

# 热处理对 QAl11-6-6 合金挤压棒组织与硬度的影响<sup>①</sup>

刘莹雪<sup>1</sup>, 刘鹏程<sup>1</sup>, 胡克福<sup>2</sup>, 吕永生<sup>2</sup>, 林高用<sup>1</sup>

(1.中南大学材料科学与工程学院, 湖南长沙 410083; 2.贵溪骏达特种铜材有限公司, 江西鹰潭 335400)

**摘要:**采用正交试验法,并结合金相显微镜、X射线衍射仪、扫描电镜和硬度计,研究了时效时间、时效温度、固溶时间、固溶温度等热处理参数对 QAl11-6-6 铝青铜合金挤压棒组织和性能的影响。结果表明:试验合金挤压态组织由  $\alpha$ 、 $\kappa$ (AlFe、AlFe<sub>3</sub>、AlNi)、 $\gamma_2$  以及剩余的  $\beta'$  相组成;固溶+时效热处理可有效提高该合金挤压棒的硬度,4个热处理工艺参数对合金硬度的影响强弱顺序依次为:时效时间>时效温度>固溶时间>固溶温度。试样在 910 °C 固溶 45 min 后采用水冷淬火,再经 450 °C × 150 min 时效处理,合金硬度由挤压态的 33.4HRC 提升到 40.1HRC,呈现明显的时效硬化特性;较多的类马氏体  $\beta'$  相的析出是合金时效后硬度显著提高的主要原因。

**关键词:** QAl11-6-6; 铝青铜合金; 挤压棒; 固溶; 时效; 硬度; 热处理; 析出相

中图分类号: TG166.2

文献标志码: A

doi:10.3969/j.issn.0253-6099.2025.01.030

文章编号: 0253-6099(2025)01-0160-06

## Effect of Heat Treatment on Microstructure and Hardness of QAl11-6-6 Alloy Extruded Rod

LIU Yingxue<sup>1</sup>, LIU Pengcheng<sup>1</sup>, HU Kefu<sup>2</sup>, LYU Yongsheng<sup>2</sup>, LIN Gaoyong<sup>1</sup>

(1.School of Materials Science and Engineering, Central South University, Changsha 410083, Hunan, China; 2.Guixi Junda Special Copper Materials Co. Ltd., Yingtan 335400, Jiangxi, China)

**Abstract:** The effect of heat treatment parameters on the microstructure and properties of QAl11-6-6 aluminum bronze alloy extruded rod was explored by performing orthogonal test, in combination with metallographic microscope, X-ray diffractometer, scanning electron microscope and hardness tester. The results show that the microstructure of extruded aluminum bronze alloy consists of  $\alpha$ ,  $\kappa$ (AlFe, AlFe<sub>3</sub>, AlNi),  $\gamma_2$ , and the remaining  $\beta'$  phases; the heat treatment including solid solution and aging can effectively improve the hardness of the alloy extruded rod; the influence of four process parameters on the hardness of the alloy is in the following descending order: aging time > aging temperature > solid solution time > solid solution temperature. The sample was quenched by water cooling after solid solution at 910 °C for 45 min, and then treated by aging at 450 °C for 150 min. The hardness of the alloy was increased to 40.1HRC from previous 33.4HRC in the extruded state, presenting obvious age hardening effect. It is found that precipitation of more martensite-like  $\beta'$  was the main reason for significant increase in hardness of the alloy after aging treatment.

**Key words:** QAl11-6-6; aluminum bronze alloy; extruded rod; solid solution; aging; hardness; heat treatment; precipitated phase

铝青铜属于 Cu-Al-Fe-Ni 系多元复杂铜基合金,是具有优异综合性能的铜合金结构材料,400 °C 以下具有非常稳定的力学性能,强度可达 700 MPa 以上,且塑性和韧性好,具有优异的减摩、耐磨性和耐腐蚀性

能,广泛应用于制造高强度耐磨、耐蚀零件和 400 °C 以下工作的重载结构件,如轴承、导向摇臂衬套、齿轮、飞轮、紧固件、螺旋桨等。铝青铜是热处理可强化合金,通过优化合金成分及热处理工艺参数可改善合金性

① 收稿日期: 2024-08-25

基金项目: 贵溪市铜产业升级科技攻关计划项目(GXTCY2022-06)

作者简介: 刘莹雪(1998—),女,内蒙古呼伦贝尔人,硕士研究生,主要研究方向为有色金属材料加工。E-mail: liuyingxue9897@163.com

通信作者: 林高用(1966—),男,湖南邵阳人,博士,教授,主要研究方向为有色金属材料加工、模具设计和数值模拟。E-mail: gylin6609@csu.edu.cn

