

doi:10.3969/j.issn.2095-0411.2021.06.001

液态模锻铝青铜件的凝固组织研究

邢书明, 高文静

(北京交通大学 机械与电子控制工程学院, 北京 100044)

摘要: 铝青铜是重要的防爆材料、模具材料和耐磨材料,但其熔炼过程易氧化、工艺性能差,极易产生裂纹和疏松缺陷。采用液态模锻工艺进行了铝青铜件的成形研究,对比研究了液态模锻与砂型铸造铝青铜件的组织特征,揭示了液锻铝青铜件的非平衡凝固路径和流变补缩机理。结果表明,液态模锻铝青铜的组织比砂型铸造件组织显著细化、且均匀。随着液锻压力的提高,基体晶粒尺寸和二次枝晶臂间距进一步细化。

关键词: 液态模锻(MMDF); 挤压铸造; 铝青铜; 锤头; 凝固组织

中图分类号: TG 316.3

文献标志码: A

文章编号: 2095-0411(2021)06-0001-07

Study on Solidification Structure of Aluminum Bronze Parts Produced by Molten Metal Die Forging(MMDF)

XING Shuming, GAO Wenjing

(School of Mechanical, Electronic and Control Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: Aluminum bronze is an important explosion-proof material and die material. However, its technological performance is poor, and it is easy to produce cracks and shrinkage defects. In this paper, the forming of aluminum bronze octagonal hammer was carried out by molten metal die forging process (MMDF for short). The microstructure characteristics of the hammer between the MMDF and sand casting were experimentally compared. The non-equilibrium solidification path and rheological feeding mechanism of the aluminum bronze by MMDF were revealed. The microstructure of MMDF aluminum bronze hammer is finer than that of sand casting hammer. With the increase of pressure, the matrix grain size and secondary dendrite arm spacing are further refined.

Key words: molten metal die forging (MMDF); squeeze casting; aluminum bronze; hammer; solidification structure

收稿日期: 2021-06-12。

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项基金资助项目(2020YJS146)。

作者简介: 邢书明(1962—), 男, 河北平山人, 博士, 教授。E-mail: smxing@bjtu.edu.cn

引用本文: 邢书明, 高文静. 液态模锻铝青铜件的凝固组织研究[J]. 常州大学学报(自然科学版), 2021, 33(6): 1-

铝青铜分为简单铝青铜(即二元 Cu-Al 合金)和复杂铝青铜(即除 Al 以外,还含有 Fe, Ni, Mn 等元素)。人们很早就认识到铝青铜具有强度高,耐磨性、气密性较好及在空气、海水中均有较强的耐腐蚀性等优点^[1],广泛用于船舶螺旋桨、齿轮坯料、阀门及海上石油平台、海水管路系统及其他致密铸件制造中^[2]。但是,铝青铜在承受较大载荷时其耐磨性有限,模具使用寿命短,改善铝青铜组织与性能具重要工程意义。王海燕等^[3]对铝青铜进行高压处理后,发现组织中出现了细小的白色颗粒状和细条状相,组织明显细化,且细化效果随压力的增大先增强后减弱,当压力为 2 GPa 时,组织最细小。但是,其铸态的抗压强度较高压处理前却有所降低,只有再经 600 ℃、保温 2 min 的热处理后,其抗压强度才明显升高。韦天升等^[4]对真空吸铸和离心铸造条件下的铝青铜凝固组织做了研究,发现真空吸铸条件下,10-4-4 铝青铜接近铸态的组织由 α 相、 β' 相、KⅡ 和 KⅢ 相构成,其相的析出顺序为 KⅡ $\rightarrow\alpha\rightarrow$ KⅢ,对应的初始析出温度分别为 1 000, 850, 750 ℃;而离心铸造条件下,接近铸态的组织中还另外含有 KI 和 KⅣ 相,其相的析出顺序为 $\alpha + \text{KI} \rightarrow \text{KⅡ} \rightarrow \text{KⅣ} \rightarrow \text{KⅢ}$,对应的初始析出温度整体高于真空吸铸,且 α 相的初始析出温度远高于真空吸铸。这说明,不同的成形条件,其相的组成和转变历程会有明显变化。液态模锻是一种零件成形技术,洪慎章等^[5]率先进行了铜合金八角锤直接加压液态模锻工艺试验,证明了铜合金八角锤采用液态模锻成形工艺生产,在技术和经济都明显优于压力铸造和热模锻工艺,既能简化生产工序,提高产品质量和合格率,又能减少基本设备投资,降低产品成本。但是,其生产效率有待提高。间接加压一模多腔液态模锻可以显著提高液态模锻生产效率,但是,间接液锻铝青铜的组织特征是否也比砂型铸造有明显的细化是一个值得研究的问题。课题组对一模四腔间接液锻铝青铜件的组织细化行为进行了试验研究。

