

高宽比对纯铜试样反复镦压过程及其组织性能的影响

石凤健^{1,2}, 张健伟¹, 王雷刚³, 邵勇^{1,2}, 葛艳明⁴, 叶思珍^{1,2}, 王浩¹

(1. 江苏科技大学, 江苏 镇江 212003)

(2. 材料科学与工程国家级实验教学示范中心, 江苏 镇江 212003)

(3. 江苏大学, 江苏 镇江 212013)

(4. 江苏金源高端装备股份有限公司, 江苏 溧阳 213376)

摘要: 反复镦压可以在不改变试样形状和尺寸的情况下获得大变形。高宽比是影响反复镦压工艺的重要参数之一。本文采用有限元与实验验证相结合的方法研究了高宽比对纯铜试样镦压变形过程、微观组织及性能的影响。结果表明, 镦压后的等效应变分布不均匀, 高宽比越大, 单道次镦压平均等效应变和等效应力都越高。1 道次镦压后, 晶粒被压扁, 随高宽比增大, 晶粒被压扁的程度越严重。3 道次变形后形成了大量变形带, 试样高宽比越大, 变形带越窄。12 道次镦压后, 高宽比为 2 的试样晶粒更等轴、细小。镦压后纯铜的硬度明显提高, 高宽比为 2 的试样镦压后硬度值更高。

关键词: 反复镦压; 高宽比; 等效应变; 微观组织; 纯铜

中图分类号: TG316.3

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2020)09-3170-07

由于结构轻量化及一些极端环境的需求, 对材料性能提出了越来越高的要求, 组织超细化是提高材料综合性能的重要手段之一。剧烈塑性变形(severe plastic deformation, SPD)能够通过块体材料中产生大应变使材料组织细化, 获得具有大角度晶界的亚微米级甚至纳米级细晶组织, 大幅提升材料性能^[1,2]。目前, 研究较多的剧烈塑性变形工艺包括等径角挤压(equal channel angular pressing, ECAP)^[3]、高压扭转(high pressure torsion, HPT)^[4]、累积叠轧(accumulative roll bonding, ARB)^[5]、多轴压缩(multi-axial compression, MAC)^[6]等。反复镦压工艺(cyclic channel die compression, CCDC)同样可以大大细化材料组织, 改善材料性能^[7-9], 而且具有工装简单、操作方便、变形量可控等特点。

反复镦压原理如图 1 所示, 凹模中开设有一个通道, 其垂直 Z 轴截面尺寸为 $H \times H$, 将尺寸为 $H \times H \times W$ 的试样竖直放入凹模通道内(试样 X 方向尺寸为 H), 试样左右两侧留有空隙。压头下压, 材料沿 Y 向流动, 直至充满型腔。根据体积不变条件, 试样 Z 向尺寸由 H 压至 W , 变形后试样形状和尺寸保持不变, 因此可以重复变形以积累更大的应变。反复镦压过程中积累的等效应变可由公式(1)计算^[2]:

$$\bar{\varepsilon} = n \frac{2}{\sqrt{3}} \ln \left(\frac{H}{W} \right) \quad (1)$$

式中, n 为镦压次数, H 为试样高度, W 为试样宽度, H/W 即为试样高宽比。

文献[10]比较了等径角挤压、高压扭转以及反复镦压纯铝及纯铜的微观组织, 表明反复镦压相较于等径角挤压能在纯铜中获得更小的晶粒尺寸。Kundu 等^[11]的研究表明纯铜的流动应力以及应变速率敏感性不断增加, 与其他剧烈塑性变形方法变形铜的结果相似。Parimi 等^[12]通过反复镦压制备了具有纳米晶结构的铜。Guo 等^[7]在 350 °C 对 AZ31 镁合金进行了 5 道次反复镦压, 合金晶粒细化至 5.2 μm , 屈服强度和延伸率都提高。由公式(1)可知, 试样高宽比是影响单道次变形程度的决定因素, 而单道次变形程度可能影响变形后材料的组织及性能。Nakashima 等^[13]研究了不同通道夹角对纯铝等径角挤压组织的影响, 结果表明, 通道夹角越小, 单道次变形程度越大, 越容易快速获得具有大角度晶界的超细晶组织。Flausino 等^[14]采用多道次小应变(每道次应变 0.075)对纯铜进行了多达 48 次多向锻造, 结果表明晶粒尺寸比单道次大应变时大, 屈服强度低。上述研究说明, 道次变形量大小对材料组织与性能有一定影响。因此, 本工作以纯铜为对象,

收稿日期: 2019-08-25

基金项目: 国家自然科学基金(51775249); 江苏省高等学校大学生实践创新训练计划项目(201910289061Y)