能<sup>[1-2]</sup>。有人以 QAl10-4-4 铝青铜合金为研究对象,通过优化其固溶、时效工艺参数,达到预期使用性能<sup>[3-6]</sup>,同时,合金成分不同,热处理工艺参数对合金性能的影响也不同。

QAl11-6-6 铝青铜是高合金化的特种合金,具有超高的强度和硬度特性,通常应用于特殊领域。目前对 QAl11-6-6 铝青铜的热处理及其组织、性能的研究报道极少,硬度达到 40HRC 以上的铝青铜制备工艺尚无报道。本文针对 QAl11-6-6 铝青铜合金挤压棒开展固溶和时效热处理工艺参数研究,旨在满足某种特殊领域的特殊硬度需求。

## 1 试验

试验材料为国内某特种铜材加工企业的 QAl11-6-6 铝青铜热挤压棒( $\Phi 16$  mm, 硬度 33.4HRC)。合金化学成分如表 1 所示,符合国家标准要求。

表 1 QAl11-6-6 铝青铜化学成分(质量分数)

类别	Al	Fe	Ni	Mn	Si	Pb	Cu
实测值	10.80	6.07	5.70	0.52	0.11	0.01	余量
标准值	10.00~11.50	5.00~6.50	5.00~6.50	≤0.50	≤0.20	≤0.05	余量

根据 Cu-Al 二元平衡图及相关文献<sup>[7-10]</sup>,确定四因素(固溶温度、固溶时间、时效温度、时效时间)、三水平的  $L_9(3^4)$  正交试验方案如表 2 所示。

表 2  $L_9(3^4)$  正交试验方案

Table 2  $L_9(3^4)$  orthogonal test scheme

水平	因素			
	固溶温度 (A)/℃	固溶时间 (B)/min	时效温度 (C)/℃	时效时间 (D)/min
1	860	45	400	90
2	910	60	450	120
3	950	90	500	150

热处理试验在 SX-G13133F 型箱式电阻炉内完成。采用 HR-150A 型洛氏硬度计测量铝青铜试样硬度,测量时采用 150 kg 载荷,保压 15 s;金相试样经水磨砂纸粗磨、金相砂纸细磨、金刚石研磨膏抛光后,采用  $\text{FeCl}_3$  溶液进行浸蚀,在 LEICA DM4M 型金相显微镜上观察铝青铜试样经不同条件热处理后的金相显微组织,观察面均为棒材横截面。在 MIRA3 LMH 型扫描电镜上观察不同状态试样的高倍显微组织;采用 D/Max 2500VB 型 X 射线衍射仪对铝青铜试样进行物相分析。

## 2 试验结果与分析

### 2.1 热处理工艺参数的影响顺序

$L_9(3^4)$  正交试验结果如表 3 所示。由表 3 可知,与挤压态铝青铜试样相比,固溶-时效处理后试样硬度大幅提升。根据极差大小可判断各因素的影响程度。对于硬度指标,4 个因素影响从强到弱顺序为:时效时间>时效温度>固溶时间>固溶温度。以硬度为指标,最佳固溶-时效方案为  $A_2B_1C_2D_3$ ,即固溶温度 910 ℃,固溶时间 45 min,时效温度 450 ℃,时效时间 150 min。

表 3 正交试验结果

Table 3 Results of orthogonal test

试验编号	A	B	C	D	硬度(HRC)
1	860	45	400	90	37.0
2	860	60	450	120	35.7
3	860	90	500	150	37.8
4	910	45	450	150	40.1
5	910	60	500	90	37.0
6	910	90	400	120	36.2
7	950	45	500	120	36.7
8	950	60	400	150	37.0
9	950	90	450	90	39.2
$H_{1j}$	36.8	37.9	36.7	37.7	
$H_{2j}$	37.8	36.6	38.3	36.2	
$H_{3j}$	37.6	37.7	37.2	38.3	
R	0.9	1.4	1.6	2.1	

