

AZ31 镁合金中绝热剪切带的组织演变规律

毛萍莉, 刘超, 刘正, 席通, 董阳

(沈阳工业大学, 辽宁 沈阳 110870)

摘要: 为了深入了解镁合金绝热剪切带与裂纹的关系, 进而揭示镁合金在高速冲击载荷作用下局部变形绝热剪切的组织演变规律, 采用分离式 Hopkinson 压杆对 AZ31 镁合金的帽状试样进行冲击压缩实验, 而后利用光学显微镜, 扫描电镜和维氏硬度计分别对冲击后的 AZ31 试样进行分析。结果表明, 绝热剪切带形成于最大剪应力方向, 随着冲击载荷的不断增大, 沿着切应力方向上的微孔洞和微裂纹不断长大, 直至彼此相互连接成裂纹, 最终导致材料的断裂。经对剪切带及周围组织维氏硬度的测量发现, 剪切带内细小晶粒区的硬度明显高于周围组织。

关键词: 分离式 Hopkinson 压杆; 高应变速率; 绝热剪切带; 微孔洞; 裂纹

中图分类号: TG146.2⁺2

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2015)05-1181-04

绝热剪切带是材料在高应变率加载条件下特有的失效形式, 普遍存在于爆炸复合、高速侵彻和冲孔等涉及冲击载荷的高速变形过程中^[1]。与准静态变形不同, 在高速冲击载荷下的动态变形过程中, 金属先经历一定的塑性变形之后, 宏观上进入塑性失稳阶段, 微观上剪切变形发生局部化, 并产生绝热剪切带^[2,3]。此时, 绝热剪切带内不仅会发生形变硬化, 还要发生形变速率硬化, 以及由形变热导致的组织软化, 这些变化均发生在微米量级的区域内, 使其组织表现得异常复杂化。一般认为, 绝热剪切带的形成是金属断裂的先兆^[4], 裂纹在绝热剪切带内萌生和聚合, 导致材料骤然失效。它的出现意味着材料承载能力的大幅度降低甚至完全丧失^[5]。以往在对高速冲击载荷下的局部变形与断裂机制研究中, 大多是针对装甲侵彻、弹丸着靶、爆炸破碎等应用场合, 主要集中在钛合金、钢铁、钨合金、铜合金和铝合金几个材料上。本实验针对的镁合金材料是目前应用中最轻的工程金属材料, 在汽车材料的轻量化应用中, 与高强度钢、铝合金、塑料等材料形成了激烈的竞争局势^[6], 近年来正在被越来越多地应用到汽车制造等工程领域^[7], 其本身的动态力学行为与失效机制越来越受到重视。通过对现有的有关高速载荷作用下的镁合金变形组织的实验结果发现, 绝热剪切带内部由大量细小的晶粒组成^[8-11], 这些细小晶粒或再结晶组织, 或者是孪晶组织的特征与一般的钛合金、钢铁十分相似。Rittel^[12]在对 AM50 镁合金和 Ti-6Al-4V 钛合金高速变形组织的

观察中发现, 动态再结晶晶粒在剪切带形成之前就已存在, 而且剪切带的形成是由于具有没有位错的纳米尺度的动态再结晶晶粒削弱材料的性能, 这种材料性能的局部起伏造成了材料的局部变形失稳, 进而产生形变局域化, 进一步发展成为剪切带。文献^[11]认为, 区域中的细小晶粒不是动态再结晶晶粒, 而是由大量孪晶带切割形成的细小晶粒, 局域化带是由具有相似晶体学取向、容易发生孪生变形的晶粒连成线形成。

高速变形条件下, 镁合金绝热剪切带内部的组织是动态再结晶晶粒、静态再结晶晶粒, 还是大量孪晶带切割形成的细小晶粒, 抑或还有可能是非晶、相变组织, 这与材料的形变量、形变速率、形变温度等有关, 现有的工作尚不全面, 还需要进一步地系统研究。为此, 作者利用 Hopkinson 压杆技术对 AZ31 镁合金进行了高温下的高速冲击压缩实验, 利用光学显微镜和显微硬度计来研究镁合金绝热剪切带的特征, 为实际应用提供参考。