作者简介: 石凤健, 男, 1977 年生, 博士, 副教授, 江苏科技大学材料科学与工程学院, 江苏 镇江 212003, E-mail: shifengjian@126.com

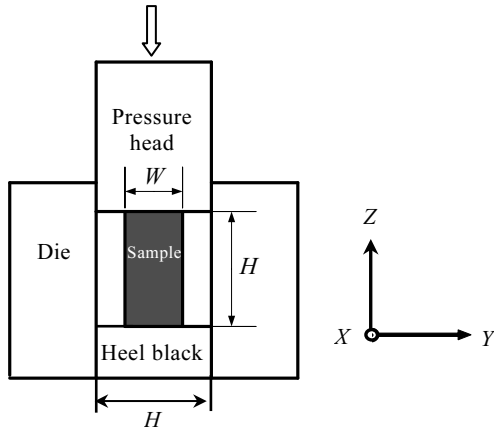


图 1 反复镦压示意图

Fig.1 Schematic illustration of CCDC process

通过数值模拟和实验手段研究试样高宽比对反复镦压的影响，为深入理解和应用反复镦压工艺提供参考。

1 数值模拟参数设置

数值模拟采用刚塑性有限元法，借助塑性成形领域应用最广泛的 DEFORM-3D 软件进行，将模具看作刚体，试样看作变形体。试样材料为纯铜，尺寸分别为 30 mm×30 mm×20 mm、30 mm×30 mm×15 mm 和 30 mm×30 mm×10 mm，即高宽比 H/W 分别为 1.5、2 和 3，模拟时分别划分为 30 000、25 000 和 20 000 个四面体网格。压头压下速度为 0.5 mm/s，忽略试样的塑性变形热及摩擦热，变形温度为室温。试样和模具之间的摩擦按常摩擦条件处理，考虑实验时的润滑条件及模具加工情况，摩擦因子取 0.15。模拟时每步压下量为 0.1 mm，高宽比为 1.5、2 和 3 的试样每次压下距离分别为 10、15 和 20 mm。模拟过程中自动进行网格重划分和体积补偿。反复镦压按 B 路线进行，即镦压后的试样先绕 X 轴旋转 90°，再绕 Y 轴旋转 90°，然后进入下一道次镦压，即沿试样 3 个方向交替进行镦压。

2 实验

实验所用材料为 T2 铜，经 750 °C×2.5 h 退火处理后炉冷，去除氧化皮后将试样切割为前述尺寸。实验所用凹模通道截面尺寸为 30 mm×30 mm，通道纵向深度为 55 mm。实验时，将凹模放在垫板上，垫块置于凹模通道内，将经含 MoS₂ 的润滑脂处理的试样放入凹模，装入压头，然后将模具放在 WE-1000 型万能材料试验机上进行镦压。每次镦压后，用压头将试样和垫块一起推出凹模通道，试样按 B 路线旋转后重新装入凹模，进行下一道次变形。对不同道次镦压后的试样沿 X 面(垂直图 1 中 X 方向的试样中间截面)切割样

品，采用 VHX-900 型超景深光学显微镜和 JSM-6480 型扫描电镜观察 X 面的组织，观察位置为截面中心区域。采用平均截距法测量变形后晶粒的尺寸。用 MH-5 型显微维氏硬度计测量变形前后材料的硬度，所加载荷为 50 g，持续时间 15 s。

3 结果与讨论

3.1 高宽比对等效应变的影响

通过 DEFORM 软件模拟了 3 种高宽比试样 1 道次镦压后的等效应变，统计了节点平均等效应变。同时，通过公式(1)计算了不同高宽比试样镦压后的等效应变值，并与模拟结果进行了对比，如图 2 所示。当高宽比为 1.5 时，等效应变模拟值为 0.517，计算值为 0.47；当高宽比为 2 时，等效应变模拟值为 0.88，计算值为 0.8；当高宽比为 3 时，等效应变模拟值为 1.31，计算值为 1.27，上述 3 种高宽比情况下模拟值与计算值的偏差均不超过 10%。模拟值与计算值之间的差异主要由摩擦引起，当摩擦因子为 0.05 时，高宽比为 1.5 的试样等效应变模拟值为 0.471，与计算值非常接近，说明模拟结果具有一定的可靠性。