### 2.2 热处理状态典型铝青铜样品显微组织特征

为探究 QAl11-6-6 铝青铜组织与硬度之间的关系,根据正交试验硬度检测结果(表 3),对挤压态与 5 个典型热处理状态的试样进行显微组织分析。

#### 2.2.1 挤压态样品组织与物相

图 1 为 QAl11-6-6 合金挤压态试样的 X 射线衍射图谱。由图 1 可知,挤压态高铝青铜室温下的物相组成为  $\alpha$ 、 $\kappa$ 、 $\gamma_2$  以及剩余的  $\beta'$  相;其中  $\alpha$  相是以 Cu 为基体的固溶体,其晶体结构为面心立方; $\beta$  相是以  $\text{Cu}_3\text{Al}$  为基体的固溶体,其晶体结构为体心立方, $\beta'$  相是合金经快速冷却而获得的过冷  $\beta$  相,为亚稳态相; $\gamma_2$  相是以  $\text{Cu}_9\text{Al}_4$  为基体的固溶体,为硬脆相,其晶体结构为复杂立方<sup>[11]</sup>。 $\alpha$  相存在一定固溶度,Al、Fe、Ni 等元素均可能固溶在基体中,这造成 Cu 原子晶格畸变,导致  $\alpha$  相对应的 Cu 峰发生偏移。

图 2 为挤压态 QAl11-6-6 合金金相显微组织。由图 2 可知,QAl11-6-6 合金经高温挤压后,其室温组织由黑色共析体( $\alpha+\gamma_2$ )、 $\beta'$  基体及其上分布的大小不一的细小颗粒状  $\kappa$  相构成, $\kappa$  相直径 0.5~2.0  $\mu\text{m}$ 。

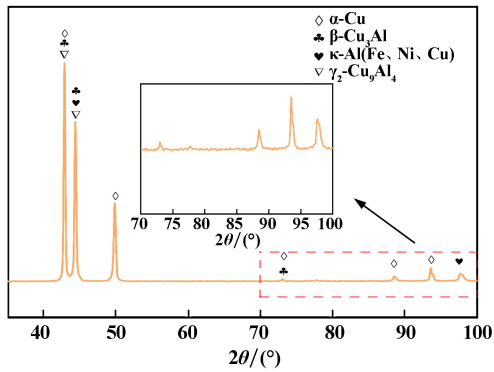


图1 挤压态棒材 XRD 图谱  
Fig.1 XRD pattern of an extruded rod

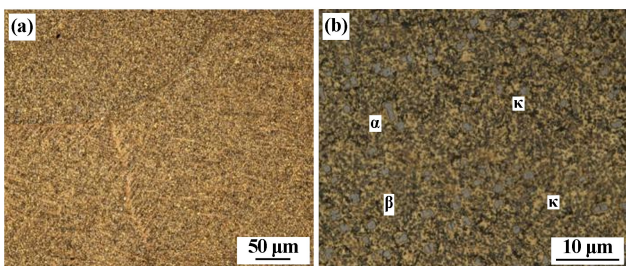


图2 挤压态棒材横截面金相显微组织  
Fig.2 Cross-sectional structure of an extruded rod under metallographic microscope

图3为挤压态QA111-6-6合金扫描显微组织,其中各特征点对应的能谱分析结果见图4。

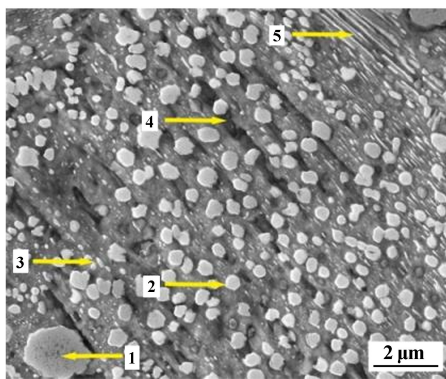
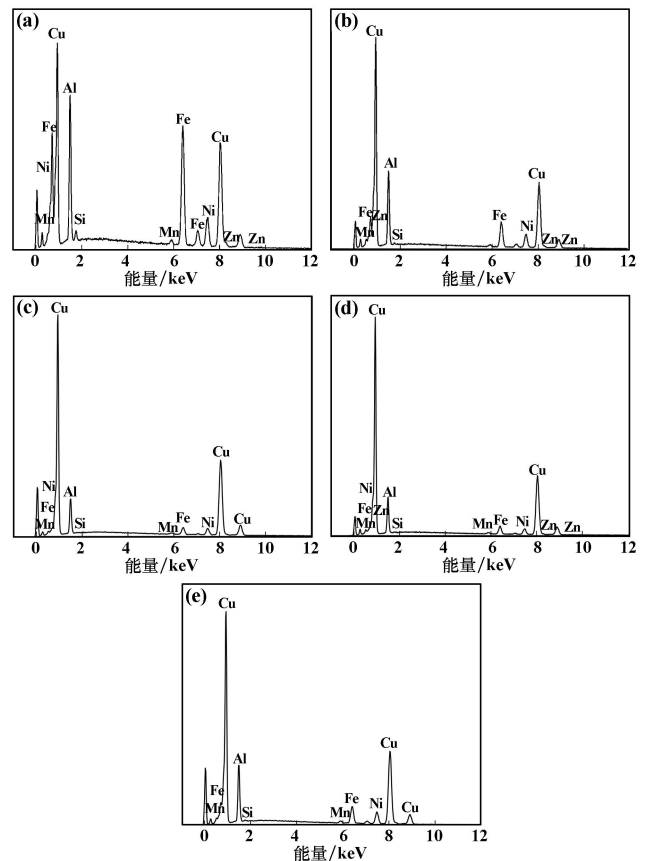


