

新型 Cu-Al-Fe-Ni 变形铝青铜的固溶和时效强化

林高用^{1,2}, 曾菊花¹, 王 莉¹, 金一伟¹, 宋佳胜¹

- (1. 中南大学 材料科学与工程学院, 长沙 410083;
2. 中南大学 有色金属材料科学与工程教育部重点实验室, 长沙 410083)

摘 要: 采用正交试验法, 结合金相、X 射线衍射、扫描电镜、能谱和力学性能等分析测试手段, 对一种自主研发的 Cu-Al-Fe-Ni 变形铝青铜的固溶和时效强化工艺进行研究。结果表明: 固溶时效工艺参数对合金抗拉强度、伸长率和硬度的作用主次顺序为时效温度、固溶温度、时效时间、固溶时间, 其中温度对合金力学性的影响趋势单一, 但时间的影响较复杂。经优化获得的最佳固溶时效工艺为: 先在 880 °C 下固溶 3 h、水淬, 再在 480 °C 下时效 1 h、空冷。合金的抗拉强度达 810 MPa, 伸长率达 9%, 硬度达 255 HB, 其综合力学性能比挤压态合金的有较大幅度的提高; 软硬相的面积比及其显微硬度对合金的力学性能有较大的影响。

关键词: 变形铝青铜; 固溶; 时效; 正交设计; 力学性能

中图分类号: TG166.2

文献标志码: A

Solution and aging strengthening of novel Cu-Al-Fe-Ni wrought aluminum bronze

LIN Gao-yong^{1,2}, ZENG Ju-hua¹, WANG Li¹, JIN Yi-wei¹, SONG Jia-sheng¹

- (1. School of Materials Science and Engineering, Central South University, Changsha 410083, China;
2. Key Laboratory of Nonferrous Metal Materials Science and Engineering, Ministry of Education, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: The solution and aging treatments of a novel Cu-Al-Fe-Ni wrought aluminum bronze were investigated by orthogonal experiments. The methods of analysis and test include OM, XRD, SEM, EDS and mechanical tests. The results show that the acting order of parameters of solution and aging on the mechanical properties is as follows: aging temperature, solution temperature, aging time, and solution time. The influence of solution temperature and aging temperature on the mechanical properties is single, while the influence with the solution time and aging time is more complex. By optimization, the best solution and aging processes are confirmed as: solution treated at 880 °C for 3 h and then aged at 480 °C for 1 h. The comprehensive mechanical properties of the alloy treated under the optimized processes are greatly improved ($\sigma_b=810$ MPa, $\delta=9\%$, 255 HB). The area ratio of soft phases to hard phases and their microhardnesses have great influences on the mechanical properties.

Key words: wrought aluminum bronze; solution; aging; orthogonal design; mechanical properties

铝青铜以优异的力学性能、耐磨、耐热和耐腐蚀性能广泛应用于轴承、轴套、齿轮、圆盘、导向摇臂衬套、接管嘴等耐磨蚀零件的制造。随着现代工业和高科技生产的快速发展, 对铝青铜结构件的服役性能

提出了更高的要求, 发展高强耐磨铝青铜已成为一种趋势^[1-2]。20 世纪以来, 国内外对发展高强耐磨铝青铜进行了较多的研究, 主要集中在通过调整合金的成分、优化热处理工艺、采用变质处理或者对合金进行

表面处理来提高其力学性能和耐磨性能^[2-9]。已有对复杂铝青铜热处理的研究结果表明^[2-5,9],选取合适的热处理工艺和参数能较大幅度地调整合金的性能,且该方法相对低廉。固溶和时效是铝青铜的主要热处理强化方法,其最佳工艺因成分的不同而呈现出一定的差异。对于一种合金成分,通过试验来确定所有热处理工艺参数的最佳匹配值既耗时耗力,也难以获得综合可信的结论。本文作者采用正交设计法,以一种自主研发的Cu-Al-Fe-Ni变形铝青铜为实验对象,研究固溶时效温度与时间对力学性能的作用主次顺序及最佳热处理工艺组合,以通过热处理提高合金的性能,扩大其应用范围。

1 实验

试验材料采用中频无芯感应电炉熔炼,在880 t卧式双动挤压机上将铸锭挤压成管材,其成分如表1所列。管材的抗拉强度为729 MPa,伸长率为19.1%,硬度为194 HB。热处理试样沿挤压态管材纵向截取。

表1 管材的化学成分

Table 1 Composition of pipes (mass fraction, %)

Al	Fe	Ni	Cu
8.5-9.0	4.0-4.5	3.0-3.5	Bal.

