



GW01 铝合金管材的热处理工艺

李龙飞^{1,4}, 邢书明¹, 杨金山², 王井玲^{1,3}, 马洪岩², 刘 华², 郭 凯²

- (1. 北京交通大学 机械与电子控制工程学院, 北京 100044;
2. 金轮天大数控机床有限公司, 天津 301709;
3. 天津职业技术师范大学 机械工程学院, 天津 300222;
4. 中色(天津)有色金属有限公司, 天津 300393)

摘 要: GW01 铝合金是在 6061 铝合金基础上研发的一种新型高强铝合金。采用三因素三水平的正交实验, 研究了固溶温度-时间、时效温度、时效时间三因素对 GW01 铝合金 T6 处理后力学性能的影响规律。结果表明: 随着固溶温度的提高和固溶时间的缩短, GW01 铝合金的抗拉强度、屈服强度和硬度均有大幅度提高, 其伸长率则先降低后升高; 随着时效温度的升高, GW01 铝合金的抗拉强度、屈服强度、硬度以及伸长率均不断降低; GW01 铝合金的抗拉强度、屈服强度以及硬度均对时效时间不敏感, 随时效时间的延长只有小幅度的降低, 其伸长率则随时效时间的延长有一定幅度的提高。(510 ℃, 3 h, 水淬)+(170 ℃, 18 h, 空冷)的 T6 热处理可以使 GW01 铝合金管材获得良好的综合力学性能。

关键词: GW01 铝合金; 固溶处理; 时效处理; 力学性能; 正交试验

中图分类号: TG166.3

文献标志码: A

Heat treatment process of GW01 aluminum alloy pipe

LI Long-fei^{1,4}, XING Shu-ming¹, YANG Jin-shan², WANG Jing-ling^{1,3}, MA Hong-yan², LIU Hua², GUO Kai²

- (1. School of Mechanical, Electronic and Control Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China;
2. Jinluntianda CNC Machine Tool Co., Ltd., Tianjin 301709, China;
3. School of Mechanical Engineering, Tianjin University of Technology and Education, Tianjin 300222, China;
4. China Nonferrous Metals Mining (Group) Tianjin Co., Ltd., Tianjin 300393, China)

Abstract: GW01 aluminum alloy is a new type of high-strength aluminum alloys researched and developed based on 6061 aluminum alloy. The effects of solid solution temperature-time, aging temperature and aging time on mechanical properties of GW01 aluminum alloy after T6 treatment were investigated by orthogonal experiment of three factors and three levels. The results show that, with the solution temperature increasing and solution time decreasing, the tensile strength, yield strength and hardness of GW01 aluminum alloy are improved greatly, and the elongation increases after a certain amount of decline. With the aging temperature increasing, the tensile strength, yield strength, hardness and elongation of GW01 aluminum alloy decrease constantly. The tensile strength, yield strength and hardness of GW01 aluminum alloy are all insensitive to aging time, which means that they only decreases a little with aging time extending. The elongation increases with aging time extending. The good mechanical properties of GW01 aluminum alloy pipe are obtained after T6 treatment process of (510 ℃, 3 h, water quenching)+(170 ℃, 18 h, air cooling).

Key words: GW01 aluminum alloy; solid solution treatment; aging treatment; mechanical property; orthogonal experiment

GW01 铝合金是在 6061 铝合金基础上研发的一种新型 Al-Mg-Si-Cu 系高强铝合金, 已经申报了专利。GW01 铝合金的合金设计思想是: 选用较小的镁硅比, 生成强化相 Mg_2Si 的同时, 尚有剩余的硅提高强度; 合金中含有锰和微量铬, 可改善其耐蚀性能、细化晶粒、提高强度, 其中含有的一定量铜也可提高合金强度。同时, 添加微量锆和钛可细化晶粒, 提高合金塑性和强度。GW01 铝合金保持了 6061 铝合金优异的可加工性能, 且其力学性能比 6061 铝合金的要高出 30%~60%, 可用于制作对材料性能要求较高的结构件。

GW01 是 Al-Mg-Si-Cu 系铝合金, 属于可热处理强化的合金, 但由于其中的合金元素复杂, 难以按现有热处理理论直接设计其热处理工艺。采用 6061 铝合金的最优 T6 工艺处理 GW01 铝合金, 其强度只有 380 MPa, 伸长率为 13%; 采用 6066 铝合金的最优 T6 工艺处理 GW01 铝合金, 其强度虽高达 410 MPa, 但伸长率较低, 疲劳性能不满足自行车安全骑行的要求。研究者们^[1-3]曾研究过与 GW01 成分类似的 6061、6063、6066 等 Al-Mg-Si-Cu 系铝合金的 T6 处理工艺, 认为合金获得较高综合力学性能的固溶处理和时效处理工艺分别为 450~570 ℃ 保温 0.5~8 h 后水淬+150~220 ℃ 保温 2~20 h 后空冷。林高用等^[4]的研究表明, 对于其自主研发的 Al-Si-Cu-Mg 合金, 随固溶温度从 465 ℃ 提升到 495 ℃, 合金硬度不断提高, 但是更高的固溶温度对硬度的影响程度及规律并不清楚。李元东等^[5]的研究表明, 对于流变压铸 2024 铝合金, 时效温度一定时, 合金强度随时效时间延长而降低, 但是时效时间对合金强度的影响程度并不明确。LOUCIF 等^[6]曾研究 Al-Mg-Si 系合金的时效处理工艺, 他们认为随时效温度从 165 ℃ 提升到 185 ℃, 合金的伸长率先增大后减小, 同样, 文中并未表明更高的时效温度对伸长率的影响程度及规律。可见, 这些研究对于新型铝合金材料 GW01 的 T6 工艺研究有一定的参考价值。但是, 其工艺参数范围很宽, 而且各工艺参数对性能的影响程度及规律并不十分清楚。为充分发掘该合金的性能潜力, 有必要探究其热处理工艺参数对性能的影响规律和程度, 进而获得综合性能最优的热处理工艺。本文作者采用正交实验方法, 来探究固溶处理和时效处理的主要工艺参数对 GW01 铝合金挤压管材 T6 后力学性能的影响规律及程度, 并归纳出获得良好综合力学性能的热处理工艺。