图3 挤压态棒材横截面扫描显微组织  
Fig.3 Cross-sectional SEM image of an extruded rod

图3中特征点1处和2处Al、Fe、Ni元素原子分数均高于合金所对应元素原子分数,判断其为 $\kappa$ 相,根据 $\kappa$ 相大小可判断特征点1处颗粒为 $\kappa_{II}$ (尺寸1~10  $\mu\text{m}$ ),2处颗粒为 $\kappa_{IV}$ (尺寸小于1  $\mu\text{m}$ )。3处为白亮色球状、杆状细小组织,Cu/Al原子比2.91。4处为黑色基体,Cu/Al原子比2.77。结合图1分析可知,3处物相为 $\alpha+\gamma_2$ ,4处物相为 $\beta'$ 相。5处为亮白色片层状

组织,Fe、Ni含量较高,判断其为 $\alpha+\kappa_{III}$ 相。



(a)点1; (b)点2; (c)点3; (d)点4; (e)点5

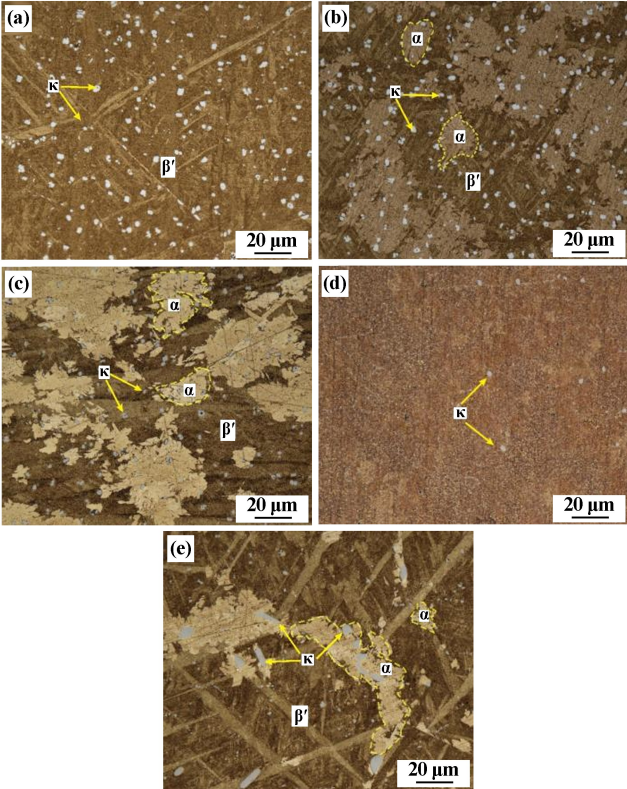
图4 图3中各特征点能谱分析结果

Fig.4 EDS analysis results of points in Figure 3

### 2.2.2 热处理状态下的显微组织特征

图5为QA111-6-6合金挤压棒热处理后典型状态下样品金相显微组织,对应的XRD图谱见图6。由图5~6可知,固溶-时效处理对合金组织影响较大,合金经固溶-时效后,其组织马氏体特征明显,XRD图谱中存在明显的 $\beta'$ 相峰,并且合金无明显条状( $\alpha+\kappa_{III}$ )相。这是因为铝青铜合金经高温固溶处理后合金中的 $\alpha$ 、 $\kappa$ 、 $\gamma_2$ 都转变为 $\beta$ <sup>[12]</sup>,固溶温度950  $^{\circ}\text{C}$ 时,合金为单相 $\beta$ ,淬火后得到亚稳态组织 $\beta'$ ,也称类马氏体。时效温度的高低决定各相的析出,时效温度升高到一定值时发生马氏体转变,时效温度较低时仅有少量 $\kappa$ 相析出。与其他样品相比,1#样品未见 $\alpha$ -Cu所对应的 $2\theta=48.7^{\circ}$ 处的衍射峰,时效温度达到一定值时发生 $\alpha$ 相的析出,但时效温度过高时 $\alpha$ 相数量增多、尺寸变大,导致合金软化,铝青铜合金中铝质量分数接近11%时,将发生共析转变,即析出( $\alpha+\gamma_2$ )相。

