

装备与成套技术

径锻机轴瓦性能分析及工艺研究

何雪龙^{1,2,3}, 马学鹏^{1,2,3}, 黄艳龙^{1,2,3}, 安建军^{1,2,3}, 张旭^{1,2,3},
潘多斐^{1,2,3}, 赵辉翔^{1,2,3}, 师文涛^{1,2,3}

(1. 兰州兰石重工有限公司, 甘肃 兰州 730314; 2. 甘肃省金属塑性成形装备智能控制重点实验室, 甘肃 兰州 730314;
3. 甘肃省大型快锻液压设备技术创新中心, 甘肃 兰州 730314)

摘要: 为提高径锻机轴瓦使用稳定性和使用寿命, 首先, 以 SX13 径锻机为研究对象, 对轴瓦的使用工况进行了详细分析, 并明确了锻造力、转速、润滑等参数。然后, 借助 X 射线衍射仪、CETR UMT-3 型摩擦试验机对轴瓦的结构进行了详细测试, 阐述了巴氏合金、铜合金以及钢背的性能需求。最后, 使用熔铸技术借助成分梯度过渡方法设计了具有双金属结构的轴瓦减摩耐磨材料, 以改善双金属间的结合强度并延长服役寿命, 并通过在双金属材料表面浇注锡基巴氏合金构筑减摩层以进一步提高轴瓦的耐摩擦磨损性能。生产使用表明, 该工艺显著提升了径锻机轴瓦的高承载、抗冲击和耐磨损性能, 为径锻机轴瓦的高质量生产提供了有效保障。

关键词: 径锻机; 轴瓦; 巴氏合金; 铜合金; 双金属材料

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2025.04.024

中图分类号: TG315 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3940 (2025) 04-0201-05

Performance analysis and process research on bearing shell of radial forging machine

He Xuelong^{1,2,3}, Ma Xuepeng^{1,2,3}, Huang Yanlong^{1,2,3}, An Jianjun^{1,2,3}, Zhang Xu^{1,2,3},
Pan Duofei^{1,2,3}, Zhao Huixiang^{1,2,3}, Shi Wentao^{1,2,3}

(1. Lanzhou LS Heavy Machinery Technology Co., Ltd., Lanzhou 730314, China;
2. Gansu Province Key Laboratory of Intelligent Control for Metal Plastic Forming Equipment, Lanzhou 730314, China;
3. Gansu Province Technology Innovation Center for Large-scale Fast Forging Hydraulic Equipment, Lanzhou 730314, China)

Abstract: In order to improve the stability and service life of bearing shell for radial forging machine, firstly, for radial forging machine SX13, the working conditions of bearing shell was analyzed in detail, and the parameters such as forging force, rotation speed and lubrication were clarified. Then, with the help of X-ray diffractometer and CETR UMT-3 friction testing machine, the structure of bearing shell was tested in detail, and the performance requirements of Babbitt alloy, copper alloy and steel based were explained. Finally, a friction-reducing and wear-resistant material for bearing shell with a bimetallic structure was designed by using melting and casting technology with the help of component gradient transition method to improve the bonding strength between the bimetallics and extend their service life, and a friction-reducing layer was constructed by pouring Sn-based Babbitt alloy at the surface of bimetallic material to further improve the friction and wear-resistant performance of bearing shell. Production and use show that this process significantly improves the high load-bearing, impact resistance and wear-resistance of bearing shell for radial forging machine, providing an effective guarantee for the high-quality production of bearing shell for radial forging machine.

Key words: radial forging machine; bearing shell; Babbitt alloy; copper alloy; bimetallic materials

轴瓦是径锻机锻造单元的关键零件, 承担着击打载荷和击打频率的快速转换工作, 是 SX 型、SKK 型、RF 型径向锻造机的核心零件之一^[1]。径锻机轴

瓦在服役过程中面临高频冲击和重载的苛刻工况, 承受着剧烈的摩擦磨损以及巨大的冲击作用, 是径锻机中最易出现故障的零部件之一, 也是制约径向锻造机锻造稳定性和服役寿命的主要部件之一^[2]。

1 工况分析

径锻机采用偏心锻造原理^[3], 利用电机带动齿

收稿日期: 2024-03-13; 修订日期: 2024-06-17

作者简介: 何雪龙 (1986-), 男, 学士, 高级工程师

E-mail: hxl_5358@163.com

轮系驱动 4 个偏心锻造单元同时运动，偏心轴轴向做旋转运动，锤杆做直线往复运动，实现周期性的高频锻打。每个锻造单元的偏心轴上有 4 个轴瓦，其中，2 个轴瓦安装在一个滑块内，与偏心轴中部的凸圆接触并相对轴向运动，另外 2 个轴瓦分别安装于偏心套内，作为偏心轴两端的支撑^[4]，如图 1 所示。