1 实验

在 RKQ3-100B 型可倾斜式铝合金熔炼炉中将配

好的金属原料进行熔炼, 炉前采用 SPECTRO MAXx LMX05 分光仪检测合金成分, 满足表 1 所示的成分要求后, 将 720 ℃ 的铝液浇铸到预先刷好涂料并预热到 260~280 ℃ 的金属型中, 金属型示意图如图 1 所示, 待铝液在铸型中凝固后将铝棒从铸型中取出, 空冷至室温得到如图 2 所示的试棒。

表 1 GW01 铝合金的成分
Table 1 Composition of GW01 aluminum alloy (mass fraction, %)

Mg	Si	Cu	Mn	Others	Al
0.45~0.85	0.70~1.10	0.35~0.65	0.30~0.60	0.1~0.5	Bal.

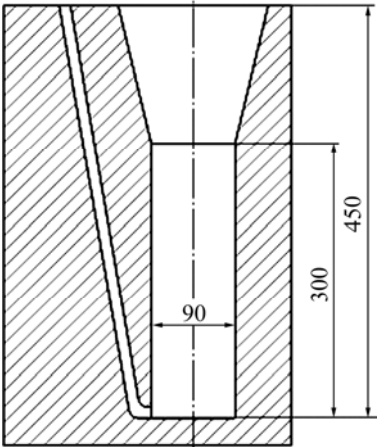


图 1 金属型的示意图
Fig. 1 Schematic diagram of metal mold (Unit: mm)



图 2 试棒毛坯照片
Fig. 2 Photo of cast rod

切除试棒的浇冒口并预热到 480 ℃, 在 630T 卧式挤压机上将铝棒挤压成 22.2 mm×1.8 mm(外径×壁厚)的管材, 挤压杆速度为 2.8~3.2 mm/s。挤压管材矫直后剪裁为长 230 mm 的拉伸试样, 按表 2 所示的正交实验表, 每组 5 个试样, 在 RX3-15-6 型热处理炉中进行 T6 处理(固溶处理和人工时效)。固溶处理中, 工件出炉至入水时间 3~5 s, 水温 20~25 ℃, 固溶处理后至时效处理入炉的时间间隔 22 h。

热处理之后的拉伸试样均在 24~30 h 之内采用 W-20 的铝合金韦氏硬度计完成硬度测试,并在 WEW-300B 型微机控制液压万能试验机上完成拉伸测试。每组试样性能测试结果的平均值如表 2 所示。

2 实验结果

为了能将实验中由于实验条件改变引起的数据波动同实验误差引起的数据波动区分开来,同时得出各因素对实验结果影响大小的精确数量估计,实验结果的分析选用方差分析法。下面分别针对性能指标硬度、强度和伸长率,分析各实验因素对其影响程度和规律。

首先计算表 2 中各列各水平的 K 值、各列各水平对应数据之和 K_{ij} 及其平方 K_{ij}^2 。然后根据式(1)和(2)计算各列偏差平方和 S_j :

$$S_j = \frac{1}{r} \sum_{i=1}^3 K_{ij}^2 - C_T \tag{1}$$

式中

$$C_T = \frac{T^2}{n} = \frac{(K_{11} + K_{21} + K_{31})^2}{9} \tag{2}$$

各列的自由度相等: $df_A=df_B=df_C=df_e=3-1=2$

于是,根据式(3)计算因素固溶温度-时间 A、时效温度 B、时效时间 C 及空列 e 的方差

$$V_j = \frac{S_j}{df_j} \tag{3}$$

2.1 工艺参数对硬度的影响规律

1) 显著性检验

各因素对硬度影响作用的计算结果列于表 3。根

据表 3 的数据,进行显著性检验,列出方差分析表,如表 4 所列。

由表 4 可见, $F_A>F_B>F_C$,说明影响硬度最显著的因素是固溶温度-时间(A 因素),其次是时效温度(B 因素),时效时间(C 因素)的影响不显著。3 个因素对材料硬度的影响作用的显著程度之比为 20.6:13.3:1。

2) 各因素对硬度的影响趋势

GW01 铝合金 T6 处理后的硬度与固溶温度-时间(A 因素)、时效温度(B 因素)、时效时间(C 因素)的关系如图 3 所示。由图 3 可看出,随着固溶温度的提高、固溶时间的缩短、时效温度的降低以及时效时间的缩短, GW01 铝合金 T6 处理后的硬度提高。提高固溶温度和缩短固溶时间,硬度提升幅度最大;缩短时效时间,硬度提升幅度最小。

