

高温下高应变速率对挤压态 Mg-2.5Zn-4Y 镁合金变形行为研究

王国欣

(沈阳职业技术学院, 辽宁 沈阳 110045)

摘要 本研究通过高速冲击压缩实验研究了挤压态 Mg-2.5Zn-4Y 镁合金的动态力学性能,其变形温度为 373 °C,应变速率分别为 700 s⁻¹、1 200 s⁻¹、1 600 s⁻¹ 及 2 100 s⁻¹。结果表明,同一温度下,随着应变速率的增大,流变应力逐渐上升。实验合金在高速冲击后真应力-真应变曲线出现了屈服现象,出现了先下凹后上凸的特点。由于孪晶、位错及 LPSO 相的相互作用,应变硬化率曲线主要分成三个阶段,随着应变速率的增加,应变硬化率曲线整体并没有明显的上移。

关键词 Mg-2.5Zn-4Y 镁合金; LPSO 相; 力学行为; 应变硬化率

基金项目: 2021 年辽宁省教育厅高等学校基本科研项目(面上项目)立项课题:“挤压态 Mg-2.5Zn-4Y 镁合金高温高应变速率变形行为研究”(LJKZ1252)。

中图分类号: TG166

文献标志码: A

文章编号: 2097-3365(2024)10-0013-03

1 研究背景

因 Mg-Zn 系镁合金有良好的综合力学性能而受到了科研人员的广泛关注,但要使 Mg-Zn 二元合金晶粒细化却比较困难,容易形成细小的孔洞,这限制了铸造和变形镁合金零件在工业生产中的应用。将稀土元素加入 Mg-Zn 系镁合金中,能有效地优化其组织结构并能够提高其力学性能^[1]。

镁合金是密排六方的晶体结构,所以滑移协调镁合金变形的能力较差^[2],通常通过孪生的方式协调其塑性变形^[3-4]。{10 $\bar{1}2$ } 拉伸孪晶^[5]和 {10 $\bar{1}1$ } 压缩孪晶是镁合金中常见的两种孪晶变体^[6]。在镁合金变形过程中,拉伸孪晶更容易形成,其主要呈透镜状。如果金属中原子的位置或化学成分呈现周期性的规律变化,便会形成长周期结构。LPSO 相本身硬度较高,这是含 LPSO 相镁合金有较好力学性能的原因之一。此外,LPSO 相扭折也可以提高材料的强度。块状 LPSO 相扭折后可形成较小的扭折带,也就是说形成了细小的 LPSO 相。细小的微裂纹不容易在 LPSO 相与 α -Mg 基体共格的界面处形成,起到了界面强化的作用。

近年来,许多科研人员对镁合金在高应变速率下的力学性能有着浓厚的兴趣,在生活中,汽车经常会出现交通事故,军工器械也会在特殊情况下使用,这些都是在瞬时发生碰撞或者爆炸,镁合金的动态力学性

能在这方面得到了充分的发挥,与此同时,材料的力学性能也会随之发生变化,屈服强度会随着应变速率提高而提高。人们对高温高应变速率下镁合金压缩的动态力学行为的了解还不够深入,研究低应变速率较多,应变速率和温度变化范围也小。在生活中,镁合金零部件的使用领域越来越多,有些会在高温高应变速率情况下使用,所以本研究对镁合金零件的应用和设计具有指导意义。以前的研究人员已经广泛地对含 LPSO 相的 Mg-Zn-Y 镁合金进行了研究,但含 LPSO 相的挤压态 Mg-Zn-Y 镁合金高温高应变速率的相关研究非常少,故研究含 LPSO 相的挤压态 Mg-Zn-Y 镁合金在不同变形条件下的变形行为是十分有意义的。

2 实验材料及方法

首先将坩埚加热至 773 °C,然后将纯镁 Mg(>99.95%) 放入坩埚炉中,向其中通入 99.97%N₂ 和 0.03%SF₂ 混合气体作为保护气,保温一段时间。将 Mg-Y 中间合金 Mg-21.6wt%Y 放入金属液中并保温,待其熔化后,再加入纯 Zn (>99.95%),保温三十分钟,排气、除渣后将金属液浇注到金属模具里,空冷,得到圆柱形合金铸锭。将其机加工,去除毛刺和氧化层,在 723 °C 温度下保温 10 小时后,在挤压机上热挤压。由于本实验仅对挤压方向的试样进行研究,故沿着挤压方向(Extrusion direction, ED)切取高速冲击压缩试样

