文章编号：1000-5773(2007)01-0108-05

平面冲击波高速撞击下 $Zr_{41}Ti_{14}Cu_{12.5}Ni_{10}Be_{22.5}$ 大块非晶合金的损伤与断裂*

李 强[1]，杨 超[2]，战再吉[2]

（1. 中国电子科技集团公司第二十七研究所，河南郑州 450005；
2. 燕山大学国家大学科技园新材料研发中心，河北秦皇岛 066004）

摘要：利用二级轻气炮研究了在平面冲击波高速撞击下，$Zr_{41}Ti_{14}Cu_{12.5}Ni_{10}Be_{22.5}$ 大块非晶合金的损伤与断裂行为。实验结果表明：在高速冲击压缩下，大块非晶合金断裂面的角度小于通常压缩情况的角度，这是由高速撞击下材料极高的应变速率决定的；极高的应变速率变形和局域绝热剪切加热造成局部熔化；在温度和压力的共同作用下，非晶合金发生晶化现象。

关键词：大块非晶合金；平面冲击波；损伤；断裂
中图分类号：O521.2；O347.3 **文献标识码**：A

1 引 言

由于新型多组元大块非晶合金具有晶态材料所无法比拟的优异性能，例如高强度、高硬度、耐磨性、优异的磁性能以及耐腐蚀性能等，越来越引起人们的关注。近 20 年来，一直是国内外材料科学与凝聚态物理研究领域的热门话题之一[1-2]。以往的大块非晶合金研究都集中在新型非晶合金的制备及其物理和力学性能方面[3-5]，利用冲击波、高压手段对大块非晶合金的损伤与断裂性能研究的报道很少[6-7]。本工作利用二级轻气炮冲击实验，研究了平面冲击波高速撞击大块非晶合金的损伤与断裂行为。

2 实 验

使用纯度超过 99.5%的金属 Zr、Ti、Cu、Ni 和 Be，按照 $Zr_{41}Ti_{14}Cu_{12.5}Ni_{10}Be_{22.5}$ 的合金成分进行配比，在真空氩弧熔炼炉中反复熔炼，得到高纯度合金锭；熔炼前，首先用高纯 Ti 吸收熔炼系统内部的氧，防止氧化。合金锭重新熔化后，用铜模吸铸的方法制成尺寸为∅18 mm 的合金棒，X 射线衍射分析表明，合金的结构为完全非晶态。

$Zr_{41}Ti_{14}Cu_{12.5}Ni_{10}Be_{22.5}$ 大块非晶合金二级轻气炮平面撞击实验在中国工程物理研究院流体物理研究所进行。本实验使用口径∅25 mm 的二级轻气炮，大块非晶合金样品的尺寸为∅18 mm×10 mm。驱动∅22 mm×2 mm 的铝合金飞片，以 2.7 km/s 的速度撞击大块非晶合金靶，经计算，试样的冲击压力可达 34 GPa 左右。实验所采用的回收装置如图 1 所示，大块非晶合金样品嵌在开有圆柱孔的紫铜圆柱内，为了在更短的时间内卸压，紫铜块下方是高压聚乙烯，其后分别是铝柱和钢柱。所有的圆柱块尺寸都为∅ 40mm，装配在一个钢套筒内部，套筒底部用螺栓和铜板封住；在样品上部覆盖一块∅40 mm×2 mm 的紫铜薄板。

使用 D/Max-2500/pc X 射线衍射仪对材料的组织结构进行分析；使用 XL30 S-FEG 高分辨扫描电子显微镜观察试样表面与横截面的损伤特征。

* **收稿日期**：2006-03-02；**修回日期**：2006-05-22
作者简介：李 强(1969—)，男，硕士，高级工程师，主要研究方向为电子工程. E-mail：htzhy2004@yahoo.com.cn
通讯作者：战再吉(1968—)，男，博士，教授，主要研究方向为材料科学与工程. E-mail：zjzhan@ysu.edu.cn