1 试验材料与方法

选取含铝 11% 的复杂铝青铜进行液态模锻试验,其化学成分见表 1。利用 250 kg 中频感应电炉熔化。

为了对比,同炉铝青铜液分别采用砂型铸造和液态模锻 2 种工艺铸造相同规格的八角锤。砂型铸造工艺如图 1 所示,一模 2 件。

利用四立柱 800 t 立式液态模锻机液态模锻成形。一模 4 件,间接加压液态模锻,锤眼通过金属型芯成形。所用模具由 H13 钢制成,水平分模,如图 2 所示。

表 1 铝青铜的化学成分

Table 1 Chemical composition of aluminum bronze %

元素	Al	Fe	Ni	Si	Cu
质量分数	11.33	4.63	5.41	0.31	Bal.

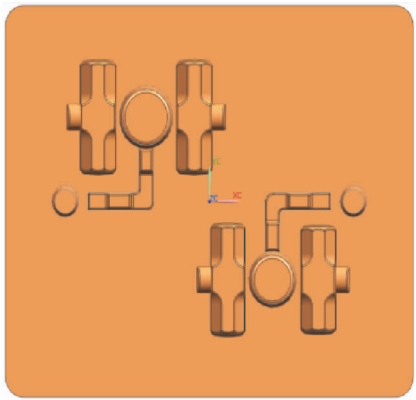


图 1 砂型铸造铝青铜八角锤的铸型图

Fig.1 Sand casting octagonal hammers of aluminum bronze

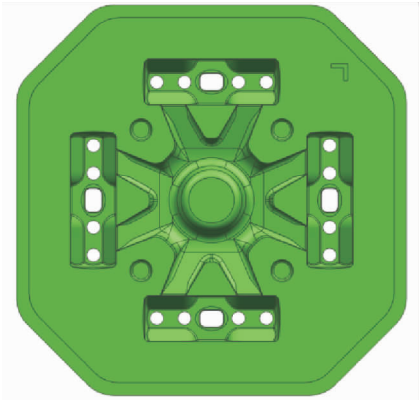


图 2 液态模锻铝青铜八角锤

Fig.2 MMDF octagonal hammer of aluminum bronze

砂型铸造和液态模锻 2 种工艺的成形工艺参数见表 2。

表 2 砂型铸造与液态模锻铝青铜八角锤的工艺参数一览表
Table 2 Technological parameters of sand casting and MMDF octagonal hammer of aluminum bronze

Process	Melted temp./℃	Pouring temp./℃	Pressure/MPa	Filling rate/ (mm • s ⁻¹)
Sand casting	1 300	1 130	0.1	—
MMDF	1 250	1 050	100,140	60

将得到的铝青铜锤分别在锤端面及端面以下 20 mm 处取金相样,经研磨抛光后,利用专用腐蚀液腐蚀,清洗吹干后利用光学显微镜对比观察砂铸和液锻试样的显微组织。

为了研究液锻压力对铸态组织的影响作用,液锻压力分别取 100 MPa 和 140 MPa 进行液锻。将液锻得到的八角锤对应位置取样,观察金相组织。

2 试验结果

2.1 液态模锻铝青铜锤的凝固组织

液态模锻与砂型铸造铝青铜防爆锤相比,显微组织明显细化。锤顶面的金相组织对比如图 3 所示。可以看到,砂铸铝青铜锤顶面的基体组织为树枝晶,较为粗大,一次臂长度达 172 μm,二次枝晶臂间距 67 μm,大部分呈竹叶状且整体呈细长条的网状分布;基体上还弥散分布着很多黑色点状颗粒富铁相,平均尺寸为 4 μm,单位面积铁相个数为 7 800 个/mm²。枝晶间存在大量复杂的黑色组织。液态模锻锤相同部位的基体组织也是枝晶状,但其尺寸细小很多,一次臂长度只有 83 μm,二次臂间距不足 20 μm,且看不到黑色点状富铁相,枝晶间的黑色组织也明显细化,平均尺寸不足 50 μm,分布更加均匀。