1 实验

实验材料为挤压态 AZ31B 镁合金, 挤压比为 6。采用线切割的方法对 AZ31B 镁合金进行机械加工。为了便于获得绝热剪切带并进行微观分析, 本实验采用帽形试样。其形状及尺寸如图 1 所示。

实验所用设备为霍普金森压杆 (SHPB), 装置简图如图 2 所示。当子弹 (又称撞击杆) 撞击入射杆时,

收稿日期: 2014-05-22

基金项目: 教育部博导基金 (20122102110002); 辽宁省自然科学基金 (201206160)

作者简介: 毛萍莉, 女, 1967 年生, 博士, 教授, 沈阳工业大学材料科学与工程学院, 辽宁 沈阳 110870, 电话: 024-25497131, E-mail: pinglimao@yahoo.com

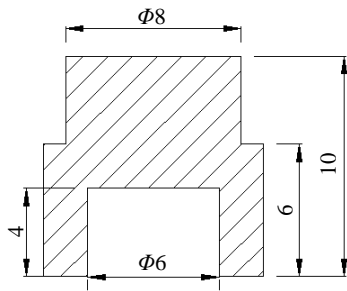


图 1 试样尺寸
Fig.1 Sample size

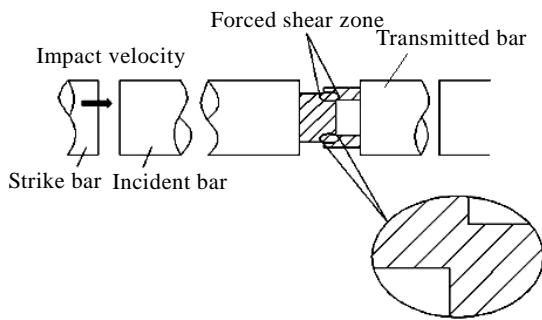


图 2 测试系统示意图
Fig.2 Testing system

入射杆会对试样施加一定载荷，在试样的重叠处形成最大的剪应力区。这一方面放大了冲击载荷产生局部剪应力变形的能力，同时也能够比较容易地在试样最大的剪应力区域中捕捉到绝热剪切带。

采用分离式 Hopkinson 压杆在高温 150 °C 条件下对试样进行压缩。将实验后的试样沿轴线切开，经过研磨、抛光和腐蚀后在光学显微镜和扫描电镜下观察金相组织变化情况。对于产生绝热剪切带的试样进行显微硬度测试。

2 结果与讨论

2.1 帽状试样中绝热剪切带的显微组织分析

图 3 为帽状试样在 150 °C 条件下经过冲击后的金相照片。通过照片可以清晰看到，在沿着与冲击方向成 45° 的切应力方向上形成了明显的变形带，这与最大切应力的方向一致，且在变形带的两侧发现了大量几乎平行分布的孪晶。由此可以推断，在冲击载荷的作用下，AZ31 镁合金发生了明显的变形局部化现象。

图 4a 为绝热剪切带在放大 200 倍下的金相照片，图 4b 和 4c 分别为图 4a 和图 4b 中方框内放大 500 倍和 1000 倍的金相照片。通过在高倍显微镜下的观察，可看到剪切带内晶粒度与周围组织的晶粒度产生了鲜明的对比，可以发现带内晶粒较带外晶粒明显细小，

