

低温等通道转角挤压中定向凝固纯铜的组织及性能演变

郭廷彪^{1,2}, 李琦¹, 王晨¹, 张锋¹, 丁雨田^{1,2}, 贾智^{1,2}, 唐兴昌^{1,2}

(1 兰州理工大学省部共建有色金属先进加工与再利用国家重点实验室, 兰州 730050;

2 兰州理工大学有色金属合金及加工教育部重点实验室, 兰州 730050)

摘要 采用光学显微镜(OM)和 XRD 技术对干冰冷却后的定向凝固纯铜(99.99%)经等通道转角挤压(ECAP)时的微观组织演变规律进行研究,并测试了 ECAP 后定向凝固纯铜的硬度及导电性能。结果表明,定向凝固纯铜在低温下经 A 和 C 路径变形后易于形成取向一致的纤维组织,并且保持(111)面的择优取向特征,而经 Bc 路径变形后,柱状晶破碎,形成均匀的等轴晶,且各晶面逐渐趋于随机取向;经过 1 道次变形后,各路径硬度大幅增加,约为原来的 1.8 倍,在随后的挤压中,硬度增加缓慢,经 4 道次 ECAP 后,Bc 路径的硬度有所下降;在低应变下,晶粒取向的一致性使得导电率增加;随着应变的增加,晶格畸变使得电子发生散射,使导电率略有降低。

关键词 定向凝固纯铜 等通道转角挤压(ECAP) 晶粒取向 微观组织 导电率

中图分类号: TG379 文献标识码: A DOI:10.11896/j.issn.1005-023X.2018.10.015

The Evolution of Microstructure and Properties of Directional Solidification Pure Copper During Equal Channel Angular Pressing at Low Temperature

GUO Tingbiao^{1,2}, LI Qi¹, WANG Chen¹, ZHANG Feng¹,
DING Yutian^{1,2}, JIA Zhi^{1,2}, TANG Xingchang^{1,2}

(1 State Key Laboratory of Advanced Processing and Recycling of Nonferrous Metals, Lanzhou University of Technology,

Lanzhou 730050; 2 Key Laboratory of Non-ferrous Metal Alloys and Processing of Ministry of Education,

Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050)

Abstract The microstructure evolution of directional solidification structure in pure copper (99.99%) during equal channel angular pressing (ECAP) after cooling with dry ice was investigated by OM and XRD, the hardness and conductivity were tested. The results manifested that the fibrous structure with same orientation was formed in directional solidification structure in pure copper by route A and C at low temperature, and the characterization of (111) preferred orientation was remained. After deformation by route Bc, columnar crystal of directional solidification structure in pure copper was broken, and homogeneous equiaxed grains were formed, at the same time, the grain orientation tended to be random. The hardness of each route increased drastically after one pass extrusion, which was about 1.8 times in compare with hardness of original sample, with the increase of extrusion passes, the hardness increased slowly, whereas the hardness decreased slightly after four passes extrusion by route Bc. The consistency of grain orientation made the conductivity increased in the condition of low strain, however, with the increase of strain, lattice distortion caused electron scattering, which led to a slight decrease in conductivity.

Key words directional solidification structure in pure copper, equal channel angular pressing (ECAP), grain orientation, microstructure, electrical conductivity

0 引言

定向凝固纯铜因消除了作为电阻产生源的横向晶界而具有优异的导电性能,被广泛应用于大规模集成电路、高导电率电线电缆及高保真影音传输器件等领域^[1],但是较低的强度严重影响了其作为高性能材料在关键领域的应用。采用固溶强化、沉淀强化等虽然可以通过阻碍位错运动提高材料的强度^[2],但会大幅降低定向凝固纯铜的导电率。Callister 等^[3]的研究表明,固溶强化形成铜合金可以使纯铜强度提高 2~3 倍,但是其导电率仅为纯铜的 10%~40%。因

此,实现材料强度与导电率的同步提高是材料科学界急需解决的难题。大塑性变形 (SPD) 技术可以有效细化材料晶粒至亚微米甚至纳米级^[4-6],可同时提高材料的物理、化学、力学等综合性能,因而得到国内外研究者的广泛关注^[7-9]。目前,等通道转角挤压 (ECAP) 技术是大塑性变形制备超细晶块体材料应用最广泛的方法之一。研究表明^[10-12],室温下 ECAP 主要的细化机制为位错分割机制,材料通过模具拐角时发生纯剪切变形,变形初期多滑移系开动,晶粒内产生大量位错并相互缠结、交割,形成位错墙及位错胞,随着变形量继续增加,通过吸收与重组位错,这些位错取向差逐渐增大为大角