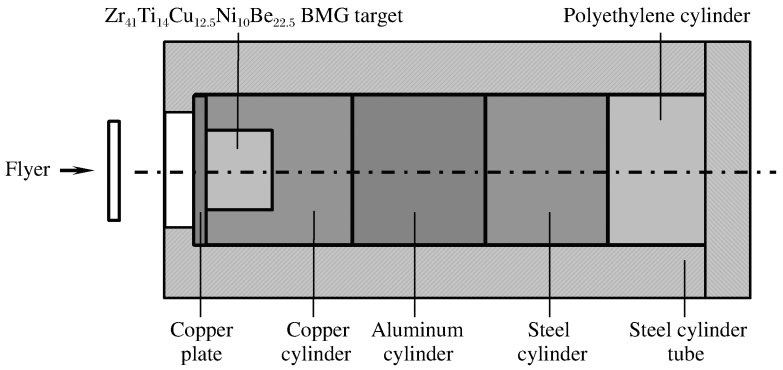


图 1　冲击波实验回收装置示意图

Fig. 1　Schematic diagram of the recovery device for hypervelocity impact

3　结果与讨论

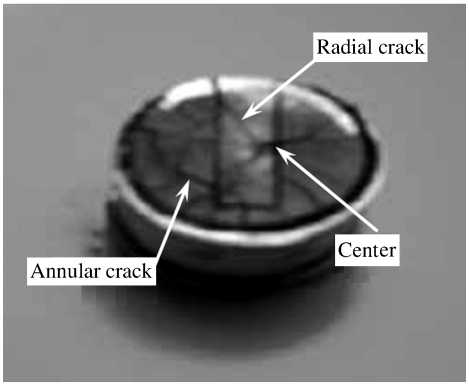


图 2　冲击压缩后大块非晶合金上表面的光学照片

Fig. 2　Optical photograph of upper surface of $Zr_{41}Ti_{14}Cu_{12.5}Ni_{10}Be_{22.5}$ BMG target after shock wave compressing

图 2 为冲击压缩后，大块非晶合金上表面的光学照片。由于极强的压缩冲击波效应，平面冲击压缩后试样的直径由冲击前的 17.5 mm 增大为 20.5 mm，厚度由冲击前的 10 mm 减小为 7.3 mm。由于压缩应力远远超过大块非晶合金的强度极限，因此，冲击后的损伤特征为具有孔洞和剪切裂纹/带的破碎断裂，试样迎着飞片方向受到冲击，使上表面呈现出环形裂纹和密集分布的、源于中心点的径向裂纹。造成这一现象的原因是：铝合金飞片在飞行过程中受到气体阻力，飞片的中心部分向前凸出，强度很大的压缩冲击波首先作用于大块非晶合金的中心点，中心点位置材料的失效产生了径向分布的裂纹；由压缩冲击波和从回收装置铜壁反射回的反射波形成的拉伸波的共同作用形成环形裂纹。

图 3 为平面波冲击压缩大块非晶合金后，试样横断面的微观结构。几条大约相距 2 mm 的相互平行的剪切裂纹/带出现在接近被冲击表面的横断面表层（由于扫描电镜视场的局限性，不能同时看到 2 条以上的平行裂纹）。如果考虑到由冲击压缩导致的尺寸补偿，这些剪切裂纹（断裂面）与冲击方向的夹角大约为 35°，如图 3(a)和图 3(c)所示。这个角度极大地偏离了通常情况下断裂面出现在 45°的 Tresca 准则，与 Zhang 等[9-10]近年的相关研究结果很符合。

综合断裂面出现的角度，可得出结论：高速压缩下大块非晶合金断裂面的角度小于通常压缩情况下的断裂面角度，这是由高速撞击下材料极高的应变速率决定的。沿着冲击方向在被冲击试样的中心区域，断裂裂纹展现出不同的特征，出现了裂纹的交叉现象，如图 3(b)、图 3(c)和图 3(d)所示。两条裂纹相互交叉汇集于一点，形成了“T”字形的裂纹模式。这种裂纹模式一般不可能出现在通常的单轴压缩或拉伸的情况下，它是由垂直加载的压缩冲击波和从试样容器壁反射回来的反射波相互作用形成的复杂应力态造成的。复杂交变的冲击波的作用导致了最大剪切应力平面偏离 Tresca 准则所决定的 45°方向，从能量平衡角度分析[9-10]，其剪切角度要小于 45°。在试样内的底部区域，由于存在由压缩冲击波、衰减波和从试样边侧和后表面反射回来的反射波导致综合作用的交互应力状态，出现了横向的剪切裂纹，如图 3(e)所示。