图 3 所示为不同高宽比试样镦压 1 道次后的等效应变分布，其中 X 面、Y 面(如图 3a 中所示，其它相同)均取自试样中间截面(即取整个试样的 1/4)。由于摩擦的存在，3 种高宽比试样镦压后的等效应变分布都不均匀，除边角区域等效应变较高且应变梯度较大外，大部分区域试样中心等效应变较高。高宽比为 1.5 和 2 时等效应变分布比较相似，X 面上变形主要集中在试样的对角线上^[15]，试样上下表面及侧面等效应变较低；Y 面上，由于试样在 X 方向受到模具约束，等效应变的大小在水平方向上较为接近。高宽比为 3 时，等效应变较高，单道次变形程度较大，尤其是靠近试样棱边处等效应变接近于 2，但试样下表面中间区域

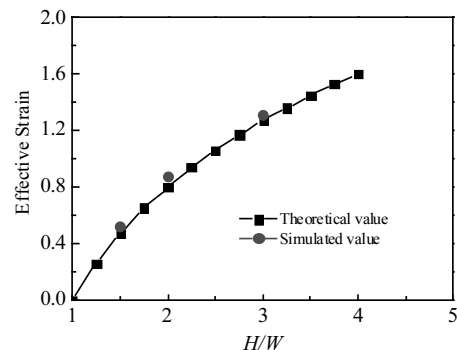


图 2 不同高宽比试样镦压 1 道次等效应变计算值与模拟值对比
Fig.2 Comparison of theoretical and simulated values of effective strain of the samples with different height/width ratios (H/W) after 1 pass compression

的等效应变明显低于上表面区域，这与变形时试样下表面流动慢有关^[16]。

反复镦压工艺的优点是镦压前后试样尺寸不变，因此，可以通过多道次变形累积应变，细化组织。B 路线是连续沿试样 3 个方向交替进行镦压，3 次镦压为一个循环^[9]。图 4 所示为不同高宽比试样 3 道次镦压后的等效应变分布，除占比较小的棱边、顶角区域等效应变较高，其它区域试样中心等效应变较高，且不同区域等效应变差异变大，这在变形早期易于引起试样组织与性能的不均匀^[15]。但总体来说，随试样高宽比的增大，试样内累积的等效应变增大，也就是说，高宽比越大，相同道次时试样内累积等效应变越大，变形效率越高。

3.2 高宽比对等效应力的影响

当试样高宽比较高时，容易产生弯曲、折叠等缺陷，或由于局部应力较高产生裂纹。图 5 给出了不同高宽比试样反复镦压后 X 面的等效应力分布(镦压方向向下)，其中图 5a~5c 为 3 种高宽比试样镦压 3 道次后的等效应力，可以看出，沿试样对角线方向等效应力较高，尤其是试样的边角处和中心区域，且随高宽

比的增大，对应区域的等效应力值增大。高宽比为 1.5 和 2 时，试样上下表面区域等效应力分布相似，高宽比为 3 时，试样左侧面(上一道次镦压试样下表面)和下表面中心区域等效应力较低，4 道次镦压后的情况与 3 道次相似，下表面等效应力(图 5d 箭头所示)较上表面低，对角线区域等效应力高，超过 430 MPa，根据第四强度理论，当等效应力达到材料的抗拉强度时，材料就会产生开裂。因此，高宽比越大的试样镦压时越容易开裂。

3.3 高宽比对纯铜组织的影响

采用自制模具对不同高宽比纯铜试样进行了多道次反复镦压实验，不同高宽比试样变形后的情况不同，高宽比为 1.5 和 2 的试样分别进行了 15 道次和 12 道次反复镦压，试样表面质量较好，高宽比为 2 的试样在边角处有少量裂纹，这与数值模拟中棱边处等效应力较高的情况吻合(图 5b)。而高宽比为 3 的试样进行第 4 道次变形时出现了严重开裂(图 6 箭头所示)，开裂位置位于试样底部，与图 5d 中较高等等效应力的分布特征较为一致，根据高宽比为 2 的试样的拉伸实验结果可知，镦压 3 道次后纯铜的抗拉强度接近饱和，其

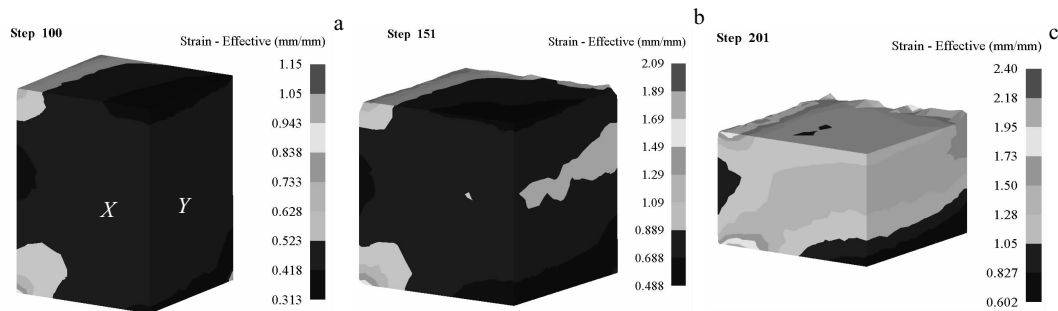


图 3 不同高宽比试样镦压 1 道次后 X、Y 面上的等效应变分布

Fig.3 Effective strain distribution at plane X and plane Y of the samples with $H/W=1.5$ (a), $H/W=2$ (b) and $H/W=3$ (c) after 1 pass compression