参考Cu-Al相图^[1]及有关文献^[6-10],确定固溶温度、固溶时间、时效温度和时效时间4个因素的3个水平,如表2所示。4因素3水平的正交试验安排如表3所列。

热处理实验在箱式电阻炉中进行。拉伸实验在MTS 810材料试验机上进行,拉伸速率为2 m/min;宏观硬度测试在HB-3000B布氏硬度计上进行;金相

表2 固溶时效工艺的因素位级表

Table 2 Level table of factors of solution and aging process

Level	Factor			
	A, solution temperature/°C	B, solution time/h	C, aging temperature/°C	D, aging time/h
1	830	1	480	1
2	880	2	550	2
3	920	3	620	3

样品用FeCl₃(59 mL)+HCl(25 mL)+H₂O(200 mL)溶液腐蚀,观察面与挤压方向垂直;显微硬度在HMV-2T唯氏显微硬度计上进行;采用Quanta200环境扫描电镜和Gensis60多功能电子能谱仪进行微区组织与成分的观察及检测。

2 结果与分析

2.1 热处理参数的作用主次顺序

不同状态下合金力学性能的正交试验结果如表3所示。可见,经热处理后铝青铜的力学性能,特别是抗拉强度,较挤压态的有较大幅度的提高。由于本实验合金主要用于低速重载条件下矿山、冶金等行业轴承、轴套、螺母、轧机滑块等耐磨零件的制造,要求合金有较高的强度和较优的耐磨性能,因此,优先考虑合金的抗拉强度,其次是硬度,最后是伸长率。时效温度作用下的3个力学性能指标的极差值都近似最大,所以为最主要的因素。反之,固溶时间作用下的3个指标的极差值均最小,所以为最次要的因素。温度对伸长率的影响程度远大于时间。综合考虑抗拉强度、硬度和伸长率,4个因素作用的主次顺序如下:时效温度、固溶温度、时效时间、固溶时间。

由此也可知,温度是影响该Cu-Al-Fe-Ni铝青铜力学性能最主要的因素,而时间则是次要因素。这与张华等^[3]对一种KK铝青铜(和本合金成分相近)的正交热处理研究结果一致。何勇^[9]对QA1-10-5-5铝青铜的热处理研究也表明,温度对合金韧性的影响远远大于保温时间的。李文生等^[5]也认为加热温度对Cu-Al14-X高铝青铜伸长率的影响程度大于保温时间的,但若以硬度为指标,各因素对合金的影响由大至小的顺序则为固溶温度、时效时间、时效温度和固溶时间。可见,热处理参数对合金性能的作用主次顺序因成分和指标而有一定的差别。

表3 正交试验安排及力学性能测试结果

Table 3 Arrangement of orthogonal design and mechanical properties

Experiment No.	Solution temperature/°C	Solution time/h	Aging temperature/°C	Aging time/h	σ_b /MPa	δ /%	Hardness, HB
1	830	1	480	1	788	16.9	209
2	830	2	550	2	743	24.9	182
3	830	3	620	3	713	25.8	183
4	880	1	550	3	790	22.2	193
5	880	2	620	1	751	26.2	180
6	880	3	480	2	774	15.6	210
7	920	1	620	2	740	17	177
8	920	2	480	3	778	2.2	233
9	920	3	550	1	798	12.7	223
$\overline{\sigma_{b1j}}$	748	773	780	779			
$\overline{\sigma_{b2j}}$	772	757	770	752			
$\overline{\sigma_{b3j}}$	772	762	735	760			
Range R_1	24	16	45	27			
$\overline{\delta_{1j}}$	22.5	18.7	11.6	18.6			
$\overline{\delta_{2j}}$	21.3	17.8	19.9	19.2			
$\overline{\delta_{3j}}$	10.6	18	23	16.7			
Range R_2	11.9	0.9	11.4	2.5			
$\overline{H_{1j}}$	191	193	217	204			
$\overline{H_{2j}}$	194	198	199	190			
$\overline{H_{3j}}$	211	205	180	203			
Range R_3	20	12	37	14			

Note: $\overline{\sigma_{bij}}$, $\overline{\delta_{ij}}$ and $\overline{H_{ij}}$ are average values of tensile strength, elongation and hardness of test corresponding to line j and row i . R_1 , R_2 and R_3 are differences between maximum and minimum of $\overline{\sigma_{bij}}$, $\overline{\delta_{ij}}$ and $\overline{H_{ij}}$, respectively.