基金项目:国家自然科学基金(51261016)

郭廷彪:男,1974 年生,博士,副教授,硕士研究生导师,主要从事金属材料强韧化及组织性能调控的研究 E-mail: guotb@lut.cn

度晶界,从而可使粗大晶粒细化为具有特定取向的细小晶粒,因此可有效提高材料强度。

然而挤压温度也严重影响材料微观组织中位错的运动和交割。研究发现^[13-15],低温塑性变形时,原子没有足够的能量进行扩散迁移,材料处于硬化状态,流变阻力很大,位错容易发生钉扎等现象,因此变形时也易出现加工硬化。而加工硬化提高了金属材料的强度、硬度,同时也保证了构件在使用过程中的安全性,有利于金属进行均匀变形。因此研究低温下定向凝固纯铜经不同路径 ECAP 变形过程中的组织演变及对性能的影响规律极为重要。本研究主要采用 OM 和 XRD 技术对低温下定向凝固纯铜经 ECAP 挤压不同道次、不同路径后的微观结构演变和宏观取向进行研究,并分析了形变组织及取向特征对定向凝固纯铜的强化效应及导电性能的影响。

1 实验

实验材料采用热型连铸技术制备的定向凝固纯铜(纯度为 99.99%)棒材,对试样分别采用 A、Bc 及 C 路径进行 1—4 道次挤压,每道次挤压前将试样浸入干冰($-70\text{ }^{\circ}\text{C}$)中静置 3~5 min,并对挤压模具进行冷却。所用 ECAP 模具如图 1 所示,模具内角 $\phi=90^{\circ}$,外角 $\psi=37^{\circ}$,挤压机型号为 YT071-100A,挤压速度为 10 mm/s,线切割切取平行挤压方向的纵截面进行检测,尺寸为 $5\text{ mm}\times 5\text{ mm}\times 2\text{ mm}$ 。将试样分别采用 800#~3 000# 砂纸打磨后再进行机械抛光至表面光亮无划痕,然后对金相试样进行腐蚀,腐蚀液配比为 5 g 氯化铁+10 mL 盐酸+100 mL 蒸馏水,用 MeF3 式金相显微镜进行微观组织观察,用 D8 ADVANCE 型 X 射线衍射仪进行 XRD 检测,扫描角度为 $10\sim 90^{\circ}$ 。采用 WDW-100D 微机控制电子万能材料试验机进行硬度测试。并对定向凝固纯铜经 ECAP 前后的导电率进行测试,所用仪器为 Sigma2008B/C 数字涡流金属电导仪,测量误差为 0.1%IACS。

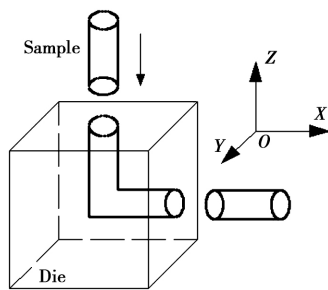


图 1 ECAP 模具示意图

Fig. 1 Schematic of equal channel angular pressing (ECAP)

2 结果与讨论

2.1 ECAP 中不同路径下的形变特征

图 2 为定向凝固纯铜原始样及低温下经 A 路径挤压不同道次后的纵截面显微组织。从图 2(a)可知,原始定向凝固纯铜显微组织为粗大的多晶柱状晶,其晶界相互平行;经 1 道次 ECAP 变形后,原始粗大的柱状晶内部出现大量相互平行的滑移带,且分布趋于均匀,滑移带间距约为 $60\text{ }\mu\text{m}$,但是

不同晶粒内部滑移带与晶界夹角不同。这是由于低温下材料的变形抗力增加,流变阻力增大,导致 ECAP 变形过程中晶粒朝着最有利的滑移方向转动困难,而发生“几何硬化”;2 道次变形后,滑移带密度急剧增加,不同晶粒内部滑移带方向趋于一致,其间距约为 $20\text{ }\mu\text{m}$;随着应变继续增加,相邻晶粒之间的滑移带穿过晶界相互结合,原始粗大柱状晶被均匀细化为取向一致的纤维组织,具有典型的织构特征。