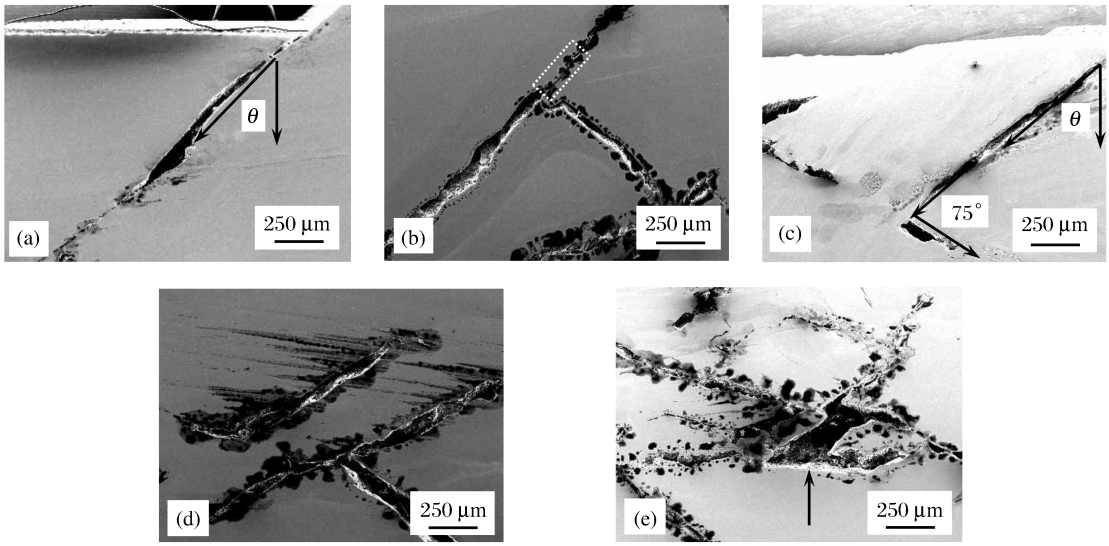
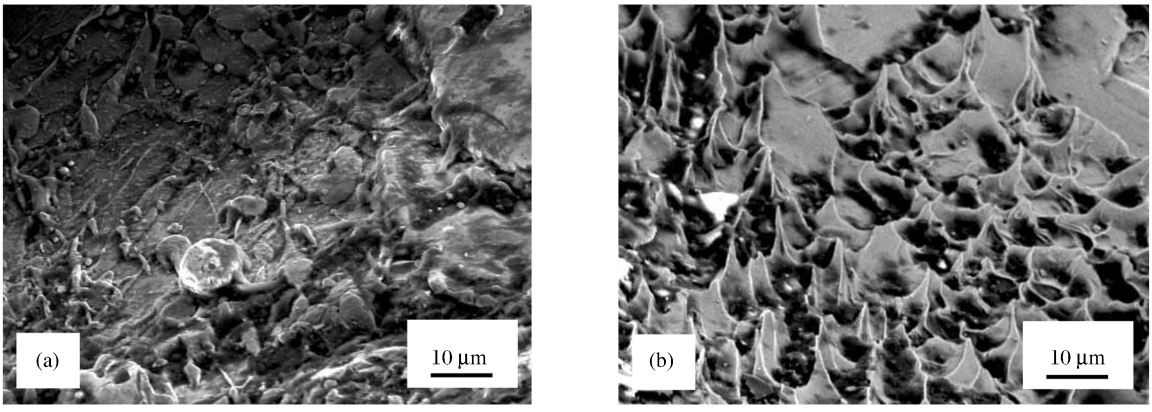


