第10卷 第2期 高 压 物 理 学 报 Vol.10,No.2
1996年6月 CHINESE JOURNAL OF HIGH PRESSURE PHYSICS June,1996

贫铀药型罩材料中微量杂质对聚能射流性能的影响*

王铁福[a,b] 赵同虎[a] 阮文俊[a,b] 王 雷[a,b]

(a.中国工程物理研究院流体物理研究所,冲击波物理与爆轰物理实验室,成都523信箱 610003)
(b.南京理工大学,南京 210014)

摘要 通过对贫铀药型罩的静破甲实验,研究了材料中微量元素对射流性能的影响。实验结果表明,贫铀中的碳含量对射流性能起着非常重要的作用,随着碳含量的增加,静破甲威力下降十分显著。最后讨论了有害微量杂质对射流造成影响的原因,指出有害杂质可以以点缺陷或向晶界偏聚的形式存在于材料中,它们对材料的滑移变形均起到阻碍作用,其结果造成材料延展性能下降。

关键词 聚能射流 爆炸 贫铀

中图法分类号 TP610.2

1 引 言

聚能装药射流原理是把炸药的能量通过空心效应集中到一个圆锥或楔形的金属药型罩上,使药型罩压垮并向轴线聚集,从而形成高速金属射流。为了提高射流的侵彻能力,除选用高密度的重金属材料,如钨铜合金、钼合金、钽、镍、贫铀制作药型罩外,改进材料的物理性能和机械性能,提高药型罩材料在高应变率及高应变下的动态延展特性也是非常重要的。

射流的断裂是影响射流侵彻能力的重要因素。对于射流的断裂机理,国内外许多专家和学者在实验研究和理论分析上作了大量的工作,建立了有关射流断裂的各种理论模型和经验公式。Hirsch E.[1]从能量的观点出发导出了速度差公式;Chou P.C.和 Carleone[2]利用表面扰动理论解释了射流断裂的机理;Walsh[3]从量纲分析出发提出了射流稳定性与材料屈服应力、材料密度、初始应变率之间的依赖关系。

进入80年代,国外一些专家和学者开始重视材料的微观组织对射流断裂行为的影响。Lichtenberger 研究了紫铜、黄铜、锌铝合金、镍等材料的晶粒度和再结晶温度对射流性能的影响[4];Lassila D.H.研究了晶界杂质的偏聚对射流造成的危害[5];Bourne B.等人研究了晶粒度再结晶温度与射流断裂之间关系[6]。这些研究成果对制定药型罩的选材标准、成型工艺路线以及热处理规范有着极其重要的意义。

* 本课题由中国工程物理研究院流体物理研究所、冲击波物理与爆轰物理实验室资助完成。
1995年11月24日收到原稿,1996年1月18日收到修改稿。

本文通过对微量杂质含量各不相同的多组贫铀药型罩的静破甲实验，研究了材料中微量杂质对射流性能的影响；指出了碳元素含量对贫铀射流动态延伸性能的破坏作用。随着碳含量的增加，静破甲威力显著下降。最后讨论了有害微量杂质对射流造成影响的原因，指出了无论微量有害杂质以点缺陷形式还是以向晶界偏聚的形式存在于材料中，它们均对材料的滑移变形起到阻碍作用，其结果造成材料延展性能的下降。

2　实验设计与实验结果

用于本项研究的药型罩材料为贫铀。由于贫铀具有很高的密度（其密度高达 18.3～18.9 g/cm^3）、良好的机械性能、得天独厚的燃烧后效、合理的价格而在众多重金属药型罩材料中独占鳌头。

为了了解贫铀中微量杂质对射流性能的影响，参试药型罩试件由微量杂质含量各不相同的 8 个炉号坯锭，按同一制作工艺加工而成。8 个炉号坯锭编号分别为 B1～B8。其化学成份采用频谱分析方法，在坯锭的上部、中部和下部分别取样检测，取其平均值作为最后检测结果。为了减少系统误差，8 个炉号的试样分析均由同一人操作完成。表 1 列出了各炉号试件的化学成份分析结果（相对值）。

