

旋压成形 CuZn31Si1 硅黄铜衬套的组织性能研究

洪晓露¹ 徐恒秋² 徐 英¹ 黄 涛² 郭亚明² 朱鸿磊¹ 张 将¹ 刘永强¹ 陈大辉¹ 彭银江¹
(1.中国兵器科学研究院宁波分院; 2.长春设备工艺研究所)

摘 要 采用旋压成形工艺制备 CuZn31Si1 硅黄铜衬套,对比旋压前后衬套的组织与性能,分析其组织演变及强化机理。结果表明,采用旋压成形工艺获得了性能良好的硅黄铜衬套。旋压后衬套的抗拉强度为 638.3 MPa,屈服强度为 543.7 MPa,伸长率为 14.7%,硬度(HB)为 183.3,性能达到国外先进水平。旋压成形后硅黄铜衬套内部产生大量的滑移线、孪晶、碎晶、亚晶等变形组织,晶粒得到细化,小角度晶界数量增加,高强度 β 相以点状形式沿晶界析出,这些共同带来了衬套性能的提高。

关键词 旋压成形; 硅黄铜衬套; 组织与性能

中图分类号 TG146.1⁺1;TG113.25 **文献标志码** A

DOI:10.15980/j.tzzz.2021.12.011 **开放科学(资源服务)标识码(OSID):**



Microstructure and Properties of CuZn31Si1 Silicon-brass Bushings by Spinning Forming

Hong Xiaolu¹, Xu Hengqiu², Xu Ying¹, Huang Tao², Guo Yaming², Zhu Honglei¹,
Zhang Jiang¹, Liu Yongqiang¹, Chen Dahui¹, Peng Yinjiang¹
(1.Ningbo Branch of China Ordnance Academy; 2.Changchun Institute of Equipment and Process)

Abstract: The silicon brass bushings were prepared by spinning. The microstructure and properties of the bushing before and after spinning were compared, and the microstructure evolution and strengthening mechanism were analyzed. The results indicate that silicon brass bushing with excellent performance was obtained by spinning process. After spinning, the tensile strength, yield strength, elongation and Brinell hardness reach up to 638.3 MPa, 543.7 MPa, 14.7% and 183.3 HB, respectively, which can be comparable to the foreign advanced level. Large amounts of deformation structures such as slip lines, twins, broken crystals, and sub-crystals are generated in the silicon brass bushing. The grains are refined while the number of small angle grain boundaries is increased, and the β phase with high strength is precipitated along the grain boundary in form of dots, which synergistically contribute to the improvement of material strength and hardness.

Key Words: Spinning Forming, Silicon Brass Bushings, Microstructure and Properties

衬套是发动机的主要配套件,用来保护轴类零件,以减少轴与座的磨损。由于在运行过程中还要不断承受高频交变应力,衬套的服役条件极为恶劣。因此,对衬套材料的性能要求很高^[1~3]。铜合金是制备衬套的主要材料之一。国内铜合金衬套主要采用锡青铜、磷青铜等,其室温抗拉强度为 580~670 MPa^[4],但其价格较为昂贵,成形方式多为实心棒料机加工或锻压后机加工,材料利用率低、能耗大,生产成本低。

硅黄铜合金因含有 Si 元素,具有较好的铸造性能,含 Si 铸件具有良好的延展性,抗磨损能力也较锡青铜高很多。同时,硅黄铜的线膨胀系数与铝合金的线膨胀系数相近,可改善衬套与铝合金零部件之间因温度变化

造成的松动情况。基于上述优点,硅黄铜合金成为衬套选材的新方向,可有效解决金属锡资源短缺和锡青铜铸件成本高等问题。国内外研究者已对其展开了大量的研究^[5~9]。德国一公司采用半连续铸造-热挤-冷拔-退火工艺制备硅黄铜衬套,室温抗拉强度为 609 MPa,屈服强度为 538 MPa,伸长率为 12.2%,硬度(HB)为 186,其市场占有率在 80%以上。国内有研究者通过棒料挤压方式制备出的硅黄铜衬套,其最高抗拉强度仅为 470 MPa^[10],与国外先进水平存在较大差距,亟需开辟新工艺来强化。