($\Phi 6 \times 6$ mm, 记为ED试样)。因为试样是线切割加工的, 会对实验结果造成一定影响, 故用砂纸将试样打磨, 使其均匀受力, 减小实验误差。

本研究所采用的实验设备为霍普金森压杆 (Split Hopkinson Pressure Bar, SHPB) 设备, 对试样进行了相同温度不同应变速率下的高速冲击实验。时间测量器是给予弹测速的, 实验开始之前应该将其复位, 其应变率为 $100 \sim 3\,000\text{ s}^{-1}$, 由加载、检测、采集数据、分析处理四部分组成。本实验应变速率分别确定为 700 s^{-1} 、 $1\,200\text{ s}^{-1}$ 、 $1\,600\text{ s}^{-1}$ 和 $2\,100\text{ s}^{-1}$, 温度确定为 $373\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

1. 加载系统: 由氮气瓶、气体的导管、子弹、支架等组成。子弹是由强度高的弹簧钢制成的, 采用此材料是为了避免实验过程中冲击使其变形。实验前应将导管中气体排空, 防止对实验产生不必要的误差。

2. 测试系统: 由入射杆、吸收杆、透射杆、阻尼器。其中, 杆也是由高强度弹簧钢制成的, 适用于本实验。实验前阻尼器要放在吸收杆附近, 用来缓冲和吸收子弹的能量, 阻尼器主要有木头和橡皮组成。

3. 收集数据和分析处理系统: 由应变片、示波器、时间测量仪、应变仪等组成。若研究高温情况下还有电热炉和热电偶等。应变片的阻值为一百二十欧姆, 它能够接收到两杆的应变; 时间测量仪是为弹测速, 实验前需要复位, 为了准确地测到子弹的速度; 将应变信号转成电信号是通过应变仪解决的; 而示波器是将它们显示出来。

3 结果与讨论

373 $^{\circ}\text{C}$ 下高速冲击力学行为: 温度为 $373\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时 ED 方向挤压态 Mg-2.5Zn-4Y 镁合金高速冲击实验的相关实验参数具体如下: 压缩时规定的子弹深度为 $200 \sim 500$ mm、压缩的气压区间为 $0.2 \sim 0.5$ MPa, 得出四组应变速率依次为 700 s^{-1} 、 $1\,200\text{ s}^{-1}$ 、 $1\,600\text{ s}^{-1}$ 和 $2\,100\text{ s}^{-1}$ 。应变速率在 $700 \sim 2\,100\text{ s}^{-1}$ 范围时, 由于动态压缩的时间是非常短的, 因此试样的应变量尚未达到断裂的程度时, 压缩过程就已完成。当应变速率是 $2\,100\text{ s}^{-1}$, 出现了断裂, 断裂强度是 563.7 MPa。

图 1 为在 $373\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、不同应变速率下挤压态 Mg-2.5Zn-4Y 镁合金沿 ED 高速冲击后的真应力—真应变曲线。在 $373\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下, 应变速率越大, 实验合金的流变应力也越大, 呈现出显著的正应变速率强化效应。在此变形条件下, ED 方向试样动态压缩后, 所得的真应力—应

变规律趋势基本相同, 曲线的开始时出现一些转折台阶, 表明试样在高速动态压缩后发生了屈服现象。试样动态压缩后, 因为动态压缩时间很短, 在应变速率依次为 700 s^{-1} 、 $1\,200\text{ s}^{-1}$ 、 $1\,600\text{ s}^{-1}$ 时, 因为应变程度没有达到断裂应变程度, 动态压缩已经结束, 因此试样没有断裂。温度在 $373\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, 不同应变速率下, 挤压态 Mg-2.5Zn-4Y 镁合金的屈服强度依次为 397 MPa、 410.3 MPa、 410.9 MPa、 435.5 MPa。尽管应变速率由 $1\,200\text{ s}^{-1}$ 升高至 $2\,100\text{ s}^{-1}$, 提高了近两倍, 屈服强度也仅仅提高了 25.2 MPa, 说明屈服强度对应变速率不太敏感。温度在 $373\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, 挤压态 Mg-2.5Zn-4Y 镁合金 ED 方向的应变速率强化相对于热软化占据主导; 曲线整体上表现出先下凹后上凸的变化特征。由图可以看出, 应变速率为 700 s^{-1} 时实验合金的真应力—真应变曲线并未出现“S”形曲线现象, 表现出上凸的变化特征。应变速率分别为 $1\,200\text{ s}^{-1}$ 、 $1\,600\text{ s}^{-1}$ 和 $2\,100\text{ s}^{-1}$ 条件下实验合金的真应力—真应变曲线, 仍呈现出“S”形, 但应变速率升高到 $2\,100\text{ s}^{-1}$, 真应力—真应变曲线的上凹有一定程度的减弱。

