

QA110-4-4 铝青铜高温干摩擦磨损特性研究与参数优化

李 辉^{1,2} 闫金顺¹

(1.吕梁学院矿业工程系; 2.中北大学机械工程学院)

摘 要 以 QA110-4-4 铝青铜为研究对象,根据 QA110-4-4 铝青铜关节轴承的加工方式对其进行热处理,利用高速高温摩擦磨损试验机(MG-2000)进行销-盘模拟试验,采用 Box-Behnken 响应曲面试验方案建立转速、载荷以及温度与其摩擦因数、磨损量之间的回归模型,探究了工艺参数对 QA110-4-4 铝青铜摩擦磨损特性的影响顺序,并给出该滑动关节轴承的最优工况条件。结果表明,工艺参数对摩擦因数的影响顺序为:转速>载荷>温度,转速与载荷的交互作用对摩擦因数有显著影响;工艺参数对磨损量的影响顺序为:载荷>转速>温度,转速与温度的交互作用对磨损量有显著影响。试验条件下,QA110-4-4 铝青铜关节轴承最优运行的工况参数:转速为 150 r/min、载荷为 108 N、温度为 100 ℃,此时 QA110-4-4 铝青铜的摩擦因数为 0.049,磨损量为 0.017 3 g。

关键词 销-盘试验;摩擦磨损;QA110-4-4 铝青铜;响应曲面

中图分类号 TH117.1;TG146.1⁺1 **文献标志码** A

DOI:10.15980/j.tzzz.2022.02.012

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Parameters Optimization of Friction and Wear Characteristics of QA110-4-4 Aluminum Bronze under High-temperature Dry Sliding Conditions

Li Hui^{1,2}, Yan Jinshun¹

(1.Department of Mining Engineering, Lüliang College;

2.College of Mechanical Engineering, North University of China)

Abstract: Taking QA110-4-4 aluminum bronze material as the research object, the high temperature friction and wear tester(MG-2000) pin-plate of simulation experiment was conducted according to the QA110-4-4 aluminum bronze joint bearing processing way to design heat treatment process. The box-Behnken response surface test scheme was adopted to establish a regression model between the three operating conditions of rotating speed, load or temperature and the friction coefficient or wear amount. The influence sequence of process parameters on the friction and wear characteristics of QA110-4-4 aluminum bronze were explored to obtain the optimal operating conditions of the sliding joint bearing. The results indicate that the influence order of three operating parameters on friction coefficient is: speed>load>temperature, and the interaction between the speed and the load has a significant influence on the friction coefficient. The influence order on wear is: load>speed>temperature, and the interaction between speed and temperature has a significant impact on wear quantity. The optimal parameters for QA110-4-4 aluminum bronze joint bearing are presented as follows: the speed of 150 r/min, the load of 108 N, temperature of 100 ℃, where the QA110-4-4 aluminum bronze of the friction coefficient is 0.049, and the wear quantity is 0.017 3 g.

Key Words: Pin-disk Test, Friction Wear, QA110-4-4 Aluminum Bronze, Response Surface

QA110-4-4 铝青铜具有较高的强度、良好的减摩性及高温力学性能,不易钎焊,耐腐蚀性良好,常用来制作高强的耐磨零件和高温条件下的工件,如轴衬、轴套、法兰盘、齿轮及其他重要耐蚀和耐磨零件^[1~5]。对 QA110-4-4 铝青铜合金的研究主要集中在铸造工艺、热处理工艺以及微量元素对合金组织性能的影响。LI H 等^[1]研

究了多种条件下铝青铜 QA110-4-4 轴承材料的摩擦磨损特性;张荣华^[4]探讨了深冷处理再回火对 ZQA110-4-4 铝青铜压缩性能的影响,发现深冷处理再回火对性能有明显改善;薛臣^[6]研究了不同热处理工艺对铝青铜合金的显微组织以及力学性能的影响;WANG C X 等^[7]研究了 Ni-Al 青铜在高温下残余应力松弛和应变硬化

收稿日期:2021-04-29;修改稿收到日期:2021-07-14
基金项目:山西省高等学校科技创新资助项目(2019L0978)
第一作者简介:李辉,男,1985 年出生,讲师,山西吕梁(033001),E-mail:liyuanqianhui@163.com
引用格式:李辉,闫金顺. QA110-4-4 铝青铜高温干摩擦磨损特性研究与参数优化[J]. 特种铸造及有色合金,2022,42(2):190-194.
LI H, YAN J S. Parameters optimization of friction and wear characteristics of QA110-4-4 aluminum bronze under high-temperature dry sliding conditions[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2022, 42(2):190-194.