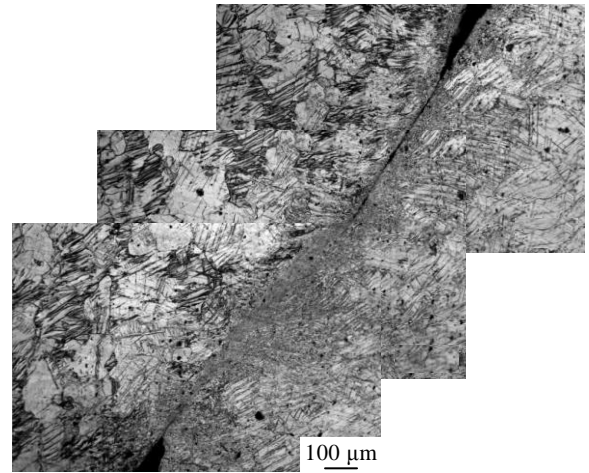


图 3 在剪切区域发现的绝热剪切带
Fig.3 Adiabatic shear band discovered in the clipping region

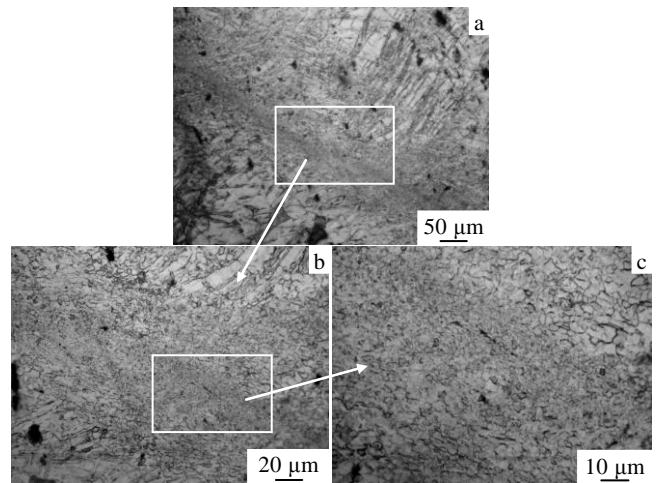


图 4 绝热剪切带在金相显微镜下的组织
Fig.4 Metallographic structure of adiabatic shear band

剪切带内产生了大量孪晶，剪切带是由大量孪晶带切割形成的细小晶粒。通过测量，剪切带带宽约为 15 μm，晶粒尺寸为 1 μm 左右。在近年国内外对绝热剪切带的研究中发现，材料的类型和组织虽然不同，实验条件亦不相同，但大多数的绝热剪切带中心的微观组织基本都有相同的特点，即带中心的微观组织都非常细小，这种组织和周围原始组织有很大不同。从剪切带中心到基体的微观组织是逐渐变化和过渡的。如图 4a 所示，剪切带两侧向基体激发出大量平行的孪晶。这说明在绝热剪切带的形成过程中，微观组织的演化是比较复杂的。原始组织重新取向，碎化和亚结构形成，并且随着局部温度的升高，剪切带中心应变最大，温度最高。带两侧的基体的应变量和温度逐渐降低。微观组织的变化主要是基体组织的重新取向，

碎化程度逐渐减小。

2.2 绝热剪切带内微孔洞的观察

图 5a, 5b 所示为剪切带内微孔洞的金相照片。在应变带内发现了长条状的孔洞, 这些孔洞沿应变带分布, 间隔不定。对于微孔洞的研究表明, 在应变率和温度的相互作用下, 绝热剪切带形成于材料中的薄弱环节, 材料的失效优先在绝热剪切带内部产生。因此, 观察发现微孔洞主要产生于剪切带中心部位, 可以说材料的失效与微孔洞的存在有直接联系。

图 5c, 5d, 5e, 5f 所示为图 5a 和 5b 剪切带内微孔洞的 320 倍, 1700 倍和 5000 倍的扫描电镜照片。通过对照片的分析, 可以得到, 裂纹在绝热剪切带内萌生, 在应变率不断升高时, 裂纹随之长大, 直到贯穿整个剪切带。绝热剪切带作为高应变率下的一种破坏形式, 在汽车防撞性研究中有着重要的作用。在高速冲击载荷作用下材料的损伤有微孔洞, 微裂纹和绝热剪切带几种形态。在图 5c 中可以清晰看到, 在绝热剪切带内存在微孔洞。一般来说, 微孔洞都是在材

