

热型连铸超弹性 Cu-Al-Mn 合金的冷加工性能

于 能, 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: 通过冷轧和拉伸试验及金相分析, 研究了 Cu-Al-Mn 形状记忆合金的冷加工性能。结果表明, 经 800℃保温 15 min 并作固溶处理, 再在 550℃下保温 60 min, 此时在 β 母相上析出较大的 α 相颗粒, 合金的冷加工性能最好, 其冷轧变形率为 43%, 拉伸应变率为 6.3%。

关键词: 热型连铸; Cu-Al-Mn; 冷加工性能

中图分类号: TG139.6

文献标识码: A

铜基记忆合金是具有很大实用价值且价格低廉的记忆合金, 但其塑性较差, 难以冷加工。尤其是为了提高这类合金抗马氏体的稳定性而提高铝含量时, 其冷加工性能更差, 这在很大程度上限制了其应用^[1]。

Cu-Al-Mn 形状记忆合金是近年开发出来的一种记忆合金, 其母相晶体的有序化程度较低, 在单晶和多晶状态下都具有优良的冷加工性能^[2]。单晶状态的 Cu-Al-Mn 形状记忆合金具有优良的超弹性能和冷加工性能, 但其生产率低, 难以在实际生产中应用。而普通多晶状态的 Cu-Al-Mn 形状记忆合金的残余应变大及应变恢复率低等问题仍没有得到很好的解决^[3]。

由 Cu-Al-10Mn 合金相图^[4]可知, 随温度的降低, 合金的相结构从有序度高的 β 相转变为 B2 结构, 然后再转变为有序度低的 $L2_1$ 结构。通过热处理使合金从有序度高的 β 相转变到有序度低的 $L2_1$ 结构, 可提高合金的冷加工性能。本文采用热型连铸法拉铸出具有柱状晶组织的 Cu-Al-Mn 形状记忆合金丝, 并对经过热处理的 Cu-Al-Mn 形状记忆合金的柱状晶组织的冷加工性能进行了研究。

1 试验方法

1.1 合金丝的热型连铸

热型连铸法^[4]是用加热的铸型代替普通的结晶器, 使铸型内的金属呈液态, 然后用引锭杆将铸件引出, 在铸型外对铸件进行冷却, 使铸件定向凝固, 通过晶粒的竞争生长, 获得单晶或定向凝固组织。

Cu-Al-Mn 形状记忆合金的成分(原子分数)为: 20% Al, 10% Mn, Cu 余量。Mn 以 Cu-Mn 中间合金的形式加入, 熔炼时通入保护气 N_2 , 熔清后搅拌均匀。当铸型温度达到 990℃时, 压下液面控制棒, 使液面升高, 合金液流入铸型, 开动拉拔辊, 将引锭棒缓慢拉出, 把铸件带出铸型, 用水对引出的铸件进行冷却, 实现连续铸造。连铸稳定后将拉铸速度调至 200 mm/min, 制得直径为 3 mm 的合金丝。

1.2 合金的热处理和冷加工

先将合金在 800℃进行固溶处理, 然后在不同的温度下退火、冷轧。冷轧时, 将直径 3 mm 的合金丝依次通过直径 2.86, 2.56, 2.2 和 2 mm 的凹槽, 直至合金丝出现裂纹, 以检测其冷加工性能。用冷轧前后合金丝截面积的缩减率表示合金的冷加工能力。将冷轧后的合金分别在 250, 350, 450 和 550℃下保温 30 min, 以检验其回复能力。

2 试验结果及讨论

2.1 轧前热处理合金的组织形貌

将合金在 800℃保温 15 min 并作固溶处理,使其获得单一 β 相,然后从 250 到 600℃,每隔 50℃作退火处理,保温时间均为 60 min. 在 250℃下作退火处理时,因温度较低,合金的组织保持不变;300℃时

在母相上析出少量贝氏体;在 350℃保温时,析出的贝氏体增多,呈针状和树枝状(图 1(a));在 400℃保温时,贝氏体变得较粗大,且具有较强的方向性(图 1(b));在 450℃保温时,析出的贝氏体减少,开始出现 α 相颗粒(图 1(c));在 550℃保温时, α 相颗粒变大(图 1(d));在 600℃保温时,合金出现等轴晶组织.