郝唯岑^[11]研究了不同加工方法下衬套的性能,发现通过旋压成形的衬套材料的力学性能较高。旋压是

收稿日期:2021-09-07;修改稿收到日期:2021-09-26
基金项目:进口替代专项开放创新基金资助项目(TDZX-17-027-2);稳定支持专项开放创新项目
第一作者简介:洪晓露,女,1988 年出生,助理研究员,浙江宁波(315103),E-mail:hxl614517@163.com
引用格式:洪晓露,徐恒秋,徐英,等. 旋压成形 CuZn31Si1 硅黄铜衬套的组织性能研究[J]. 特种铸造及有色合金,2021,41(12):1 504-1 507.
HONG X L, XU H Q, XU Y, et al. Microstructure and properties of CuZn31Si1 silicon-brass bushings by spinning forming[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2021, 41(12):1 504-1 507.

一种比较先进的塑性成形加工工艺,可通过位错增殖达到加工硬化的效果,兼有锻造、挤压、拉伸、弯曲、环压、横轧、滚压等工艺特点,具有变形条件好、产品性能高、尺寸公差小、材料利用率高、制品范围广、可制成整体无缝空心回转体零件等特点^[12~14]。然而,通过旋压成形工艺来制备硅黄铜衬套却鲜有报道。因此,本课题采用旋压成形工艺制备 CuZn31Si1 硅黄铜衬套,对比研究旋压前后衬套的组织性能,分析其组织演变及强化机理,以期在旋压成形在硅黄铜衬套的制备提供参考。

1 试验材料及方法

1.1 试验材料

CuZn31Si1 硅黄铜的化学成分见表 1。Zn、Si 为主要合金化元素,杂质元素 Pb 含量控制在 0.1% 以下。

表 1 CuZn31Si1 硅黄铜化学成分

Tab.1 Chemical composition of CuZn31Si1 silicon brass %			
wt%			
Zn	Si	Pb	Cu
31.06	0.935	0.068	其余

1.2 旋压成形工艺

旋压前的管坯采用水平连铸制备,内径为 56 mm,厚度为 10 mm。经两道次旋压壁厚减小至 5.8 mm,内径不变。第 1 道次变形量为 25%,第 2 道次变形量为 20%。旋压采用反旋方式进行,即材料流动方法与旋轮进给方向相反,见图 1。旋压件的长度超过芯模。旋轮采用一对双锥面式旋轮,错距安装,进给比为 0.2 mm/r,管坯预热温度为 200±5 ℃。旋压后的衬套毛坯见图 2,