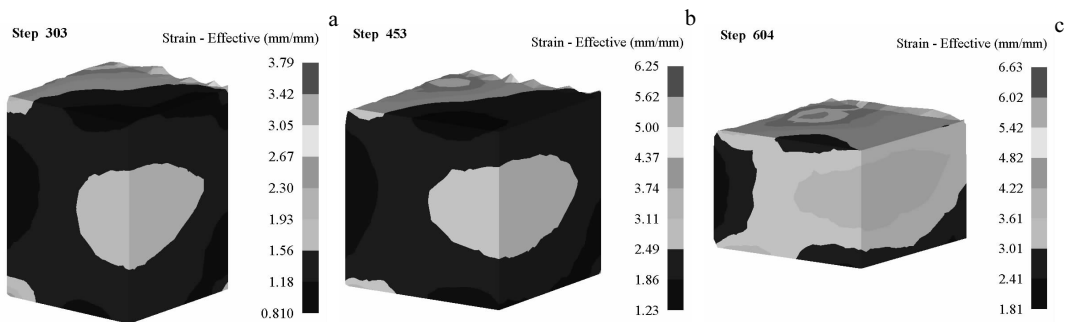


图 4 不同高宽比试样镦压 3 道次后 X、Y 面的等效应变分布

Fig.4 Effective strain distribution at plane X and plane Y of the samples with $H/W=1.5$ (a), $H/W=2$ (b) and $H/W=3$ (c) after 3 passes CCDC

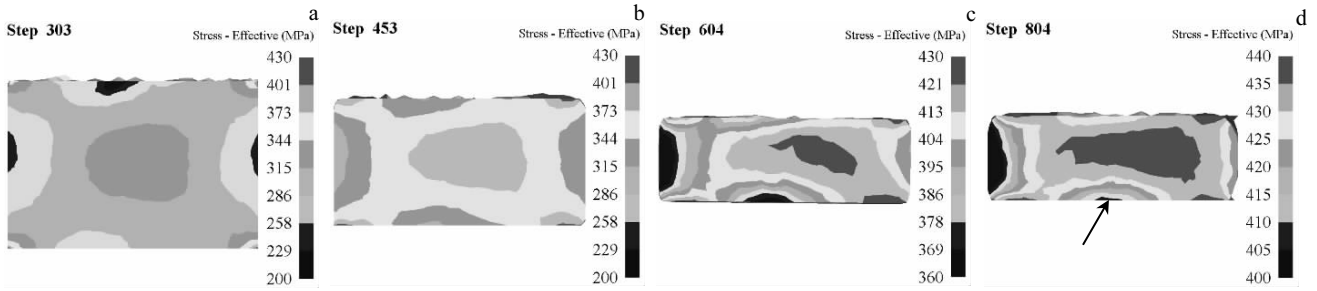


图 5 不同高宽比试样反复镦压后 X 面的等效应力分布

Fig.5 Effective stress distribution at plane X of the samples with $H/W=1.5$ after 3 passes CCDC (a), $H/W=2$ after 3 passes CCDC (b), $H/W=3$ after 3 passes CCDC (c) and $H/W=3$ after 4 passes CCDC (d)



图 6 高宽比为 3 的试样不同道次镦压后的形状

Fig.6 Shape of the samples with $H/W=3$ processed by different passes CCDC: (a) 1 pass, (b) 3 passes, and (c) 4 passes

值约为 450 MPa^[9], 与图 5d 中对角线上的等效应力值接近, 说明较大高宽比情况下试样对角线方向的高等效应力是引起材料开裂的主要原因。

采用光学显微镜对不同高宽比试样镦压前后的组织进行了观察。图 7 所示为退火态纯铜的光学显微组织, 晶粒较粗大、等轴, 晶界平直, 平均晶粒尺寸约 350 μm , 有少量退火孪晶。图 8 所示为不同高宽比试样 1 道次镦压后 X 面的光学显微组织。高宽比为 1.5 时, 原来较为等轴的晶粒被压扁, 孪晶也随之变形(图 8a 中 A 区), 部分平直的晶界发生了弯曲, 但大部分原始晶界依然清晰可见^[8], 高宽比为 1.5 时晶粒压扁的程度略小。随高宽比的增加, 晶粒压扁的程度进一步

