

doi : 10. 3969/j. issn. 1005 - 3026. 2016. 09. 022

脉冲电流下黄铜合金 H70 的力学性能和微观组织

范 蓉^{1,2},赵坤民¹,阮金华^{1,3},曹 简²

(1. 大连理工大学 工业装备结构分析国家重点实验室,辽宁 大连 116024 ;2. 西北大学 机械工程学院,埃文斯顿 伊利诺伊州 60201 ;3. 武汉科技大学 机械自动化学院,湖北 武汉 430081)

摘 要 :在高精度电辅助拉伸系统上进行了一系列 H70 黄铜合金板材拉伸试验 ,探讨了脉冲电流持续时间和温度峰值对黄铜合金拉伸性能的影响 ,并观察了试验前后材料的微观组织 .结果表明 脉冲持续时间越长 ,单次脉冲电流产生的峰值温度越高 ,H70 黄铜合金的抗拉强度越低 .在相同预应变下 ,脉冲电流产生的温度峰值越高 ,应力回复值下降越明显 .当峰值温度高于 600 ℃ 时 ,应力回复值接近于初始屈服强度 .变形过程引入脉冲电流使黄铜发生明显再结晶 ,靠近断裂区域 晶粒长大明显 ,并出现铸态细小等轴晶和粗大枝晶 .

关 键 词 :脉冲电流 ;黄铜合金 H70 ;力学性能 ;再结晶 ;微观组织

中图分类号 :TG 146 文献标志码 :A 文章编号 :1005 - 3026(2016)09 - 1322 - 05

Mechanical Properties and Microstructures of Brass Alloy H70 Subjected to Pulse Current

FAN Rong^{1,2}, ZHAO Kun-min¹, RUAN Jin-hua^{1,3}, CAO Jian²

(1. State Key Laboratory of Structural Analysis for Industrial Equipment ,Dalian University of Technology ,Dalian 116024 ,China ;2. School of Mechanical Engineering ,Northwestern University ,Evanston Illinois 60201 ,USA ;3. School of Machinery and Automation ,Wuhan University of Science and Technology ,Wuhan 430081 ,China. Corresponding author :FAN Rong ,E-mail :fanrong@mail. dlut. edu. cn)

Abstract : Effects of electric pulse duration and relative peak temperature on mechanical properties were studied by high precision electrically assisted (EA) tension test , and microstructures were observed by metallographic analysis. The results indicated that higher temperature generated by longer electric pulse duration resulted in more reduction in tensile strength. Higher temperature peak generates lower stress recovery at the same prestrain level. When the peak temperature was over than 600 ℃ , stress recovery decreased by 50% , which was nearly the initial yield strength under regular tension test. Recrystallization and grain growth were observed on the specimen after EA tension. Grain refinement and dendritic growth occurred near the fracture area.

Key words : electric pulse ; brass alloy H70 ; mechanical properties ; recrystallization ; microstructure

在材料变形过程中通入电流 ,材料的流动应力下降 ,塑性增加^[1] .自 20 世纪 60 年代 Troitski^[2]首次在锌单晶的拉伸试验中发现电致塑性效应以来 ,电流对金属材料变形性能的影响受到广泛关注^[3-4] .其不仅对材料的塑性变形行为有显著影响^[5-6] ,而且对金属材料的组织转变和性能也有显著影响^[7] ,且脉冲电流导致的电塑性效应最明显 .但是 ,电塑性研究涉及复杂的电 - 热 - 力 - 相变耦合问题 ,且针对不同的材料 ,影响

规律明显不同^[8] .