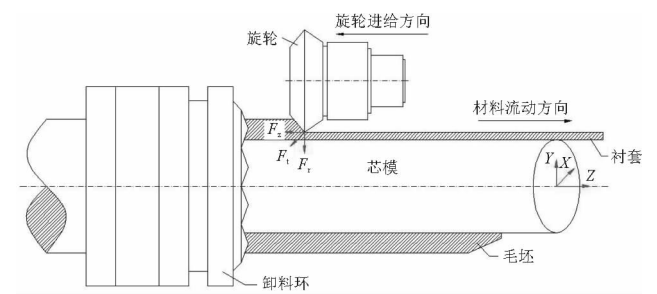


图 1 旋压工艺示意图

Fig.1 Schematic diagram of spinning process

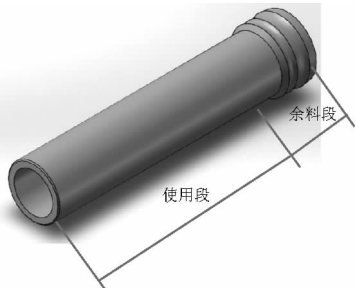


图 2 旋压衬套结构模型图

Fig.2 Structure model of spinning bushing

衬套毛坯的可使用段远长于余料段,材料利用率增加。

1.3 性能表征

取衬套毛坯进行镶嵌磨抛,制成标准金相试样,采用 ZEISS Imager A2m 金相显微镜观察合金的显微组织,浸蚀剂为三氯化铁盐酸水溶液(三氯化铁、盐酸、水体积比为 3 : 10 : 100),物相分析采用 SmartLab X 射线衍射仪,电压为 40 kV,电流为 150 mA,扫描速率为 8°/min,扫描角度范围为 10°~90°;晶粒尺寸分布及取向采用 JSM-7900F 场发射扫描电镜下 EBSD 分析;抗拉强度及伸长率采用 E45.105 微机控制电子万能试验机进行测试;硬度用 HB-3000 布氏硬度计进行测试,钢球直径为 5 mm,载荷为 2.5 N,保压 15 s。

2 试验结果及分析

2.1 相成分

在黄铜中加入少量的合金化元素,可近似认为这些元素替代了部分 Zn,可换算成合金的 Zn 当量。Zn 当量 X 换算如下:

$$X = \frac{A + \sum C_n}{A + \sum C_n + B} \times 100\% \tag{1}$$

式中,A、B、C 分别为黄铜中 Zn、Cu 以及合金元素的质量分数,% ;n 为加入元素的 Zn 当量系数。

Si 的 Zn 当量系数为 10,根据上述换算公式计算出 CuZn31Si1 硅黄铜的 Zn 当量为 37.6%。因此,CuZn31Si1 硅黄铜相当于 Zn 的质量分数为 37.6% 的二元黄铜。

根据 Cu-Zn 相图可知,CuZn31Si1 硅黄铜中主要为 α 相和 β 相。α 相为面心立方结构,具有良好的塑性,但硬度和强度较低。β 相是以电子化合物 CuZn 为基的固溶体,是 α 相和熔融金属间进行包晶反应所产生的体心立方结构的产物,强度和硬度较高,同时塑性较低。

对旋压前后的硅黄铜衬套合金进行 XRD 物相分析,见图 3。可以看出,旋压前后的硅黄铜合金相组成均为 α+β 相,这与 Cu-Zn 相图相符。但是旋压前硅黄铜中的 β 相峰值极低,几乎不可见,而旋压后 β 相的峰