表 1　不同炉号的化学成分

Table 1　Chemical composition of materials from different furnaces

Furnace number	Chemical composition (relative values)							
	Fe	Ni	Cu	Mn	Al	C	N	Si
B1	<2.8	<2.5	<2.5	<1.0	<5.0	8.2	5.3	<3.0
B2	<2.8	<2.5	<2.5	<1.0	<4.9	7.6	5.5	<3.0
B3	<2.5	<2.5	<2.5	<1.0	<2.5	7.0	1.9	<3.0
B4	<2.5	<2.5	<2.5	<1.0	>20.0	8.7	2.5	<3.0
B5	<4.6	<2.5	<2.5	<1.0	<2.5	10.0	2.2	<5.0
B6	<4.0	<2.5	<2.5	<1.0	<6.0	13.0	2.8	<3.0
B7	<3.8	<2.5	<2.5	<1.0	<2.5	20.0	2.5	<3.0
B8	<20.0	<2.5	<2.5	<1.0	<2.5	23.0	2.5	<3.0

用于本项研究的基本装药结构为：弹径为 30 mm，药型罩锥度 48°，罩壁厚为 0.9 mm，采用 8701# 炸药，起爆方式为 8# 雷管点起爆。图 1 为该装药结构简图。由于主要进行材料性能的研究，所以在装药结构设计中未对穿深指标刻意追求。

射流的质量可以采用不同的方法加以评价。闪光 X 光像是观察射流形态和评价射流的最好方法；其次是以静破甲深度来评价射流，这种方法经济方便，但实验数据有很大的散布性。鉴于贫铀材料仍具有一定的放射性污染，实验又缺乏必要的防护措施，因此，只能进行静破甲实验。实验所用弹药发数为每个炉号 5 发，共 40 发。所用靶板为 ϕ120 mm 的 45# 钢。表 2 列出了不同炉号的药型罩静破甲实验结果。

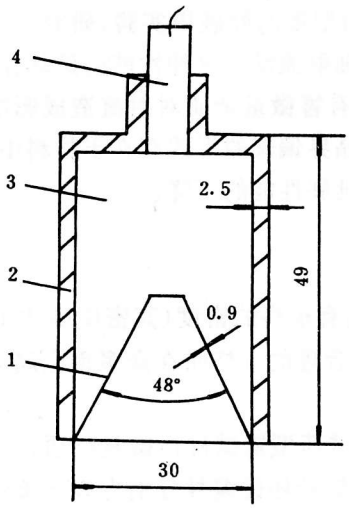

图 1 装药结构简图

1. 药型罩；2. 弹壳；3. 炸药；4. 雷管

Fig. 1 Shaped charge assembly

1. Liner; 2. Casing; 3. Explosive; 4. Detonator

表 2 静破甲实验结果

Table 2 The experimental results

Furnace number	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8
Stand-off/(mm)	90	90	90	90	90	90	90	90
Effective quantity of round	5	5	5	5	5	5	5	5
Average penetration depth/(mm)	118	119	110	102	99	80	71	56

将以上实验结果与表 1 中相应炉号材料的化学成份对照分析可以看出，微量杂质及其含量对射流侵彻威力有着很大影响。其中影响最大的是碳元素的含量。为了更直观地了解碳的含量对射流侵彻能力的影响，图 2 描绘了所有参试实验弹的穿深 P 与相应含碳量 Q(相对值)的变化关系。图中的曲线是根据实验结果采用 $y=ae^{bx}$ 的函数关系拟合而成。从图中可以看到，随着含碳量的增加，射流侵彻能力呈下降趋势。

此外，B4 号材料与其它炉号相比，铝含量的相对值高达 20，是其它炉号铝含量的几倍，但是相应的穿深仍然很高。这是否意味着微量杂质铝对射流没有危害作用，其结论尚需进一步通过实验加以验证。

