

文章编号:1673-9981(2007)02-0118-04

热型连铸 Cu-Al-Be 超弹性合金丝 机械性能的初步研究

黄武, 黎沃光, 余业球

(广东工业大学材料与能源学院, 广东 广州 510006)

摘要: 用热型连铸法制备直径 1.2mm 的柱状晶 Cu-Al-Be 丝, 并对其弯曲疲劳性能、冷加工性能及冷加工后热处理组织的变化进行了研究. 试验结果表明: 热处理后, 试样的弯曲疲劳次数达 16 万次以上, 最大拉伸应变量可达 40% 以上; 冷轧变形量约 40% 时, 合金组织发生马氏体相变, 合金失去超弹性, 经热处理后有所恢复, 但最大应变只能达到 1%.

关键词: 热型连铸; Cu-Al-Be; 超弹性; 马氏体相变

中图分类号: TG135.2

文献标识码: A

热型连铸是将定向凝固与连续铸造结合起来的一种新工艺. 它是用加热的铸型代替普通的结晶器, 使铸件定向凝固, 获得单晶或柱状晶组织^[1]. 该工艺可终形铸造出所需形状、尺寸的合金丝材, 且丝材具有光滑的表面^[2]. 柱状晶组织可消除记忆合金的晶界应力集中, 使合金的力学性能及记忆性能接近单晶组织. 用这种方法制备的具有柱状晶组织的 Cu-Al 系合金已取得令人瞩目的成果^[1,3].

对热型连铸法制备的 Cu-Al-Ni 合金丝材国内外作了很多研究, 用这种方法制备的 Cu-Al-Ni 合金丝具有较好的表面质量和超弹性能, 但是冷加工性能很差. 焊接时在高温下会析出 γ_2 相, 使合金变硬, 变脆^[4].

Cu-Al-Be 合金的单晶组织具有非常好的超弹性能和弯曲疲劳性能^[5-7], 但单晶合金的制取很困难, 难以应用于工业生产, 而采用热型连铸法制备柱状晶 Cu-Al-Be 合金, 在实践中是可行的. 本文采用热型连铸法制取 Cu-Al-Be 合金丝, 并对其弯曲疲劳性能、冷加工性能及冷加工后组织形貌的变化进行了初步研究.

1 试验

1.1 试样的制备

采用水平式热型连铸法制备试样, 铸型温度为 1060℃, 连铸速度为 200mm/min, 其原理见文献 [1]. 试样成分: $w(\text{Al}) = 11.5\%$, $w(\text{Be}) = 0.7\%$, 余量为铜, 丝径为 1.2mm.

1.2 弯曲疲劳试验

以电机驱动压杆作往复运动, 使热处理后的试样绕直径 20mm 的轴反复做 90° 的弯曲运动, 弯曲频率 9 次/min. 根据公式 $\epsilon = \frac{d}{2} \left(\frac{1}{R_{\min}} - \frac{1}{R_0} \right)$, 计算最大应变^[5], 式中 d 为丝径, R_{\min} 和 R_0 分别为合金丝的最小曲率半径和弯曲前的初始曲率半径. 本试验 $R_{\min} = 10\text{mm}$, $R_0 = \infty$, $d = 1.2\text{mm}$, 故得出 $\epsilon = 6\%$.

1.3 拉伸及冷轧试验

在 WAW-500C 液压控制万能实验机上进行拉伸试验. 试验温度为 30℃, 将热处理后的试样加载直至拉断, 记录其应力应变.

在上下辊间隙可调的双辊轧机上进行冷轧试验. 将直径 1.2mm 的合金丝轧成厚度 0.7mm 的带

收稿日期: 2006-12-04

作者简介: 黄武(1976-), 男, 湖南邵阳人, 硕士研究生.

材. 根据公式 $\epsilon = \frac{|l-l_0|}{l_0}$, 可计算冷轧压缩变形量, 其中 l 为变形后的厚度, l_0 为原始厚度. 本试验 $l_0 = 1.2\text{mm}$, $l = 0.7\text{mm}$, 可得出 $\epsilon = 41.7\%$. 冷轧后试样分别在 200, 400, 550, 600, 700°C 保温 1h, 观察其组织变化.

2 试验结果及讨论

2.1 弯曲疲劳试验

材料的疲劳失效与由材料表面粗糙引发的细微裂缝或材料内部的夹杂及析出物有关, 在疲劳过程中马氏体相界的移动也会导致记忆合金疲劳失

效^[5]. 试样的弯曲疲劳试验结果列于表 1.