图 2 为 $373\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、不同应变速率下实验合金沿 ED 方向的应变硬化率曲线。由图可以看出, 应变速率为 700 s^{-1} 时应变硬化率曲线并未出现三阶段情况, 应变速率分别为 $1\,200\text{ s}^{-1}$ 、 $1\,600\text{ s}^{-1}$ 和 $2\,100\text{ s}^{-1}$ 时对应的应变硬化率曲线分三个阶段。应变硬化率从变形开始到变形结束持续降低, 出现这种情况的主要原因是实验合金短时间内出现了一些 $\{10\bar{1}2\}$ 一次拉伸孪晶, 此时这些拉伸孪晶开始启动协调塑性变形, 从而应变硬化率迅速降低。随着应变的持续增加, 应变硬化率继续下降。这主要是因为高速冲击后试样内部绝热温升, 使更多的非基面滑移系被激活从而协调塑性变形, 以至于应变硬化率继续下降。接下来我们探讨 $1\,200\text{ s}^{-1}$ 、 $1\,600\text{ s}^{-1}$ 和 $2\,100\text{ s}^{-1}$ 时应变硬化率曲线变化规律。当应变 0.032 之前, 此阶段为阶段 I, 应变硬化率迅速下降, 短时间内许多 $\{10\bar{1}2\}$ 一次拉伸孪晶形成, 在达到屈服应力之前这些拉伸孪晶将启动, 应变硬化率将下降。在应变大于 0.032 、小于 0.55 时, 此阶段为应变硬化率的第 II 阶段。此阶段应变硬化率平缓上升。出现这种现象的原因是有许多二次孪晶出现, 这些增加的孪晶界对位错滑移有阻碍作用, 这样应变硬化率便升高了。孪晶的形成使得部分晶粒取向发生改变, 这些晶粒有可能也形成硬取向, 应变硬化率也将增大。此外, 位错受

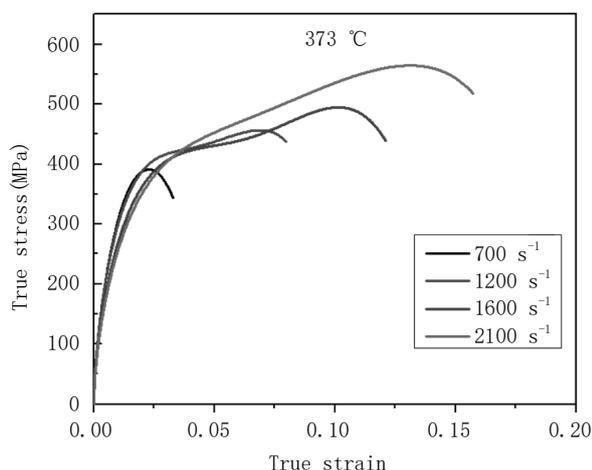


图 1 373 °C 下挤压态 Mg-2.5Zn-4Y 镁合金沿 ED 高速冲击后的真应力-真应变曲线

到 LPSO 相的阻碍作用, 应变硬化率也将升高。在应变大于 0.005 时, $\{10\bar{1}2\}$ 孪晶将逐渐消失, 位错滑移更容易, 这样应变硬化速率也将下降。应变速率 $1\ 600\ s^{-1}$ 和 $2\ 100\ s^{-1}$ 的应变硬化率曲线仍然分三个阶段, 与上述情况相似, 在此不再赘述。