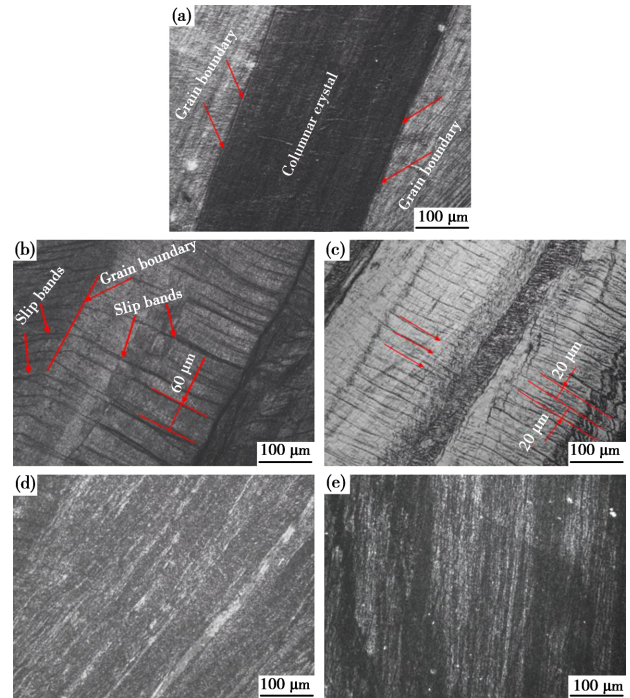


图 2 A 路径下定向凝固纯铜的显微组织演变:(a)原始样,(b)1 道次,(c)2 道次,(d)3 道次和(e)4 道次(电子版为彩图)

Fig. 2 Microstructure evolution of directional solidification structure in pure copper by route A;

(a)as-received, (b)one pass, (c)two passes,

(d)three passes and (e)four passes

图 3 为定向凝固纯铜经 Bc 路径挤压不同道次后的纵截面显微组织。从图 3 可知,2 道次变形后,粗大柱状晶明显被分割为方向一致的带状组织,宽度大约为 $30\text{ }\mu\text{m}$,不同带状组织内部滑移带方向不同且密集均匀分布。3 道次变形后,滑移带宽度继续减小,并且形成两个方向滑移带相互交割。4 道次变形后,滑移带穿过晶界发生交互作用,有利于形成均匀的等轴晶。分析认为:其一,由于 Bc 路径变形的特殊性,即每道次挤压后将试样绕轴向沿着同一方向旋转 90° ,使晶粒内部累积的应变分布更加均匀;其二,由于每个面都经过剪切作用后,后启动的滑移系对先启动的滑移系进行分割,有利于形成等轴晶;其三,由于低温下原子扩散系数降低,原子扩散能力减弱,使得挤压过程中原子摆脱平衡位置束缚的概率降低,导致材料塑性降低,有利于在 ECAP 变形区的均匀塑性流变^[11]。因此,低温下 Bc 路径变形更有利于形成均匀的等轴晶。

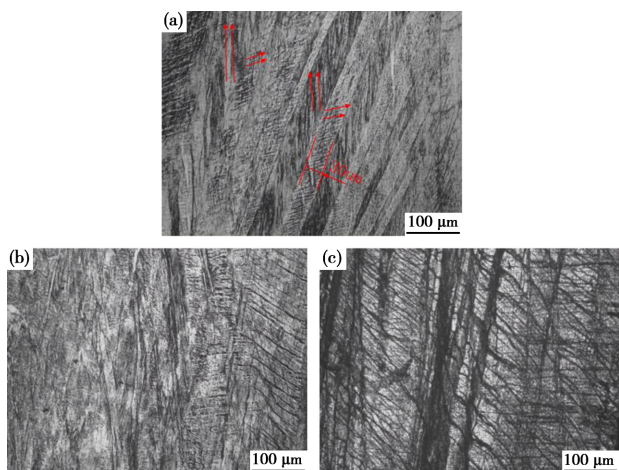


图 3 Bc 路径下定向凝固纯铜的显微组织演变:(a)2 道次, (b)3 道次和(c)4 道次(电子版为彩图)

Fig. 3 Microstructure evolution of directional solidification structure in pure copper by route Bc:(a) two passes, (b) three passes and (c) four passes