锤顶以下距离锤顶部 20 mm 处的显微组织对比如图 4 所示。可见,液锻与砂铸组织的差异更加明

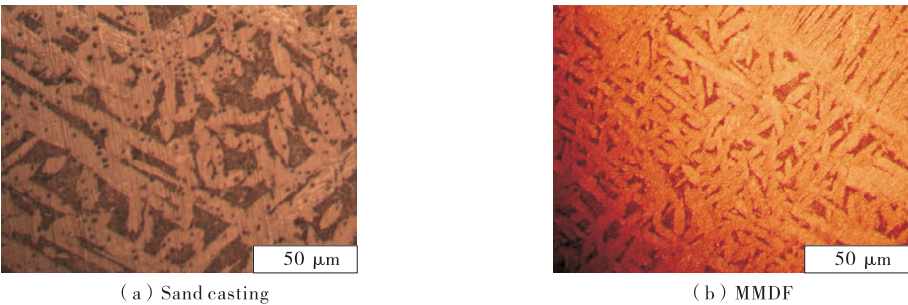


图 3 液锻与砂铸锤顶面的显微组织对比
Fig.3 Microstructure comparison of MMDF and sand casting hammer top surface

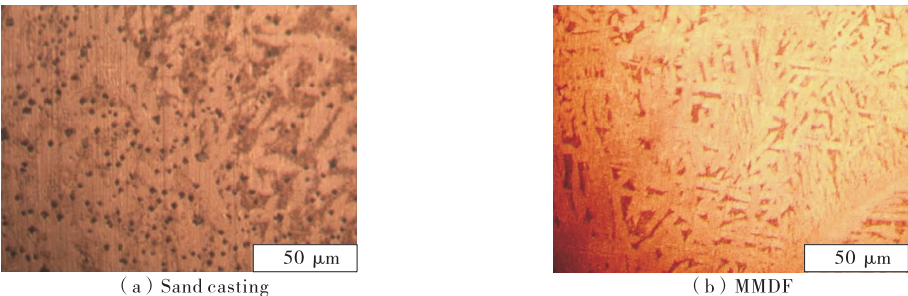


图 4 距锤顶 20 mm 处砂铸和液锻锤的组织对比
Fig.4 Microstructure comparison of sand casting and MMDF at 20 mm under the hammer top surface

显。砂铸锤基体组织同样呈现白色短条状,但比端面明显细化,而颗粒状黑色铁相则略有粗化,平均尺寸约 $6\ \mu\text{m}$ 。液锻锤的组织同样比其端面处细小,特别是二次臂间距减小为 $8\ \mu\text{m}$ 。

锤顶面及顶面下 20 mm 处的定量金相分析结果如图 5 所示。与传统的认识不同,无论砂铸还是液锻,锤内部的基体组织均比表面细小,而铁相尺寸则依然是表面细小、内部粗大。

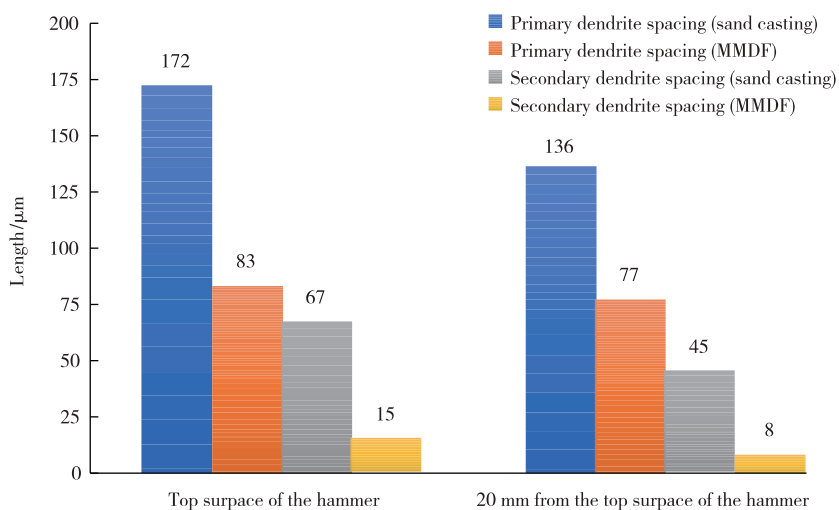


图 5 砂铸与液锻锤的凝固组织特征对比

Fig.5 Comparison of solidification structure characteristics between sand casting hammer and MMDF hammer