料结构不均匀处产生的。在高速冲击载荷的作用下, 帽状试样在剪切区产生绝热剪切带之后, 在切应力的分方向上的变形局部化会导致变形带内应力应变集中。当应力和温度达到一定程度后, 合金强度降低, 周围材料不均匀及不协调的变形导致了微孔洞和微裂纹的产生。如图 5e 中所示, 裂纹的拓展方向与周围的孪晶界近似垂直时, 剪切带内的裂纹穿过晶粒并终止于晶界处。这说明孪晶形成于裂纹产生之前, 这种孪晶界具有止裂作用, 因为当裂纹在扩展过程中遭遇到它们时要消耗额外的能量来穿过孪晶界或使其弯曲, 而无力继续扩展。而裂纹经过平行于裂纹扩展方向的孪晶时, 只需要较小的能量就可继续扩展, 这样的孪晶可能成为裂纹扩展的通道。随着冲击载荷的不断增加, 微孔洞和微裂纹沿着切应力方向不断长大, 直至彼此相互连接成裂纹, 最终导致材料的破坏。

2.3 绝热剪切带的显微硬度特征

图 6 为剪切带与周围组织的维氏硬度测量结果。通过对剪切带附近的硬度测量发现, 剪切带内细小晶

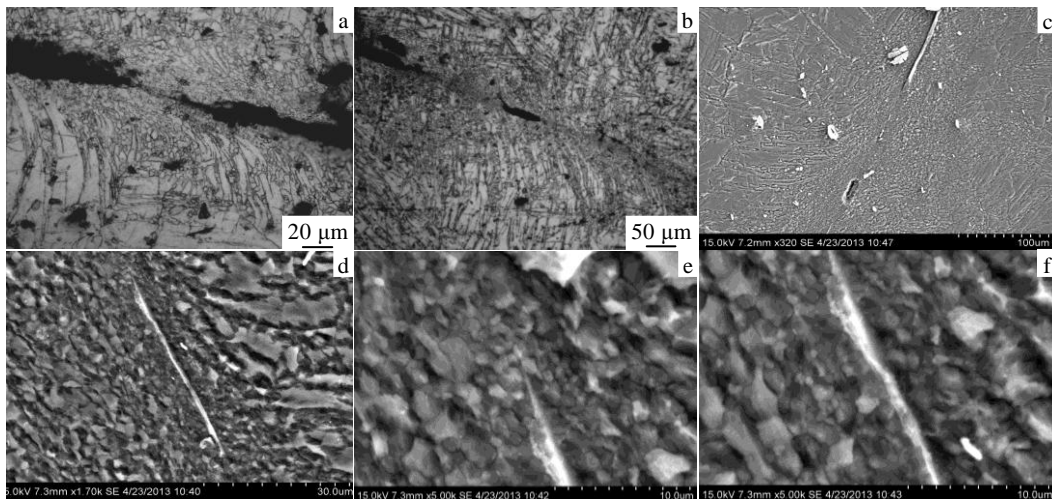


图 5 绝热剪切带中的微孔洞组织

Fig.5 Microholes in the adiabatic shear band: (a, b) OM microstructure and (c~f) SEM microstructure

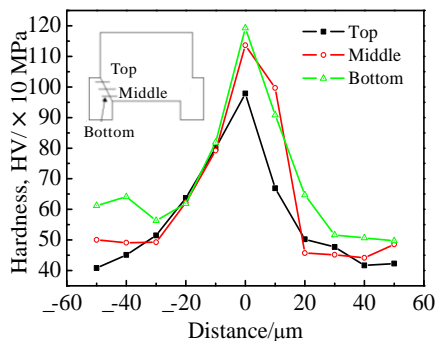


图 6 绝热剪切带及周围组织的维氏硬度

Fig.6 Microhardness profile across an adiabatic shear band

粒区域的硬度明显高于剪切带外组织的平均硬度。剪切带内区域硬度值的升高是由于材料的剪切区受到剪切力的作用后, 温度达到了动态再结晶临界温度而发生了动态再结晶, 动态再结晶晶粒为非常细小的等轴晶晶粒。大量细小均匀的等轴晶晶粒使得剪切带内硬度提高。实验数据表明, 在紧靠剪切带附近材料的硬度有不同程度的降低。这主要是热软化在起作用。因为在高速冲击时, 形成绝热剪切带后, 主要的塑性应变集中在窄小的剪切带内, 而其剪切带周围材料的应变几乎为 0。因此剪切带内所受到的应变硬化作用相对较强。当剪切带内产生的热量向其周围基体扩散