铜合金具有较高的强度和良好的抗蚀性和耐磨性 ,被广泛应用到机械、冶金和电器等领域 .在电流对铜合金力学性能和组织影响的报道中 ,文献 [9]研究了黄铜合金中不同锌含量对电塑性效应的影响 ,表明连续直流电能够显著降低流动应力 ,不同锌含量对电流密度的灵敏度不同 ;文献 [10]考虑了连续直流电对不同晶粒尺寸黄铜的力学性能影响 ,结果表明 ,晶粒尺寸越小 ,电流引

起的应力下降越多;同时,文献[10]指出连续直流电不仅对力学性能产生影响,材料的微观组织也发生了明显改变,表明晶界融化现象出现在高电流密度拉伸试样表面。然而,前人研究中只考虑了连续电流对铜合金变形行为的影响,脉冲电流的影响尚未见报道。文献[11]发现在纯铜的退火过程中施加脉冲电流,能够促进再结晶形核,细化晶粒,同时能够明显促进铜合金的裂纹愈合,因此,有必要将脉冲电流引入到黄铜合金变形过程中来。

本文选取单相黄铜合金 H70 为研究对象,在高精度电辅助拉伸系统上进行了一系列电脉冲作用下的 H70 黄铜合金板材拉伸试验,探讨了脉冲电流持续时间和温度峰值对黄铜合金拉伸性能的影响,并采用光学显微镜观察了试验前后材料的微观组织。

1 试验材料和试验方法

以板厚 0.127 mm 的多晶 α 相黄铜合金 H70 为研究对象,其化学成分(质量分数,%)为: Cu 68.23, Zn 28.5, Fe 0.05, Pb 0.07, 其余 0.15。将黄铜合金板沿轧制方向加工成如图 1 所示的拉伸试样,试样宽 3.5 mm,标距 6 mm。进行电脉冲拉伸试验前,试样经过了 500 $^{\circ}$ C 保温 2 h 后空冷至室温的去应力退火处理。

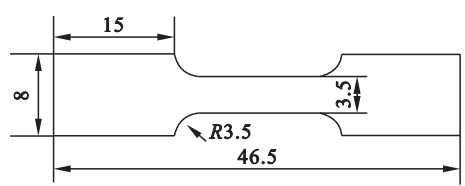


图 1 拉伸试样尺寸(单位 mm)
Fig. 1 Dimensions of tensile specimen

图 2 所示的高精度电辅助拉伸系统由 SEM 测试平台、直线位移传感器(LVDT)和力传感器等组成。SEM 测试平台上的直流电机驱动螺钉旋转提供加载,直线位移传感器(LVDT)用于测量小变形过程中的位移,高精度力传感器的最大许用荷载为 1 100 N。本试验采用非接触式应变测量技术,安全测量通电拉伸过程中试样的应变,采用高分辨率数字相机记录拉伸过程中试样表面散斑位移,经 ICASOFT 软件处理得到试样的实时应变。脉冲电流由 Micro Star CRS-LFP12-300 (Dynatronix Inc)脉冲电源生成,通过图 2 所示的上下夹头与试样相连,采用非接触式红外热像仪 TIM160 实时监测拉伸过程中试样表面温度。

在上述高精度电辅助拉伸系统上进行了一系列脉冲电流辅助拉伸试验,研究脉冲持续时间以及脉冲电流产生的温度峰值对材料拉伸性能的影响。试样拉伸结束后,将其表面先后进行抛光腐蚀,腐蚀液为 25 mL HN_4OH 、25 mL 水和 5 mL HF 的混合液,并通过光学显微镜观察试样的微观组织。本文所述试验装置及所有试验均在美国西北大学完成。