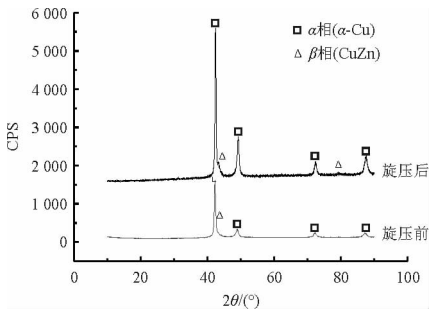


图 3 硅黄铜 XRD 图谱

Fig.3 XRD patterns of Si brass

值较旋压前高,可见旋压后合金中的 β 相明显增加。

2.2 显微组织

图 4 为旋压前后硅黄铜衬套的显微组织。可以看出,基体为 α 固溶体,黑色点状相为 β 相。旋压前,水平连铸硅黄铜管坯的显微组织为 α 固溶体和沿晶界析出

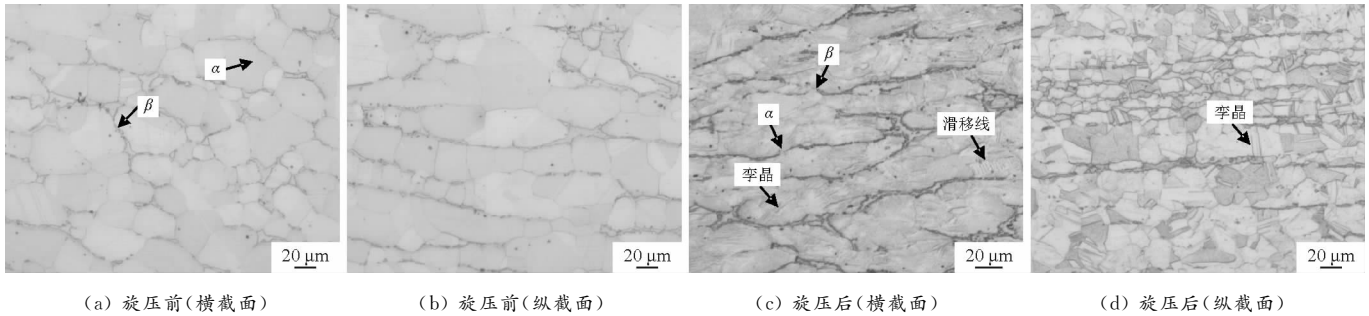


图 4 CuZn31Si1 硅黄铜衬套显微组织
Fig.4 Microstructure of silicon-brass bushing

和变形孪晶。

采用 EBSD 对旋压前后硅黄铜衬套纵截面的晶粒取向、晶界角和晶粒尺寸进行分析,见图 5 和图 6。可以看出,旋压前晶粒分布均匀,尺寸多在 15~40 μm 之间,且相邻晶粒的晶界角度 $>10^\circ$,基本为大角度晶界。而旋压后晶粒得到明显细化,且存在大量的碎晶和亚晶,小角度晶界(晶界角度 $<10^\circ$)数量急剧增加。

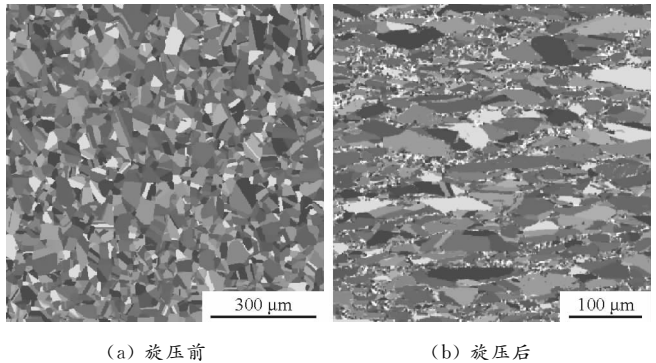


图 5 旋压前后 CuZn31Si1 硅黄铜衬套晶粒取向照片
Fig.5 Grain orientation images of silicon brass bushing before and after spinning

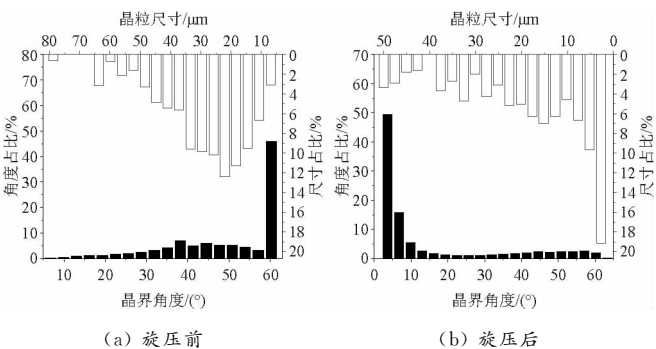


图 6 旋压前后晶界角及晶粒尺寸分布图
Fig.6 Grain boundary angle and grain size distribution before and after spinning

的 β 相,其含量很低;晶粒为等轴晶,横截面和纵截面上所观察到的晶粒尺寸差别较小,各向异性不明显。旋压后,晶粒被压扁拉长,部分晶粒已成纤维状,在纵截面上沿旋压方向呈条状分布, β 相明显增多且沿晶界聚集。同时,可以观察到旋压后晶粒内部产生了大量的滑移线

2.3 力学性能

表 2 为旋压前后硅黄铜衬套本体取样的力学性能。可以看出,旋压前合金的抗拉强度为 422.3 MPa,屈服强度为 163.7 MPa,伸长率为 50.3%,硬度(HB)为 85.9。旋压后,合金的抗拉强度为 638.3 MPa,屈服强度为 543.7 MPa,伸长率为 14.7%,硬度(HB)为 183.3。抗拉强度、屈服强度和硬度(HB)较旋压前提高了 51.1%、232.1%和 113.4%,与德国维兰德公司的硅黄铜衬套力学性能相当。虽然伸长率下降,但仍比维兰德公司的硅黄铜衬套高(维兰德公司的硅黄铜衬套伸长率在 12.2%左右),可满足使用要求。由此可见,采用水平连铸+旋压,在制备硅黄铜衬套上是可行的。