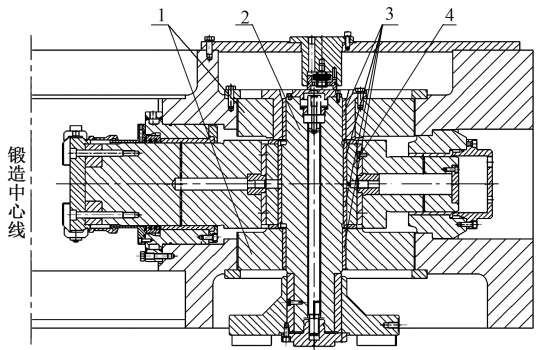


图 1 径锻机示意图
1. 偏心套 2. 偏心轴 3. 轴瓦 4. 滑块
Fig. 1 Schematic diagram of radial forging machine

以 SX13 径锻机为例，安装于滑块内的轴瓦（图 2）外径为 $\Phi 200^{+0.145}_{+0.077}$ mm、内径为 $\Phi 180^{+0.27}_{+0.23}$ mm。安装于偏心套内的轴瓦外径为 $\Phi 185^{+0.145}_{+0.077}$ mm、内径为 $\Phi 165^{+0.27}_{+0.23}$ mm。轴瓦实际工况如下：单个锤杆最大锻造力为 1.6 MN^[5]，偏心轴转速为 620 r · min⁻¹，偏心轴的偏心距为 5 mm，偏心轴表面采用氮化处理，硬度为 62 HRC，润滑采用 100# 闭式工业齿轮润滑油，润滑压力为 0.6 MPa。轴瓦外径 D 为 $\Phi 165$ mm、长度 L 为 119 mm、壁厚 H 为 10 mm，内有油槽。



图 2 轴瓦实物图
Fig. 2 Physical picture of bearing shell

径锻机锻造单元以正弦运动保证被锻造材料的理想变形，且每次变形行程的末端变形速度逐渐降低。1.6 MN 径锻机实际锻造工作时轴瓦只有 1/4 周期受力^[6]，计算单位面积所承受的压力 $P=11.43 \text{ kN} \cdot \text{cm}^{-2}$ ，即 114.3 MPa。轴瓦的滑动速度为 $5.84 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ，采

用 CETRUMT-3 型摩擦试验机，磨件为 GCr15 钢球，半径 R 为 4.75 mm。因为钢球直径与实际轴瓦直径不同，因此轴瓦的实际滑动速度与钢球的实际滑动速度之间存在系数 b ，则压力速度乘积值 $pv=bPV$ ， $b=2R/D$ ，则 $pv=38.43 \text{ (MPa} \cdot \text{m)} \cdot \text{s}^{-1}$ 。润滑油为 100# 闭式齿轮油，运动方式为往复运动，室温条件下在油润滑和干摩擦条件下分别测定试样表面涂层的摩擦因数和磨损体积，最终测得干摩擦时的平均摩擦因数为 0.23，油润滑时的平均摩擦因数为 0.062。

2 轴瓦性能

通过与国外轴瓦产品^[7]对比发现，服役于高频、重载和高磨损等苛刻工况下的国产轴瓦的摩擦磨损性能和使用寿命与之差距明显。原材料的成分设计与性能控制成为制约我国轴瓦性能发挥与提高的主要原因。

2.1 硬度测试

使用 Times 维氏硬度计和布氏硬度计测量轴瓦表面硬度。Times 维氏硬度计的加载力为 10 gf，持续时间为 5；布氏硬度计的加载力为 250 kgf，钢球直径为 $\Phi 10 \text{ mm}$ ，作用时间为 30 s。测得的数据如表 1 所示。

表 1 轴瓦表面硬度
Table 1 Surface hardness of bearing shell

序号	1	2	3	平均值
维氏硬度值/HV	17.90	21.96	27.44	22.43
布氏硬度值/HB	79.6	79.6	79.6	79.6

布氏硬度 H_r 和抗拉强度 R_m 间近似有 $R_m=k \times H_r$ 的关系，其中 k 为系数，对于锡和铅， $k=2.9$ 。由于本测试的材料仅为数十微米厚度的薄层，所测试的布氏硬度压入深度已达基体，反映出布氏硬度为基体与表面层的复合硬度^[6]。对远低于表面层复合硬度的材料，其布氏硬度与维氏硬度接近即为显微硬度，故这里采用维氏硬度作为计算抗拉强度的依据。近似可得表面层材料的抗拉强度为 65.05 MPa。