2.2 压力对液态模锻铝青铜件凝固组织的影响

压力分别为 100 MPa 和 140 MPa 条件下液锻铝青铜件的组织(表面下 20 mm 处)对比如图 6 所示。可见,压力提高,基体组织显著细化,晶粒尺寸由 100 MPa 时的 $320\ \mu\text{m}$ 减小为 140 MPa 时的 $150\ \mu\text{m}$,其中枝晶一次臂平均长度由 $77\ \mu\text{m}$ 缩短为 $65\ \mu\text{m}$,二次臂间距则由 $8\ \mu\text{m}$ 减小为 $5\ \mu\text{m}$ 。两种液锻压力下的枝晶特征尺寸定量对比如图 7 所示。这说明,增加液锻压力,可以显著细化基体晶粒,减小二次枝晶臂间距,相应地使晶间复杂组织分散均匀、细小。

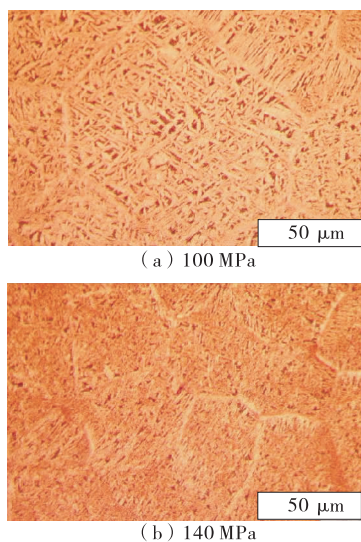


图 6 压力细化液锻锤头组织

Fig.6 Microstructure refined by pressure of MMDF hammer

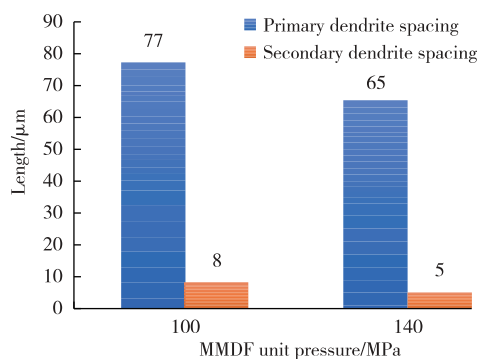


图 7 凝固组织特征对比

Fig.7 Comparison of solidification structure characteristics

3 分析讨论

3.1 铝青铜锤液态模锻过程的凝固模拟分析

为了深入了解液态模锻铝青铜组织细化的原因,采用 ProCAST 软件,对铝青铜液态模锻过程的温度场、流场及缩松缺陷进行了模拟。模拟计算的工艺参数与试验参数相同,具体模拟参数见表 3。

表 3 铝青铜八角锤液态模锻模拟参数一览表

Table 3 Simulation parameters of MMDF octagonal hammer of aluminum bronze

Process	Filling rate/(mm · s ⁻¹)	Pressure/MPa	Pouring temp./℃	Mold temp./℃	Interface condition h/(J · m ⁻²)
MMDF	60	100	1 050	200	5 000

模拟计算结果表明,铝青铜的充型时间只有 3 s,如图 8 所示。充型完成时,锤头表面温度已经明显低于内部,且进入了凝固温度范围,也就是说,锤头表层在充型过程就开始了凝固,但是这时模腔尚未充满,凝固压力还很低,锤表面的凝固可以认为是在重力下的凝固,所以压力对凝固的影响作用不明显。结合对比图 3(b)与图 4(b)液态模锻试验结果的显微组织,可以进一步说明受压力的影响,锤内部组织的细化程度优于锤表面,锤表面显微组织的平均一次枝晶臂长度为 83 μm,而锤内部平均一次枝晶臂长度为 77 μm。但是,由于液锻的充型速度很快,铝青铜合金液对模腔壁的冲击动能高,界面传热更加充分,所以液锻表面组织比砂铸表面组织细化显著,如图 3 所示。

当充型完成后,内部金属在高达 100 MPa 的压强作用下凝固。铜铝合金属于凝固体积的合金,根据式(1)的 Clausius-Clapeyron 方程式^[6]可知,其凝固温度会随着压强的增大而提高,进而产生“压力过冷”。因此,锤内部的“压力过冷”效应突出,是导致凝固组织显著细化的主要原因。也就是说,液锻锤头端面细密的组织来源于高速充型带来的“快冷过冷”促进了形核,而锤头内部的细密组织则主要来源于“压力过冷”效应。这就解释了液锻锤头端面与内部 20 mm 处的凝固组织都比较细小的结果。

$$\frac{dT_p}{dp} = \frac{T_m \Delta V}{\Delta H} \tag{1}$$

式中: dT_p 为压力变化 dp 引起的平衡温度变化量; T_m 为标准状态时的平衡温度; ΔV 为凝固前后的摩尔体积变化量; ΔH 为凝固过程的摩尔热效应,吸热为正,放热为负。