表 2 旋压前后硅黄铜衬套本体取样的力学性能
Tab.2 Mechanical property test results of silicon brass bushings before and after spinning

类型	试样	σ_b /MPa	$\sigma_{0.2}$ /MPa	δ /%	硬度(HB)
旋压前	1	409	150	53.5	86.1
	2	408	153	48.5	84.9
	3	450	188	49	86.7
	平均值	422.3	163.7	50.3	85.9
旋压后	1	641	546	14.5	181
	2	640	549	15.0	184
	3	634	536	14.5	185
	平均值	638.3	543.7	14.7	183.3
提高幅度/%		51.1	232.1	-70.8	113.4

2.4 分析讨论

2.4.1 组织演变

在旋压过程中,硅黄铜受到较大的塑性变形力。旋压力作用于衬套与旋轮的接触面上,可将其分解为径向旋压力 F_r 、轴向旋压力 F_z 和切向旋压力 F_t ,见图 1。旋压分力计算如下^[15]:

径向旋压力:

$$F_r = K\sigma_m t_0 (D_p f \cot \alpha_p)^{1/2} \quad (2)$$

轴向旋压力:

$$F_z = K\sigma_m t_0 (D_p f \tan \alpha_p)^{1/2} \quad (3)$$

切向旋压力:

$$F_t = K\sigma_m f t_0 \quad (4)$$

式中, σ_m 为合金平均应力; f 为旋轮进给率; t_0 为坯料壁厚; D_p 为旋轮直径; α_p 为工作角; m 、 K 为系数。

席奇豪^[16]指出, 径向旋压力 $F_r >$ 轴向旋压力 $F_z \gg$ 切向旋压力 F_t 。变形区以径向压缩导致轴向和切向的金属流动, 遵循体积不变规律和金属流动最小阻力定律, 产生以塑性流动为主的变形过程。反映在微观组织上, 塑性变形时, 晶粒内部在一定的滑移面上沿受力方向产生滑移, 引起晶粒形状的改变。旋压过程中由于径向旋压力和轴向旋压力占主导作用, 晶粒变形则以径向压扁和沿旋压方向的轴向拉长为主。而随着切向旋压力的作用, 部分晶粒还发生转动。

此外, 由于硅黄铜属于面心立方结构, 层错能较低, 旋压变形过程中形成了大量的滑移线、孪晶等变形组织。晶粒的各向不均匀发展和滑移线、孪晶等交互作用, 不仅使得不同滑移位向的晶粒间相互推挤而破碎, 产生碎晶, 还将大量晶粒分化成很多位向各异的小晶块, 形成了尺寸较小的亚晶, 使晶粒得到细化。而亚晶界均为小角度晶界, 这也是旋压后小角度晶界数量急剧增加的原因^[17~19]。

2.4.2 强化机制

在旋压过程中, 受到不同方向旋压力的影响, 硅黄铜发生塑性变形。位错密度升高且相互缠结, 交互作用增强, 并在变形区域聚集运动。同时, 碎晶、亚晶、孪晶等变形组织的增多, 晶粒尺寸的细化, 都使得晶界数量显著增加。而晶界处原子排列不规则, 分布有大量缺陷, 点阵畸变严重, 且晶界两侧的晶粒取向不同, 在一侧晶粒中滑移的位错不能直接进入相邻晶粒, 变形过程中的位错难以通过晶界而被堵塞在晶界附近。因此, 旋压后的晶界对位错的运动起到钉扎作用, 不能移动的位错数量随着晶界数量的增加而急剧增加, 塑性变形抗力增大, 以致需要更大的外力才能使得位错克服障碍而运动。宏观上则表现为旋压后硅黄铜衬套的强度和硬度显著升高, 材料得到强化^[19]。