3) 硬度最高时热处理工艺条件的确定

一般来说,硬度与强度是正相关的,因此,试验指标韦氏硬度越大越好。 K_{Ax} 表示 A 因素的 x 水平所对应的韦氏硬度之和,因此,根据表 3 中 K_{A1} 、 K_{A2} 、 K_{A3} 的大小可以判断各水平 A_1 、 A_2 、 A_3 对韦氏硬度的影响大小,而 $K_{A3}>K_{A2}>K_{A1}$,所以可确定 A_3 为 A 因素的优水平。同理,可以确定 B、C 因素的优水平分别为 B_1 、 C_1 ;因素 C 的水平改变对硬度影响较小,从降低热处理成本角度考虑,时效温度一定时,时效时间越短,生产成本越低,也应选 C_1 。3 个因素的优水平组合 $A_3B_1C_1$ 为本试验指标韦氏硬度的最优水平组合,即硬度最高的 T6 处理工艺为 510 ℃条件下保温 3 h 后水淬,之后,在 170 ℃条件下保温 4 h 再空冷。

2.2 工艺参数对抗拉强度的影响规律

抗拉强度方差分析方式与韦氏硬度方差分析方式相同,同理可得抗拉强度方差分析结果,如表 5 所示。

表 2 GW01 铝合金 T6 工艺参数及 T6 合金的性能

Table 2 T6 process parameters and properties of aluminum alloy GW01 after T6 heat treatment

Experiment No.	Process of T6 heat treatment			Property after T6 heat treatment			
	Solution temperature-time, A	Aging temperature, B/℃	Aging time, C/h	Hardness, HW	R_m /MPa	$R_{p0.2}$ /MPa	$A_{50\text{ mm}}$ /%
1	470 ℃, 7 h	170	4	15.2	313	260	13.6
2	470 ℃, 7 h	185	10	14.6	301	255	14.7
3	470 ℃, 7 h	205	18	11.6	232	175	14.7
4	490 ℃, 5 h	170	10	16.8	354	315	14.2
5	490 ℃, 5 h	185	18	16.1	327	283	14.4
6	490 ℃, 5 h	205	4	14.5	289	240	13.0
7	510 ℃, 3 h	170	18	17.8	403	360	16.4
8	510 ℃, 3 h	185	4	17.8	389	335	14.4
9	510 ℃, 3 h	205	10	16.0	328	290	14.6

表 3 试验方案及韦氏硬度结果分析表

Factor	Webster hardness						
	K_1	K_2	K_3	K_1^2	K_2^2	K_3^2	DevSq (S)
Solution temperature-time, A	41.4	47.4	51.6	1713.96	2246.76	2662.56	17.52
Aging temperature, B	49.8	48.5	42.1	2480.04	2352.25	1772.41	11.33
Aging time, C	47.5	47.4	45.5	2256.25	2246.76	2070.52	0.85
Vacant column, e	47.3	46.9	46.2	2237.29	2199.61	2134.44	0.21

表 4 韦氏硬度方差分析表

Source of variation	DevSq	DOF	Mean square	F	F_a	Level of significance
A	17.52	2	8.760	83.43	$F_{0.05}(2,2)=19.0$	Significant
B	11.33	2	5.665	53.95	$F_{0.01}(2,2)=99.0$	Significant
C	0.85	2	0.425	4.05		Non-significant
Error (e)	0.21	2	0.105			
Sum total	29.91					

DevSq: Sum of square of deviations; DOF: Degree of freedom; F : Value of analysis of variance; F_a : Value of analysis of variance.