2.2 X 射线衍射分析铜层和表层

使用 X 射线衍射仪（X-Ray Diffraction, XRD）Rigaku SmartLab 设备对 1.6 MN 径锻机轴瓦试样表面的巴氏合金层进行物相分析，得到的结果如图 3~图 5 所示。

涂层表层主要为 Pb 和 Sn 及其化合物，主要相为 PbSn₄。考虑 X 射线衍射的穿透深度达数十微米，X 射线衍射所检测的结果涉及到亚表层，因而显示

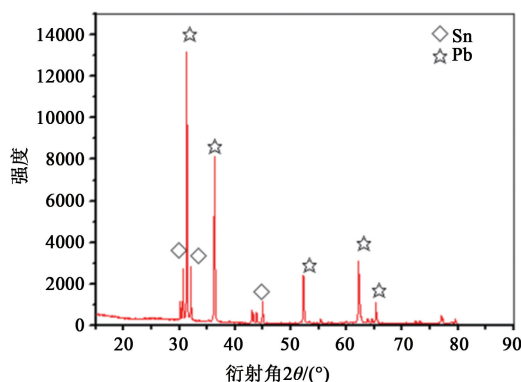


图3 表面涂层的XRD图谱

Fig. 3 XRD pattern of surface coating

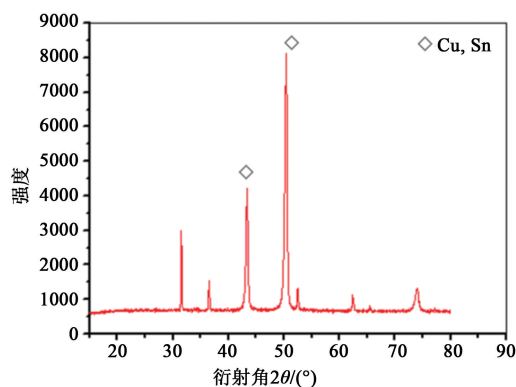


图4 铜层的XRD图谱

Fig. 4 XRD pattern of copper layer

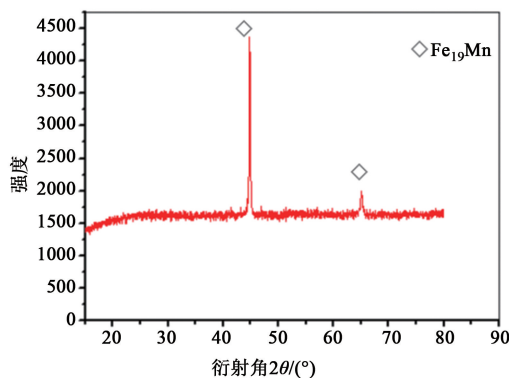


图5 钢层的XRD图谱

Fig. 5 XRD pattern of steel layer

Pb 的强度很高, 亚表层为 PbSn₁₀ 合金。

2.3 扫描电镜观测

使用扫描电子显微镜 S-3000N 对 1.6 MN 径锻机轴瓦进行观测, 利用扫描电镜自带的电子探针 X 射线能谱 (Energy Dispersive Spectroscopy, EDS) 定量分析, 所得结果的相对误差与目标成分的相对含量有关, 穿透深度为几微米。

考虑到实际轴瓦表面通常有一层 Sn 保护层, 结合 X 射线衍射, 该层即为类锡青铜 C51100 (Sn 的

质量分数为 3.5%~4.5%) 或纯铜。

3 轴瓦熔铸技术

在铅青铜合金的制备过程中抑制或消除铅偏析也是解决国产轴瓦性能和寿命的关键点^[8]。优化铸造工艺可以在一定程度上克服铅青铜合金的铅偏析问题, 近年来通过在铅青铜合金中添加铅偏析抑制剂如铈等稀土元素也显示出良好的效果。

钢背/铅青铜双金属材料界面结合强度同样对轴瓦的性能和寿命有着重要影响^[9]。在高频重载的工况下, 双金属材料轴瓦极易发生由于界面结合强度不足而导致的部件性能退化甚至失效问题, 而通过在界面设计具有成分渐变的梯度过渡层是解决此类问题的有效手段。