增大(图 8b 中 B 区), 在部分晶粒内可以看到近乎平行的剪切变形带(图 8b 中 C 区)。当高宽比为 3 时, 晶粒的长宽比明显比前两者更大(图 8c 中 D 区)。

图 9 所示为不同高宽比试样镦压 3 道次后 X 面的光学显微组织。高宽比为 1.5 时, 可以看到大量变形带, 由于镦压方向的改变, 后一道次镦压形成的变形带方向(图 9a 中 EF 方向)与前一道次(图 9a 中 GH 方向)不同, 形成变形带的交叉^[17]。不同区域材料的变形程度不均匀, 有些区域变形较为严重(图 9a 中 I 区), 有些区域变形程度略小(图 9a 中 J 区)。大部分原始晶界已分辨不清, 只有少量可见(图 9a 箭头所示)。高宽比

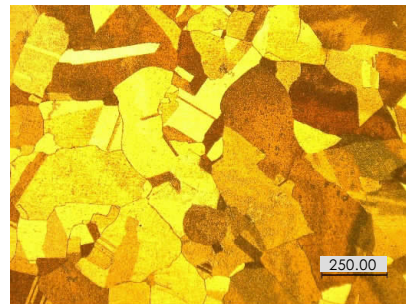


图 7 退火态纯铜的光学显微组织照片

Fig.7 OM image of as-annealed pure copper

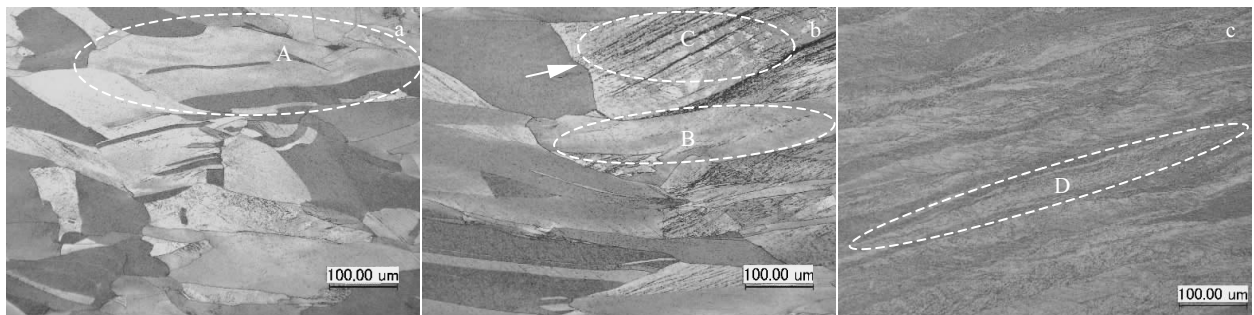


图 8 不同高宽比试样镦压 1 道次后 X 面的光学显微组织照片

Fig.8 OM images at plane X of the samples with $H/W=1.5$ (a), $H/W=2$ (b), and $H/W=3$ (c) after 1 pass compression

为 2 时，绝大部分区域材料均发生了明显塑性变形，同样可以看到相互交叉的变形带。高宽比为 3 时，形成纤维状组织，光学显微镜已难以分辨。

图 10 所示为不同高宽比试样镦压 3 道次后 X 面的 SEM 组织。高宽比为 1.5 时，可以看到大量变形带，变形带宽度不均，有些小于 1 μm (图 10a 箭头 L 处)，有些几微米(图 10a 箭头 M 处)，变形带平均宽度约为 2.3 μm。高宽比为 2 时，变形带的宽度更为均匀，其平均宽度约为 1.5 μm。高宽比为 3 时，可以看到交叉的变形带(图 10c)，有些变形带的宽度很窄，变形带平均宽度约为 1.2 μm。在交叉的变形带区域存在一定量的细晶(图 10c 箭头 N 处)。

对于高宽比为 3 的试样，由于单道次变形量大，经过 3 道次变形后，容易在试样边角处产生裂纹，导致无法进行后续变形。图 11 所示为不同高宽比试样镦压 12 道次后 X 面的 SEM 组织，可以看到，2 种高宽比试样中原始的晶粒均已完全破碎，高宽比为 1.5 时，出现了一定量的等轴状细晶，但大部分晶粒仍呈带状，有一定方向性，其平均晶粒尺寸约为 0.64 μm。高宽比为 2 时，大部分晶粒呈等轴状，晶粒细小，分布较