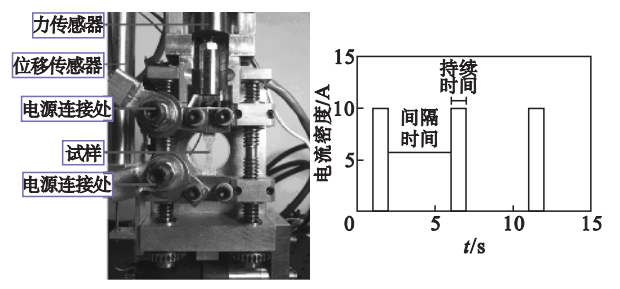


图 2 电辅助拉伸装置
Fig. 2 Electrically assisted tension testing system

2 结果与讨论

2.1 脉冲持续时间对应力的影响

图 3 是电流密度为 150 A/mm^2 脉冲间隔时间 10 s,脉冲持续时间分别为 0.75 s 和 1 s 下的应力应变曲线。可见,未通电下的试样在拉伸过程中出现典型的加工硬化现象,流变应力随着变形量的增加而不断升高。这是因为,随着变形量的增大,位错密度不断增加,位错之间的交互作用增大了位错运动的阻力,加工硬化占主导地位。临断裂前,试样的抗拉强度达到 390 MPa。脉冲电流引起试样应力出现瞬间下降,脉冲间隔阶段试样应力迅速回升。从整体应力应变曲线可以看出,与未通电拉伸结果相比,脉冲持续时间为 0.75 s 和 1 s 的试样的抗拉强度分别下降了 14.7% 和 25.3%。脉冲持续时间越长,材料抗拉强度越低。

图 3b 和图 3c 分别为拉伸初期和后期脉冲作用下材料应力应变曲线的局部放大图。拉伸初期,单次脉冲结束时,应力回复值(如图 3b 所示)略低于相同应变下未通电时的应力值,随着拉伸的进行,下降值越来越明显。拉伸后期,应力回复值明显低于未通电时的应力值,且脉冲持续时间越长,应力回复值下降越明显。

脉冲电流产生的焦耳热引起试样温度上升,温度随时间的变化曲线如图 4 所示。脉冲电流引起黄铜温度瞬间上升,脉冲持续时间越长,温度峰值越高。随着拉伸的进行,试样横截面积降低,引起电流密度不断升高,进而使得脉冲的温度峰值

不断上升,临近断裂前最后一个脉冲作用下,试样 (0.75 s).
的温度峰值分别为 760 ℃ (1 s) 和 740 ℃

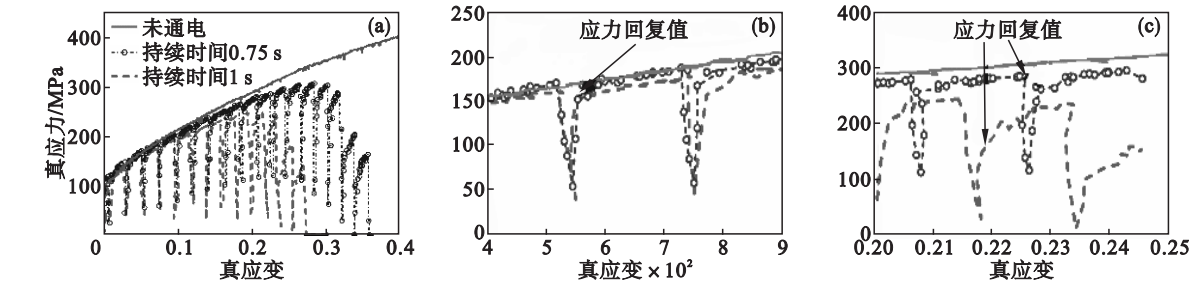


图 3 电流密度为 150 A/mm² 脉冲间隔时间为 10 s 时,不同脉冲持续时间下的应力应变曲线
Fig. 3 Stress-strain relationship of different electric pulse duration with the current density of 150 A/mm² and current pulse time of 10 s

(a)—整体应力应变 ; (b)—拉伸初期应力应变曲线的局部放大图 ; (c)—拉伸后期应力应变曲线的局部放大图.

