像

Fig.8 Morphology and for scanning lines of Si and Mn "white"-etching layer and adiabatic shear band

况分析, 集中变形区的平均切应变大小约为 110, 根据文献 [11] 对剪切带形成时间的保守估计 ($4.9 \mu\text{s}$) 可知, 这里的平均切应变率为 $2.24 \times 10^6 \text{ s}^{-1}$, 而在非集中变形区切应变大小平均约为 0.5, 远远小于集中剪切变形区. 本文认为非集中变形区是集中剪切变形区严重剪切变形的热影响区, 所以绝热剪切带由集中剪切变形区 (LSDZ) 及其热影响区 (HAZ) 组成. 通常经硝酸酒精溶液侵蚀后所显示的亮带是集中剪切变形区和热影响区的总宽度. 以往, 人们常常把这个宽度称为绝热剪切带 (ASB) 的宽度. 图 6 表明, 在绝热剪切带的热影响区中, 实际奥氏体晶粒大小与基体的相差不大, 尤其是在与基体的交界处, 奥氏体晶粒的形状几乎没有发生变化, 这里是否发生过相变还有待于进一步的研究.

对比图 4 白层和完整绝热剪切带中带状组织的错动

变化可以看到, 白层实际是不完整的绝热剪切带, 它是剪切带热影响区的剩余部分, 因此, 可以认为白层的另一半被聚能射流“冲”掉了, 由此可以推断, 弹孔的形成是射流对靶板剪切的结果. 另外, 弹孔壁所呈现的圆滑缺损表明在剪切过程中弹孔表面伴有熔化现象发生, 见图 4. 由此可知, 这种不完整绝热剪切带的热影响区所经历的温度应该远远高于完整绝热剪切带的热影响区所经历的温度, 因为, 这里不但受最大剪切变形的影响, 而且还受到聚能射流所产生高温的影响. 图 5 弹孔边缘白层中所显示的实际奥氏体晶粒大小极不均匀的现象恰好反映出快速加热奥氏体化的典型特征, 说明白层的温升速度极快, 在靠近破孔的边缘已有新的奥氏体晶粒形成, 即发生了相变, 这个加热层非常薄 ($50\text{--}420 \mu\text{m}$), 所以冷却速度也极快.

由于弹孔边缘白层中存在温度梯度, 所以这一区域中的 C 将向白层与基体的交界处扩散, 造成白层中的 C 浓度不均匀, 文献 [10] 的实验也证实剪切带中的 C 浓度低于基体浓度且在边缘方向有逐渐增加的浓度梯度. 但电子探针扫描测试表明, 其它合金元素却没有发生明显变化 (参见图 8), 这是因为其它金属元素的扩散速度相对于 C 元素来说太慢了, 以致于能谱仪根本测不出其浓度的变化. 由于极快速的加热与冷却, 所以形成了图 7 所示的具有纳米尺度的超细晶马氏体和残余奥氏体混合组织, 这里残余奥氏体的形态及大小完全不同于图 5 所示高温状态下的实际奥氏体晶粒形态. 弹孔周围白层中显微硬度值有一定分散性的现象间接反映了这一区域可能含有相当数量的残余奥氏体. 而剪切带中沿剪切带长度方向显微硬度不均的现象则有可能是由于其中各部剪切量不同造成的. 之所以白层和剪切带的硬度均低于靶板未回火的淬火马氏体硬度, 是因为穿甲后的热效应造成了白层和剪切带的轻度回火所致. 而与白层邻近的基体硬度相对远处基体

硬度的降低则是剪切热使变形基体发生了轻度回复. 根据上面的分析可知, 白层中奥氏体晶界的不明锐、白层与基体间以及剪切带热影响区与基体间交界的模糊均表明了 C 在白层和剪切带内发生了扩散, 并在界面上发生了富集. 这种现象也似乎说明, 此时 C 的扩散是以晶界扩散为主要机制.

4 结论

在穿甲过程中, 弹孔周围温升速度极快, 不但使弹孔表层温度超过了相变点而且使表层部分靶材发生了熔化. 由于相变层极薄, 所以冷却速度非常的快, 这种极快速加热和冷却的结果即形成了所谓的白层, 其显微组织由具有纳米尺度 (20 nm 左右) 的马氏体和残余奥氏体混合组成. 白层和剪切带中除 C 以外的其它合金元素均未发生明显的扩散.

超高强度钢靶板在聚能射流穿甲过程中所形成的绝热剪切带由集中变形区和剪切热影响区组成. 强烈的剪切变形仅发生在集中变形区, 集中变形区的宽度为 $2\ \mu\text{m}$ 左右, 所发生的切应变约为 110, 应变速率至少为 $2.24 \times 10^6\ \text{s}^{-1}$, 通常光学显微镜下显示的剪切带的宽度是集中剪切变形区及其热影响区的总宽度, 热影响区的切应变平均约为 0.5.

聚能射流对靶板穿甲初期由于受射流聚焦的影响, 靶板弹孔边缘受到横向切向应力作用, 但就其整个过程而言, 聚能射流对超高强度钢靶板的穿甲以沿射流方向的剪切方式为主. 在这一过程中, 靶板材料破坏包含了如下几个相互重叠的过程: 与射流接触的靶板周围局部区域材料沿射流方向上的整体协调变形; 射流与靶板之间的剪切断裂和弹孔表面部分靶材的熔化; 集中在极薄层面上高度局

域化的剪切变形从而形成绝热剪切带; 应力波反射造成的正向开裂.

感谢李志成博士、苏戈女士在透射电镜观察和弹孔宏观形貌拍照中给予的帮助.

参考文献

- [1] Wittman C L, Meyers M A, Pak H R. *Metall Trans*, 1990; 21A: 707
- [2] Cho K, Chi Y C, Duffy J. *Metall Trans*, 1990; 21A: 1161
- [3] Hines J A, Vecchio K S, Ahzi S. *Metall Mater Trans*, 1998; 29A: 191
- [4] Dong H, Li G F, Wang B Z, Chen N P. *J Iron Steel Res*, 1995; 7: 38
(董翰, 李桂芬, 王步震, 陈南平. 钢铁研究学报, 1995; 7: 38)
- [5] Dong H, Li G F, Chen N P. *Acta Metall Sin*, 1996; Vol.32: 599
(董翰, 李桂芬, 陈南平. 金属学报, 1996; 32: 599)
- [6] Zhang B F, Shen W C, Liu Y J, Wang Y F, Tang X Y. *Acta Metall Sin*, 1997; 33: 1161
(张宝法, 沈万慈, 刘英杰, 王远飞, 唐祥云. 金属学报, 1997; 33: 1161)
- [7] Krejci J, Brezina J, Buchar J. *Scr Metall Mater*, 1992; 27: 611
- [8] Yang Z Y, Zhao J P. *Ordance Mater Sci Eng*, 1995; 18: 29
(杨卓越, 赵家萍. 兵器材料科学与工程, 1995; 18: 29)
- [9] Qin C S, Duan Q S, Han B. *Explosion and Shock Waves*, 1997; 17: 318
(秦承森, 段庆生, 韩冰. 爆炸与冲击, 1997; 17: 318)
- [10] Li Q. *PhD Dissertation*, Northeastern University, Shenyang, 1996
(李强. 东北大学博士论文, 沈阳, 1996)