均匀，平均晶粒尺寸约为 0.53 μm。

退火态纯铜晶界平直，晶内位错密度较低，反复镦压时，取向有利的晶粒先变形，晶粒被压扁，同时位错急剧增值，对于中低层错能的铜来说，位错分布并不均匀，容易形成胞状结构^[18]。由于位错塞积和晶粒转动，原来平直的晶界变成弯曲状(图 8b 箭头处所示)。在一些晶粒内可以看到剪切变形带(图 8b 中 C 区)，3 道次镦压使变形带扩展到相邻晶粒，高宽比越大的试样，由于同时激活了更多的晶内滑移，产生了更为密集的变形带，变形带宽度更窄。在变形过程中，位错不断进入胞壁，逐渐形成具有小角度晶界的亚晶，亚晶不断吸收位错，取向差逐渐增大^[18]。同时由于试样旋转引起不同方向变形带的交叉，加速了晶粒的细化过程^[17]。由于高宽比较大的试样变形初期位错增殖更快，形成的位错胞尺寸更小，后续镦压时通过吸收位错向大角度晶界演变的过程更快，因此，反复镦压后晶粒更为等轴、细小。

3.4 高宽比对纯铜硬度的影响

图 12 所示为不同高宽比试样反复镦压时硬度随变形道次的变化曲线。退火态纯铜的硬度为 696 MPa，1 道次变形后，高宽比为 1.5、2 和 3 的试样硬度分别

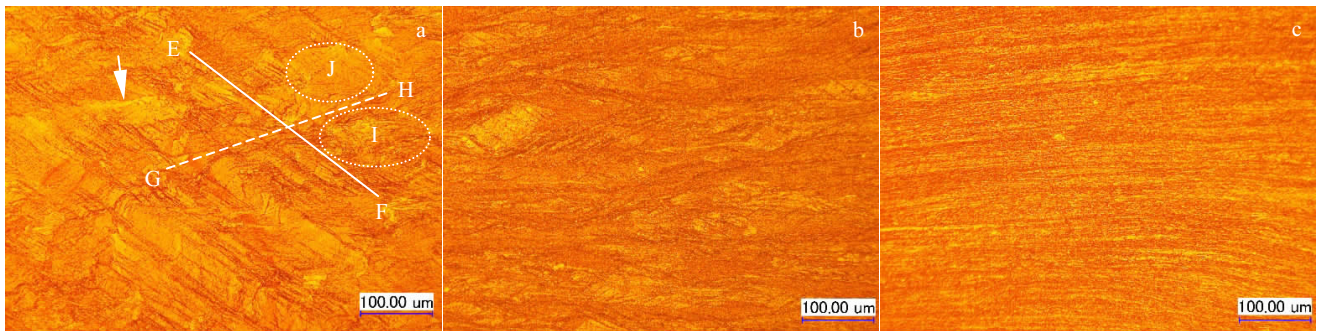


图 9 不同高宽比试样镦压 3 道次后 X 面的光学显微组织照片

Fig.9 OM images at plane X of the samples with $H/W=1.5$ (a), $H/W=2$ (b), and $H/W=3$ (c) after 3 passes CCDC

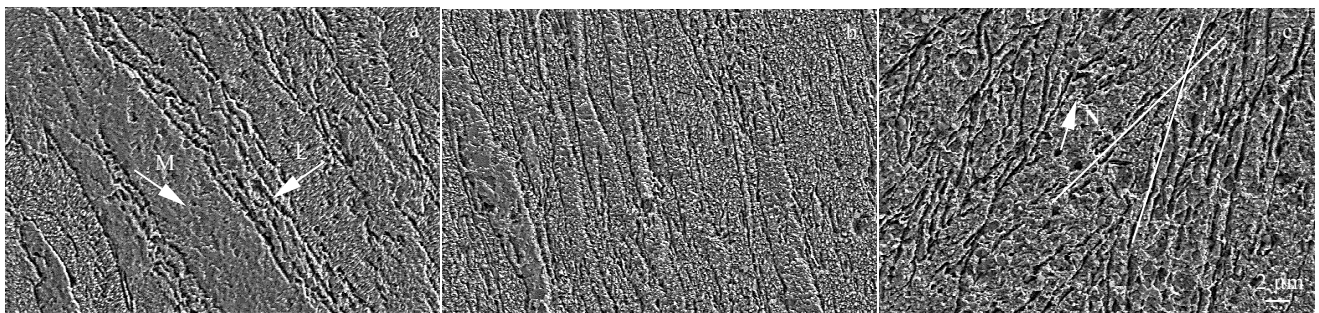


图 10 不同高宽比试样镦压 3 道次后 X 面的 SEM 组织照片

Fig.10 SEM images at plane X of the samples with $H/W=1.5$ (a), $H/W=2$ (b), and $H/W=3$ (c) after 3 passes CCDC