3 实验结果分析

射流的侵彻能力是与射流断裂之前的连续射流长度成正比的，这就是说高质量的射流要有极高的延伸率，它能稳定而均匀地拉伸至很长的程度而不断裂。因此，对射流断裂理论的研究一直是这一领域中的重要课题。聚能射流的断裂总的来说可分为三类：(1)延性断裂。这种断裂方式一般形成长细比较大的断裂颗粒，每个断裂颗粒都承受了很大的塑性变形。在回收的断裂颗粒表面能看到粗糙的棱形滑移线，断裂颗粒的长细比大约在 4.5～5 的范围。(2)脆性断裂。断裂之前塑性变形不明显，其长细比大约为 1 左右。(3)粒子型断裂。主要是粉末冶金的断裂，断裂时形成弥散颗粒。脆性断裂不能使射流充分伸长，因而侵彻能力很差，这种断裂是人们所不希望的。

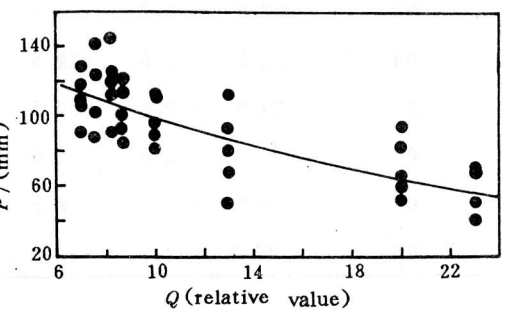

图 2 侵彻深度随含碳量变化

Fig. 2 The variation of penetration depth with C content

聚能射流的断裂性能受到多种金属学参数的影响，如材料的纯度、晶粒度、再结晶温度和织构等。这些参数并不是孤立的，它们之间存在着错综复杂的关系。例如微量杂质影

响材料的再结晶温度，一般说来，某些微量杂质的增加会导致再结晶温度的提高，而高的再结晶温度对射流的侵彻能力是不利的。但微量杂质的存在又可起到细化晶粒的作用，晶粒的细化可增强射流的延展性能，这对增加连续射流长度，推迟断裂时间是有益的。因此，单独讨论微量杂质对射流起到好的影响还是坏的影响是很困难的。这里只从滑移理论出发，讨论微量杂质对射流断裂及断裂方式的影响机制。这种讨论是不全面的，但它可以从某一侧面对实验结果有一个理性认识。

聚能射流在形成以及伸长的过程中承受了巨大的塑性变形。滑移是金属塑性变形的主要方式。Lichtenberger 和 Zernow[7]在回收的射流断裂颗粒表面，发现与颗粒轴线呈 45°的棱形滑移线，证明射流的塑性变形主要是以滑移方式进行的。下面将以微量杂质对滑移机制所产生的阻碍作用，讨论贫铀中的碳元素对其射流性能的影响。

贫铀中的碳作为一个点缺陷，可以以间隙原子或替代式溶质原子的形式，存在于晶体组织中。根据位错与点缺陷相互作用理论[8]，所有点缺陷都能以多种方式与位错相互作用。其中之一是点缺陷在晶体中引起弹性畸变，因而在它周围产生位错应力场，于是附近的其它间隙原子将受到位错应力场的作用。当位错应力场为引力时，位错附近杂质密度增加并高于平均密度。杂质密度的增加限制了位错的自由移动，从而与位错相关的滑移就会减少，其结果会促使材料由延性断裂向脆性断裂转变。显然，这种转变对射流最大限度的伸长是不利的。