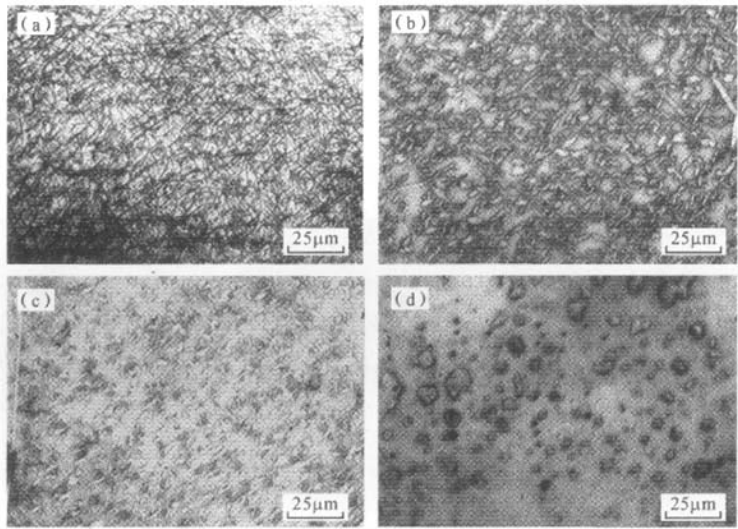


图 1 不同热处理温度下合金的组织形貌
(a)350℃;(b)400℃;(c)450℃;(d)550℃

Fig. 1 Structure in different heat-treatment temperature

2.2 冷轧试验分析

合金在不同热处理工艺下的最大变形率列于表 1. 由表 1 可知,在 550℃保温 60 min 时,合金变形

率最大,为 43%;在 400℃保温 60 min 时,合金的变形率最小,仅为 10.1%. 从上述对金相组织的分析结果可知,合金的冷加工性能随贝氏体组织的出现及变粗大而变差; α 相的出现及变粗大可改善合金的冷加工性能.

2.3 轧后热处理合金的组织形貌

冷轧后,在压应力的作用下合金组织由 β 相转变成马氏体,合金的超弹性消失. 为恢复合金的超弹性,需对合金进行轧后热处理以消除马氏体. 将冷轧后的合金分别在 250, 350, 450, 550℃下保温 30 min,其金相组织如图 2 所示. 在 250℃保温时,由于温度较低,马氏体还大量存在,其基本形态不变(图 2(a));热处理温度升高到 350℃时,马氏体组织变得粗大(图 2(b));450℃时马氏体发生分解,并开始逐渐消失,这是因为在该温度下合金中的马氏体开

表 1 最大冷轧变形率及拉伸应变率

Table 1 The most reduction rate and elongation rate

热处理工艺	最大冷轧 变形率/%	最大拉伸 应变率/%
250℃保温 60min	28.7	5.9
300℃保温 60min	23.9	5.2
350℃保温 60min	21.6	4.9
400℃保温 60min	10.1	2.6
450℃保温 60min	23.8	5.1
500℃保温 60min	26.5	5.7
550℃保温 60min	43	6.3
600℃保温 60min	18.6	3.7

始转变为 β 母相(图 2(c));550℃时出现等轴晶,原来的柱状晶消失(图 2(d)).由此可知,合金的再结

晶温度为 450~550℃.