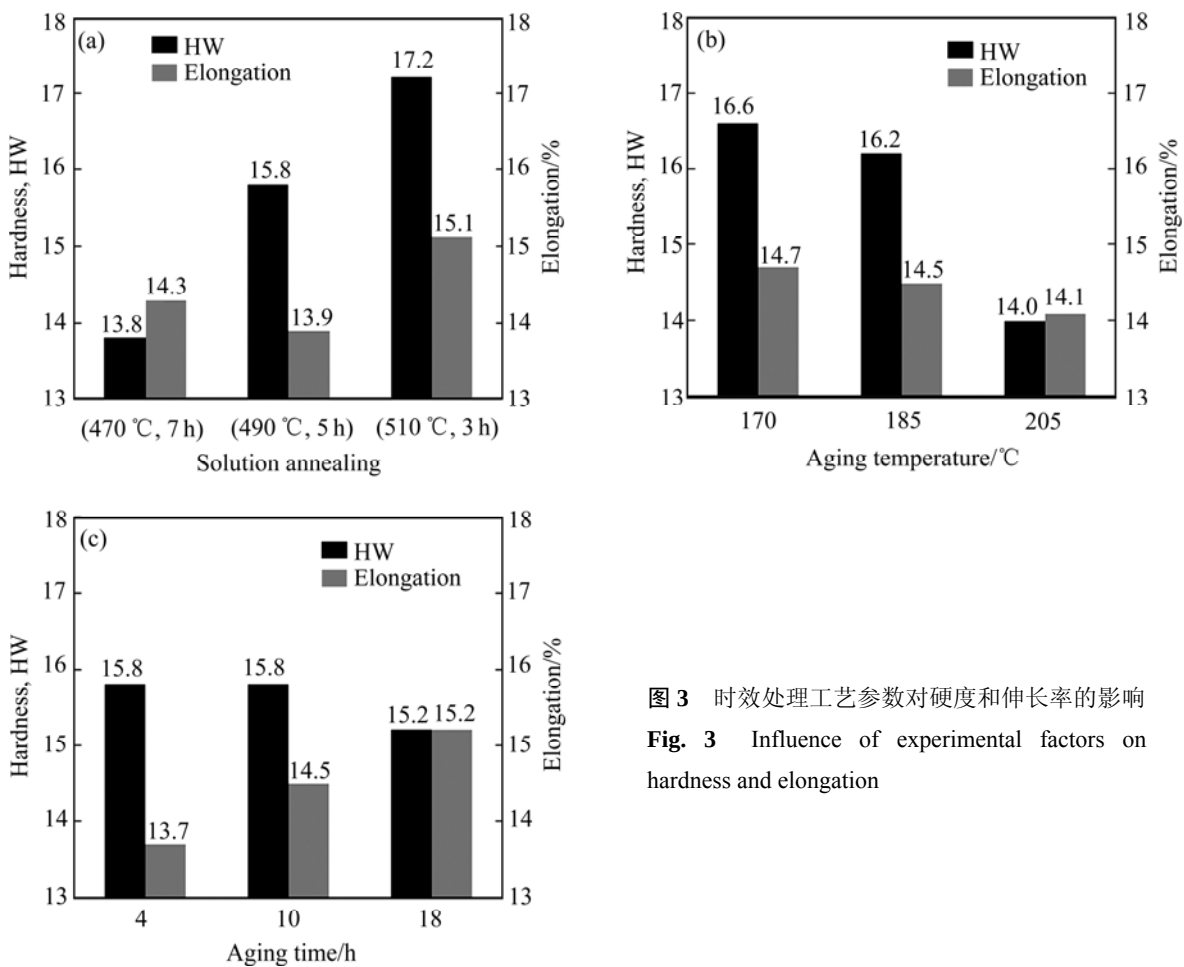


图 3 时效处理工艺参数对硬度和伸长率的影响

Fig. 3 Influence of experimental factors on hardness and elongation

由表 5 可见, 影响抗拉强度的三因素的主次顺序与影响硬度的因素主次顺序相同, 其中固溶温度-时间(A 因素)和时效温度(B 因素)对抗拉强度的影响显著, 时效时间(C 因素)对抗拉强度的影响不显著, 3 个因素对材料抗拉强度的影响作用的显著程度之比为 83.8:59.3:1。GW01 铝合金 T6 处理后的抗拉强度与固溶温度-时间、时效温度、时效时间的关系如图 4 所示。各因素对抗拉强度的影响规律与其对硬度的影响规律相同。本试验指标抗拉强度越大越好, 其最优水平组合为 $A_3B_1C_1$, 即抗拉强度最高的 T6 处理工艺为

510 °C 条件下保温 3 h 水淬, 之后在 170 °C 条件下保温 4 h 空冷。

2.3 工艺参数对屈服强度的影响规律

屈服强度方差分析方式与韦氏硬度的方差分析方式亦相同, 同理可得屈服强度方差分析结果, 如表 6 所示。

由表 6 可见, 影响屈服强度的三因素的主次顺序与影响抗拉强度的因素主次顺序以及各因素的显著性水平均相同, 3 个因素对屈服强度的影响作用的显著

表 5 抗拉强度方差分析表

Table 5 Variance analysis table of tensile strength

Source of variation	DevSq	DOF	Mean square	<i>F</i>	<i>F</i> _α	Level of significance
A	12550.23	2	6275.115	96.37	<i>F</i> _{0.05} (2,4)=6.94	Highly significant
B	8874.89	2	4437.445	68.15	<i>F</i> _{0.01} (2,4)=18.0	Highly significant
C ^Δ	149.56	2	74.780	1.15		Non-significant
Error (e)	110.89	2	55.445			
Error (e ^Δ)	260.45	4	65.113			
Sum total	21685.57					

C^Δ, e^Δ: Correct values of C and e.