2.2 最佳热处理工艺组合及验证

以强度、硬度和伸长率为指标,采用综合平衡法确定合金的最佳热处理方案组合为 $A_2B_3C_1D_1$ (固溶温度 880 °C,固溶时间 3 h,时效温度 480 °C,时效时间 1 h),显然不在正交试验的 9 组方案中。基于此,对于其是否为最佳方案,需要通过进一步的实验来证明。

将优化出的最佳组合方案标号为 10 号,验证性实验按照该方案进行,即将样品先在 880 °C 的温度下固溶 3 h,水淬,随后在 480 °C 的温度下时效 1 h,空冷,最后对样品进行力学性能检测和组织分析。结果表明,合金在优选出的实验条件下的抗拉强度为 810 MPa,伸长率为 9%,硬度为 255 HB,其综合力学性

能高于 9 组正交热处理试验结果。与正交试验中最好的实验方案 9 号相比,合金在优选出的实验条件下的强度和硬度均更高,其伸长率虽有所下降,但仍满足使用要求。可见,优选出的方案确实为最佳实验方案。

2.3 典型状态下铝青铜的显微组织特征

为了探究铝青铜组织与性能的关系,根据正交试验力学性能测试结果,对挤压态与 4 个典型热处理状态下试样的显微组织特征进行分析。

2.3.1 挤压态的组织与物相

结合图 1、图 2 及特征点的能谱分析结果(表 4)可知,铝青铜在挤压态下的组织主要由 α 铜基固溶体和

K 相组成。 K 相在组织中具有不同的形态和分布, 根据 HASAN 等^[1]的研究, B 点所示的椭圆形大块状相不同区域的成分不同, 但都属于 K_I 相, 即为富铁相、 $FeAl$ 相或 $FeAl_3$ 相, 是铝青铜在凝固过程中首先从富铁区析出的初晶相; 分布在晶界附近的粒状相, 如 C 、

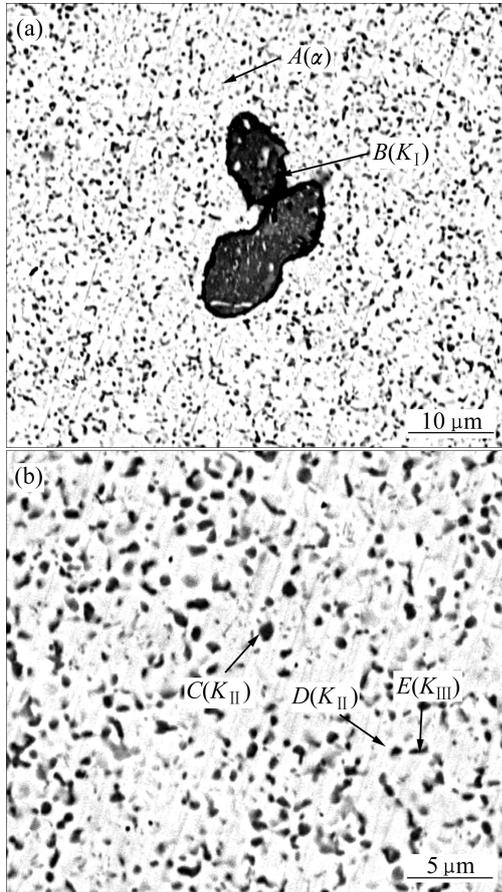


图1 挤压态管材的横向组织
Fig. 1 Transversal microstructures of extruded pipe: (a) Low magnification; (b) High magnification

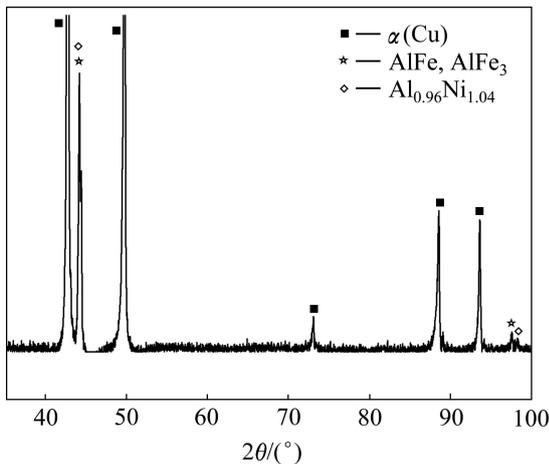


图2 挤压态管材的 XRD 谱
Fig. 2 XRD pattern of extruded pipe

表4 图1所示特征点的能谱分析结果

Table 4 Energy spectrum analysis of characteristic locations in Fig. 1

Characteristic location	Mole fraction/%					Phase type
	Al	Fe	Ni	Si	Cu	
A	18.4	3.1	2.9	0.2	Bal.	$\alpha(Cu)$
B	18.7	60.0	4.3	4.3	Bal.	$K_I(AlFe_3)$
C	28.7	23.6	8.2	0.5	Bal.	$K_{II}(AlFe)$
D	24.1	21.2	7.6	0.3	Bal.	$K_{II}(AlFe)$
E	25.8	10.3	26.7	0.1	Bal.	$K_{III}(AlNi)$