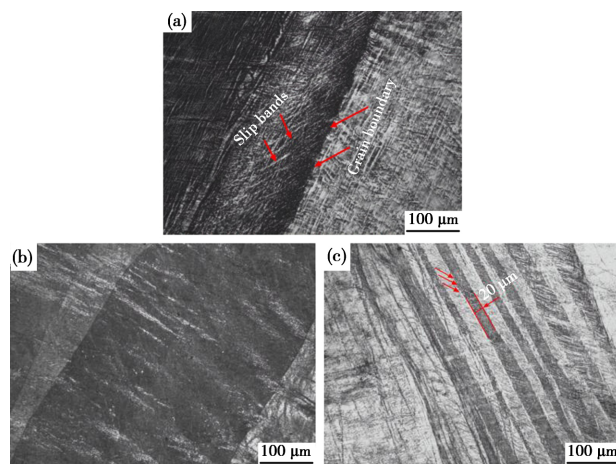


图 4 C 路径挤压后定向凝固纯铜的显微组织演变:(a)2 道次, (b)3 道次, (c)4 道次(电子版为彩图)

Fig. 4 Microstructure evolution of directional solidification structure in pure copper by route C:(a) two passes, (b) three passes and (c) four passes

图 4 为 C 路径挤压多道次后定向凝固纯铜的纵截面显微组织。从图 4 可知,2 道次变形后滑移带急剧减少,且在晶内分布极不均匀,与晶界夹角较小;3 道次变形后滑移带基本消失,晶粒没有明显细化;4 道次变形后形成了均匀一致的带状组织,宽度约为 20 μm,且条带内部滑移带分布明显,相比于 A 和 Bc 路径,C 路径细化效果明显不佳。分析认为,C 路径的剪切特征为在相同晶面上两个相反方向剪切,这种剪切导致多余应变产生,因此 C 路径的细化效果较 A 和 Bc 路径差。

图 5 为 ECAP 过程中不同路径下定向凝固纯铜的剪切形变特征。图 5(a)为 A 路径下定向凝固纯铜的剪切特征,考虑 XZ 平面上很小的薄片单元,1 道次变形后,形成了一个被拉长的倾斜平行四边形,由于 A 路径后一次的剪切与前一次剪切方向在 XZ 平面上的夹角为 45°,存在 X 和 Z 方向的

分切应力,X 方向的切应力使晶粒被拉长,Z 方向的切应力使变形后形成的剪切带宽度减小,因此 4 道次变形后形成了取向一致的纤维组织。对于 Bc 路径(图 5(b)),第二次挤压时将试样旋转 90°,形成的平行四边形也被转到 XY 平面,此时薄片只是发生位置的移动,形状没有改变,第三次挤压前再将试样朝着同一方向旋转 90°,平行四边形又回到 XZ 面,与 1 道次剪切方向相反,容易出现滑移带的交叉、分割现象。同时,Bc 路径下后一次的剪切与前一次的剪切方向绕空间某点旋转了一定角度,存在 X、Y 和 Z 三个方向的分切应力,Y 方向的分切应力切断被拉长的剪切变形带,因此有利于形成均匀的等轴晶。图 5(c)为 C 路径的变形特征,每次变形后试样旋转 180°,是在同一剪切面的相反剪切方向剪切,应变相互抵消,使得累积应变减弱,因此细化效果较 A 和 Bc 路径差。

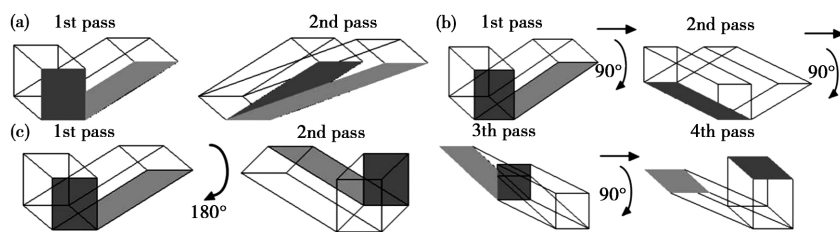


图 5 不同挤压路径的剪切特征:(a)A 路径,(b)Bc 路径,(c)C 路径

Fig. 5 Shear characteristics of different route:(a) route A, (b) route Bc and (c) route C

2.2 低温下晶粒宏观取向分布特征

图 6 为定向凝固纯铜在低温下经 ECAP 以 A、Bc、C 路径挤压 1—4 道次后的纵截面 XRD 图。从图 6 可知,原始定向凝固纯铜(111)面衍射相对强度较大,A 路径变形过程中,随着挤压道次增加,(111)面保持较高的衍射强度,表现出择优取向特征,(200)面和(220)面衍射相对强度逐渐增加;Bc 路径变形过程中,各晶面衍射峰强度增加或减弱随挤压道次交替进行;C 路径变形过程中,各晶面衍射相对强度随着挤压道次的增加而逐渐增强。