由表 1 可以看出, 试样 2 的疲劳次数接近单晶 Cu-Al-Be 合金, 远高于 Cu-Al-Ni 超弹性合金丝 (25000 次). 这是由于热型连铸合金丝的表面非常光滑, 且快速凝固可使合金组织成为均匀平直的柱状晶, 柱状晶晶界对疲劳裂纹的扩展有阻隔作用^[8]; 同时合金中的 Be 能提高其抗弯曲疲劳强度, 因为 Be 成分的增加能降低马氏体相变温度, 提高 β 母相的稳定性^[9]; 经热处理后的试样, 由于空位浓度趋于平衡, 大大消除了内应力^[6], 弯曲疲劳性能与铸态相比有较大改善. 在弯曲疲劳试验过程中检测试样的弯曲角, 测得试样在卸载后保持平直, 表明试样的应变恢复率达 100%.

表 1 弯曲试验结果

Table 1 The result of bending test

试样	热处理条件	疲劳次数/次
1	700°C 保温 5min, 空冷	161190
2	750°C 保温 15min, 淬水, 200°C 时效 15h	168480
3	铸态	50283

2.2 拉伸试验

拉伸试验结果见图 1, 图 1(a) 为铸态试样, 图 1(b) 为热处理后试样. 图 1(b) 中曲线 1 的热处理条件为: 750°C 保温 15min, 淬水, 200°C 时效 15h; 曲线 2 的热处理条件为: 750°C 保温 15min, 淬水, 300°C 回火.

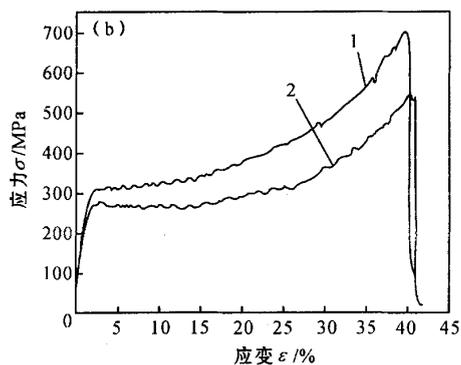
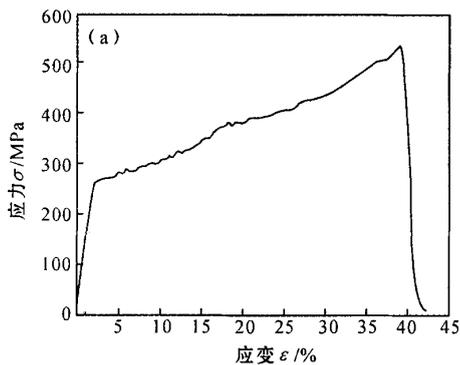


图 1 试样拉伸曲线

Fig. 1 Tensile curves of specimens

由图 1 可以看出, 热处理后的试样和铸态试样的应力-应变曲线大致相似. 在应力 250~300 MPa 时曲线出现急骤拐点, 这是由于诱发了 β' (18R) 相马氏体; 柱状晶中不同晶粒位向不同, 产生马氏体变体所需的应力也不同, 所以应力-应变曲线向上倾斜. 由图 1(b) 可知, 热处理后试样的拉伸曲线更趋于水平, 这是因为热处理使合金组织更单一和均匀化, 空位减少; 曲线有锯齿状波动, 与单晶 Cu-Al-Be

拉伸试验的曲线相似, 这是由于合金内存在一些易迁移的空位, 这些空位又会影响到 β 马氏体相界面的移动性, 从而产生一些不稳定的情形^[7]; 曲线 2 比曲线 1 低, 这是因为试样再经 300°C 回火处理后空位及位错进一步减少, 更容易发生马氏体相变. 由上述可知, 柱状晶超弹性 Cu-Al-Be 合金与单晶 Cu-Al-Be 合金有相似的机械性能.

Cu-Al-Ni 合金丝的拉伸曲线中有两个明显的

平台^[10],合金丝在拉伸中依次经 $\gamma_1' \rightarrow \beta_1'' \rightarrow \alpha_1'$ 相变,有不同的拉伸性能特征,该合金的最大拉伸应变小于20%^[4].而在Cu-Al-Be合金丝的拉伸曲线中看不到明显的平台,合金在10%应变后母相全部相变为 β' (18R)相马氏体,并且开始出现另一种 α' (6R)相马氏体^[7],这两种马氏体相有相似的拉伸性能,直到应变为40%以上时,Cu-Al-Be合金才开始断裂.因此,Cu-Al-Be合金丝比Cu-Al-Ni合金丝有更好的塑性加工性能.