效应的组织演变规律;XU G 等^[8]观察了不同温度下固溶时效处理的 QAl10-4-4 铝青铜合金的组织 and 性能。但目前缺乏系统地对 QAl10-4-4 铝青铜合金与其工况条件之间的摩擦磨损性能分析,而在实际应用中轴衬、轴套、法兰盘、齿轮的摩擦性能与使用寿命都与其运行的工况条件有着重要关系。因此,研究 QAl10-4-4 铝青铜合金的摩擦磨损特性与工况之间的关系的重要。本课题对关节轴承常用的 QAl10-4-4 铝青铜进行热处理和高温干滑动摩擦磨损试验,采用 Box-Behnken 响应曲面法,选取转速、温度和压力 3 个工况条件为自变量,以摩擦因数与磨损量为评价指标,建立响应曲面回归模型,利用 Design-Expert10.0 软件分析得出最优回归方程,并通过显著性分析得出最优工况条件,旨在为该合金在高温摩擦磨损条件下的应用提供参考。

1 试验材料及方案

1.1 试验条件

采用高速高温摩擦磨损试验机(MG-2000)进行干摩擦式销-盘模拟试验。其转速为 0~6 000 r/min;压力为 0~2 000 N;温度为 0~800 ℃。柱销直径为 10 mm,摩擦盘厚度为 10 mm,旋转半径为 30 mm。

试样销由 QAl10-4-4 铝青铜经过热处理制成,其化学成分见表 1,将 QAl10-4-4 铝青铜经过 900 ℃×2 h 固溶+10~35 ℃水淬+450 ℃×1 h 时效+空冷,然后加工成试样销。试样硬度(HB)为 220,伸长率为 19.8%。试样销盘实物及微观组织见图 1。参照 GB/T 5231-2012 可知,经固溶处理后,铝青铜组织发生 β→β' 马氏体转变,使得铝青铜的硬度、强度提高,再经过时效处理,β' 马氏体分解析出细小颗粒 κ 相导致的析出强化和析出更细的 α 相相互作用,使得铝青铜合金金属韧性提高。摩擦盘材质为 40Cr,经过 850 ℃淬火+150 ℃

表 1 QAl10-4-4 合金的化学成分

Tab.1 Chemical composition of QAl10-4-4 alloy %										
w _B										
Sn	Zn	Pb	P	Ni	Al	Fe	Mn	Si	其他杂质	Cu
0.1	0.5	0.02	0.01	3.5~5.5	9.5~11.0	3.5~5.5	0.3	0.1	1.0	余量

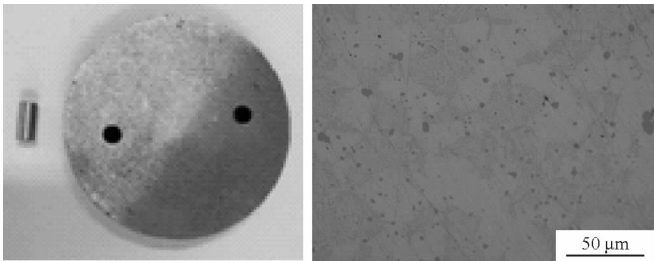


图 1 试样销-盘宏观及微观形貌

Fig.1 Macro and micro morphologies of specimen pin-disk

低温回火制成,其硬度(HRC)为 52。所有试样采用同一批次热处理后 QAl10-4-4 铝青铜制成,初始表面粗糙度 Ra 为 0.08 μm。使用 3D 表面仪表征试样销表面形貌,见图 2。