通过对图 2 四条应变硬化率曲线分析可得, 在 373 °C 下, 应变速率越大, 曲线并没有明显的向上移动。应变速率为 $700\ s^{-1}$ 时应变硬化率曲线并未出现三阶段情况, 而应变速率分别为 $1\ 200\ s^{-1}$ 、 $1\ 600\ s^{-1}$ 和 $2\ 100\ s^{-1}$ 时对应的应变硬化率曲线分三个阶段。在 I 阶段, 应变速率越大, 实验合金的应变硬化率下降幅度越小。对于 II 阶段来说, 应变速率越大, 应变硬化率起始应变到结束应变范围越大, 此阶段应变硬化率并未下降。应变速率越大, 应变硬化率曲线的 II 阶段由下降转变为平缓。当应变速率是 $700\ s^{-1}$ 时, 由于应变速率较低, 在高温下协调变形的滑移系更多, 故此时 II 阶段主要为下降趋势。当应变速率是 $1\ 200$ 、 $1\ 600\ s^{-1}$ 及 $2\ 100\ s^{-1}$ 时, 曲线的 II 阶段处于平缓阶段, 这可能是由于位错滑移与孪晶及 LPSO 相的相互作用, 以至于出现了这种现象。对于 III 阶段来说, 应变速率越大, 实验合金的应变硬化率曲线下降幅度越小。

4 结论

本文主要利用 SHPB 设备对挤压态 Mg-2.5Zn-4Y 镁合金进行了高温高速冲击压缩实验, 探究了不同变形条件下实验合金的力学行为, 得出具体结论如下:

1. 温度相同, 应变速率不同条件下, 挤压态 Mg-

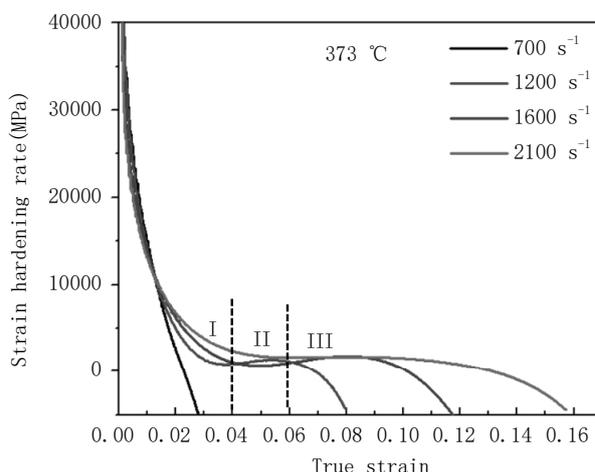


图 2 373 °C 下挤压态 Mg-2.5Zn-4Y 镁合金沿 ED 高速冲击后的应变硬化率曲线

2.5Zn-4Y 镁合金表现出明显的正应变速率强化效应。应变速率越高, 流变应力越大。

2. 实验合金在高速冲击后真应力-真应变曲线出现了屈服现象, 出现了先下凹后上凸的特点。呈现出“S”形曲线的变化特点。而应变速率为 $700\ s^{-1}$ 时, 实验合金的真应力-真应变曲线并未出现“S”形曲线现象, 表现出上凸的变化特征。

3. 综合文章分析, 应变硬化率曲线主要分成三个阶段, 随着应变速率的增加, 应变硬化率曲线整体并没有明显的上移。

参考文献:

- [1] 孟棫朴, 田丰, 刘先文, 等. 轧制 Mg-Y-Zn-Al 镁合金的微观组织及力学性能 [J]. 热加工工艺, 2023, 52(03): 100-102.
- [2] 郑玄乐, 丁志兵, 张帅, 等. 热处理对 Mg-Gd-Y-Zn-Ti 合金微观组织和性能的影响 [J]. 特种铸造及有色合金, 2024 (03): 44.
- [3] 李闯. 轧制变形对 Mg-Zn-Y 合金组织影响研究 [J]. 东莞理工学院学报, 2022(03): 29.
- [4] 孙明, 程广奎, 李喜阔, 等. Mg-Zn-Y 系镁合金的研究现状与展望 [J]. 有色金属材料与工程, 2024, 45(01): 66-77.5.
- [5] 曹霞, 徐吉, 杨博文, 等. 拉伸取向控制对 AZ31 镁合金孪生和织构演化的影响 [J]. 稀有金属材料与工程, 2023, 52(04): 1238-1243.
- [6] 肖昱, 贺丹丹, 郭鹏程, 等. 高温三向单次冲击下 AZ31 镁合金孪晶与退孪晶对织构的影响 [J]. 塑性工程学报, 2023, 30(11): 158-166.