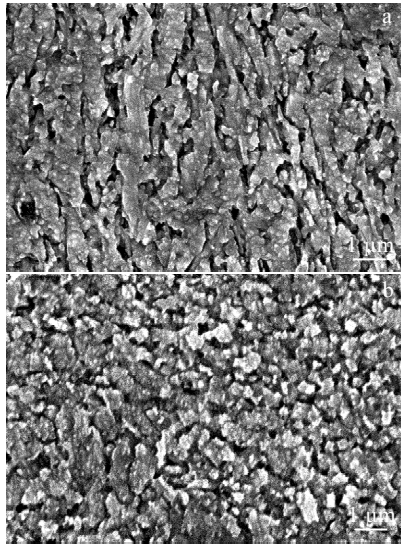


图 11 不同高宽比试样镦压 12 道次后 X 面的 SEM 组织照片
Fig.11 SEM images at plane X of the samples with $H/W=1.5$ (a) and $H/W=2$ (b) after 12 passes CCDC

提高到了 1126、1187 和 1233 MPa, 试样高宽比越大, 硬度提高的幅度越大。前 3 道次硬度提高的较快, 变形道次进一步增加时, 硬度上升的幅度逐渐变缓, 高宽比为 1.5 的试样镦压 12 道次后硬度达到最大值 1386 MPa, 而高宽比为 2 的试样镦压 9 道次后硬度达到最大值 1439 MPa。

退火态纯铜位错密度较低, 位错运动阻力小, 硬度低。1 道次镦压后, 位错密度迅速提高, 纯铜产生明显的加工硬化, 试样高宽比越大, 变形程度越大, 加工硬化越严重, 硬度提高的幅度越大, 此时材料硬度的提高以位错强化为主。后续变形时, 由于位错湮灭使位错密度增加变缓, 甚至当位错增殖与湮灭平衡时, 位错密度不再上升, 位错强化作用减弱。但低应变时形成的亚晶随变形道次的增加其取向差逐渐增大, 部分演变成大角度晶界^[19], 晶界和亚晶界起到了阻碍位错运动的作用, 使硬度提高。当位错密度及晶粒细化均进入饱和状态后, 材料的硬度不再上升, 甚至由于动态回复或动态再结晶使硬度略有下降^[19]。因此, 反复镦压纯铜硬度的提高是位错强化与晶界强化共同作用的结果。

当高宽比为 1.5 时, 道次变形量较低, 引起的位错密度增加幅度也相对较低, 在不断改变镦压方向时, 部分异号位错相互抵消^[14], 使其饱和状态的位错密度低于高宽比为 2 的试样; 另外, 高宽比为 2 的试样 12 道次镦压后的晶粒尺寸小于高宽比为 1.5 的试样。因此, 高宽比为 2 的试样饱和状态的硬度略高于高宽比为 1.5 的试样。

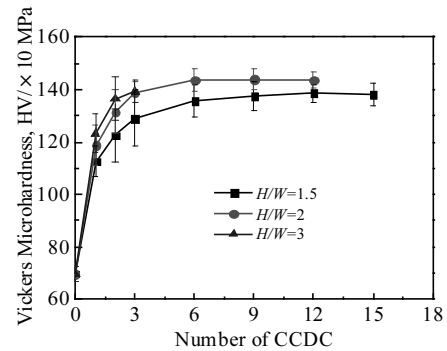


图 12 硬度随 CCDC 道次的变化曲线

Fig.12 Variation curves of Vickers microhardness with the number of CCDC

4 结 论

1) 试样高宽比越大, 单道次镦压产生的平均等效应变越大, 等效应力越高。

2) 1 道次镦压后, 晶粒被压扁, 试样高宽比越大, 晶粒被压扁的程度越大。3 道次镦压后, 形成大量相互交叉的变形带, 试样高宽比越大, 变形带平均宽度越小。12 道次镦压后, 高宽比为 1.5 和 2 的试样晶粒细化至亚微米级, 试样高宽比为 2 时, 晶粒更为细小、等轴。

3) 不同高宽比试样的硬度随变形道次的变化趋势相似, 前 3 道次, 纯铜的硬度迅速提高, 高宽比越大, 硬度提高的越快。纯铜硬度的提高是位错强化和晶界强化共同作用的结果, 高宽比为 2 的试样, 由于其晶粒更为细小, 饱和状态的硬度值更高。