图7为合金经不同温度和时间固溶再水淬样品金相显微组织。图8为两种典型热处理状态下合金的扫



(a) 1#样品; (b) 2#样品; (c) 4#样品; (d) 7#样品; (e) 9#样品

图 5 热处理状态下典型合金的金相显微组织

Fig. 5 Optical microstructures of typical alloys after different heat treatment

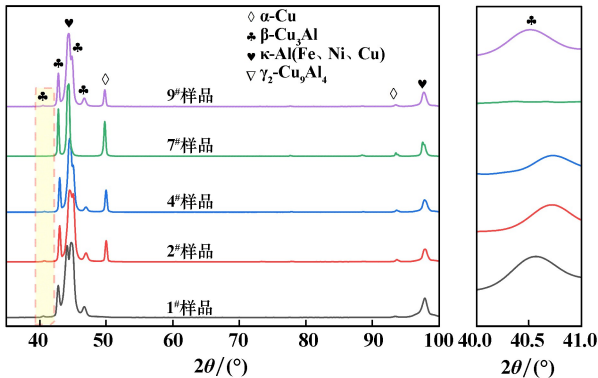
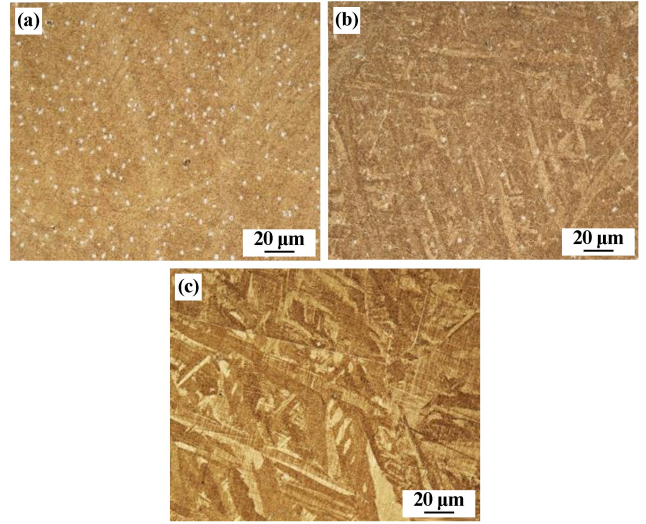


图 6 热处理状态下典型合金的 XRD 图谱及局部放大图

Fig. 6 XRD patterns of typical alloys after different heat treatment and the partial enlarged view

描显微组织。由图 7 可见,固溶温度会影响  $\kappa$  相的分散度。结合图 5 和图 7 可见,固溶温度 950  $^{\circ}\text{C}$  时,合金充分固溶,淬火后合金组织仅为单相  $\beta'$  相,再经时效处理后, $\kappa$  相析出无形核质点,导致  $\kappa$  相不能弥散均匀分布,出现聚集长大等特征,使合金组织出现局部不均匀性,不利于改善合金强度、硬度。固溶温度 910  $^{\circ}\text{C}$  时,合金物相为  $\beta'$  相和未发生固溶的  $\kappa$  相,作为时效

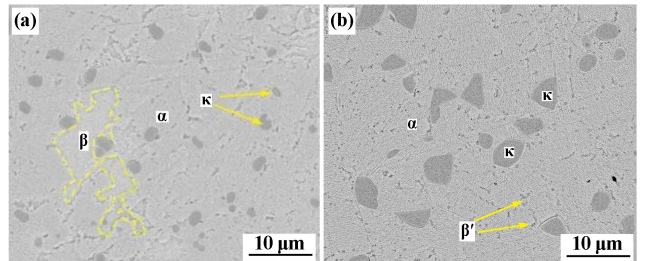
阶段  $\kappa$  相的形核质点,使得  $\kappa$  相均匀析出、弥散分布,同时  $\kappa$  相多呈球形,对合金基体无割裂作用,析出相可以钉扎位错,增大位错阻力,起弥散强化作用。但固溶温度较低时, $\alpha$  和  $\kappa$  相未能充分固溶到基体里,在后续时效过程中也不能细小弥散地析出,导致硬质析出相对合金硬度改善作用较小。