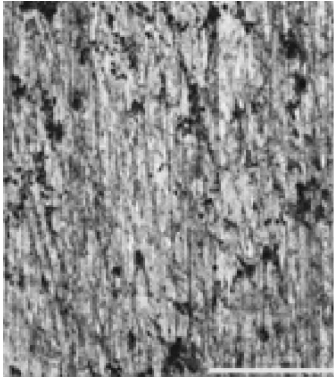


图 2 试样销表面形貌

Fig.2 Surface morphology of pin

用酒精清洗试样销与试样盘表面,干燥后采用精度为 0.000 1 g 电子天平称量并记录试验前质量为 m_q;安装销-盘试件,设定加载力、环境温度、转速以及运行时间;待环境温度稳定后开始运行试验机;记录摩擦过程中试件温度、摩擦力矩、摩擦因数;试验完成后分离摩擦副,待冷却后对摩擦销进行清洗、干燥,称量并记为 m_b。

1.2 试验方案

为了综合研究转速、载荷、温度对摩擦因数与磨损量的影响和各因素之间的交互作用,基于 Box-Behnken 设计了响应曲面表,见表 2。Box-Behnken 设计是一种符合旋转性或几乎可旋转性的球面设计,它能以较少的试验次数估计有交互作用的多项式,如果响应曲面的回归模型建立的精度较高,将可以计算取任一工况条件组合下的摩擦因数与磨损量^[9]。

表 2 Box-Behnken 响应曲面试验设计表

Tab.2 Design table for Box-Behnken response surface test					
序号	转速 A/ (r · min ⁻¹)	载荷 B/ N	温度 C/ ℃	平均摩擦 因数	磨损量/ g
1	250	120	200	0.097 3	0.132 7
2	250	120	200	0.097 3	0.132 7
3	350	120	100	0.201 5	0.339 1
4	250	40	100	0.124 6	0.061 7
5	350	120	300	0.349 1	0.131 8
6	250	120	200	0.097 3	0.132 7
7	250	200	300	0.191 9	0.347 1
8	150	120	100	0.055 9	0.077 1
9	250	40	300	0.275 4	0.121 9
10	250	120	200	0.097 3	0.132 7
11	250	120	200	0.097 3	0.132 7
12	150	120	300	0.089 1	0.110 1
13	350	200	200	0.215 6	0.281 4
14	250	200	100	0.152 3	0.184 1
15	350	40	200	0.490 5	0.108 3
16	150	200	200	0.163 2	0.153 2
17	150	40	200	0.254 7	0.044 9

2 试验结果与分析

2.1 摩擦因数回归模型建立与分析

按表 2 的 Box-Behnken 响应曲面试验设计表进行摩擦磨损试验,取稳定摩擦磨损阶段,即 300~600 s 时的摩擦因数求其平均值。将表 2 中 17 组响应曲面试验的工况参数与得到的摩擦因数用 Design-Expert10.0 软件进行多次回归拟合^[10],可获得摩擦因数与转速、载荷、温度之间的回归模型,将得到的回归模型进行方差分析,见表 3。由方差分析的结果可知,得到的三元二次回归模型高度显著,具有统计学意义。其中 A(转速)、B(载荷)、C(温度)对摩擦因数的影响都非常显著;交互作用 A×B 对摩擦因数的影响较为显著。图 3 是温度为 200 ℃时,转速与载荷对摩擦因数的响应曲面图。可以看出曲面弧度较大,说明转速与载荷的交互作用对摩擦因数的影响较大,与方差分析结果一致;A、B 的二次效应对摩擦因数的影响也极其显著。根据 P 值来确定各工况参数对摩擦因数的影响顺序,由大到小分别为 A、B、B²、A²、C、A×B。由于 A×C、B×C、C₂ 的 P 值都大于 0.1,属于极其不显著的因素,所以可做误差项处理,在后续的优化过程中可剔除,进一步简化模型,获得的回归模型为:

表 3 摩擦因数回归模型分析结果

Tab.3 Analysis of regression model of COF					
关系	偏差平方和	自由度	均方	值	显著性水平 P
模型	0.190 0	9	0.021 0	10.7	0.003
A	0.060 0	1	0.060 0	30.5	0.001
B	0.022 0	1	0.022 0	11.3	0.012
C	0.017 0	1	0.017 0	8.74	0.021
A×B	0.008 0	1	0.008 0	4.27	0.078
A×C	0.003 0	1	0.003 0	1.66	0.238
B×C	0.003 0	1	0.003 0	1.57	0.251
A ²	0.031 0	1	0.031 0	15.7	0.005
B ²	0.040 0	1	0.040 0	20.5	0.003
C ²	0.000 3	1	0.000 3	0.18	0.684
残差	0.014 2	7	0.001 8		
失拟	0.014 0	3	0.004 6		
误差	0	4	0		
总和	0.20	16			

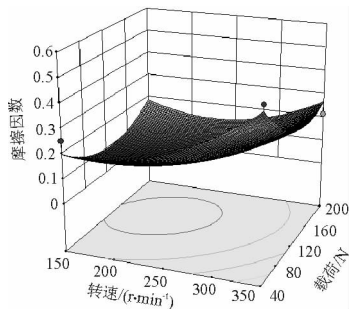


图 3 转速和载荷对摩擦因数的响应图

Fig.3 Response diagram of speed and load to COF

$$\mu = 0.443\ 37 - 2.709\ 61 \times 10^{-3} n - 2.880\ 95 \times 10^{-3} F + 4.64 \times 10^{-4} T - 5.731\ 25 \times 10^{-6} nF + 8.529\ 21 \times 10^{-6} n^2 + 1.522\ 53 \times 10^{-5} F^2 \quad (1)$$

式中,μ 为摩擦因数;n 为转速,r/min;F 为载荷,N;T 为温度,℃。

2.2 磨损量回归模型建立与分析

将表 2 中 17 组响应曲面试验的工况参数与磨损量进行多次回归拟合^[11],并对得到的回归模型进行方差分析,见表 4。

表 4 磨损量回归模型分析结果
Tab.4 Analysis of regression model of weight loss

关系	偏差平方和	自由度	均方	值	显著性水平 P
模型	0.096 0	6	0.016 0	6.00	0.007
A	0.028 0	1	0.028 0	10.6	0.009
B	0.049 0	1	0.049 0	18.5	0.002
C	0.000 3	1	0.000 3	0.11	0.045
A×B	0.001 0	1	0.001 0	0.39	0.545
A×C	0.014 0	1	0.014 0	5.41	0.042
B×C	0.002 6	1	0.002 6	0.99	0.343
残差	0.027	10	0.002 7		
失拟	0.027	6	0.004 4		
误差	0.000 0	4	0.000 0		
总和	0.12	16			

由方差分析结果可知,得到的回归模型高度显著,具有统计学意义。其中 A(转速)、B(载荷)对磨损量的影响非常显著;交互作用 A×C 对磨损量的影响较为显著。图 4 是载荷为 120 N 时,转速与温度对磨损量的响应曲面图。可以看出,曲面弧度较大,说明转速与温度的交互作用对磨损量的影响较大,与方差分析结果一致。根据 P 值确定各工况参数对磨损量的影响顺序,由大到小分别为 B>A>C>A×C。由于 A×B、B×C 的 P 值都大于 0.1,属于极其不显著的因素,所以可做误差项处理,在后续的优化过程中可剔除。进一步简化模型,获得的回归模型为:

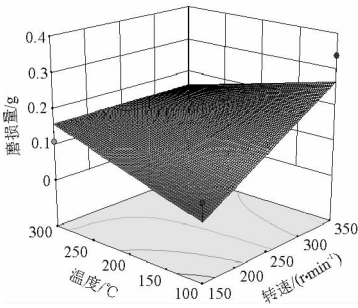


图 4 转速和温度对磨损量的响应图

Fig.4 Response diagram of speed and temperature to wear quantity

$$W = -0.424\ 7 + 1.795\ 63 \times 10^{-3} n + 9.828\ 13 \times 10^{-4} F + 1.563 \times 10^{-3} T - 6.007\ 5 \times 10^{-6} nT \quad (2)$$