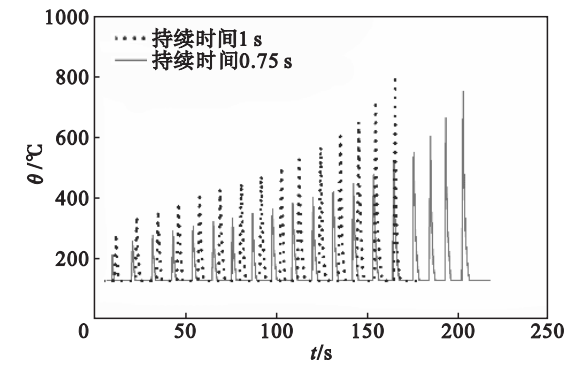


图 4 脉冲电流作用下试样表面最高温度随时间变化曲线
Fig. 4 Maximum temperature of specimen surface change with time under the pluse current

脉冲电流产生的温度峰值与试样的应力有明显关联,以图 5 所示脉冲持续时间为 0.75 s 的结果为例,脉冲持续时间内,材料温度瞬间上升达到一个峰值,应力出现下降,脉冲间隔期间,温度迅速下降,拉伸的持续进行使材料应力上升至再次屈服和强化阶段.随着峰值温度的不断升高,瞬时应力下降值增加.当达到 424 ℃ 时,材料的应力回复值达到最大值 211 MPa.随着应变的增加以及温度峰值的持续升高,应力回复值出现下降趋势,温度达到 605 ℃ 时,应力回复值从 190 MPa 下降至 112 MPa.可以看出,在拉伸的过程中,脉冲电流产生的温度峰值导致材料的强度下降和应力回复值发生改变.

2.2 温度对应力的影响

通过实时调节电流强度,控制脉冲引起的温度峰值维持在预定值范围内 (+ / - 10 ℃),脉冲持续时间和间隔时间保持不变,得到不同温度峰值下的应力应变曲线如图 6 所示.脉冲电流引起的温度峰值越高,脉冲电流引起的应力下降越明显.在脉冲间隔期间,当温度峰值为 300 ℃ 时,曲

线回升至与未通电时一致,脉冲电流没有对整体应力趋势产生影响.随着峰值温度的升高,整体应力不断下降,当温度峰值达到 500 ℃ 时,随着应变的增加,每一个脉冲间隔期间的应力回升值均低于下降前的应力值.

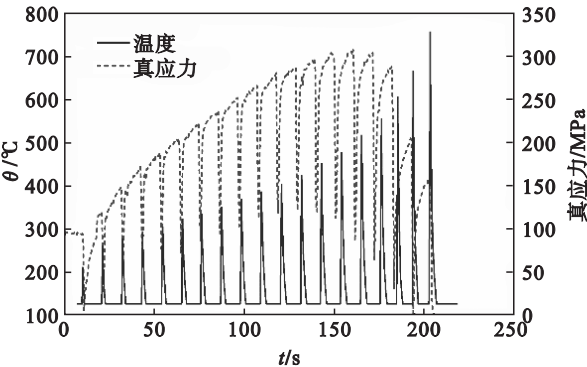


图 5 脉冲持续时间为 0.75 s 下的温度和应力随时间变化曲线
Fig. 5 Temperature and stress change with the time under the current duration of 0.75 s

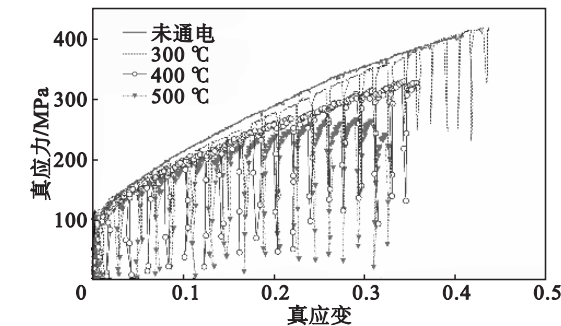


图 6 不同温度峰值下材料应力应变曲线
Fig. 6 True stress-strain curves under different temperature

将试样预拉伸至 26% ,在保持拉伸状态不变的情况下通电.脉冲电流产生的温度峰值与应力回升值的关系如图 7 所示.随着温度的升高,温度峰值引起的应力回升值越低.当温度峰值超过

600 ℃ 时 , 应力回复值和未拉伸时的初始屈服应力值(虚线所示) 接近. 黄铜合金 H70 具有高的加工硬化率. 脉冲电流引起的温度升高退火显著降低材料应力. 值得注意的是 , 不同于传统的热处理 , 试样温度停留在峰值的时间极短(< 0.1 s).