D 所示点为 K_{II} 相, 主要是 $FeAl$ 系列化合物; 分布在晶界上的 E 点所示棒状粒子则为 K_{III} 相($Al_{0.96}Ni_{1.04}$), 但 K_{III} 相更多地存在于呈片层状分布的 $\alpha+K_{III}$ 共析体中。根据 HASAN 等^[1]的描述, 铝青铜组织中还可能存在从 α 相中析出的等轴 K_{II} 富铁相, 起弥散强化的作用。

2.3.2 典型热处理状态下的显微组织特征

根据 Cu-Al 二元相图以及含 4%Fe 和 4%Ni 的 Cu-Al 相图的富铜角^[1]可知, 在本实验中, 铝青铜的平衡组织应为 $\alpha+K$, 但是在实际冷却条件下, 合金中往往存在未转变的 β' 亚稳相。 β' 相是 β 相的同素异形体, 呈马氏体形态, 两者都是以 Cu_3Al 为基的固溶体。表 5 所列挤压态和 4 种典型热处理状态下合金的显微组织特征。由该表可知, 合金经热处理后, 其组织中的 α 相减少, 而出现了更多的 $\alpha+K_{III}$ 共析体或残余 β' 相。这是因为合金经高温固溶处理时, 组织中的 α 相和 K 相转变成 β 相, 固溶温度越高, 转变越充分; 随后的淬火急冷处理使 β 相转变成亚稳 β' , 并伴随着 K 相的析出; 亚稳 β' 相再在合适的时效温度下转变成 $\alpha+K_{III}$ 共析体, 并伴随有 K 相从 β' 相析出。时效过程中 α 相基本保持不变, 其量的大小主要与固溶工艺有关^[11-12]。表 5 可定量地反映出, 随着固溶温度的升高和时间的延长, 组织中 α 相减少, β' 相或 $\alpha+K_{III}$ 共析体增多。时效工艺则决定了 β' 相是否能向 $\alpha+K_{III}$ 共析体转变及其转变量。据表 5 可知, 试验合金的共析温度介于 550~620 °C 之间。

在铝青铜的各种物相中, α 相的塑性最好, 但硬度低; β' 相的硬度高于 α 相的, 但塑性相对较差; K 相为一系列 $Fe(Al, Ni)$ 金属间化合物, 硬度最高。图 3 和 4 所示分别为试样在 4 种典型热处理状态下的显微组织。可见, 与图 1 所示挤压态相比, 经热处理后的组织都发生一定程度的粗化, 且随着固溶温度的升高, 粗化越严重。经 920 °C 固溶的 8 号和 9 号态组织粗化

表5 典型状态下铝青铜的显微组织特征

Table 5 Characteristics of aluminum bronze microstructures under typical conditions

State No.	Condition	Characteristics of mechanical property	Phase type	Volume fraction/%	HV _{0.01}
0	Extruded	Low strength and hardness, middle ductility	α	95.8	192
			K	4.2	337
3	(830 °C, 3 h)+ (620 °C, 3 h)	High ductility	$\alpha+K_{III}$ eutectoid	72	171
			K	33.2	172
8	(920 °C, 2 h)+ (480 °C, 3 h)	Low ductility	K	4.8	332
			α	20	141
9	(920 °C, 3h)+ (550 °C, 1 h)	High strength and hardness, middle ductility	β'	75.6	235
			K	4.4	457
10	(880 °C, 3 h)+ (480 °C, 1 h)	Good comprehensive mechanical properties	α	14.1	143
			β'	81.8	221
10	(880 °C, 3 h)+ (480 °C, 1 h)	Good comprehensive mechanical properties	K	4.1	457
			α	34.8	154
10	(880 °C, 3 h)+ (480 °C, 1 h)	Good comprehensive mechanical properties	β'	60	338
			K	5.2	338