根据多年径锻机轴瓦的使用经验, 采用熔铸技术借助成分梯度过渡方法设计具有双金属结构的轴瓦减摩耐磨材料, 以改善双金属之间的结合强度并延长服役寿命, 并通过在双金属材料表面浇注锡基巴氏合金构筑减摩层以进一步提高轴瓦的摩擦磨损性能^[10]。通过研究减摩层组成、空间形态分布以及界面结构对材料摩擦磨损性能的影响, 阐明减摩层组成和微观结构对摩擦学性能的作用机制, 建立双金属减摩层的成分设计准则, 确定 1.6 MN 径锻机轴瓦钢背层厚度为 7.6 mm, 内孔镀 PbSn₁₀ 合金厚度为 0.02~0.035 mm, 表面镀锡基巴氏合金厚度为 0.001~0.002 mm, 如图 6 所示。

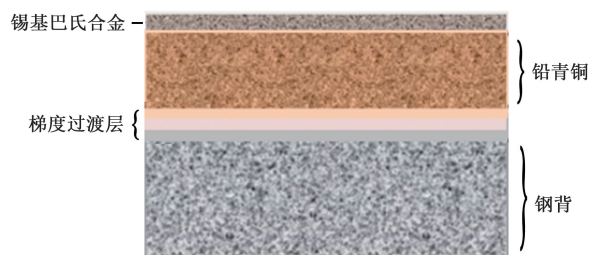


图6 双金属材料示意图

Fig. 6 Schematic diagram of bimetallic materials

3.1 合金元素的选择与熔混

基体选用锡基巴氏合金^[11], 较铅基巴氏合金具有更好的耐蚀性、较低的偏析倾向以及与轴瓦基底更好的键合性和较好的动载能力。巴氏合金的性能是通过元素体现的, 选择合适的合金元素, 可以提高巴氏合金的硬度、耐热性、承载能力和耐磨性, 改善浇铸性能。

(1) 铜元素 (Cu)

Cu 的加入是为了消除严重的比重偏析, 其含量

一般为 3%~5%，微量的铜能溶入 α 固溶体（Sn 基体）并使之强化。当铜的含量超过其在 α 固溶体中的固溶度时，金相组织中则出现 η' 相（ Cu_6Sn_5 ），呈针状或星状分布，其硬度高而且脆性大，它可以成为 SnSb 化合物的结晶核心，从而阻止了 β 相（SnSb）的偏析。当含铜量过大时，脆性的 η' 相增多，将大大降低合金的塑性，容易造成巴氏合金的硬质相脱落而加剧磨损，甚至会因较大的硬质相的脱落而导致轴瓦表面划伤和烧瓦事故。

(2) 镍元素 (Ni)

镍与铜可以形成固溶体，促使了 η' 相的生长，阻滞了 β 相的聚集，但过多的镍将降低合金的流动性，恶合金的铸造性能^[12]。

依据合金元素对巴氏合金性能的影响，选用加入铜、镍等合金元素与传统 11-6 巴氏合金混合，加热熔融。

Sn-Sb-Cu 三元合金在固相线以下物相如图 7 所示，其中 w_{Sn} 、 w_{Cu} 、 w_{Sb} 分别为 Sn、Cu 和 Sb 的质量分数， k 相是通过包晶反应或者共晶反应形成的六方或立方结构金属间化合物。 β' 相是一种固溶体相，具有特定的晶体结构， β' 相与 β 相在结构或形成机制上有一定关联。凝固组织为：针状或星状的 Cu_6Sn_5 (η') 金属间化合物、方形的 SnSb (β) 金属间化合物以及 Cu、Sb 固溶于 Sn 基体。但其凝固组织还受化学成分、加工方法（重力铸造和离心铸造等）和冷却条件等的影响，甚至通过合适的热处理和塑性变形等也能够改变其组织，进而对性能产生影响。