从图 8(b)还可看到,锤端部存在涡流,锤眼处存在汇流。在这些位置需要设置必要的排气结构,防止产生气孔缺陷。

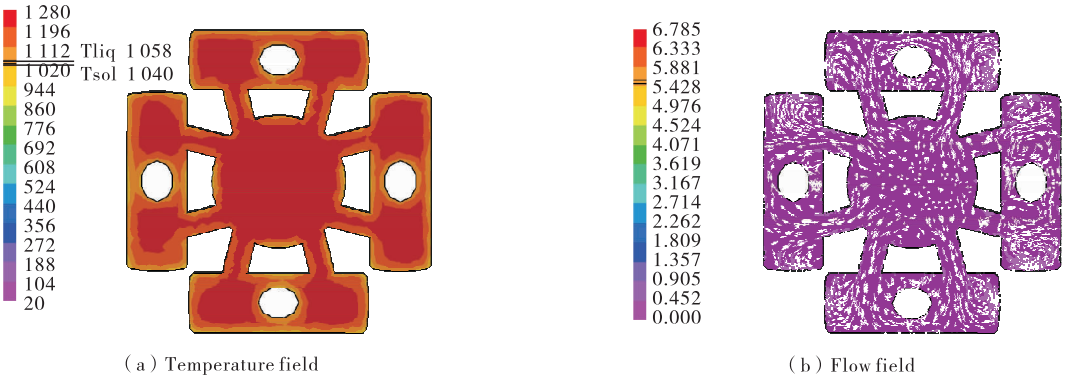


图 8 充型完成时($t=3$ s)温度场和流场分布

Fig.8 Temperature field and flow field after mold filling ($t=3$ s)

模拟计算还表明,液锻锤头的凝固速度很快,完全凝固时间只有 50 s,如图 9 所示,比砂型铸造的凝固时间缩短了近一半。

模拟显示,锤头的凝固顺序总体上符合常规。首先是锤头外侧向锤头内侧及内浇道逐步进行,最后是料饼凝固。但是,由于锤眼芯的存在,使锤头在锤眼附近出现了先凝固区。这说明,躲开锤眼,设置 2 个内浇道是必要的。

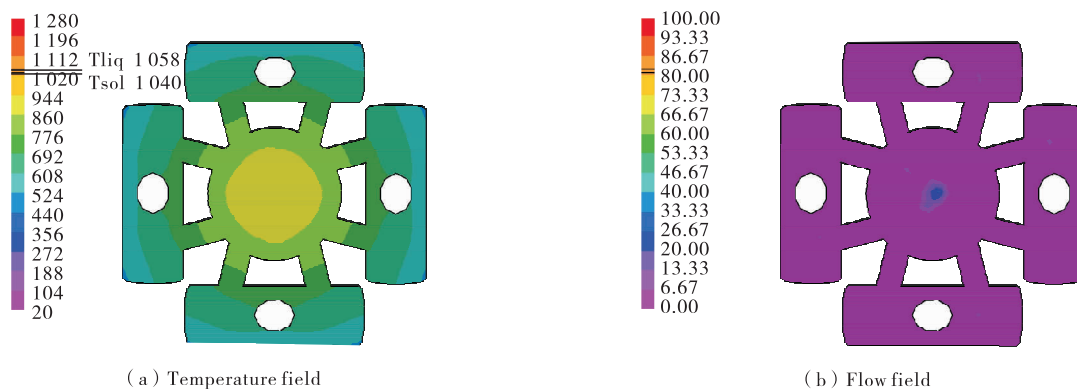


图 9 凝固完成时($t=50$ s)温度场和总收缩孔隙度分布

Fig.9 Distribution of temperature field and total shrinkage porosity after solidification ($t=50$ s)

3.2 液态模锻铝青铜的凝固路径

根据如图 10 所示的铜铝合金相图(铜角)可知,含铝 11.32% 的铝青铜室温平衡组织应为单相 γ_1 相。但是图 3 和图 4 显示,其组织中除了基体外,晶间还存在复杂的混合组织。这说明,砂铸铝青铜是非平衡凝固,而液态模锻的冷却速度很快,其非平衡凝固的倾向更加显著。