(a) 910  $^{\circ}\text{C} \times 45 \text{ min}$ ; (b) 950  $^{\circ}\text{C} \times 45 \text{ min}$ ; (c) 950  $^{\circ}\text{C} \times 60 \text{ min}$

图 7 固溶态合金金相显微组织

Fig. 7 Optical microstructure of alloy after solid solution



(a) 4#样品; (b) 9#样品

图 8 热处理状态下典型合金的扫描显微组织

Fig. 8 SEM microstructures of typical samples after different heat treatment

结合图 5 和图 8 可见,时效温度决定各相的析出。时效温度 400  $^{\circ}\text{C}$  时,合金组织与经固溶处理后的合金组织相似, $\beta'$  类马氏体特征较为明显,这是因为时效温度较低,未达到马氏体转变温度,时效过程中主要发生  $\kappa$  相的析出,仍有大量剩余的  $\beta'$  相。时效温度 450  $^{\circ}\text{C}$  时,部分  $\alpha$  相在  $\beta'$  相晶界处析出,其余  $\alpha$  相呈近似球状在  $\beta'$  相基体内析出, $\kappa$  相呈近似球状弥散分布在基体中,类马氏体特征仍存在但  $\beta'$  含量降低。对比 2# 样品和 4# 样品可知,时效时间延长,析出  $\alpha$  相尺寸变大。时效温度 500  $^{\circ}\text{C}$  保温 2 h 后合金马氏体特征基本消失。

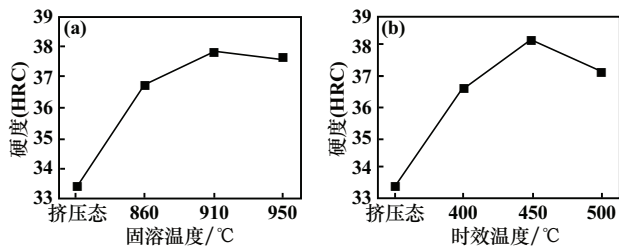
结果表明:低温固溶、低温时效时,合金中马氏体特

征不明显,且低温时效析出相析出不充分,合金硬度较低;中温固溶、中温时效时,析出相分布均匀,且各相含量适中,硬相 $\beta'$ 与 $\kappa$ 对合金的强化作用高于软相 $\alpha$ 对合金的软化作用,此时合金硬度更高;高温固溶、中温时效时,析出相分布不均匀,导致合金组织局部不均匀,不利于合金的强化;高温固溶、高温时效时,析出相 $\kappa$ 分布不均匀且类马氏体 $\beta'$ 相含量较少,不利于合金强化。

### 2.3 热处理工艺参数对合金硬度的影响

#### 2.3.1 固溶和时效温度对硬度的影响

图9为正交试验中温度对合金硬度指标的影响趋势。结合表3可知,提升固溶温度,合金硬度先上升后下降,固溶温度 $910\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时合金硬度最大。合金经 $910\text{ }^{\circ}\text{C}\times 45\text{ min}$ 固溶后,合金物相组成为 $\beta'$ 相和尺寸较小的 $\kappa$ 相,时效过程中未发生固溶的 $\kappa$ 相作为形核点, $\kappa$ 相分布更弥散均匀,对合金产生显著的沉淀强化,使得固溶时效后的合金硬度有较大幅度提高。虽然提高固溶温度有利于 $\alpha$ 、 $\kappa$ 两相固溶,但合金经 $950\text{ }^{\circ}\text{C}\times 60\text{ min}$ 固溶、水淬后,合金为 $\beta'$ 单相,时效过程中 $\kappa$ 相无形核点, $\kappa$ 相易发生聚集长大,不利于合金强化。由此可知,合适的固溶温度能促进时效过程中 $\kappa$ 相弥散析出,对合金产生第二相强化作用。时效温度对合金硬度的影响与固溶温度的影响相似,合金硬度均随着温度升高呈现先升高后降低的趋势。这是因为合金硬度受软相( $\alpha$ 相)和硬相( $\beta'$ 、 $\kappa$ 相)含量、大小共同影响,时效温度会直接影响各相的析出量及分散度,随着时效温度从 $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ 升到 $450\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,金属间化合物 $\kappa$ 相弥散析出增多,结合图5, $\kappa$ 相在合金中以细小球状析出,这种析出方式有利于合金的综合力学性能,使得合金硬度随着时效温度升高呈上升趋势。但时效温度进一步升高到 $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,一方面会过时效,致使组织软化,合金硬度降低,另一方面,虽然高温时效时析出的 $\kappa$ 相较多,但也伴随着硬相 $\beta'$ 的分解与软相 $\alpha$ 的析出,硬度降低。时效温度 $450\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时合金硬度更高,此时相组成为 $\alpha+\beta'+\kappa$ 三相共存。