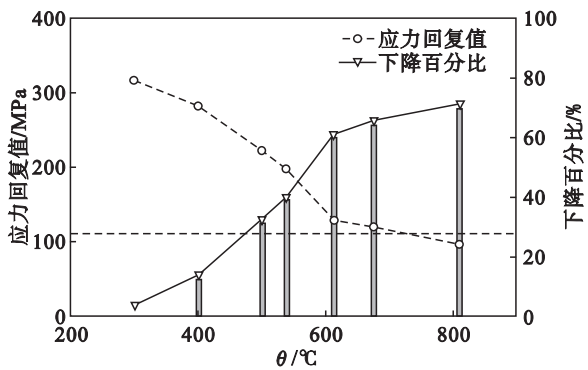


图 7 电流产生的温度对应力的影响
Fig. 7 Influence of temperature generated by electric current on flow stress

2.3 微观组织变化

图 8 为未通电拉伸试验下 , 试验前后试样断裂区域附近的表面微观组织变化. 黄铜合金组织由单相面心立方晶格的 α 相固溶体构成. 经退火后 α 相固溶体呈多边形 , 并有大量退火孪晶. 经过拉伸后 , 同一晶粒沿着拉伸方向伸长 , 且晶粒内部出现大量的滑移带.

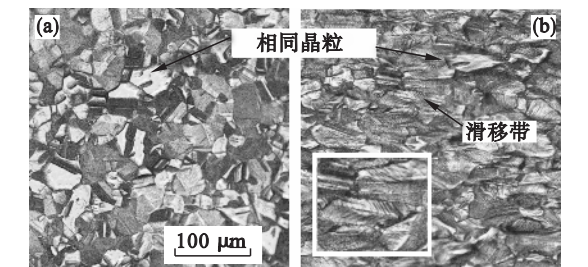


图 8 未通电拉伸前后试样微观组织的对比
Fig. 8 Microstructure images of brass alloy before and after electrically assisted tension test
(a)—试验前 ; (b)—试验后.

图 9 是试样在脉冲电流峰值温度为 800 ℃ 时 , 拉伸至断裂后的表面微观结构. 在常温下 , 原子扩散能力小 , 不易恢复到变形前状态. 电流的辅助作用增加原子的扩散能力. 金属依次发生回复、再结晶和晶粒长大. 靠近夹持区域的晶粒(图 9a) 与原始组织无明显变化 , 在靠近试样中部 , 开始出现新的等轴小晶粒(图 9b) , 等轴晶粒逐步相互吞并并长大(图 9c) , 晶粒尺寸由原始的 31.4 μm 增大至图 9d 的 70 μm . 同一试样表面出现多种组织 , 这与电流密度及相应的温度峰值有直接关系.

靠近试样中部 , 变形引起横截面积减少. 相同电流强度下 , 电流密度高于靠近夹持区域的电流密度 , 图 9a 和图 9d 相应位置的瞬时温度峰值分别达到 350 / 700 ℃. 此外 , 变形量、变形速率也是影响动态再结晶的主要因素 , 将在以后的研究中考虑.

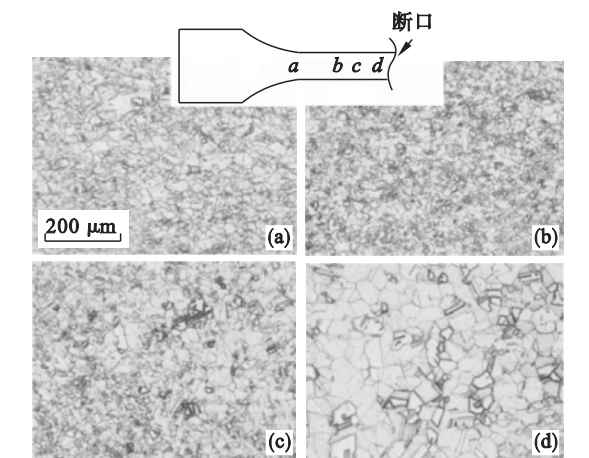


图 9 通电拉伸下试样表面各区域微观组织
Fig. 9 Microstructure images of brass alloy after electrically assisted tension test
(a)—a 点 ; (b)—b 点 ; (c)—c 点 ; (d)—d 点.