为了易于观察变形后各道次晶面取向变化,对衍射峰进行归一化处理^[16]。定义 K 为挤压后各晶面相对强度与随机晶面相对强度的比值,若 K 大于 1 时,则表明晶面有明显的取向;若 K 趋于 1 时,则表明晶面趋向于随机分布;若 K 小于 1 时,则表明晶面无明显取向^[17]。图 7 为挤压后不同道次的 K 值变化。从图 7 可以看出,原始定向凝固纯铜(111)晶面 K 值为 1.36,表明(111)晶面具有明显的择优取向,其余各晶面 K 值明显小于 1。A 路径变形过程中,1 道次后(111)晶面取向稍有减弱,随后逐渐增强,直至趋于稳定,(200)晶

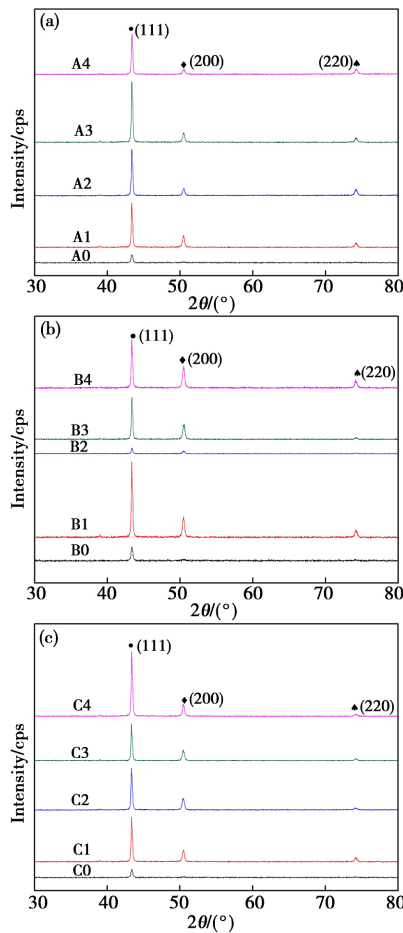


图6 定向凝固纯铜不同路径的X射线衍射谱:
(a)A路径,(b)Bc路径,(c)C路径

Fig. 6 XRD patterns of directional solidification structure in pure copper by different route: (a) route A, (b) route Bc and (c) route C

面和(220)晶面取向在变形过程中相互竞争,但K值始终小于1,无择优取向特征;Bc路径变形过程中,(111)晶面取向逐渐减弱,(200)晶面和(220)晶面取向逐渐增强,其K值最终趋于1,接近随机取向;C路径变形过程中,(111)晶面K值无明显变化,仍保持其原始的择优取向,(200)晶面K值前3道次逐渐增加,4道次后明显减弱,(220)晶面K值随挤压道次增加而减弱。结合A、Bc和C路径中微观组织演变分析得知,A和C路径变形后易产生取向一致的纤维组织,从而保持(111)晶面的择优取向特征,而Bc路径变形后,容易形成具有随机取向特征的等轴晶粒,因此其各晶面的K值最终趋于1。

2.3 硬度与导电性能

图8为经ECAP不同路径变形后挤压道次与硬度的关系。从图8可知,原始定向凝固纯铜硬度为68HV,1道次变形后,各路径硬度变化基本相同,定向凝固纯铜硬度增加至113HV,2道次变形后,Bc路径硬度增加较快,而A和C路径硬度增加缓慢;3道次变形后,Bc路径硬度趋于稳定,A和C路径硬度继续增加,4道次变形后,A路径硬度最大(129HV),其次是Bc路径(127.7HV),C路径最小(124HV)。分析认为,ECAP变形初期,严重塑性变形使粗大柱状晶粒破