(a) 固溶温度; (b) 时效温度

图9 温度对铝青铜合金硬度的影响

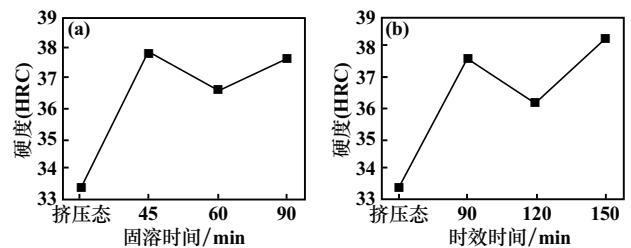
Fig.9 Effect of temperature on hardness of

aluminum bronze alloy

合金经固溶-时效处理后硬度提升的强化机制是固溶强化与沉淀强化,合金经固溶后获得 $\beta'$ 相,后续经合适的时效工艺处理,既保留了部分 $\beta'$ 相,又使得 $\kappa$ 相弥散析出,合金硬度得以提升。

#### 2.3.2 固溶和时效时间对硬度的影响

图10为正交试验中时间对合金硬度指标的影响趋势。由图10和表3可知,与温度相比,固溶时间和时效时间对合金硬度的影响较复杂。固溶时间和时效时间对合金硬度影响趋势相似,随着时间延长,合金硬度呈先降低后升高的变化趋势。随着固溶时间延长, $\alpha$ 相含量减少,利于提高硬度,但组织易发生粗化,对合金强度不利。时效时间会影响铝青铜组织中 $\alpha$ 相, $\kappa$ 相等析出相含量以及分布特点,时效时间过长, $\alpha$ 相变得粗大,但同时也伴随 $\kappa$ 相析出数量增加、 $\beta'$ 相含量减少,此时合金硬度由软相( $\alpha$ 相)以及硬相( $\beta'$ 、 $\kappa$ 相)共同决定。固溶时间 $45\text{ min}$ 和时效时间 $150\text{ min}$ 时合金硬度更高。时效时间对合金组织的析出、分布与合金硬度的影响还需进一步研究。



(a) 固溶时间; (b) 时效时间

图10 时间对铝青铜合金硬度的影响

Fig.10 Effect of time on hardness of aluminum bronze alloy

## 3 结论

1) 挤压态QA111-6-6合金室温下的组织由 $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\kappa$ 、 $\gamma_2$ 以及剩余 $\beta'$ 相组成,此状态下主要存在 $\kappa_{II}$ 、 $\kappa_{III}$ 、 $\kappa_{IV}$ 共3种 $\kappa$ 相。

2) 以硬度为指标,影响QA111-6-6铝青铜性能的热处理工艺参数强弱顺序为:时效时间>时效温度>固溶时间>固溶温度。

3) 优化后的热处理工艺参数为:  $910\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下固溶 $45\text{ min}$ ,水淬,随后在 $450\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下时效 $150\text{ min}$ ,空冷。在该工艺条件下铝青铜合金硬度达 $40.1\text{ HRC}$ 。

4) 与挤压态相比,固溶-时效处理后合金中无 $\alpha+\kappa_{III}$ 相,含有较多的类马氏体相 $\beta'$ ,合金硬度受硬相 $\beta'$ 、 $\kappa$ 及软相 $\alpha$ 综合影响。