最严重。3号态组织虽然细小，但是由于其含有较多的 α 软相，且 $\alpha+K_{III}$ 共析体的显微硬度也较低，所以其宏观硬度和抗拉强度均较低，而塑性则很好。9号态是9组正交试验中综合性能最好的状态，8号态处于低塑性状态，而10号态则是优选出来的状态。三者的组织特征相似，都由 α 、 β' 和 K 相组成，其中硬相($\beta'+K$ 相)的面积率分别为86%、80%和65%。根据表3和验证实验结果，从9号、8号至10号态，硬相的面积率呈减小趋势，但硬度却逐渐增大。这是因为 β' 相的显微硬度呈显著增大的趋势。可见，除了文献[9]中描述的 β' 相的含量对合金的硬度有重要影响外，其显微硬度也影响合金的硬度。结合图3和图4可知，经低温短时时效的10号组织中的 β' 相呈显著的马氏体形态，因而拥有较高的显微硬度。根据表3，从9号、8号至10号，合金的抗拉强度和伸长率都是先减小后增大，其中8号态的伸长率很小。这是因为从9号、8号至10号态，组织变得细小，弥散分布的 K 相增多， β' 相的显微硬度增大，有利于合金的强化，但是 α 软相的增加降低了合金的抗拉强度，两者共同决定合金强度的变化；晶粒的细化、软相的增多虽有利于提高塑性，但 β' 相的显微硬度增大，使变形抗力增大，增加了合金发生塑性变形的难度，两者之间的强弱同样也决定了伸长率的变化趋势。

总之，合金中的各种显微组织特征一起决定着合

金的力学性能。通过控制固溶和时效工艺，有效地控制组织中软、硬相的比例及显微硬度，将有利于获得具有优良综合力学性能的变形铝青铜。

2.4 热处理参数对性能的影响

2.4.1 温度对力学性能的影响

图5所示为正交热处理试验结果中固溶时效参数对力学性能指标的影响趋势。结果表3可知，随着固溶温度的升高，抗拉强度和硬度均增加，而伸长率则减小。这是因为固溶温度的提高使更多的 α 相和 K 相发生固溶， β' 硬相增多，而 α 软相则减少，有利于提高抗拉强度和硬度。当固溶温度为880 °C时，合金有较好的综合力学性能，较挤压态有较大幅度的提高。由图5(b)和表3可知，时效温度对合金力学性能的影响趋势恰好和固溶温度相反。这是因为随着时效温度的提高，虽然有更多的 K 相强化粒子析出，但是同时更多 β' 硬相分解成 $\alpha+K_{III}$ 共析体，降低了合金的硬度和抗拉强度；共析体的形态也随着温度的升高由层状向粒状转变，有利于提高塑性。

2.4.2 时间对力学性能的影响

由图5(c)和表3可知，和温度相比，时间对力学性能的影响较复杂。随着固溶时间的延长，伸长率变化很小，硬度呈小幅度增大，抗拉强度则先减小后增大。这是因为和固溶温度一样，随着固溶时间的延长，