另外, 由于旋压前的坯料由水平连铸而成, 水平连铸时冷却速度较快, 抑制了 β 相的形成, 获得几乎单一的、富含 Zn 和 Si 的过饱和 α 固溶体结构。而在 200 °C 旋压后, 由于温度升高, 再加上旋压力的作用, 材料内部畸变能增加, 提高了 Zn 析出的驱动能, 使得 Zn 原子在

位错集结处、小角度晶界处以点状 β 相形式析出。高强硬 β 相的增加也使得硅黄铜衬套的强度和硬度有较大提升。

3 结 论

(1) 采用旋压成形工艺获得了性能良好的 CuZn31Si1 硅黄铜衬套。旋压后其抗拉强度为 638.3 MPa, 屈服强度为 543.7 MPa, 伸长率为 14.7%, 硬度 (HB) 为 183.3。

(2) 旋压成形后 CuZn31Si1 硅黄铜衬套内部产生大量的滑移线、孪晶、碎晶、亚晶等变形组织, 晶粒得到细化, 小角度晶界数量增加, 高强硬 β 相也以点状形式沿晶界析出, 这些都有利于合金强度和硬度的提升。

参 考 文 献

- [1] 王雪, 赵俊生, 孟宏伟, 等. 柴油机连杆衬套磨损的正交试验研究[J]. 润滑与密封, 2017, 42(9): 76-80.
- [2] 颜君衡, 齐鹏, 贾国强. 铝合金活塞销孔镶铜套工艺研究[J]. 内燃机与配件, 2018(15): 35-36.
- [3] 魏满晖, 向建华, 刘健, 等. 材料热衰退下的连杆衬套刚强度特性分析[J]. 内燃机工程, 2020, 41(4): 39-45.
- [4] 席奇豪, 樊文欣, 吕伟, 等. 基于灰色关联度的连杆衬套强力旋压参数优化[J]. 锻压技术, 2016, 41(7): 114-117.
- [5] 查昭, 皮常青. HSi70-2 新型无铅硅黄铜的性能研究[J]. 科技创新与应用, 2015(20): 65-66.
- [6] 王跃臣, 罗艺, 庄晓云. 硅黄铜微观组织观察与成分分析[J]. 材料导报, 2015, 29(5): 397-399.
- [7] 陈一胜, 刘位江, 朱志云, 等. 不同相组成的硅黄铜组织性能的研究[J]. 有色金属科学与工程, 2014, 5(3): 32-37.
- [8] 张伟楠, 徐金富, 常勇强, 等. 热处理对硅锰黄铜中 Mn5Si3 相及合金性能的影响[J]. 中国标准化, 2019(S1): 245-249.
- [9] 张伟楠, 余荣积, 徐金富, 等. 锰硅比对硅锰黄铜中硅锰相的影响[J]. 宁波工程学院学报, 2019, 31(2): 9-12.
- [10] 郭贺冉. 基于 Simufact 对硅黄铜连杆衬套挤压成形工艺及性能的研究[D]. 江西赣江: 江西理工大学, 2020.
- [11] 郝唯岑. 锡青铜 (QSn7-0.2) 连杆衬套多道次旋压成形工艺研究[D]. 太原: 中北大学, 2018.
- [12] 孔义. 旋压技术在汽车零部件制造成形中的应用[J]. 汽车博览, 2019(3): 94-95.
- [13] 凌泽宇, 肖刚锋, 夏琴香, 等. 镍基高温合金锥筒形件拉深旋压成形机理研究[J]. 锻压技术, 2020, 45(2): 100-105.
- [14] 史志文, 杨睿智, 宋丽娟, 等. 国家标准《高强度钢强力旋压工艺规范》研制的必要性和技术概要[J]. 锻压技术, 2020, 45(2): 208-214.
- [15] 赵云豪. 旋压技术与应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2008.
- [16] 席奇豪. 强力旋压 QSn7-0.2 合金微观组织与力学性能的研究[D]. 太原: 中北大学, 2017.
- [17] 徐洪烈. 强力旋压技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 1984.
- [18] 赵志业. 金属塑性变形与轧制理论[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1994.
- [19] 胡庚祥, 蔡珣, 戎咏华. 材料科学基础[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2009.

(编辑: 刘晨辉)