式中,W 为磨损量,g。

通过曲面分析可知,转速与载荷对磨损量都有较大

影响,现针对转速与载荷中较为明显的磨损表面形貌进行分析。图 5 和图 6 分别为不同转速和载荷下试样销磨损后的 SEM 形貌。由图 5 可以看出,在转速为 150 r/min 时铝青铜中有大量的划痕以及少量的剥落,转速为 350 r/min 时试样销表面的材料剥落更多,面积也更大,且大片材料呈现撕裂状,这是由于在高转速下,粘着磨损更为严重。由图 6 可以看出,载荷为 40 N 的试样销表面有少量的划痕及材料剥落,载荷为 120 N 的试样销表面有大量材料剥落与沟槽,且大片材料呈现撕裂状或层状,载荷为 200 N 的试样销表面材料的撕裂与剥落、沟槽相比120 N要轻,这是由于载荷增大,使得试样销表面产生局部高温,使得大量剥落的金属材料软化,

在接触面间充当了润滑剂作用,从而减小了摩擦因数,降低了磨损量。

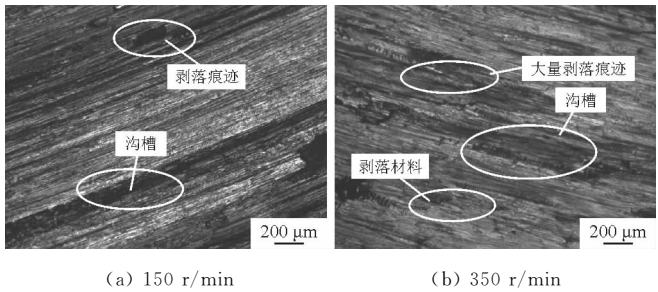


图 5 不同转速下的试样销表面形貌(载荷为 120 N)
Fig.5 Surface morphology of specimen pin at different rotating speeds

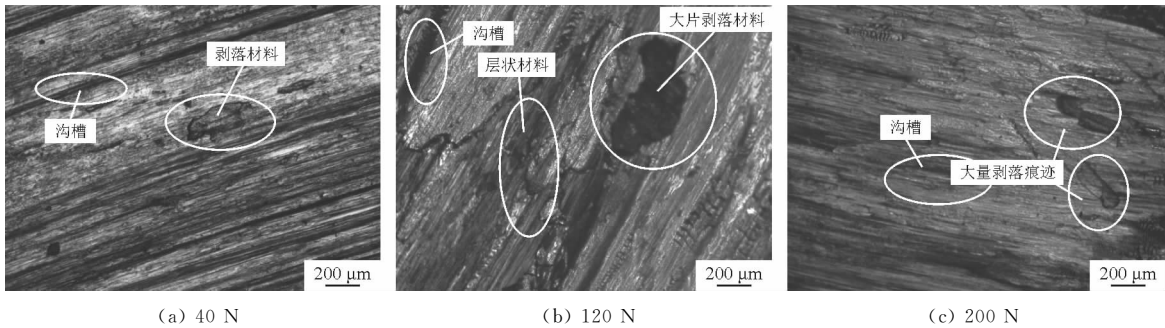


图 6 不同载荷下试样销的表面形貌(转速为 250 r/min)
Fig.6 Surface morphology of specimen pin under different loads

2.3 最优工况参数选择

表 5 为摩擦因数与磨损量实测值和回归方程预测值的对比结果^[12]。可以看出,回归方程计算出的摩擦因数与磨损量的预测值和实际测量值误差很小,均在 10% 以内,进一步验证了回归模型的可信度。根据响应

曲面法设计优化与分析后可知,当转速为 150 r/min、载荷为 108 N、温度为 100 ℃ 时,可以获得较小的摩擦因数和磨损量,是理想的工况参数。并通过试验对这组最优运行工况参数进行 3 次摩擦磨损试验,得到摩擦因数与磨损量,见表 6。

表 5 不同工况参数的摩擦因数和磨损量的预测值与实测值的对比

Tab.5 Comparison between predicted value and measured value of friction coefficient and wear under different operating conditions									
试验 编号	工况参数			摩擦因数			磨损量		
	转速/(r·min ⁻¹)	载荷/N	温度/℃	预测值	实际值	误差/%	预测值/g	实际值/g	误差/%
1	200	80	200	0.110 7	0.121 1	8.59	0.085 4	0.094 2	9.34
2	250	80	150	0.121 0	0.127 6	5.17	0.112 0	0.120 1	6.74
3	200	160	200	0.057 6	0.600 2	9.04	0.145 9	0.137 8	5.88