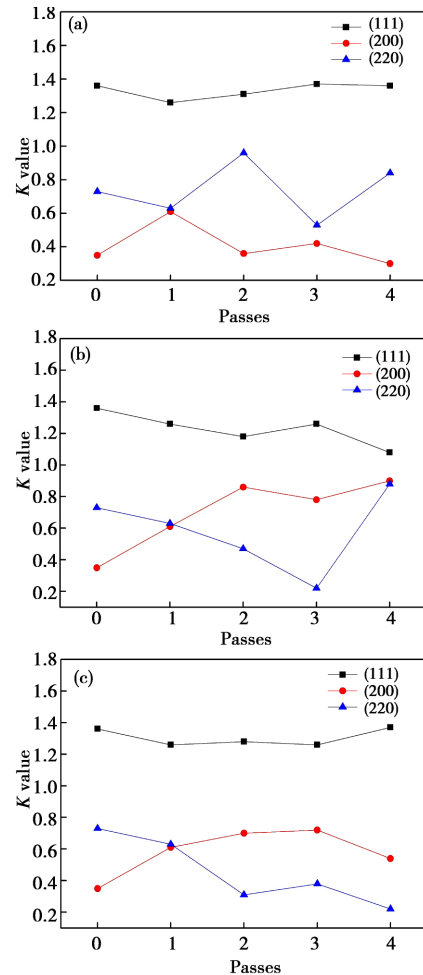


图7 不同路径挤压后不同道次的K值变化:(a)A路径,(b)Bc路径,(c)C路径

Fig. 7 K value of different extrusion after different route passes: (a) route A, (b) route Bc and (c) route C

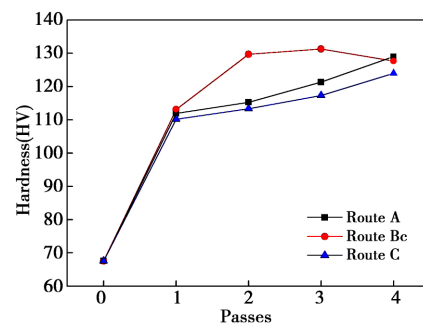


图8 挤压道次与硬度的关系

Fig. 8 Relationship between extrusion passes and hardness
碎及位错密度大幅增加,而晶界对位错运动起到阻碍作用,从而使金属在塑性变形过程中表现出加工硬化能力^[18],导致硬度大幅增加,即硬度近似服从Hall-Petch关系;此外,低温ECAP变形过程中原子激活系数较小,破坏原子键需要的能量更大,从而使ECAP变形抗力大大增加,导致硬度增加。ECAP变形后期,晶粒细化到一定程度后,传统的细晶强化效果不再明显,在变形过程中晶界又可作为有效的位错开动源,提高了材料的变形协调性^[19],使其变形抗力降低。因此4道次变形后,Bc路径硬度有所降低。

图 9 为经 ECAP 不同路径变形后挤压道次与导电率的关系。图 9(a)和(b)分别为多晶铜和定向凝固纯铜导电率随挤压道次的变化。从图 9(a)可知,原始多晶铜导电率为 91.8%IACS,前两道次变形后,导电率连续增加,A、Bc 和 C 路径导电率分别为 93.4%IACS、94.6%IACS 和 93.7%IACS,而 3 道次变形后,各路径导电率有所下降,Bc 路径导电率下降最大,4 道次变形后各路径导电率又呈上升趋势,其值分别为 93.8%IACS、93.7%IACS、94.5%IACS。分析认为,初期 ECAP 过程中,在模具拐角剪切力的作用下,具有随机取向分布的晶粒被沿轴向拉长,使得晶界、电子传输过程阻碍减少,因此导电率大幅增加;而 ECAP 变形后期,由于应变量累积过大,材料中位错等晶体缺陷急剧增加,晶格发生畸变,导致原子间距改变、电子散射增大,使导电率有所下降,但随着挤压道次增加,晶粒择优取向特征明显加强,使得晶粒取向与晶格畸变的交互作用中,导电率波动不定。从图 9(b)可知,原始定向凝固纯铜导电率为 99.1%IACS,应变量增加导致粗大柱状晶破碎,晶粒取向一致性有所减弱,导电率下降;而 ECAP 变形后期,晶粒取向的一致性与晶格畸变的交互作用使导电率基本趋于动态平衡,因此定向凝固纯铜经 ECAP 四道次变形后导电率有所下降。