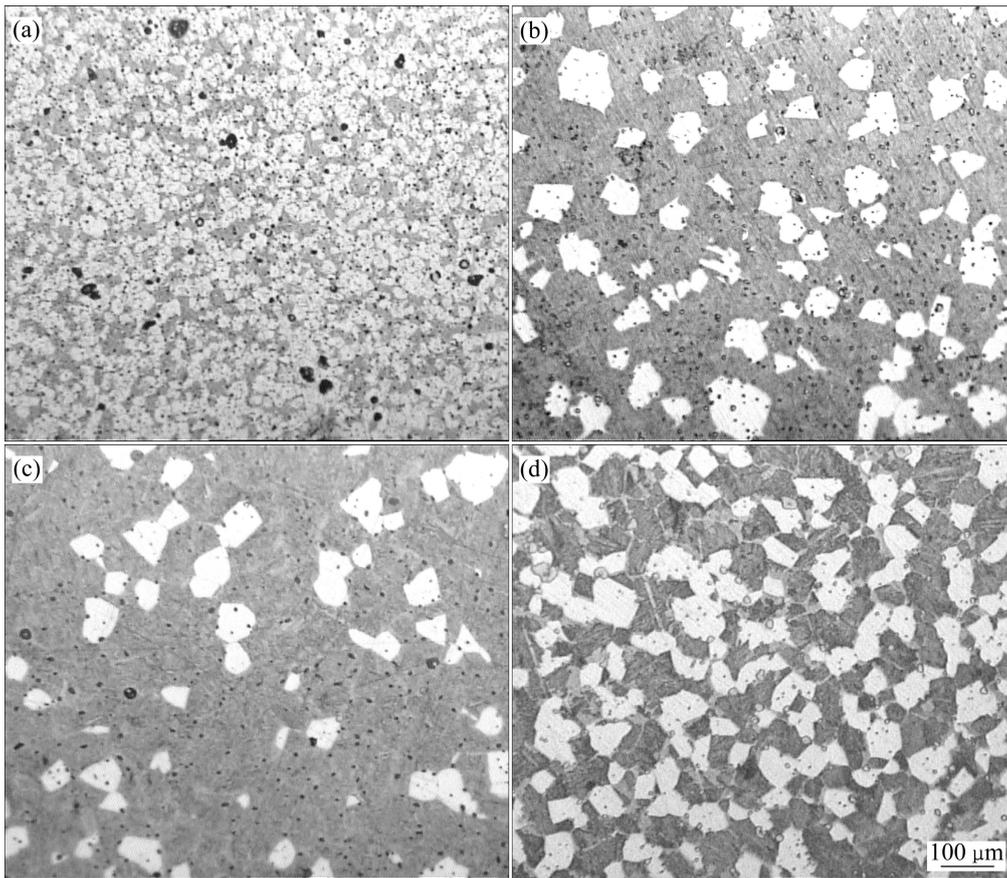


图 3 4 种典型热处理状态下试样的金相显微组织

Fig. 3 Optical microstructures of samples under four typical heat treatments: (a) State 3; (b) State 8; (c) State 9; (d) State 10

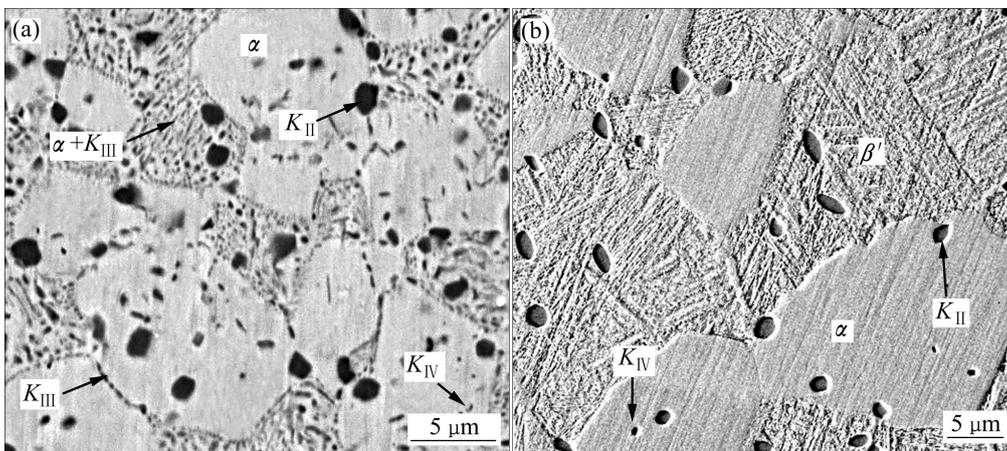


图 4 两种典型热处理状态下试样的高倍组织

Fig. 4 SEM microstructures of samples under two typical heat treatments: (a) State 3; (b) State 10

第二相固溶更充分, α 软相的面积率减小, 有利于提高硬度, 但降低了塑性; 随着时间的延长, 组织发生粗化, 对抗拉强度不利, 而 α 软相减少, 有利于提高抗拉强度。总之, 当固溶时间为 3 h 时, 合金有较好的力学性能, 较挤压态有一定幅度的提高。时效时间

对合金力学性能的影响更复杂。研究表明^[5, 15-16], 时效时间是影响析出相数量、形态与分布的重要因素, 且因合金的成分而呈现出一定的差异。关于时效时间对试制合金组织与性能的影响及机理有待进一步研究。