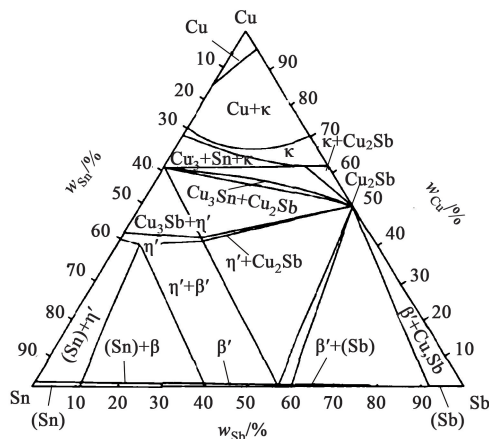


图 7 固相线以下 Sn-Sb-Cu 三元系相图中的相

Fig. 7 Phases in phase diagram of Sn-Sb-Cu ternary system below solid phase line

将已制备好的改性巴氏合金熔液注入坩埚中，

待液态金属开始凝固时，迅速用水冷却，实现硬点相细晶强化。细化晶粒可以提高材料的强度和硬度，同时也可以提高塑性和韧性。强制高速水冷技术在巴氏合金枝晶偏析中可以确保细化晶粒，减轻浇铸残余应力造成的巴氏合金层结合界面强度下降程度，获得高效的巴氏合金无枝晶偏析的浇铸工艺^[13]。

3.2 巴氏合金与钢背界面键合

建立镍栅层隔离方法，探明镍栅层在锡向钢背的扩散和合金化作用。在镍栅层表面电镀挂锡，降低界面扩散造成的合金化和应力集中，运用拉伸法和表面划痕法评价界面结合强度，浇铸轴瓦的超声无损检测结合面的结合强度、缺陷。巴氏合金与钢背界面键合的工艺步骤如下：

(1) 瓦体浇铸前去除残余应力；

(2) 轴瓦钢背（10 钢）表面处理，将钢背投入至质量分数为 10%~15% 的 NaOH 溶液中，煮 5~10 min，而后取出用清水洗去残余碱液，用稀盐酸刷洗钢背结合面除锈，而后用清水洗去残液；

(3) 表面镀锡，采用氯化锌与氯化铵以 2:1 或 1:1 比例配置的饱和溶液，涂抹到加热后的结合面，镀锡；

(4) 轴瓦浇铸，首先将浇铸模具预热至 270~300 °C，并将模具与预热好的钢背装配好，将处理好的巴氏合金熔液倒入模具中，并迅速用水对模具中下部冷却，在浇铸过程中始终保持模具中间芯体的温度要高于钢背瓦体的温度，这样将会使液体挤向瓦面，从而形成较为致密的合金层^[14]；

(5) 保温，待巴氏合金凝固后，即可停止冷却，然后可将其放入温度为 120~160 °C 的炉中冷却，待其冷却至室温。

4 结语

径锻机轴瓦涂层表面主要元素为纯 Sn，亚表面减摩层为 PbSn_{10} 合金。铜层主要元素为 Cu 和少量的 Sn，为类锡青铜 C51100（Sn 的质量分数为 3.5%~4.5%）或纯铜。钢层主要元素为 Fe，XRD 分析显示含有少量 Mn，故钢层材料为 10 钢。

目前，兰州兰石重工有限公司已经将开发的国产轴瓦应用于 1.6 MN 径向锻造机，该设备主要用于生产 32CrMoV12-10 合金结构钢的棒材，每天生产 12 h，目前设备运行 2 年，轴瓦使用一切正常，与进口轴瓦寿命相当。开发的新型钢背/铜合金双

金属轴瓦具有优异力学性能、减摩耐磨性能, 破解了常规国产轴瓦寿命过短的问题, 提升了我国径向锻造机装备国产化制造的技术水平和核心竞争力。

参考文献:

- [1] Hojas H. GFM precision radial forging machines [A]. FIA, Equipment Symposium [C]. Chicago: FIA, 1973.
- [2] 中国锻压协会. 特种锻造 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2011.
Confederation of Chinese Metalforming Industry. Special Forging [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2011.
- [3] 苏建婷, 黄艳龙, 何雪龙, 等. 精锻机锻造箱结构型式及特点 [J]. 装备制造技术, 2016 (8): 186-188.
Su J T, Huang Y L, He X L, et al. Structural types and characteristics of precision forging machine forging boxes [J]. Equipment Manufacturing Technology, 2016 (8): 186-188.
- [4] 段志东, 葛鹏, 周亚宁, 等. 四锤头径向锻造机锻造箱结构的动力特性研究 [J]. 机械设计与制造, 2013 (6): 109-111.
Duan Z D, Ge P, Zhou Y N, et al. Research on dynamic response of forging box of precision forging machine with four hammer [J]. Machinery Design & Manufacture, 2013 (6): 109-111.
- [5] 葛鹏. 1.6 MN 精锻机主机设计 [D]. 兰州: 兰州交通大学, 2017.
Ge P. Design of 1.6 MN Precision Forging Machine Host [D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2017.
- [6] 安建勇. 基于提高巴氏合金轴瓦质量科学性分析研究 [J]. 上海大中型电机, 2021 (4): 27-30.
An J Y. Scientific analysis and research on improving the quality of babbitt alloy bearing [J]. Shanghai Large and Medium-sized Motors, 2021 (4): 27-30.
- [7] 翁炳奎, 龙荷荪, 郑平. 提高离心浇铸巴氏合金轴瓦质量的研究 [J]. 理化检验 (物理分册), 1999 (7): 291-293, 297.
Weng B K, Long H S, Zheng P. Research on improving the quality of centrifuge casting babbitt alloy bearing [J]. Physical and Chemical Testing (Physical Section), 1999 (7): 291-293, 297.
- [8] 李跃宗, 沈华雄, 贾谦, 等. 滑动轴承合金组分、硬度和软化温度等参数的研究 [A]. 中国科学院兰州化学物理研究所固体润滑国家重点实验室, 中国机械工程学会摩擦学分会. 第十一届全国摩擦学大会论文集 [C]. 兰州: 中国机械工程学会摩擦学分会, 2013.
Li Y Z, Shen H X, Jia Q, et al. Study on parameters of sliding bearing alloy components, hardness, and softening temperature [A]. State Key Laboratory of Solid Lubrication, Lanzhou Institute of Chemical Physics, Chinese Academy of Sciences, Tribology Branch of Chinese Mechanical Engineering Society. Proceedings of the 11th National Conference on Tribology [C]. Lanzhou: Tribology Branch of Chinese Mechanical Engineering Society, 2013.
- [9] 申博, 郭文孝. 基于改进 TOPSIS-灰色关联分析的 QSn7-0.2 锡青铜变薄拉深多目标优化 [J]. 锻压技术, 2024, 49 (10): 129-136.
Shen B, Guo W X. Multi-objective optimization on ironing of QSn7-0.2 tin bronze based on improved TOPSIS-grey correlation analysis [J]. Forging & Stamping Technology, 2024, 49 (10): 129-136.
- [10] 李庆春. 铸造形成理论基础 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1984.
Li Q C. Theoretical Basis for Casting Formation [M]. Beijing: China Machine press, 1984.
- [11] 周卫铭, 郭忠诚, 龙晋明, 等. 电镀铅锡锑巴氏合金 [J]. 机械工程材料, 2005, 29 (1): 27-29.
Zhou W M, Guo Z C, Long J M, et al. Electroplating of lead tin antimony Babbitt alloy [J]. Materials for Mechanical Engineering, 2005, 29 (1): 27-29.
- [12] 宋振亚, 彭孜, 闫鸣, 等. 制备方法对锡基巴氏合金轴瓦组织及性能的影响 [J]. 稀有金属, 2021, 45 (3): 378-384.
Song Z Y, Peng Z, Yan M, et al. Effect of preparation method on microstructure and properties of Sn-based Babbitt alloy bearing bush [J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2021, 45 (3): 378-384.
- [13] 刘显阳, 殷鹏, 张帆, 等. 巴氏合金轴瓦结合工艺研究进展 [J]. 重型机械, 2021 (6): 1-7.
Liu Y Y, Yin P, Zhang F, et al. Research progress of Babbitt bearing joint technology [J]. Heavy Machinery, 2021 (6): 1-7.
- [14] 安建勇. 轴承巴氏合金重力铸造工艺研究 [J]. 铸造设备与工艺, 2021 (3): 23-25, 48.
An J Y. Research on gravity Babbitt casting process for bearing [J]. Casting Equipment and Technology, 2021 (3): 23-25, 48.

《锻压技术》郑重声明

为充分尊重作者权益, 坚决抵制学术不端行为, 积极引导优良学风, 努力为学术创新营造良好氛围, 本刊郑重声明: 对一稿多投, 重复发表, 存在署名有争议, 引用他人著述未注明出处, 抄袭、剽窃、弄虚作假, 或以上情况的变相形式等学术不端行为的文章, 坚决拒绝刊登。一经发现, 立即撤稿, 并由本刊视情节轻重给予书面警告、拒绝刊登有其署名的稿件、通知其所在单位等处理。轻者给予 3~5 年不允许刊发其论文的处罚, 情节严重者, 将以适当方式予以公布, 该作者的论文永久不得刊用。

《锻压技术》编辑部