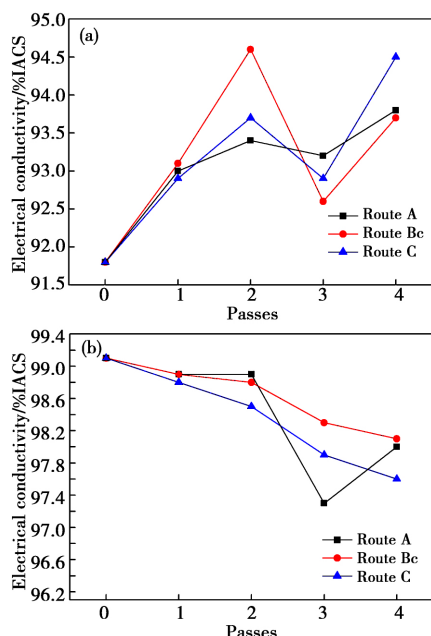


图 9 挤压道次与导电率的关系

Fig. 9 Relationship between extrusion passes and electrical conductivity

3 结论

(1) 定向凝固纯铜在低温下经 A 和 C 路径变形后易于形成取向一致的纤维组织,并且保持(111)晶面的择优取向特征;而 Bc 路径变形后,柱状晶破碎,有利于形成均匀的等轴晶,且各晶面逐渐趋于随机取向。

(2) 经 1 道次变形后,定向凝固纯铜硬度从 68HV 大幅增加至 113HV,随着应变量继续增加,硬度增加幅度趋于平缓。ECAP 变形可使多晶铜的晶粒取向趋于一致,从而导致其导电率增加;而定向凝固纯铜经 ECAP 变形后,柱状晶破

碎,导电率略有降低。

参考文献

- 1 Fukuda Y, Oh-Ishi K, Furukawa M, et al. Influence of crystal orientation on the processing of copper single crystals by ECAP [J]. *Journal of Materials Science*, 2007, 42(5): 1501.
- 2 Mirzakhani B, Payandeh Y. Combination of severe plastic deformation and precipitation hardening processes affecting the mechanical properties in Al-Mg-Si alloy [J]. *Materials & Design*, 2015, 68(68): 127.
- 3 Callister W D. Student solutions manual to accompany materials science and engineering an introduction [M]. New York: John Wiley and Sons, 2000: 35.
- 4 Morris D G, Gutierrez-Urrutia I, Munoz-Morris M A. Evolution of microstructure of an iron aluminide during severe plastic deformation by heavy rolling [J]. *Journal of Materials Science*, 2008, 43(23): 7438.
- 5 Wang C P, Li F G, Lei W, et al. Review on modified and novel techniques of severe plastic deformation [J]. *Science China Technological Sciences*, 2012, 55(9): 2377.
- 6 Chen Y J, Wang Q D, Lin J B, et al. Grain refinement of magnesium alloys processed by severe plastic deformation [J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2014, 24(12): 3747.
- 7 Shin M H, Yu C Y, Kao P W, et al. Microstructure and flow stress of copper deformed to large plastic strains [J]. *Scripta Materialia*, 2001, 45(7): 793.
- 8 Valiev R Z, Islamgaliev R K, Alexandrov I V. Bulk nanostructured materials from sever plastic deformation [J]. *Progress in Materials Science*, 2000, 45(2): 103.
- 9 Ni S, Liao X Z, Zhu Y T. Effect of severe plastic deformation on the structure and mechanical properties of bulk nanocrystalline metals [J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2014, 50(2): 156 (in Chinese).
- 倪颂, 廖晓舟, 朱运田. 剧烈塑性变形对块体纳米金属材料结构和力学性能的影响 [J]. *金属学报*, 2014, 50(2): 156.
- 10 Wu S D, An X H, Han W Z, et al. Microstructure evolution and mechanical properties of fcc metallic materials subjected to equal channel angular pressing [J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2010, 46(3): 257 (in Chinese).
- 吴世丁, 安祥海, 韩卫忠, 等. 等通道转角挤压过程中 fcc 金属的微观结构演化与力学性能 [J]. *金属学报*, 2010, 46(3): 257.
- 11 Guo T B, Ding Y T, Xu G J, et al. Mechanical properties of single crystal copper and polycrystalline copper during super plastic and cyclic deformation [J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2010, 20(7): 1375 (in Chinese).
- 郭廷彪, 丁雨田, 许广济, 等. 强塑性循环变形中单晶铜和多晶铜的力学性能 [J]. *中国有色金属学报*, 2010, 20(7): 1375.
- 12 Lu K, Lu L. Progress in mechanical properties of nanocrystalline materials [J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2000, 36(8): 785 (in Chinese).
- 卢柯, 卢磊. 金属纳米材料力学性能的研究进展 [J]. *金属学报*, 2000, 36(8): 785.
- 13 Li M Q, Zhang C, Luo J, et al. Thermomechanical coupling simulation and experimental study in the isothermal ECAP processing of Ti-6Al-4V alloy [J]. *Rare Metals*, 2010, 29(6): 613.