图 3 平面冲击波压缩大块非晶合金后的横断面微观结构扫描电镜照片

Fig. 3 SEM micrographs showing cross-sectional microstructure of $Zr_{41}Ti_{14}Cu_{12.5}Ni_{10}Be_{22.5}$ BMG under planar shock wave loading by an aluminum

放大图 3 中剪切裂纹/带内部的壁部和底部区域,可看到在裂纹内壁存在许多微小的破碎颗粒(如图 4(a)所示),同时在裂纹底部出现了许多“类似于液滴坑”的损伤特征(如图 4(b)所示)。这是大块非晶合金在强冲击波作用下,由于极高的应变速率变形和局域绝热剪切造成的。实际上,在大块非晶合金的压缩和拉伸测试中,普遍存在着绝热剪切和熔化现象[11],它们通常发生在高应变速率变形过程中,是应变硬化和热软化失去平衡的结果。众所周知,在强冲击波作用下,大块非晶合金在弹性变形后展现出轻微的塑性变形,这将导致其不均匀的变形。当剪切应力超过材料的屈服极限后,剪切裂纹/带内就会发生严重的挤压和摩擦运动,因此,导致剪切带内局部区域的材料破碎成微小的颗粒,如图 4(a)所示。然而,由于非晶合金具有较低的热导率,变形过程中产生的热不能及时逸散,因此,试样内某些区域的局部温度可能增大到超过大块非晶合金的玻璃化转变温度,有时甚至超过材料的熔化温度,从而使材料熔化。相对于非晶合金其它情况下断裂后出现的“类似液滴”的局部熔化特征,当前高速撞击情况下的“类似于液滴坑”是一种更加严重的熔化现象。



(a) Crash particles inside the shear crack (b) Morphology on the bottom part of shear cracks/bands

图 4 高速撞击后回收的大块非晶合金内部的绝热剪切形貌特征

Fig. 4 SEM micrographs showing morphologies of adiabatic shear bands after shock loading

温度和压力都对大块非晶合金的晶化行为有极大的影响，当绝热剪切变形过程中能量释放导致的温升超过材料的玻璃化转变温度时，一方面，大块非晶合金将直接发生晶化现象；另一方面，由于在高速撞击过程中，大块非晶合金内极高的峰值冲击压力促进非晶内弥散分布的晶体形核和长大，因此，大块非晶合金在低于玻璃化转变温度时就会发生晶化现象。由于在高速撞击过程中，大块非晶合金内的温度和压力都有很大的升高，因此，大块非晶合金的晶化行为是温度和压力共同作用的过程。图 5 为在平面冲击波压缩后，大块非晶合金横断面的 X 射线衍射谱。经过对衍射谱进行指标化标定，发现大块非晶合金在冲击波作用下优先析出的是 $Be_{21}Ni_5$ 相，这与这种大块非晶合金退火条件下首先析出 $ZrBe_2$ 相和合金熔体在慢速冷却过程中首先析出 Zr_2Cu 相是不同的。大块非晶合金内晶体的形核和长大机制的不同，导致大块非晶合金优先析出不同的领先相。

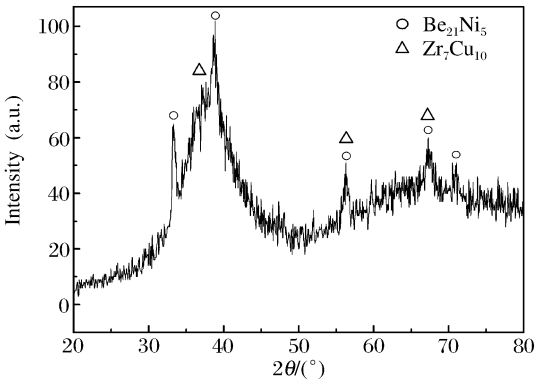


图 5　平面波冲击压缩后大块非晶合金横断面的 X 射线衍射谱

Fig. 5　X-ray diffraction pattern of cross-section microstructure of $Zr_{41}Ti_{14}Cu_{12.5}Ni_{10}Be_{22.5}$ BMG after the treatment of planar shock wave