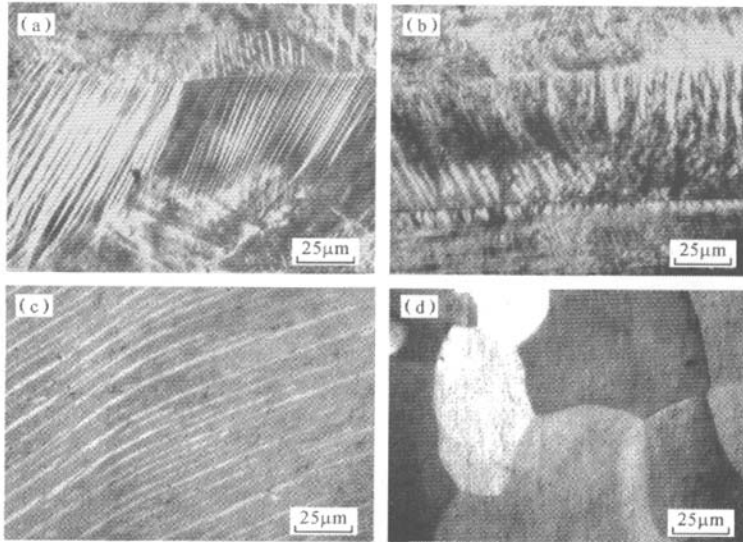


图 2 轧后不同热处理温度下合金的组织形貌

(a)250℃; (b)350℃; (c)450℃; (d)550℃

Fig. 2 Structure in different heat-treatment temperature after cold-rolling

2.4 拉伸试验分析

不同热处理条件下合金的拉伸应变率列于表 1. 先将合金在 800℃保温 15 min 并作固溶处理, 再在 550℃保温 60 min, 此时合金的拉伸应变率最大, 为 6.3%, 合金断裂时的抗拉强度为 310 MPa. 图 3 是合金在这一热处理状态下的拉伸曲线. 拉伸时, 首先是合金母相的弹性变形, 在曲线上为第一段直线, 随后在拉伸曲线上出现了明显的转折点, 表明产生了应力诱发马氏体, 随着应变量的增加, 应力缓慢增加直至合金拉伸断裂. 曲线第二段的斜率没有变化, 是由于柱状晶因不同晶粒相对于拉伸轴取向关系的不同, 达到马氏体诱发应力的抗应力不同所致.

柱状晶组织合金的拉伸性能与单晶相比有一定的差距, 单晶 Cu-Al-Mn 形状记忆合金在[001]方向循环拉伸和压缩时, 超弹应变达 10%, 并且在循环拉伸和压缩过程中, 仅在第一次循环中有 0.3% 的残余应变, 在其后的循环中残余应变均为零, 应力-应变曲线是封闭的^[6].

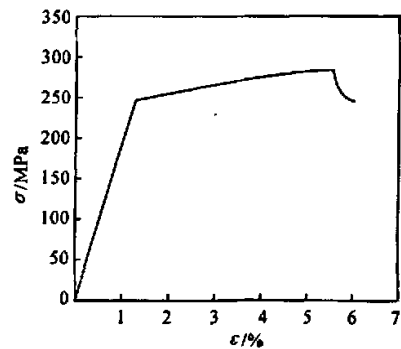


图 3 Cu-Al-Mn 合金应力-应变曲线

Fig. 3 Stress-Strain curve of CuAlMn alloy

3 结 论

(1) 热型连铸 Cu-Al-Mn 记忆合金在 800℃保温 15 min 并作固溶处理, 随后于 550℃保温 60 min, β 母相析出许多较大的 α 相颗粒, 这时合金的冷加工性能最好, 冷轧变形率高达 43%, 拉伸应变率为 6.3%.

(2) α 相的析出改善了合金的冷加工性能,而贝氏体的析出恶化了合金的冷加工性能。

参考文献:

- [1] 李周,汪明朴,徐根应,等. Cu-18.4Al-8.7Mn-3.4Zn-0.1 记忆合金冷加工性能[J]. 矿冶工程,2002,22(1): 90-91.
- [2] SUTOU Y, OMRI T, WANG J, et al. Characteristics of Cu-Al-Mn-based shape memory alloys and their applications[J]. Materials Science and Engineering A, 2004, 378, 278-282.
- [3] SUTOU Y, OMRI T, YAMAUCHI K, et al. Effect of grain size and texture on pseudoelasticity in Cu-Al-Mn-based shape memory wire[J]. Acta Materialia, 2005, 53, 4121-4133.
- [4] SUTOU Y, KAUNUMA R, ISHIDA K. Effect of alloying elements on the shape memory properties of ductile Cu-Al-Mn alloys[J]. Material Science and Engineering A, 1999, 273-275, 375-379.
- [5] 黎沃光,陈先朝,余业球,等. 热型连铸法制取 CuAlNi 形状记忆合金丝[J]. 功能材料, 2000, 31(6): 605-607.
- [6] HIROYUKI K, TOSHIHISA O, SATOSHI H, et al. Cyclic stress-strain response of superelastic Cu-Al-Mn alloy single crystals[J]. Material Science and Engineering A, 1999, 264, 245-253.

The cold-working property of Cu-Al-Mn superelasticalloy cast by heated mold continuous casting

YU Neng, LI Wo-guang, YU Ye-qiu

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

Abstract: The cold-working property of Cu-Al-Mn alloy was investigated using cold-rolling test, metallograph observation, tensile test etc. The results showed that the massive α phases precipitated in the β phases, the deformation rate of alloy was up to 43%; and the elongation rate was up to 6.3% after solution treatment at 800℃ for 15 min, followed by holding at 550℃ for 60 min.

Key words: heated mold continuous casting; Cu-Al-Mn; cold-working property