时, 就会在基体材料中引起热软化效应, 这进一步削弱了硬化效果, 导致剪切带附近材料的硬度值会略有下降。

3 结 论

1) 挤压态 AZ31 镁合金在分离式 Hopkinson 压杆作用下, 在沿着与冲击方向成 45° 的切应力方向上有绝热剪切带的形成, 这与最大切应力的方向一致, 且在变形带的两侧发现大量几乎平行分布的孪晶。

2) 随着冲击载荷的不断增大, 微孔洞和微裂纹沿着切应力方向不断长大, 直至彼此相互连接成裂纹, 最终导致材料的破坏。

3) 剪切带内细小晶粒区域的硬度明显高于剪切带外组织的平均硬度。

参考文献 References

- [1] Yang Yang(杨 扬), Cheng Xinlin(程信林). *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*(中国有色金属学报)[J], 2002, 12(3): 401
- [2] Shockey D A, Erlich D C. *Concepts and Applications*[M]. New York: Plenum Press, 1981: 249
- [3] Meyers M A. *Dynamic Behavior of Materials*[M]. New York: John Wiley & Sons Inc, 1994: 56
- [4] Tresca H. *Proceeding of the Institute of Mechanical Engineering*[J], 1878, 30: 301
- [5] Tan Chengwen(谭成文), Wang Fuchi(王富耻). *Ordnance Material Science and Engineering*(兵器材料科学与工程)[J], 2003, 26(5): 62
- [6] Liu Zheng(刘 正), Shi Wenfang(史文方), Mao Pingli(毛萍莉). *China Metal Bulletin*(中国金属通报)[J], 2009, 39: 17
- [7] Liu Zheng(刘 正), Zhang Kui(张 奎), Zeng Xiaoqin(曾小勤). *The Theory Foundation and Application of Magnesium Based Light Weight Alloys*(镁基轻质合金理论基础及其应用)[M]. Beijing: China Machine Press, 2002: 9
- [8] Mao Pingli, Liu Zheng, Wang Changyi. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*[J], 2009, 19(5): 816
- [9] El-Magd E, Abouridouane M. *International Journal of Impact Engineering*[J], 2006, 32: 741
- [10] Ji Wei(纪 伟), Fan Yafu(范亚夫), Chen Jie(陈 捷) et al. *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2009, 38(4): 559
- [11] Wu Xiuling(吴秀玲), Tan Chengwen(谭成文). *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2008, 37(6): 1111
- [12] Rittel D, Wang Z G. *Mechanics of Materials*[J], 2008, 40(8): 629

Microstructure Evolution of Adiabatic Shear Bands in AZ31 Magnesium Alloy

Mao Pingli, Liu Chao, Liu Zheng, Xi Tong, Dong Yang
(Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, China)

Abstract: In order to have a deep understanding of the relationship between adiabatic shear bands and cracks in magnesium alloys, the split Hopkinson pressure bar (SHPB) was used to study the deformation localization of the hat-shaped AZ31 magnesium alloy specimen under high strain rate impacting. The microstructure and the cracking formed within the adiabatic shear band were observed by OM and SEM, and the microhardness within and around the adiabatic shear band were tested. The results demonstrate that the adiabatic shear band is formed along the maximum shear stress direction. With the increasing of the impact loading, the micro holes form along the adiabatic shear band. When the micro holes are coarsened and connect with each other the crack forms and then the specimen is broken. The micro hardness of the microstructure in the core of the adiabatic shear band is higher than that of the microstructure around the adiabatic shear band.

Key words: split Hopkinson pressure bar; high strain rate; adiabatic shear band; microholes; crack

Corresponding author: Mao Pingli, Ph. D., Professor, School of Materials Science and Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, P. R. China, Tel: 0086-24-25497131, E-mail: pinglimao@yahoo.com