4　结　论

在高速冲击压缩条件下，$Zr_{41}Ti_{14}Cu_{12.5}Ni_{10}Be_{22.5}$ 大块非晶合金断裂面的角度小于通常压缩情况下的断裂面角度，这是由材料极高的应变速率所决定的；极高的应变速率变形和局域绝热剪切加热导致合金内部局域熔化；在温度和压力的共同作用下，大块非晶合金会发生晶化现象。

衷心感谢中国工程物理研究院流体物理研究所吴强研究员和施尚春先生对本实验工作的支持。

References：

[1] Johnson W L. Bulk Amorphous Metal：An Emerging Engineering Material [J]. JOM，2002，54：40-43.

[2] Miracle D B. A Structural Model for Metallic Glass [J]. Nature Materials，2004，(3)：697-702.

[3] Ellison C J，Torkelson J M. The Distribution of Glass-Transition Temperatures in Nanoscopically Confined Glass Formers [J]. Nature Materials，2003，(2)：695-700.

[4] He G，Eckert J，Loser W，et al. Novel Ti-Base Nanostructure-Dendrite Composite with Enhanced Plasticity [J]. Nature Materials，2002，(2)：33-37.

[5] Inoue A，Takeuchi A. Recent Progress in Bulk Glassy，Nanoquasicrystalline and Nanocrystalline Alloys [J]. Mater Sci Eng，2004，A375-A377：16-30.

[6] Yang Ch. Effect of Shock Wave on ZrTiCuNiBe Bulk Metallic Glass [D]. Qinhuangdao：Yanshan University，2005. (in Chinese)
杨　超. ZrTiCuNiBe 大块金属玻璃的冲击波效应研究 [D]. 秦皇岛：燕山大学，2005.

[7] Yang C，Liu R P，Zhang B Q，et al. Void Formation and Cracking of $Zr_{41}Ti_{14}Cu_{12.5}Ni_{10}Be_{22.5}$ Bulk Metallic Glass under Planar Shock Compression [J]. J Mater Sci，2005，40：3917-3920.

[8] Zhan Z J，Li G，Wang L M，et al. Equation of State of $Zr_{41}Ti_{14}Cu_{12.5}Ni_{10}Be_{22.5}$ Bulk Metallic Glasses [A]//Proc 18th Inter Conf on High Pressure Science and Technology [C]. Beijing，2001.

[9] Zhang Z F，He G，Eckert J，et al. Fracture Mechanisms in Bulk Metallic Glassy Materials [J]. Phys Rev Lett，2003，91：045505.

[10] Zhang Z F，Eckert J，Schultz L. Difference in Compressive and Tensile Fracture Mechanisms of $Zr_{59}Cu_{20}Al_{10}Ni_8Ti_3$ Bulk Metallic Glass [J]. Acta Materialia，2003，51：1167-1179.

[11] Subhash G，Dowding R J，Kecskes L J. Characterization of Uniaxial Compressive Response of Bulk Amorphous Zr-Ti-Cu-Ni-Be Alloy [J]. Mater Sci Eng，2002，A334：33-40.

Damage and Cracking of $Zr_{41}Ti_{14}Cu_{12.5}Ni_{10}Be_{22.5}$ Bulk Amorphous Alloy under Planar Shock Compression

LI Qiang[1], YANG Chao[2], ZHAN Zai-Ji[2]

(1. *The 27th Research Institute, China Electronic Technology Corporation (Group), Zhengzhou* 450005, *China*;
2. *R&D Center for Advanced Materials, National Science Park of Yanshan University, Qinhuangdao* 066004, *China*)

Abstract: Planar shock compression effects on damage and cracking in $Zr_{41}Ti_{14}Cu_{12.5}Ni_{10}Be_{22.5}$ bulk amorphous alloy are studied using a two-stage light gas gun. The experimental result indicates that the cracking angel θ of bulk amorphous alloy under planar shock compression is smaller than that of traditional compression experiment, it is decided by the highest strain velocity under shock compression conditions in bulk amorphous alloy; part of bulk amorphous alloy surface also is melt by the effects of highest strain velocity and the energy of partial adiabatic shear bands; the crystallization happens in bulk amorphous alloy by the effects of temperature and pressure.