图 10 为试样表面断口附近微观组织 , 退火组织转变为铸态组织. 在断口区域 , 枝晶偏析严重 , 树枝晶网胞粗大. 断口附近有一明显裂纹 , 由宽度方向的外侧向内侧延伸. 裂纹附近铸态组织为细小等轴晶 , 断口与裂纹中间部分区域依然保持与图 9d 类似的退火组织.

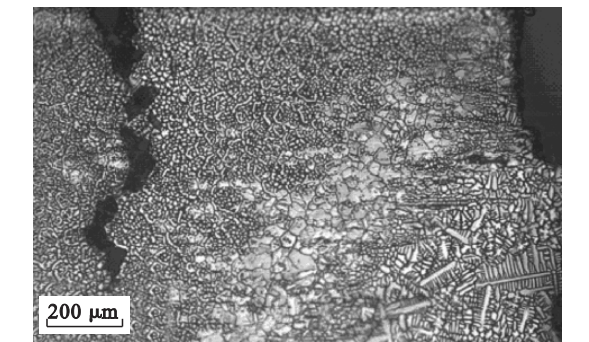


图 10 试样表面断裂区域微观组织
Fig. 10 Microstructure of surface fracture region

图 11 为仅通电未拉伸的情况下 , 黄铜试样表面的微观组织. 电流密度为 225 A/mm^2 , 通电持续时间为 1 s. 在高密度脉冲电流作用下 , 试样中部瞬间熔化断裂 , 试样温度下降 , 通过表面抛光腐蚀 , 发现试样表面晶粒形状保持完好 , 与初始未通电时晶粒尺寸大小形状一致无变化 , 这与图 10 所示的电脉冲拉伸试样存在明显区别. 因此 , 温度的骤然升降不能解释组织变化的原因.

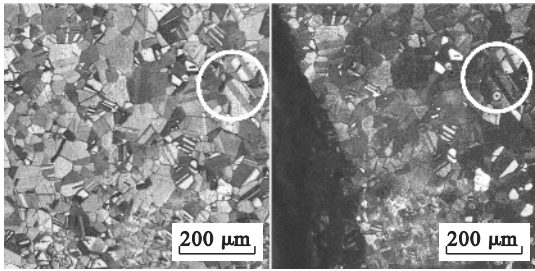


图 11 225 A/mm² 脉冲电流下材料组织变化
Fig. 11 Microstructure under electric pulse of 225 A/mm²

铜合金在拉伸的过程中 ,晶体内部发生畸变 ,位错储存了能量 ,并随着拉伸的进行畸变能不断增加 ,阻碍滑移的作用越大 ,强度越高. 脉冲电流能够促进变形积攒的位错滑移 ,加快位错攀移进入晶界 ,增大亚晶角度. 同时 ,黄铜晶界处的第二相与杂质逐渐溶入晶粒中后 ,晶粒的长大摆脱了他们的钉扎阻碍作用 ,总界面自由能降低促使晶粒互相吞并并长大. 断裂区域的铸态组织形成 ,由于断裂区域的温度达到融化临界温度(820 ℃) ,不断变形引起的畸变能也为铸态组织长大提供了条件 ,断裂处畸变能最大 ,因此铸态树枝晶晶粒尺寸最大.