表 6 最优工况参数组合下 3 次摩擦磨损试验的摩擦因数和磨损量

Tab.6 Frictional coefficient and wear loss of three friction wear experiment with parameter combination at optimal operating condition				
试验	1	2	3	平均
摩擦因数	0.050	0.050	0.047	0.049 0
磨损量/g	0.018	0.017	0.017	0.017 3

3 结 论

(1)在响应曲面试验中,转速与载荷的交互作用对摩擦因数也有显著影响,并得出 3 个工况参数对摩擦因数的影响顺序为:转速>载荷>温度;转速与温度的交互作用对磨损量有显著影响,并得出 3 个工况参数对摩

擦因数的影响顺序为:载荷>转速>温度。通过对摩擦销表面形貌分析可知,QA110-4-4 铝青铜关节轴承的磨损量随着转速的增大呈增大趋势;随着载荷增加,呈先增大后减小趋势。

(2)通过 Design Expert 10.0 软件的分析与计算,得到 QA110-4-4 铝青铜关节轴承最优运行的工况参数:转速为 150 r/min、载荷为 108 N、温度为 100 ℃,并通过试验验证得到在此工况条件下 QA110-4-4 铝青铜的平均摩擦因数为 0.049,平均磨损量为 0.017 3 g。

参 考 文 献

[1] LI H, LI R Q, YANG F, et al. Friction and wear characteristics of QA110-4-4 aluminum bronze bearing materials under high-temperature dry sliding conditions[J]. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 2020, 42: 1-8.

Y 含量对 Mg-4Sm-0.6Zn-0.5Zr 合金组织及性能的影响

毛红奎¹ 白霄宇¹ 田一清¹ 尹 智¹ 王 宇¹ 徐 宏¹ 孙鹏程² 戈迎春²
(1.中北大学材料科学与工程学院; 2.西安应用光学研究所)

摘 要 研究了 Y 元素对 Mg-4Sm-0.6Zn-0.5Zr 合金组织及力学性能的影响。结果发现,Mg-4Sm-0.6Zn-0.5Zr 合金主要由 α -Mg 基体、Mg₂₄Y₅相、(Mg,Zn)₃(Y,Sm)相、LPSO 结构的 Mg₁₂YZn 相组成。随着 Y 含量增加,晶粒逐渐细化,晶界共晶相数量增多,在晶界位置存在共晶次生 LPSO 相 Mg₁₂YZn。LPSO 相与 α -Mg 基体共格,提高了镁合金的强度和硬度。随着 Y 含量增加,Mg-4Sm-0.6Zn-0.5Zr 合金的力学性能不断提高,Y 含量达到 6.89%时,铸态 Mg-4Sm-7Y-0.6Zn-0.5Zr 合金的硬度(HV)、屈服强度、抗拉强度以及伸长率分别为 95.6、118 MPa、193 MPa、10.5%。Mg-4Sm-0.6Zn-0.5Zr 合金的断口和裂纹深度随着 Y 含量的增加逐渐变浅,台阶数目减少,由准解理脆性断裂转变为解理脆性断裂。

关键词 Y 元素;稀土镁合金;力学性能;显微组织;LPSO 相

中图分类号 TG146.22 **文献标志码** A

DOI:10.15980/j.tzzz.2022.02.013

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Effects of Y Content on Microstructure and Mechanical Properties of Mg-4Sm-0.6Zn-0.5Zr Alloy

Mao Hongkui¹, Bai Xiaoyu¹, Tian Yiqing¹, Yin Zhi¹, Wang Yu¹, Xu Hong¹, Sun Pengcheng², Ge Yingchun²
(1.School of Materials Science and Engineering, North University of China; 2.Xi'an Institute of Applied Optics)