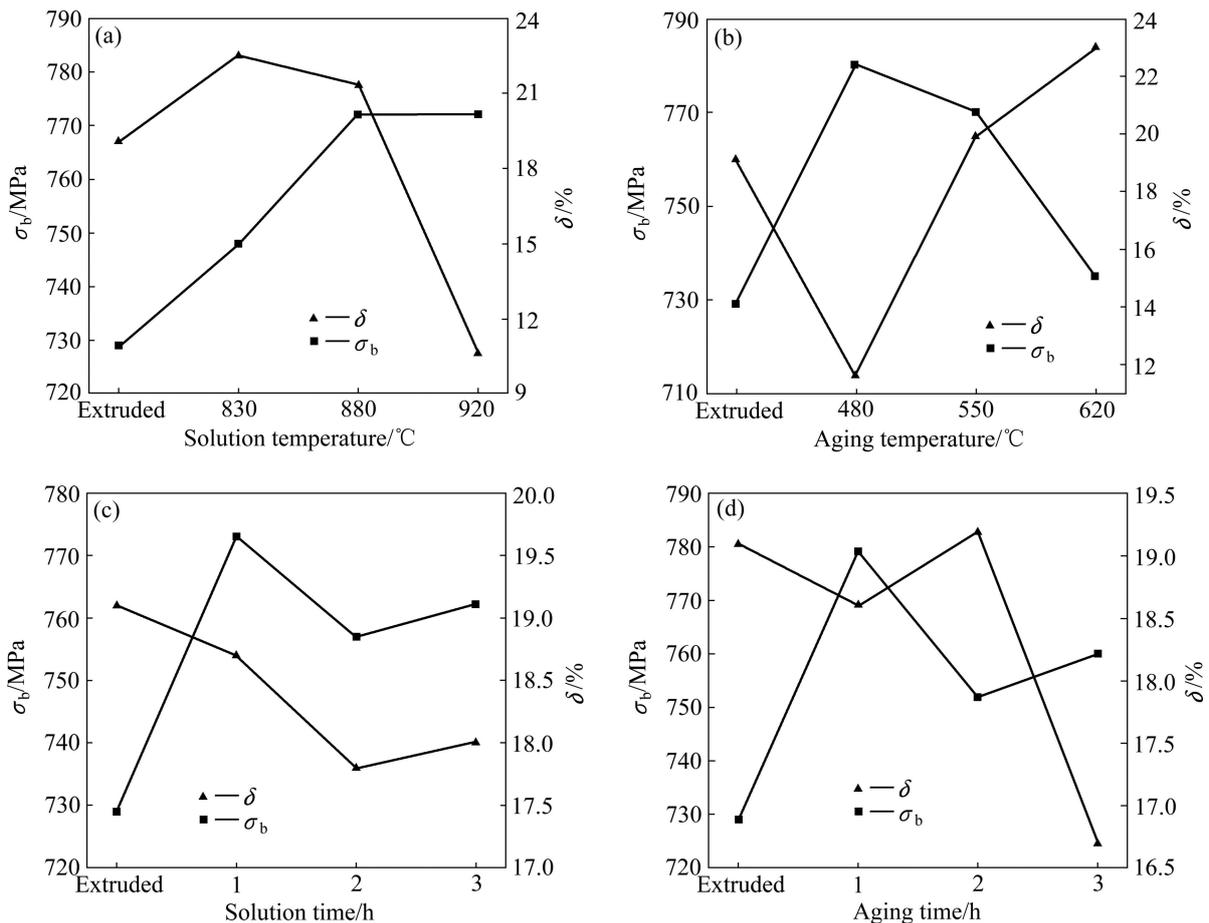


图5 固溶和时效参数对力学性能指标的影响

Fig. 5 Effects of solution and aging parameters on mechanical properties: (a) Solution temperature; (b) Aging temperature; (c) Solution time; (d) Aging time

3 结论

1) 综合考虑抗拉强度、硬度和伸长率 3 个指标, 影响自制 Cu-Al-Fe-Ni 铝青铜性能的 4 个热处理参数的主次顺序是: 时效温度、固溶温度、时效时间、固溶时间, 其中固溶和时效温度对合金力学性的影响趋势单一, 而保温时间对其影响较复杂。

2) 经优化得出的最佳固溶和时效热处理工艺为: 先在 880 °C 下固溶 3 h, 水淬, 随后在 480 °C 下时效 1 h, 空冷。合金在该工艺下的抗拉强度达 810 MPa, 硬度达 255 HBS, 伸长率达 9%, 总体较挤压态的有较大幅度的提高。

3) 与挤压态组织相比, 经固溶和时效后组织中的 α 软相大幅减少, 还含有较多的 β' 相及 $\alpha+K_{III}$ 共析产物, ($\beta'+K$) 硬相和 α 软相的面积比及显微硬度对合金的力学性能有较大的影响。

REFERENCES

- [1] 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: 241-325.
TIAN Rong-zhang, WANG Zhu-tang. Processing handbook of the copper alloy[M]. Changsha: Central South University Press, 2006: 241-325.
- [2] 徐建林, 王智平. 铝青铜合金的研究与应用进展[J]. 有色金属, 2004, 56(4): 51-54.
XU Jian-lin, WANG Zhi-ping. Research and application situation of aluminum bronze[J]. Nonferrous Metals, 2004, 56(4): 51-54.
- [3] 张华, 张卫文, 夏伟, 李元元. 高强耐磨变形铝青铜的热处理工艺[J]. 华南理工大学学报: 自然科学版, 2002, 30(2): 91-93.
ZHANG Hua, ZHANG Wei-wen, XIA Wei, LI Yuan-yuan. Heat treatment technology of a high-strength wear-resisting wrought aluminium bronze[J]. Journal of South China University of Technology: Natural Science, 2002, 30(2): 91-93.