### 参考文献(References):

[1] SEAN M O, JENNIFER K S, CHARLES R F. Influence of processing

- on the microstructure of nickel aluminum bronze (NAB)[J]. *Additive Manufacturing*, 2022,56:102859.
- [2] 许诺,王立昕,高瑜,等. 铝青铜合金的研究与发展[J]. *铸造工程*, 2021,45(2):11-15.  
XU Nuo, WANG Lixin, GAO Yu, et al. The research and development of aluminum bronze alloy[J]. *Foundry Engineering*, 2021,45(2):11-15.
- [3] 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.  
XUE Chen. Study on heat treatment process and properties of aluminum bronze (QAl10-4-4) connecting rod bushing[D]. Taiyuan: North University of China, 2019.
- [4] 郭贺冉,冯再新,殷傲,等. 固溶时效温度对锻后 QAl10-4-4 铝青铜组织与性能的影响[J]. *金属热处理*, 2020,45(6):63-66.  
GUO Heran, FENG Zaixin, YIN Ao, et al. Effects of solution and aging temperature on microstructure and properties of QAl10-4-4 aluminum bronze after forging[J]. *Heat Treatment of Metals*, 2020,45(6):63-66.
- [5] XU G, CHEN B, ZHANG D, et al. Effect of heating treatment on microstructure and properties of QAl10-4-4 aluminum bronze alloy[C]//3rd International Conference on Electron Device and Mechanical Engineering (ICEDME). 2020:481-485.
- [6] 应俊龙,巢昂轩,李智勇. 热处理工艺对离心铸造 QAl10-4-4 铝青铜组织及性能的影响[J]. *特种铸造及有色合金*, 2021,41(12):1568-1571.  
YING Junlong, CHAO Bingxuan, LI Zhiyong. Effect of heat treatment process on microstructure and properties of QAl10-4-4 aluminum bronze[J]. *Special Casting & Nonferrous Alloys*, 2021,41(12):1568-1571.
- [7] 路俊攀. 加工铜及铜合金金相图谱[M]. 长沙:中南大学出版社, 2010.  
LU Junpan. Photographical spectrum for worked copper and copper alloys[M]. Changsha: Central South University Press, 2010.
- [8] MA S, YANG X B, FU L M, et al. Achieving high strength-ductility synergy in nickel aluminum bronze alloy via a quenching-aging-tempering heat treatment[J]. *Materials Letters*, 2023,333:133661.
- [9] MA S, YE C, YANG X, et al. Microstructure evolution during the heavy warm rolling of a nickel aluminum bronze[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2023,883:145458.
- [10] 马倩,刘光磊,张令喻,等. 固溶时效深冷处理对 ZQAl10-3-1.5 合金摩擦磨损性能的影响[J]. *材料热处理学报*, 2018,39(2):32-37.  
MA Qian, LIU Guanglei, ZHANG Lingyu, et al. Effects of solid solution and aging and cryogenic treatment on friction and wear properties of ZQAl10-3-1.5 alloy[J]. *Transactions of Materials and Heat Treatment*, 2018,39(2):32-37.
- [11] 田荣璋,王祝堂. 铜合金及其加工手册[M]. 长沙:中南大学出版社, 2006.  
TIAN Rongzhang, WANG Zhutang. Processing handbook of the copper alloy[M]. Changsha: Central South University Press, 2006.
- [12] 金云学,都春燕,王磊. 镍铝青铜组织在热处理过程中的演变规律[J]. *特种铸造及有色合金*, 2014,34(9):1004-1008.  
JIN Yunxue, DU Chunyan, WANG Lei. Microstructural evolution of nickel aluminum bronze during heat treatment process[J]. *Special Casting & Nonferrous Alloys*, 2014,34(9):1004-1008.
- 引用本文:**刘莹雪,刘鹏程,胡克福,等. 热处理对 QAl11-6-6 合金挤压棒组织与硬度的影响[J]. *矿冶工程*, 2025,45(1):160-165.  
LIU Yingxue, LIU Pengcheng, HU Kefu, et al. Effect of heat treatment on microstructure and hardness of QAl11-6-6 alloy extruded rod[J]. *Mining and Metallurgical Engineering*, 2025,45(1):160-165.

(上接第 159 页)

- [37] YOSHIZAWA M, IGARASHIM M, MORIGUCHIK K, et al. Effect of precipitation long-term creep deformation properties of P92 and P122 type advanced ferritic steels for USC power plants[J]. *Materials Science and Engineering A*, 2009,510-511:162-168.
- [38] FEDOROVA I, BELYAKOV A, KOZLOV P, et al. Laves-phase precipitates in a low-carbon 9% Cr martensitic steel during aging and creep at 923 K[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2014,615:153-163.
- [39] NABIRAN N, KLEIN S, WEBER S, et al. Evolution of the Laves phase in ferritic heat-resistant steels during long-term annealing and its influence on the high-temperature strength[J]. *Metallurgical & Materials Transactions: A*, 2015,46:102-114.
- [40] HU C P, HU J M, GAO Y, et al. A journal co-citation analysis of library and information science in China[J]. *Scientometrics*, 2011,86(3):657-670.
- 引用本文:**肖璇,金毛毛,秦文洲,等. 基于 CiteSpace 的高温结构材料用 Laves 相合金的文献计量和可视化[J]. *矿冶工程*, 2025,45(1):153-159.  
XIAO Xuan, JIN Maomao, QIN Wenzhou, et al. CiteSpace-based bibliometrics and visualization of Laves phases for high temperature applications[J]. *Mining and Metallurgical Engineering*, 2025,45(1):153-159.