2.3 冷轧结果及其组织形貌

图2(a)为铸态试样的组织形貌.由图2(a)可

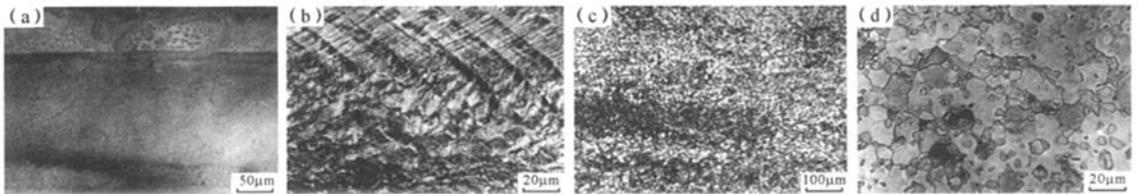


图2 热型连铸Cu-Al-Be丝的组织形貌

(a)铸态试样;(b)冷轧试样;(c)冷轧后550℃退火试样;(d)冷轧后600℃退火试样

Fig. 2 Morphology of heated mold continuous casting Cu-Al-Be alloys

(a) as cast wires; (b) after cold rolling; (c) cold rolled wires after 550°C annealing; (d) cold rolled wires after 600°C annealing

由图2(c)可知,经550℃退火后消除了部分应力,部分马氏体向 β 母相回复,但在晶界处有 α 相析出,并发生再结晶,柱状晶组织受破坏.因此,合金超弹性很低,最大应变只有1%.如果继续加热至600℃或700℃后,再结晶加剧,形成粗大的等轴晶,合金组织完全失去柱状晶的特征,试样变得很脆,见图2(d).因此,冷轧后如何使马氏体发生逆相变回复为 β 相,而又保持柱状晶组织仍是值得研究的问题.

3 结论

经热处理后,Cu-Al-Be超弹性合金弯曲疲劳次数达16万次以上,应变恢复率为100%;拉伸试验的最大应变量可达40%以上;在冷轧应变约40%时,合金组织发生马氏体相变,使合金失去超弹性,经热处理后有部分马氏体回复,弹性有一定程度的恢复,但是由于发生了再结晶,破坏了柱状晶组织,力学性能大大降低,最大应变量只有1%.

见,铸态合金丝由平直的柱状晶组成,其组织为单一的 β 相.图2(b)为冷轧试样纵截面的组织马氏体相变,下方是试样表面.由图2(b)可知,试样的中部马氏体变形小,为片状马氏体并以一定角度整齐地排列,而表面层马氏体变形大,破碎后以不同的角度错开排列.这是由于冷轧时对合金施加外力,使合金产生很大的变形,在应力诱发下 β 母相转化为 β 相马氏体.马氏体相变有24种不同的变体,它的形成与应力有关,且应力不同组织所发生的变化也不同.

参考文献:

- [1] 黎沃光,陈先朝,余业球,等.热型连铸法制取Cu-Al-Ni形状记忆合金丝[J].功能材料,2000,31(6):605-607.
- [2] 舟久保,熙康.形状记忆合金[M].北京:机械工业出版社,1992:9.
- [3] 余业球,黎沃光,陈先朝. Cu-Al-Ni形状记忆合金的热型连铸[J].特种铸造及有色合金,2000(1):20-21.
- [4] 尹占华.热型连铸Cu-Al-Ni形状记忆合金的性能研究[D].广州:广东工业大学,2004.
- [5] SIREDEY N, HAUTCOEUR A, EBERHARDT A. Lifetime of superelastic Cu-Al-Be single crystal wires under bending fatigue[J]. Materials Science and Engineering A, 2005, 396: 296-301.
- [6] SIREDEY N, EBERHARDT A. Fatigue behavior of Cu-Al-Be shape memory single crystals[J]. Materials Science and Engineering A, 2000, 290: 171-179.
- [7] GONZALEZ C H, DE ARAÚJO C J, QUADROS N F, et al. Study of martensitic stabilisation under stress in Cu-Al-Be shape memory alloy single crystal[J]. Materials Science and Engineering A, 2004, 378: 253-256.
- [8] 蔡莲淑,余业球,黎沃光.超弹性柱晶组织CuAlNi合金丝的弯曲疲劳[J].金属功能材料,2006,13(3):15.

[9] 芦笙. Cu-Al-Be 形状记忆合金的性能及组织研究[D].

南京:东南大学,2002.

晶粒长大的阻碍作用[J]. 广东有色金属学报, 2006,16

(1):31-35.

[10] 罗继辉,黎沃光,余业球. Ti 对热型连铸 Cu-Al-Ni 合金

Research in mechanical properties of heated mold continuous casting Cu-Al-Be super-elastic alloy wires

HUANG Wu, LI Wo-guang, YU Ye-qiu

(Faculty of Materials and Energy, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China)

Abstract: The Cu-Al-Be super-elastic wires are produced by heated mold continuous casting process and tested by cyclic bending, tensile, and rolling experiments to study their fatigue property, cold working properties and microstructure after cold working. The results are as follow: The bending fatigue lifetime reaches 168,480 cycles after heat treatment. The maximum elongation rate is 42%. When the reduction rate reaches 40% through cold rolling, martensitic transformation occurs and the super-elasticity of wires decreases, accordingly the maximum strain reaches only 1% even after the heat treatment.

Key words: heated mold continuous casting; Cu-Al-Be; super-elasticity; martensitic transformation