- [4] LI Wen-sheng, WANG Zhi-ping, LU Yang, GAO Yong, XU Jian-lin. Preparation, mechanical properties and wear behaviors of novel aluminum bronze for dies[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2006, 16: 607-612.
- [5] 李文生, 王智平, 路 阳. 高强耐磨铝青铜热处理工艺的研究[J]. 甘肃工业大学学报, 2002, 28(2): 26-28.
LI Wen-sheng, WANG Zhi-ping, LU Yang. Research on heat-treatment process of high-strength wear-resistance aluminum alloy[J]. Journal of Gansu University of Technology, 2002, 28(2): 26-28.
- [6] GAO Lei-lei, CHENG Xian-hua. Microstructure and mechanical properties of Cu-10%Al-4%Fe alloy produced by equal channel angular extrusion[J]. Materials and Design, 2008, 29: 904-908.
- [7] 张大童, 陈瑞萍, 罗宗强, 张卫文, 李元元. 热处理温度对高强变形铝青铜组织和力学性能的影响[J]. 稀有金属, 2010, 34(4): 521-525.
ZHANG Da-tong, CHEN Rui-ping, LUO Zong-qiang, ZHANG Wei-wen, LI Yuan-yuan. Effect of heat-treatment temperature on microstructure and mechanical properties of high strength aluminum bronze[J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2010, 34(4): 521-525.
- [8] KAPLAN M, YILDIZ A K. The effects of production methods on the microstructures and mechanical properties of an aluminum bronze[J]. Materials Letters, 2003, 57: 4402-4411.
- [9] 何 勇. QAl10-5-5 铝青铜热处理工艺的研究[J]. 国外金属热处理, 2005, 26(2): 12-18.
HE Yong. Research on heat treatment of QAl10-5-5 aluminum bronze[J]. Heat Treatment of Metals Abroad, 2005, 26(2): 12-18.
- [10] 高允彦. 正交及回归试验设计方法[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1988: 32-64.
GAO Yun-yan. Orthogonal and regression test design method[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1988: 32-64.
- [11] HASAN F, JAHANAFROOZ A, LORIMER G W, RIDLEY N. The morphology crystallography and chemistry of phases in as-cast nickel-aluminum bronze[J]. Metallurgical Transactions A, 1982, 13: 1337-1342.
- [12] ZHANG Da-tong, CHEN Rui-ping, ZHANG Wen-wen, LUO Zhong-quan, LI Yuan-yuan. Effect of microstructure on the mechanical and corrosion behaviors of a hot-extruded nickel aluminum bronze[J]. Acta Metallurgical Sinica, 2010, 23(2): 113-120.
- [13] 李文生, 路 阳, 袁利华, 王智平, 金玉花. 新型铝青铜 Cu-14Al-X 的热处理强化[J]. 金属热处理, 2006, 31(8): 71-75.
LI Wen-sheng, LU Yang, YUAN Li-hua, WANG Zhi-ping, JIN Yu-hua. Heat treatment strengthening of a novel aluminum bronze Cu-14Al-X[J]. Heat Treatment of Metals, 2006, 31(8): 71-75.
- [14] CHEN Fu-xiao, LI He-jun, GUO Jun-qing, YANG Yong-shun. Predictive model of superplastic properties of aluminum bronze and of the superplastic extrusion test[J]. Materials Science and Engineering A, 2009, 499: 315-319.
- [15] 高万茹, 程先华. 等通道转角挤压对铝青铜力学性能的影响[J]. 上海交通大学学报, 2011, 45(1): 35-39.
GAO Wang-ru, CHENG Xian-hua. Effect of mechanical properties of Cu-10%Al-4%Fe alloy prepared by equal channel angular extrusion[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2011, 45(1): 35-39.
- [16] SUN Y S, LORIMER G W, RIDLEY N. Microstructure and its development in Cu-Al-Ni alloys[J]. Metallurgical Transactions A, 1990, 21: 575-581.

(编辑 龙怀中)