非平衡凝固的路径是个很复杂的问题^[8]。可以参考平衡相图图 10 进行推测:含铝 11.33% 的铝青铜合金液随着温度降低,到达液相线后,首先析出以 CuAl_2 为基的固溶体 β 。随后的降温过程中高温 β 相不断析出铜而铝含量增高,一部分 β 相会转变为以铜为基的 α 相,面心立方结构^[9];剩余的 β 相中铝含量继续增大,当温度降至共析温度范围时(565 °C 左右),发生 $\beta \rightarrow \alpha + \gamma_2$ 共析转变^[10]。

但因液态模锻冷速快,共析转变受到抑制,只有少部分 β 相生成了 $(\alpha + \gamma_2)$ 共析体,绝大部分 β 相会过冷到 565 °C 以下,成为亚稳相。当温度和成分满足包析反应条件时,应该发生 $\alpha + \gamma_2 \rightarrow \gamma_1$ 包析反应,形成 γ_1 。但是,同样由于冷速快,这种包析反应更是无法充分进行,所以,室温组织将由 β (或 β 的亚稳相), α , γ_1 和 γ_2 4 种相组成。如图 3(b)、图 4(b) 及图 6 所示,其白色组织为基体 β 和 α 相,晶间的黑色复相组织为 γ_1, γ_2 以及共析产物和包析产物。

非平衡凝固条件下各个相的数量和形貌并不固定,都会随着冷却速度和压力的变化而发生一定变化。随后应需要深入研究,进行细致的物相分析确认晶间组织的具体类型。

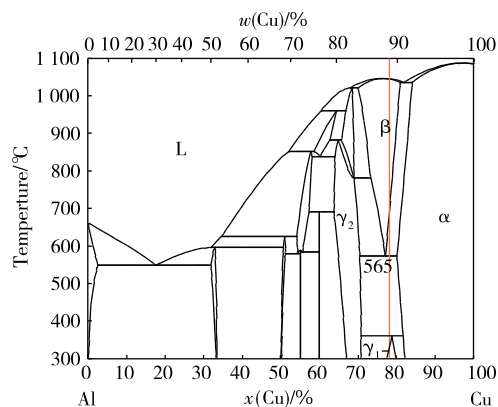


图 10 Al-Cu 相图^[7]

Fig.10 Al-Cu phase diagram^[7]

4 结 论

- 1) 液态模锻铝青铜与砂型铸造相比,基体晶粒尺寸显著细化,晶间固态转变产物分散、细小。
- 2) 液态模锻铝青铜件的表面和内部组织都很细密。表面组织细密源于“快冷过冷”,而内部组织细密则主要源于“压力过冷”。
- 3) 随着液锻压力的提高,基体晶粒尺寸细化效果更加显著。当液锻比压达到 140 MPa 时,基体晶粒尺寸只有 65 μm ,二次枝晶臂间距可以细化到 5 μm 左右。

参考文献:

- [1] KARIMI A, MARTIN J L. Cavitation erosion of materials[J]. International Metals Reviews, 1986, 31(1): 1-26.
- [2] NAKAJIMA H. Fabrication, properties and application of porous metals with directional pores[J]. Progress in Materials Science, 2007, 52(7): 1091-1173.
- [3] 王海燕, 李雅莉, 湛岩, 等. 高压处理对铝青铜组织与抗压强度的影响[J]. 高压物理学报, 2013, 27(4): 500-504.
- [4] 韦天升, 林高用, 蔡阳中, 等. 特种铸造方式下 QA110-4-4 铝青铜组织演变规律[J]. 有色金属加工, 2013, 42(1): 13-18.
- [5] 洪慎章, 曾振鹏. 铜合金八角锤液态模锻工艺[J]. 机械工人(热加工), 2001(2): 36-37.
- [6] 胡汉起. 金属凝固原理[M]. 2 版. 北京: 机械工业出版社, 2000.
- [7] MURRAY J L. The aluminium-copper system[J]. International Materials Reviews, 1985, 30(1): 211-234.
- [8] RIZI M S, KOKABI A H. Microstructure evolution and microhardness of friction stir welded cast aluminum bronze [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2014, 214(8): 1524-1529.
- [9] CALLCUT V A. Aluminum bronze for industrial use[J]. Metals and Materials, 1989, 5(3): 128-132.
- [10] NAIR S, SELLAMUTHU R, SARAVANAN R. Effect of nickel content on hardness and wear rate of surface modified cast aluminum bronze alloy[J]. Materials Today: Proceedings, 2018, 5(2): 6617-6625.

(责任编辑:李艳)