Abstract: The influences of Y element on the microstructure and mechanical properties of Mg-4Sm-0.6Zn-0.5Zr alloy were investigated. The Mg-4Sm-*x*Y-0.6Zn-0.5Zr alloy is mainly composed of α -Mg matrix, Mg₂₄Y₅ phase, (Mg,Zn)₃(Y,Sm) phase, and Mg₁₂YZn phase with LPSO structure. With the increase of Y content, the grains are gradually refined and the amount of eutectic phases at the grain boundary is increased. There exists a eutectic secondary LPSO phase Mg₁₂YZn at the grain boundary. The LPSO phase Mg₁₂YZn is coherent with the α -Mg matrix, which improves the strength and hardness of the magnesium alloy. With the increase of Y content, the mechanical properties of Mg-4Sm-0.6Zn-0.5Zr alloy is improved continuously. With the Y content of 6.89%, the hardness, yield strength, tensile strength and elongation of the as-cast Mg-4Sm-7Y-0.6Zn-0.5Zr alloy reach up to 95.6 HV, 118 MPa, 193 MPa, 10.5%, respectively. The structure of LPSO has an effect on the fracture behavior of magnesium alloy. The fracture mechanism of Mg-4Sm-7Y-0.6Zn-0.5Zr alloy is characterized by cleavage brittle fracture, and the fracture and crack depth gradually become shallower.

Key Words: Y Element, Rare Earth Magnesium Alloy, Mechanical Properties, Microstructure, LPSO Phase

收稿日期:2021-08-06;修改稿收到日期:2021-10-22

基金项目:山西省重点研发计划国际科技合作资助项目(201903D421080);山西省高等学校科技创新项目(2020L0319)

第一作者简介:毛红奎,男,1977 年出生,副教授,太原(030051),E-mail:maohk@126.com

引用格式:毛红奎,白霄宇,田一清,等. Y 含量对 Mg-4Sm-0.6Zn-0.5Zr 合金组织及性能的影响[J]. 特种铸造及有色合金,2022,42(2):194-199.

MAO H K, BAI X Y, TIAN Y Q, et al. Effects of Y content on microstructure and mechanical properties of Mg-4Sm-0.6Zn-0.5Zr alloy[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2022, 42(2):194-199.

[2] 韦天升,林高用,蔡阳中,等. 特种铸造方式下 QAl10-4-4 铝青铜组织演变规律[J]. 有色金属加工, 2013, 42(1): 13-18.

[3] 徐国富,尹志民,罗丰华,等. 铈及钛对 QAl10-4-4 铝青铜缓冷脆性的影响[J]. 材料科学与工艺, 2001, 9(4): 363-366.

[4] 张荣华. 深冷处理对 ZQAl10-4-4 铝青铜压缩性能的影响[J]. 金属热处理, 2014(4): 104-105.

[5] 巢曷轩,蒋克全,洪锋,等. 铝青铜 QAl10-4-4 热处理工艺性能研究[J]. 热处理技术与装备, 2016, 37(6): 35-38.

[6] 薛臣. 铝青铜(QAl10-4-4)连杆衬套的热处理工艺及性能研究[D]. 太原: 中北大学, 2019.

[7] WANG C X, JIANG C H, CHEN M, et al. Residual stress and microstructure evolution of shot peened Ni-Al bronze at elevated temperatures[J]. Materials Science and Engineering, 2017, A707: 629-635.

[8] XU G, CHEN B, ZHANG D, et al. Effect of heating treatment on microstructure and properties of QAl10-4-4 aluminum bronze alloy [A]//2020 3rd International Conference on Electron Device and Mechanical Engineering[C]. Suzhou, China, 2020.

[9] 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): 76-80,97.

[10] 李和言,马成男,吴健鹏,等. 铜基粉末冶金干式摩擦副磨合过程摩擦性能研究[J]. 摩擦学学报, 2018, 38(2): 153-160.

[11] 马红帅,梁国星,吕明,等. AISI4340 钢干滑动摩擦磨损特性研究[J]. 摩擦学学报, 2018, 38(1):59-66.

[12] ARCHARD J F. Contact and rubbing of flat surfaces[J]. Journal of Applied Physics, 1953, 24(8):981-988.

(编辑:刘晨辉)