杂质在一定温度下都有向晶界偏聚的趋势，这一偏聚过程常发生于材料的热处理过程中。在热处理过程中，杂质以扩散方式和晶界迁移的方式，向晶界聚集并使晶界上的杂质浓度增加。实验测定表明[8]，在平衡状态下，溶质原子在晶界上的浓度比在晶粒内部高出 10～1000 倍。贫铀中的碳元素也不例外，由于贫铀药型罩在加工过程中须经过多次 β 淬火和退火，碳在贫铀中很容易形成硬度很高很脆的碳化物如碳化铀等，这些脆性碳化物向晶界聚集的结果造成晶界的脆性化。脆性化的晶界大大减少了晶界滑移的机动性。事实上，当多晶体金属在外力作用下发生塑性变形时，首先是晶粒中的某个滑移系到达临界分切应力，并开始滑移变形。当滑移变形传播到晶界处时，滑移受到晶界的阻碍并在晶界附近造成位错的塞积形成应力集中。这时只有通过晶界的滑移或转动进行协调变形，才能使塑性变形得以继续进行。然而当滑移遇到脆性化的晶界时，晶界滑移起动变得很困难。随着应力增加位错塞积越来越严重，应力集中也越来越加剧，最后导致沿晶界的脆性断裂。而沿晶界的脆性断裂对聚能射流侵彻威力的影响是相当大的。

上述关于贫铀中微量碳元素对滑移机制的影响，对其它微量元素来说也是适用的。但是微量杂质除了对塑性滑移产生阻碍作用外，对晶体组织的细化也是有益的，在不影响再结晶温度提高的前提下，这对提高射流动态延伸特性是有好处的，因此，判断一种微量杂质及杂质含量是否对射流具有有益的贡献，还需进行全面的对比分析。

聚能射流的超塑性理论研究是这一研究领域里的热点之一。除了滑移理论外，一些专家学者提出了运用动力再结晶理论对聚能射流的超塑性进行研究，但目前尚未得到很成熟的结果。聚能射流的超塑性不仅涉及高温、高压、高应变和高应变率的力学问题，而且还涉及金属学、化学、物理学等学科方面的问题，因此只有多学科的协调努力才能把研究工作推向深入。

参 考 文 献

1 Hirsch E. Propellents Explosives Pyrotechnics, 1985, (10): 74
2 Chou P C, Carleone J. J Appl Phys, 1977, 48(10): 4187～4195
3 Walsh J M. J Appl Phys, 1984, 56(7): 1997～2006
4 Lichtenberger A, Scharf M, Bohmann A. Influence of the Structural and Metallurgical State of the Liner on the Performance of a Shaped Charge. In: The Proceedings of 6th Int Symp on Ballistics, USA Orlando, 1985. 237～243
5 Lassila D H. Correlation between Shaped Charge Jet Break up and Grain Boundary Impurity Concentrations. In: The Proceedings of 13th Int Symp on Ballistics, Stockholm, 1992. 549
6 Bourne B, Joues P N, Warren R H. Grain Size and Crystallographic Effects on the Performance of Shaped Charges. In: The Proceedings of 14th Int Symp on Ballistics, Quebec, 1993. 119～124
7 Lichtenberger A, Zernow L. Increase of Jet Ductility with Cold Pressed Liners and Recovery of Jet Fragments. In: The Proceedings of 14th Int Symp on Ballistics, Quebec, 1993. 91～100
8 余宗森, 田中卓. 金属物理. 北京: 冶金出版社, 1982. 121～133

THE INFLUENCE OF IMPURITIES IN LINER MATERIALS ON THE BEHAVIOR OF SHAPED CHARGE JETS

Wang Tiefu[a,b], Zhao Tonghu[a], Ruan Wenjun[a,b], Wang Lei[a,b]

(a. *Laboratory for Shock Wave and Detonation Physics Research, Southwest Institute of Fluid Physics, P. O. Box* 523, *Chengdu* 610003)
(b. *Nanjing University of Science and Technology, Nanjing* 210014)

ABSTRACT In this paper, the influence of impurities on the behavior of shaped charge jets was investigated by fire tests of depleted uranium shaped charge liner. The results of these tests indicate that impurity carbon have an important influence on the behavior of depleted uranium shaped charge jet. As the content of impurity carbon increases, the penetration depthes of depleted uranium shaped charge decreased dramatically. The reason we suggest is that harmful impurities can affect the ductility of materials in different ways, such as inhibiting the dislocation movement and reducing the slip mobility, etc.

KEY WORDS shaped charge jet, explosive, uranium.