(下转第 1687 页)

- 2 Li W W, Diao J X. The preparation of nanometer non spherical colloidal silica and its polishing character[J]. ECS Transactions, 2013, 52(1):507.
- 3 Negrych J A, Haag G, Rall P E, et al. Abrasive media and aqueous slurries for chemical mechanical polishing and planarization; US, 6334880B1[P]. 2002-01-01.
- 4 Maejima K, Miyabe S, Izumi M, et al. Polishing composition for semiconductor wafer, production method thereof, and polishing method; US, 2008/0038996A1[P]. 2008-02-14.
- 5 Nakajo M, Izumi M, Miyabe S, et al. Polishing compound for semiconductor wafer polishing and polishing method; US, 2009/0223136A1[P]. 2009-09-10.
- 6 Izumi M, Nakajo M, Saito Y, et al. Polishing composition for semiconductor wafer; US, 2010/0163786A1[P]. 2010-07-01.
- 7 李家荣, 唐会明, 张金平. 一种非球形纳米级硅溶胶的制备方法: 中国, 102390837A[P]. 2012-03-28.
- 8 李薇薇, 关飞飞, 徐功涛. 不规则形貌硅溶胶的制备方法及其应用: 中国, 103408027A[P]. 2013-11-27.
- 9 施为德. 马铃薯形二氧化硅溶胶及其制备方法: 中国, 101402829A [P]. 2009-04-08.
- 10 Shih Z W, Chang K Y, Tseng C L, et al. Method for preparing shape-changed nanosize colloidal silica; US, 2003/0113251A1 [P]. 2003-06-19.
- 11 大森丰, 伊藤博友, 山口健二. 具有细长形状的硅溶胶的制备方法: 中国, 101626979A[P]. 2010-01-13.
- 12 George W, Sears J. Determination of specific surface area of colloidal silica by titration with sodium hydroxide[J]. Analytical Chemistry, 1956, 28(12):1981.
- 13 Lu Q W, Wang Y B, Hai E H. A discussion on the formation condition and mechanism of silica gel[J]. Journal of Inner Mongolia Polytechnic University, 1994, 13(3):17(in Chinese).
陆庆玮, 王一兵, 海尔汗. 硅酸凝胶生成条件与机理的探讨[J]. 内蒙古工业大学学报, 1994, 13(3):17.
- 14 戴安邦. 硅酸聚合作用的一个理论[J]. 南京大学学报(化学版), 1963(1):1.
- 15 Iler R K. The chemistry of silica [M]. New York: Wiley-Interscience, 1979:224.

(责任编辑 谢 欢)

(上接第 1654 页)

- 14 Guo T B, Ding Y T, Yuan X F, et al. Microstructure and orientation evolution of unidirectional solidification pure copper during ECAP [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2011, 40(3):171.
- 15 Guo T B, Ding Y T, Hu Y, et al. Study on the materials flowing and deformation behavior by equal channel angular pressing(ECAP) [J]. Materials Review B: Research papers, 2009, 23(9):93(in Chinese).
郭廷彪, 丁雨田, 胡勇, 等. 等径角挤压过程中材料的流变行为研究 [J]. 材料导报: 研究篇, 2009, 23(9):93.
- 16 He Y B, Pan Q L, Qin Y J, et al. Microstructure and mechanical properties of ultra-fine grain ZK60 magnesium alloy process by equal angular pressing [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2010, 20(12):2274(in Chinese).
何运斌, 潘清林, 覃银江, 等. 等通道角挤压制备细晶 ZK60 镁合金的组织与力学性能[J]. 中国有色金属学报, 2010, 20(12):2274.
- 17 Wen Y N, Zhang J M. Surface energy calculation of the bcc metals by using the MAEAM [J]. Computational Materials Science, 2007, 144(3):163.
- 18 Yun X B, Song B Y, Chen L. Ultra-fine grain copper prepared by continuous equal channel angular press [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2006, 16(9):1563(in Chinese).
运新兵, 宋宝福, 陈莉. 连续等径角挤压制备超细晶铜[J]. 中国有色金属学报, 2006, 16(9):1563.
- 19 Yamakov V, Wolf D, Salazar M, et al. Length-scale effects in the nucleation of extended dislocations in nanocrystalline Al by molecular-dynamics simulation [J]. Acta Metallurgica Sinica, 2001, 49(14):2713.

(责任编辑 谢 欢)