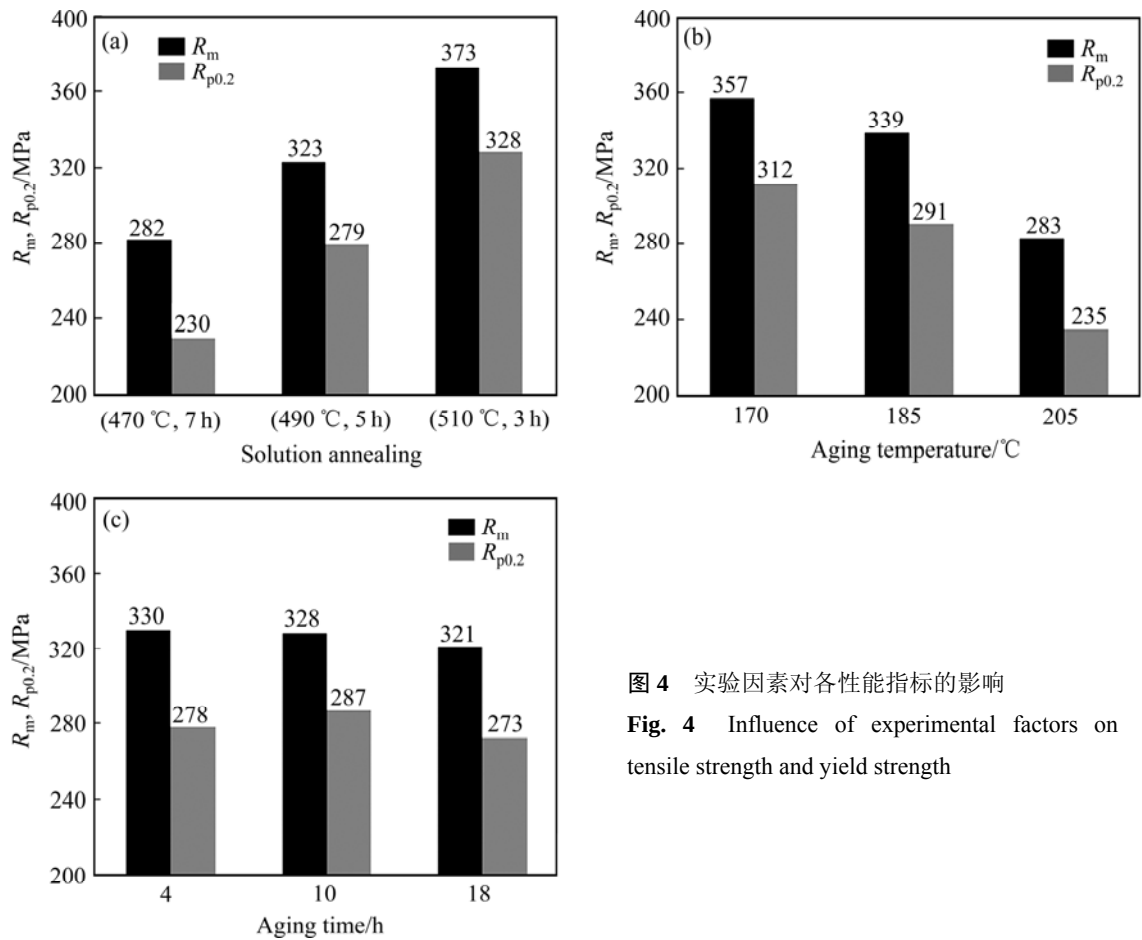


图 4 实验因素对各性能指标的影响

Fig. 4 Influence of experimental factors on tensile strength and yield strength

程度之比为 48.7:31.7:1。GW01 铝合金 T6 处理后的屈服强度与固溶温度-时间、时效温度、时效时间的关系如图 4 所示。固溶温度-时间和时效温度对屈服强度的影响规律与其对硬度的影响规律相同, 时效时间对屈服强度影响不显著, 屈服强度随时效时间的延长先小幅度升高, 然后较大幅度降低。本试验指标屈服强度越大越好, 其最优水平组合为 A₃B₁C₂, 即屈服强度最高的 T6 处理工艺为 510 ℃条件下保温 3 h 后水淬, 之后在 170 ℃条件下保温 10 h 再空冷。

2.4 工艺参数对伸长率的影响规律

伸长率方差分析方式与韦氏硬度的方差分析方式相同, 同理可得伸长率方差分析结果, 如表 7 所示。由表 7 可见, 影响伸长率的三因素主次顺序依次为时效时间(C 因素)、固溶温度-时间(A 因素)、时效温度(B 因素), 三因素 A、B、C 对伸长率的影响均不显著, 其影响作用的显著程度之比为 5.6:4.0:1。GW01 铝合金 T6 处理后的伸长率与固溶温度-时间、时效温度、时效时间的关系如图 3 所示。T6 后伸长率随固溶温度的提高和固溶时间的缩短先减小后增大, 且在 510 ℃、3 h 时获得最大伸长率; 随时效温度的升高, 伸长率降低; 时效时间对伸长率的影响最大, 随着时效时间的延长, 伸长率呈增大趋势。本试验指标伸长率越大越好, 其最优水平组合为 A₃B₁C₃, 即伸长率最高的 T6

处理工艺为 510 ℃条件下保温 3 h 后水淬, 之后在 170 ℃条件下保温 18 h 再空冷。

3 分析与讨论

3.1 GW01 综合性能较好的 T6 处理工艺

由实验结果可以看出, 针对不同的性能指标可以得到不同的最优工艺; A、B、C 三因素对 4 项性能指标的影响大小及规律不尽相同, 随着固溶温度的提高和固溶时间的缩短, 材料的力学性能有较大的变化, 主要表现在抗拉强度、屈服强度和硬度的大幅度提高, 以及伸长率的先降低再升高; 随着时效温度的升高, 该材料的抗拉强度、屈服强度、硬度以及伸长率均不断降低; 该材料的抗拉强度、屈服强度以及硬度对时效时间均不敏感, 随时效时间的延长只有小幅度的降低, 伸长率随时效时间的延长有一定幅度的提高。

作为自行车车架管使用的 GW01 铝合金要求有适当的强度和较高的塑性, 以保证成品车架疲劳测试合格。针对这一要求, 根据上述试验结果, 其最恰当的 T6 处理工艺应当是: 510 ℃条件下保温 3h 水淬, 之后在 170 ℃条件下保温 18 h 空冷。采用这一工艺得到的 1.2 mm 壁厚的 GW01 管材车架, 按 EN14766 标准进行如图 5 所示的水平力疲劳测试, 其循环次数可达