在枝晶偏析和细密组织之间 ,存在没有完全转化的晶粒 ,这可能是因为局部裂纹引起脉冲电流密度集中在裂纹附近横截面积更小区域 ,相应的远离裂纹位置电流密度减小. 此外 ,材料的温度升高和脉冲电流作用之间有微小滞后^[12] ,引起局部地区的温度升高较为缓慢 ,脉冲电流作用引起试样在温度峰值停留时间极短(< 0. 1 s)没有达到足够的温度. 在裂纹出现区域 ,电流产生的热量没有来得及完全扩散该区域 ,随后断开 ,导致中间区域的微观组织变化略慢于附近区域 ,因此保留了部分完好晶粒.

3 结 论

- 1) 脉冲电流的作用导致黄铜的流动应力出现瞬间下降和上升. 脉冲持续时间越长 ,材料的抗拉强度越低.
- 2) 脉冲电流产生的峰值温度引起黄铜应力回复值越明显 ,当峰值温度高于 600 ℃ 时 ,应力回复值与未拉伸时的屈服强度接近.
- 3) 脉冲电流引起拉伸下的黄铜表面晶粒组

织发生明显再结晶 ,越靠近断裂区域 ,晶粒越大 ,再结晶越明显 ,晶粒尺寸由原始的 31. 4 μm 增大至 70 μm ,断裂区域出现等轴铸态组织和粗大树枝晶铸态组织.

参考文献 :

[1] Guan L ,Tang G ,Chu P K. Recent advances and challenges in electroplastic manufacturing processing of metals[J]. *Journal of Materials Research* 2011 25(7) :1215 - 1224.

[2] Troitskii O A. Electromechanical effect in metals[J]. *Zheff Pisma Redaktsiiu* ,1969 ,10(1) :18 - 22.

[3] Conrad H. Electroplasticity in metals and ceramics[J]. *Materials Science and Engineering A* 2000 287(2) :276 - 287.

[4] Perkins T A ,Kronenberger T J ,Roth J T. Metallic forging using electrical flow as an alternative to warm/hot working [J]. *Journal of Manufacturing Science and Engineering* , 2007 ,129(1) :84.

[5] 邱胜宝 姚可夫 ,丁红瑜. 脉冲电流频率对冷拔金属线材力学性能的影响[J]. *材料热处理学报* ,2010 ,31(7) : 114 - 118.

(Qiu Sheng-bao ,Yao Ke-fu ,Ding Hong-yu. Effect of frequency of high density pulsing current on mechanical properties of cold drawn metallic wires[J]. *Transaction of Material and Heat Treatment* 2010 31(7) :114 - 118.)

[6] Zhou Y ,Chen G Q ,Fu X S ,et al. Effect of electropulsing on deformation behavior of Ti-6Al-4V alloy during cold drawing [J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China* , 2014 24(4) :1012 - 1021.

[7] Song H ,Wang Z. Grain refinement by means of phase transformation and recrystallization induced by electropulsing [J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China* , 2011 21(21) :353 - 357.

[8] Ross C D ,Irvin D B ,Roth J T. Manufacturing aspects relating to the effects of direct current on the tensile properties of metals [J]. *Journal of Engineering Materials and Technology* 2007 ,129(2) :342.

[9] Dzialo C M ,Siopis M S ,Kinsey B L ,et al. Effect of current density and zinc content during electrical-assisted forming of copper alloys[J]. *CIRP Annals-Manufacturing Technology* , 2010 59(1) :299 - 302.

[10] Fan R ,Magargee J ,Hu P ,et al. Influence of grain size and grain boundaries on the thermal and mechanical behavior of 70/30 brass under electrically-assisted deformation[J]. *Materials Science and Engineering A* ,2013 ,574 (7) : 218 - 225.

[11] Conrad H ,Karam N ,Mannan S. Effect of electric current pulses on the recrystallization of copper [J]. *Scripta Metallurgica* ,1983 ,17(3) :411 - 416.

[12] Tang D W ,Zhou B L ,Cao H ,et al. Thermal stress relaxation behavior in thin films under transient laser pulsing heating [J]. *Journal of Applied Physics* ,1993 73(8) :3749 - 3752.