参考文献 References

- [1] Bagherpour E, Pardis N, Reihanian M *et al.* *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*[J], 2019, 100(5-8): 1647
- [2] Azushima A, Kopp R, Korhonen A *et al.* *CIRP Annals-Manufacturing Technology*[J], 2008, 57(2): 716
- [3] Li B, Teng B G, Chen G X. *Materials Science & Engineering A*[J], 2019, 744: 396
- [4] Kang J Y, Kim J G, Kim S K *et al.* *Scripta Materialia*[J], 2016, 123: 122
- [5] Naseri M, Reihanian M, Borhani E. *Materials Science and Engineering A*[J], 2016, 673: 288
- [6] Shi Fengjian(石凤健), Wang Leigang(王雷刚), Lu Sheng(芦笙). *China Mechanical Engineering*(中国机械工程)[J], 2009, 20(24): 2998

- [7] Guo Wei, Wang Qudong, Ye Bing *et al.* *Journal of Alloys and Compounds*[J], 2013, 558: 164
- [8] Shi Fengjian(石凤健), Wang Leigang(王雷刚). *China Mechanical Engineering*(中国机械工程)[J], 2012, 23(17): 2106
- [9] Shi Fengjian(石凤健), Wang Leigang(王雷刚), Xu Tao(许涛) *et al.* *Transactions of Materials and Heat Treatment*(材料热处理学报)[J], 2011, 32(12): 89
- [10] Zehetbauer M J, Valiev R Z. *Nanomaterials by Severe Plastic Deformation*[M]. Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co KGaA, 2005: 684
- [11] Kundu A, Kapoor R, Tewari R *et al.* *Scripta Materialia*[J], 2008, 58(3): 235
- [12] Parimi A K, Robi P S, Dwivedy S K. *Materials & Design*[J], 2011, 32(4): 1948
- [13] Nakashima K, Horita Z, Nemoto M *et al.* *Acta Materialia*[J], 1998, 46(5): 1589
- [14] Flausino P C A, Nassif M E L, Bubani F C *et al.* *Materials Science & Engineering A*[J], 2019, 756: 474
- [15] Kumar S S S, Priyasudha K, Rao M S *et al.* *Materials & Design*[J], 2016, 101: 117
- [16] Guo Wei(郭炜), Wang De(王德), Lu Deping(陆德平) *et al.* *Forging & Stamping Technology*(锻压技术)[J], 2017, 42(1): 149
- [17] Sakai T, Miura H, Yang X. *Materials Science and Engineering A*[J], 2009, 499: 2
- [18] Mishra A, Richard V, Grégori F *et al.* *Materials Science Forum*[J], 2006, 503-504: 25
- [19] Wu Y, Huang S H, Chen Q *et al.* *Journal of Materials Engineering and Performance*[J], 2019, 28(4): 2063

Effect of Height/Width Ratio on Compression Process, Microstructure and Properties of the Copper Sample via Cyclic Channel Die Compression

Shi Fengjian^{1,2}, Zhang Jianwei¹, Wang Leigang³, Shao Yong^{1,2}, Ge Yanming⁴, Ye Sizhen^{1,2}, Wang Hao¹

(1. Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang 212003, China)

(2. National Experimental Teaching Demonstration Center of Materials Science and Engineering, Zhenjiang 212003, China)

(3. Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

(4. Jiangsu Jinyuan Forging Co., Ltd, Liyang 213376, China)

Abstract: Severe plastic deformation can be achieved in the sample via cyclic channel die compression (CCDC) without changing its shape and size. The height/width ratio is one of the important parameters that affect the CCDC process. A finite element method and experimental validation were employed to investigate the effect of height/width ratio of the sample on compression process, microstructure and properties in this study. The results show that the effective strain is inhomogeneous after deformation. The larger the height/width ratio is, the larger the average effective strain for a single pass compression, and the higher the effective stress. After one pass, grains are squashed, and it is more serious as the height/width ratio increases. After 3 passes, a large number of shear bands are formed, and become narrow with the increase of height/width ratio. After 12 passes, more equiaxed and finer grains are obtained in the sample with height/width ratio of 2. Hardness of pure copper increases significantly after CCDC, and the hardness value of the sample is higher with height/width ratio of 2.

Key words: cyclic channel die compression; height/width ratio; effective strain; microstructure; pure copper

Corresponding author: Shi Fengjian, Ph. D., Associate Professor, School of Material Science and Engineering, Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang 212003, P. R. China, E-mail: shifengjian@126.com