表 6 屈服强度方差分析表

Table 6 Variance analysis table of yield strength

Source of variation	DevSq	DOF	Mean square	<i>F</i>	<i>F</i> _α	Level of significance
A	14504.23	2	7252.115	63.27	<i>F</i> _{0.05(2,4)} =6.94	Highly significant
B	9440.89	2	4720.445	41.19	<i>F</i> _{0.01(2,4)} =18.0	Highly significant
C ^Δ	297.56	2	148.780	1.30		Non-significant
Error (e)	160.89	2	80.445			
Error (e ^Δ)	458.45	4	114.613			
Sum total	24403.57					

表 7 伸长率方差分析表

Table 7 Variance analysis table of elongation

Source of variation	DevSq	DOF	Mean square	<i>F</i>	<i>F</i> _α	Level of significance
A	2.46	2	1.230	5.02	<i>F</i> _{0.05(2,4)} =6.94	Non-significant
B ^Δ	0.61	2	0.305	1.24	<i>F</i> _{0.01(2,4)} =18.0	Non-significant
C	3.39	2	1.695	6.92		Non-significant
Error (e)	0.37	2	0.185			
Error (e ^Δ)	0.98	4	0.245			
Sum total	6.83					

B^Δ: Correct values of B.



图 5 自行车车架水平力疲劳测试

Fig. 5 Horizontal force fatigue testing of bicycle frame

10.5~11 万次，高于 EN14766 标准中要求的 5 万次，现行 1.8 mm 壁厚的 6061 管材车架水平力疲劳测试次数只有 3~4 万次。

对于用于静载荷条件下使用的 GW01 铝合金，要求有高强度和恰当的伸长率，这时最恰当的 T6 处理工艺是：510 °C 条件下保温 3h 水淬，之后在 170 °C 条件下保温 4 h 空冷。这时的抗拉强度可达 405 MPa，伸长率为 13.5%。

3.2 GW01 的热处理强韧化机制

1) 第二相强化

GW01 为 Al-Mg-Si-Cu 系合金，时效过程中析出的 Mg_2Si 相为其中的主要强化相，使合金得到强化，在形成 Mg_2Si 的同时，合金中尚有剩余的 Si，可进一步提高合金强度。合金中加入了一定量的 Cu，Cu 在合金中形成 $CuAl_2$ (O 相) 和 Q 相^[7]，可促进了合金时效初期 GP 区的形成^[8-9]，合金的时效强化能力提高。

合金中的 Mn 有助于针状 Al_9FeSi 相转变为粒状含 Mn 的 $Al_5(FeMn)_3Si_2$ 弥散相^[10-11]，从而消除粗大针状结晶相对合金性能的有害影响，提高合金的塑性。固溶的微量 Er 在随后的时效处理过程中会以细小弥散的第二相形式析出，成为铝合金中的有效强化相^[12]，提高合金强度。

该合金经过不同时效处理时间后的力学特性如图 4(c) 和图 3(c) 所示，可见，随时效时间的延长，抗拉强度和屈服强度变化较小，韦氏硬度从 15.8 降低到 15.2，伸长率逐渐升高，由 13.7% 升至 15.2%，变化较大。根据时效硬化规律^[13-14]，合金的强度性能随着 GP 区的形成而增大，过渡相的形成使合金的强度性能能进一步增加而达到峰值，稳定相的形成使合金的强度性能降低，而合金的塑性始终随着过饱和固溶体的分解而降低。时效 4~18 h 时，该合金内 GP 区已经形成，过渡相不断增加，稳定相随时间的推移从无到有地形成，使得该合金的强度随失效时间从 4~18 h 延长时，变化

不明显。而该合金伸长率随时效时间的变化趋势与时效硬化规律相反，可能是由于 Ti、Zr、Cr、Er 等微量元素使合金微观结构发生了特殊的变化，改变了合金的特性。该新型合金在 510 °C 保温 3h 水淬，随后 170 °C 保温 18 h 空冷，抗拉强度和断后伸长率分别为 403 MPa、16.4%，综合力学性能较好。

2) 细晶强化

通常，在常温下晶粒细小的金属，受到外力发生塑性变形时，外力可分散在更多的晶粒内，金属塑性变形较均匀，应力集中较小，塑性更高。此外，晶界面积大，晶界曲折，不利于裂纹的扩展，强度更高。GW01 合金中微量元素 Cr、Ti、Zr 产生了极强烈的晶粒细化效果，其细化机理为含有 Cr 的原子团簇作为 Al_3Ti 、 Al_3Zr 共同形核的基底使 $Al_3(Ti_xZr_{1-x})$ 形核， $Al_3(Ti_xZr_{1-x})$ 使 $\alpha(Al)$ 形核^[15]。微量的 Er 可以以颗粒状 Al_3Er 化合物的形式断续或连续分布在晶界上，沿晶界分布的粒状 Al_3Er 可以起到阻碍晶粒长大的作用^[12]。Cr、Ti、Zr、Er 等微量元素均有细化晶粒的作用，同时，也提高合金强度和塑性，其细化效果如图 6 所示，