Key words: bulk amorphous alloy; planar shock wave; damage; cracking

《高压物理学报》征稿简则

《高压物理学报》是我国高压物理领域唯一的专业性学术刊物，在国内外公开发行。力求及时报道高压物理学科基础理论和应用研究方面具有创新性、高水平、有重要意义的研究成果，读者对象为国内外科技工作者。征稿内容为动态及静态高压技术，人工合成新材料，高温高压下材料的力学、光、电、磁等特性以及物质微观结构的研究，动态及静态高压研究中的测试技术，高温高压下的相变，高温高压物态方程等。接受中、英文稿件。

1. 来稿应具有科学性、先进性和实用性，论点明确、论据可靠、数据准确、逻辑严谨、文字简练、图表清晰。每篇论文的篇幅应在6 000～8 000字以内，请使用中华人民共和国法定计量单位。论文格式请参考近期出版的《高压物理学报》。请使用电子邮件投稿(gaoya@caep.ac.cn)，也可提供软盘。

2. 所投稿件不得涉及国家及本单位机密，投稿时请附本单位保密审查意见，由审查者签名并加盖公章。

3. 文章标题字数应在20字以内。文中图、表应有自明性，所有图题、图注、表题、表注均为中、英文对照，图、表中的文字一律用英文。

4. 第一作者应确保全体作者同意文章署名，请提供第一作者、通讯作者简介(姓名、出生年、性别、职称、学位、研究方向等)，以及所有联系方式(通信地址、邮政编码、电话号码、传真、电子邮箱等)，以备联系。请注明论文(工作)的资助项目(资助项目名称和批准号)，简要介绍工作背景和论文意义。

5. 来稿应保证文章版权的独立性，严禁抄袭，文责自负，请勿一稿多投。

重点注意事项

▲ 中英文摘要 摘要用第三人称书写，语言要简练，应有具体内容。要求：(1) 拥有与论文同等量的主要信息，重点包括4个要素：即研究目的、方法、结果和结论。(2) 以提供论文梗概为目的，不得评论、解释论文内容。中文摘要应在200～400个字之间，英文摘要不少于120个实词。为便于Ei Compendex以及国外其它数据库收录，英文摘要中尽量避免特殊字符(各种数学符号、上下脚标及希腊字母)及由特殊字符组成的数学表达式；第一句不要与英文题名重复；尽量用短句子并避免句形单调；用过去时态叙述主要工作，用现在时态叙述结论，尽量用主动语态代替被动语态。

▲ 参考文献 参考文献应是公开出版物。请充分著录参考文献，引用条数不宜太少，并尽量引用近期国内外文献，采用“顺序编码制”著录。中文参考文献必须附英译文，著录项目应齐全。

▲ 版权与稿酬 《高压物理学报》已加入《中国学术期刊(光盘版)》、万方数据库、中文科技期刊数据库、中国期刊网、数字化科技期刊群、台湾中文电子期刊服务——思博网(CEPS)等，并被Ei Compendex光盘收录。凡经本刊录用的稿件，其著作权(包括光盘版和网络版出版权)便自动转让给《高压物理学报》编辑部，编辑部不再另行通知。来稿一经发表，即付稿酬(包括光盘版和网络版稿酬)。

《高压物理学报》一贯秉承服务科学、服务读者、服务作者的办刊理念，慎重对待每一篇来稿，尊重作者劳动。优秀稿件享有快速发表通道，重大创新性成果可在3个月内刊出。

通信地址：四川绵阳919信箱110分箱《高压物理学报》编辑部，邮政编码：621900

电子邮件：gaoya@caep.ac.cn (投稿、征订、咨询)

电　　话：(0816)2490042；传真：(0816)2282695

《高压物理学报》编辑部