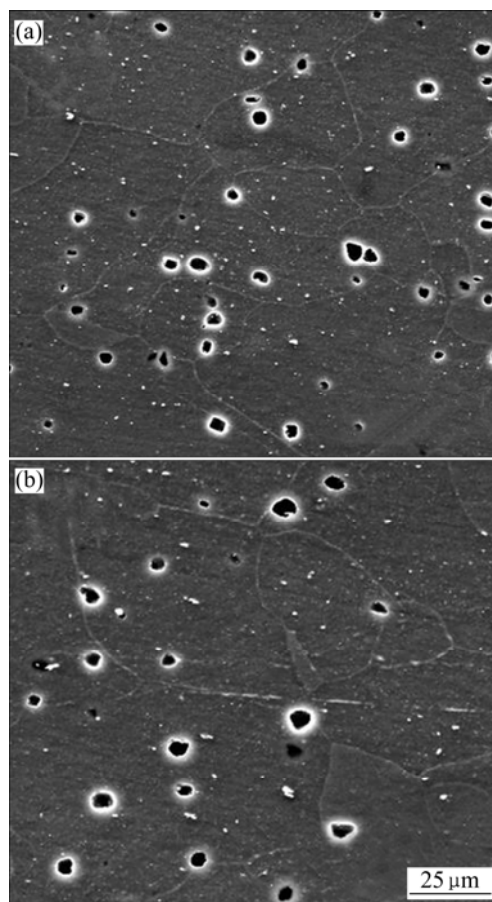


图 6 T6 热处理后合金管材晶粒尺寸的对比

Fig. 6 Comparison of grain sizes of alloy pipe after T6 heat treatment: (a) Adding Cr, Ti, Zr and Er; (b) Without addition

GW01 管材 T6 处理后的平均晶粒直径为 56 μm , 明显小于没有添加微量元素 Ti、Zr、B、Er 合金管材 T6 处理后的平均晶粒直径(87 μm), 而通常只添加 Ti 细化晶粒的 6061 铝合金管材经 T6 处理后的平均晶粒直径为 70~90 μm 。

3) 固溶强化

铝合金的固溶强化主要源于过饱和固溶体在基体中的溶解, GW01 合金中的 Mn 可以扩大淬火温度上限, 增大合金元素的固溶度, 从而提高合金力学性能, 改善抗蚀性、冲击韧性和弯曲性能^[16-18]。GW01 合金强度随着固溶温度的升高和固溶时间的缩短而提高。固溶温度较高时, 合金中各原子更加活跃, 能使合金中粗大的第二相尽可能地溶入到基体中, 提高溶质原子在基体中的固溶度, 进而增加时效过程中强化相的相变驱动力, 以便时效过程中析出尽可能多的第二相, 使得合金强化。同时, 促进合金中粗大 Mg_2Si 相的溶解^[19]以及富 Cu、Mn、Cr 等相的溶解。另外, 固溶温度较高时, 固溶体的溶解时间必然缩短。因此, 该合金强度随着固溶温度的升高和固溶时间的缩短而提高。

4 结论

1) 固溶处理是影响 GW01 合金抗拉强度和伸长率的最显著因素, 随着固溶温度的提高和固溶时间的缩短, 抗拉强度、屈服强度和硬度大幅度提高, 伸长率先降低再升高。

2) 时效温度是影响 GW01 合金抗拉强度和伸长率的重要因素, 随着时效温度的升高, GW01 的抗拉强度、屈服强度、硬度以及伸长率均不断降低。因此, 应选择较低的时效温度。

3) GW01 的抗拉强度、屈服强度以及硬度对时效时间均不敏感, 但伸长率随时效时间的延长有一定幅度的提高。在实际生产中, 考虑到提高生产效益和提高材料伸长率不能同时兼顾, 因此, 时效温度应根据该材料的使用要求灵活选择。

4) 获得良好综合力学性能的最优热处理工艺为 510 $^{\circ}\text{C}$ 条件下保温 3 h 后水淬, 之后在 170 $^{\circ}\text{C}$ 条件下保温 18 h 再空冷。

REFERENCES

[1] 商宝川, 尹志民, 周 向, 黄志其. 固溶-时效对 6082 合金挤压棒材组织性能的影响[J]. 材料热处理学报, 2011, 32(1):

77-81.

SHANG Bao-chuan, YIN Zhi-min, ZHOU Xiang, HUANG Zhi-qi. Effect of solution and aging treatment on microstructure and properties of hot extruded 6082 aluminum alloy bars[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2011, 32(1): 77-81.

[2] MANSOURINEJAD M, MIRZAKHANI B. Influence of sequence of cold working and aging treatment on mechanical behaviour of 6061 aluminum alloy[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2012, 22(9): 2072-2079.

[3] KOLAR M, PEDERSEN K O, GULBRANDSEN-DAHL S, MARTHINSEN K. Combined effect of deformation and artificial aging on mechanical properties of Al-Mg-Si Alloy[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2012, 22(8): 1824-1830.

[4] 林高用, 雷玉霞, 郭道强, 许秀芝, 张宗鹏. 变形 Al-Si-Cu-Mg 合金热处理强化及其组织特征[J]. 中国有色金属学报, 2014, 24(3): 584-592.

LIN Gao-yong, LEI Yu-xia, GUO Dao-qiang, XU Xiu-zhi, ZHANG Zong-peng. Heat treatment strengthening and microstructure characteristics of wrought Al-Si-Cu-Mg alloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2014, 24(3): 584-592.

[5] 李元东, 索江龙, 毕广利, 陈体军, 马 颖. 热处理对流变压铸 2024 变形铝合金组织及性能的影响[J]. 中国有色金属学报, 2014, 24(4): 894-904.

LI Yuan-dong, SUO Jiang-long, BI Guang-li, CHEN Ti-jun, MA Ying. Effects of heat treatment on microstructure and mechanical properties of rheo-diecasting 2024 wrought aluminum[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2014, 24(4): 894-904.

[6] LOUCIF A, FIGUEIREDO R B, KAWASAKI M, BAUDIN T, BRISSET F, CHEMAM R, LANGDON T G. Effect of aging on microstructural development in an Al-Mg-Si alloy processed by high-pressure torsion[J]. Journal of Materials Science, 2012, 47(42): 7815-7820.

[7] 钟 警, 郑子樵, 余玲娟, 李红萍, 吴秋萍. 时效制度对 AA6156 铝合金拉伸性能和断裂韧性的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2013, 42(10): 2163-2168.

ZHONG Jing, ZHENG Zi-qiao, SHE Ling-juan, LI Hong-ping, WU Qiu-ping. Effects of aging treatments on tensile properties and fracture toughness of AA6156 aluminum alloy[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2013, 42(10): 2163-2168.

[8] 金 曼, 邵光杰. Cu 对 6082Al-Mg-Si 合金时效初期析出相的影响[J]. 中国有色金属学报, 2009, 19(1): 1-7.

JIN Man, SHAO Guang-jie. Effects of aging treatments on tensile properties and fracture toughness of AA6156 aluminum alloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2009, 19(1): 1-7.

[9] CHAKRABARTI D J, LAUGHLIN D E. Phase relations and

- precipitation in Al-Mg-Si alloys with Cu additions[J]. *Progress in Materials Science*, 2004, 49(3/4): 389–410.
- [10] ZHAO Zhi-hao, MENG Yi, CUI Jian-zhong. Effect of Mn on microstructures and mechanical properties of Al-Mg-Si-Cu-Cr-V alloy[J]. *China Foundry*, 2012, 9(4): 349–355.
- [11] 刘宏, 刘艳华, 赵刚, 刘春明, 左良. Mn 对 Al-Mg-Si-Cu 铝合金结晶相的影响[J]. *中国有色金属学报*, 2004, 14(11): 1906–1911.
- LIU Hong, LIU Yan-hua, ZHAO Gang, LIU Chun-ming, ZUO Liang. Effects of Mn on constituents of Al-Mg-Si-Cu alloys[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2004, 14(11): 1906–1911.
- [12] 邢泽炳, 聂祚仁, 邹景霞, 高旭东. Al-Er 合金铸锭中铒的存在形式及作用研究[J]. *中国稀土学报*, 2007, 25(2): 234–238.
- XING Ze-bing, NIE Zuo-ren, ZOU Jing-xia, GAO Xu-dong. Existing form and effect of erbium in Al-Er alloy[J]. *Journal of the Chinese Rare Earth Society*, 2007, 25(2): 234–238.
- [13] 余永宁. 金属学原理[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2007: 495–500.
- YU Yong-ning. *Principles of metal*[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2007: 495–500.
- [14] CHAUDHURY S K, APELIAN D. Fluidized bed heat treatment of cast Al-Si-Cu-Mg alloys[J]. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2006, 37(7): 2295–2311.
- [15] 贺永东, 张新明. 微量 Cr、Mn、Ti、Zr 细化 7A55 铝合金铸锭组织的效果与机理[J]. *中国有色金属学报*, 2005, 15(10): 1594–1601.
- HE Yong-dong, ZHANG Xin-ming. Refinement mechanism of trace Cr, Mn, Ti and Zr as cast 7A55 alloys[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2005, 15(10): 1594–1601.
- [16] 何立子, 陈彦博, 崔建忠, 张晓博, 胡壮麒. Mn 和 Zr 对新型 Al-Mg-Si-Cu 合金组织与性能的影响[J]. *稀有金属材料与工程*, 2004, 33(12): 1337–1340.
- HE Li-zi, CHEN Yan-bo, CUI Jian-zhong, ZHANG Xiao-bo, HU Zhuang-lin. Effect of Mn and Zr on microstructures and properties of new type Al-Mg-Si-Cu alloys[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2004, 33(12): 1337–1340.
- [17] 潘青林, 李绍禄, 邹景霞, 尹志民. 微量 Mn 对 Al-Mg-Si 合金微观组织与拉伸性能的影响[J]. *中国有色金属学报*, 2002, 12(5): 972–976.
- PAN Qing-lin, LI Shao-lu, ZOU Jing-xia, YIN Zhi-min. Effects of minor manganese addition on microstructures and tensile properties of Al-Mg-Si alloys[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2002, 12(5): 972–976.
- [18] 李海, 史志欣, 王芝秀, 王秀丽, 郑子樵. Mn 和 Cr 对 Al-Mg-Si-Cu 合金组织及性能的影响[J]. *材料热处理学报*, 2011, 32(10): 100–105.
- LI Hai, SHI Zhi-xin, WANG Zhi-xiu, WANG Xiu-li, ZHENG Zi-qiao. Effects of Mn and Cr on microstructure and properties of Al-Mg-Si-Cu alloys[J]. *Transactions of Materials and Heat Treatment*, 2011, 32(10): 100–105.
- [19] 项胜前, 周春荣, 郭加林, 尹志民, 商宝川. 固溶-时效对 6061 铝合金挤压组织和性能的影响[J]. *轻合金加工技术*, 2011, 39(4): 31–35.
- XIANG Sheng-qian, ZHOU Chun-rong, GUO Jia-lin, YIN Zhi-min, SHANG Bao-chuan. Effect of solid solution-aging treatment on microstructure and properties of 6061 aluminum alloy extruded rods[J]. *Light Alloy Fabrication Technology*, 2011, 39(4): 31–35.

(编辑 李艳红)