

# 211Z 高强韧耐热铝合金的淬透性研究

牟刚<sup>1</sup>, 车云<sup>2</sup>, 蒋渝<sup>1</sup>, 张中可<sup>2</sup>, 毛健<sup>1</sup>

(1. 四川大学, 四川 成都 610064)

(2. 贵州省铝材料工程技术研究中心, 贵州 贵阳 550001)

**摘要:** 采用类端淬设备、电导率计、差示热扫描分析仪和透射电镜等并结合数字模拟研究了 211Z 型铝合金的淬透性能。结果表明: 试样在  $\leq 40$  °C 水温淬火的过饱和固溶程度、时效后的硬度均高于水温较高 (50~60 °C) 时淬火的相应值, 但淬透深度相反; 试样时效处理后的硬度值受淬火敏感温度区间 (140~380 °C) 的平均冷却速度影响, 超过临界值后, 硬度值基本保持不变, 小于临界值, 则随平均冷却速度的增加而增大。

**关键词:** 211Z 高强韧耐热铝合金; 淬火敏感性; 淬透深度; 硬度; 数值模拟

中图分类号: TG146.2<sup>+</sup>1

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2015)11-2847-05

211Z 高强韧耐热铝合金是在中国有色金属标准委员会注册的新牌号 (GB/T 29434-2012), 该型合金具有高强、高韧、高硬度、耐热性好等特点。铝合金淬火时效工艺的原理是通过高温固溶最大限度将合金元素固溶在铝基体中, 然后在时效阶段析出细小弥散的分散相来提高材料的力学性能。但是由于试样表面和心部的冷却速度不一致, 导致在冷却过程中冷速慢处合金元素的提前析出, 也就引起了表面与心部力学性能的不一致, 这种现象称为淬火敏感性<sup>[1-7]</sup>。本研究针对 211Z 高强韧铝合金大扁锭的淬火敏感性问题进行研究。表征淬火敏感性直观的方法可以采用淬透性曲线, 一般以最大硬度下降 10% 作为淬透的标准<sup>[7]</sup>。由于针对铝合金目前还并没有末端淬火的相关国家标准, 因此, 采用自制的类端淬实验设备进行, 并在后期对该实验进行了数值模拟分析, 得到了该型铝合金淬火时的淬火水温、淬透深度、硬度及冷却速度之间的直接关系, 为其工艺调整及性能改善提供依据。

## 1 实验

实验所采用的 211Z 合金主要合金成分为(质量分数): 3.6%~7.6%Cu, 0.05%~1.5%Mn, 0.01%~0.5%Ti, 0.01%~1.0%Zr, 0.05%~5.0%Re, 0.01%~0.4% 专用微合金元素, 余量为 Al。合金经 730 °C 熔炼后浇铸成锭, 然后通过热挤压 (挤压压力 800 t, 挤压温度 450 °C) 得到实验用棒材, 棒材尺寸为  $\Phi 12.5$  mm  $\times$  180 mm。

固溶参数为 ( $538 \pm 5$ ) °C, 45 min, 固溶后分别控制淬火水温为 15、30、40、50、60 °C 进行类端淬实验 (试验装置如图 1a 所示)。最后的时效热处理参数为 175 °C, 14 h<sup>[8]</sup>。类端淬实验具体实现方式: 试棒固定在料框上, 与料框底部保持垂直状态, 淬火时, 试棒与料框从位置 1 移动至位置 2, 一起浸入淬火液中, 试棒仍然保持直立状态, 淬火池中盛大量的水, 可以认为在淬火过程中, 水温保持不变。由于试棒直径较小, 因此液面与试棒接触处所对应的水平面可以认为类似于端淬实验的端淬面。本试验主要评价端淬面 A 处及其以上部分材料的硬度、电导率及微观组织的变化。端淬面以上每隔 10 mm 分别标为 B、C、D、...、M

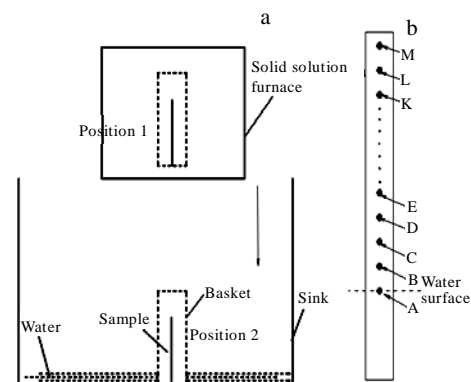


图 1 实验装置示意图及硬度测试位置

Fig.1 Schematic diagram of experimental apparatus (a) and

收稿日期: 2014-11-15

基金项目: 四川省科技支撑计划项目 (2013GZX0146)

作者简介: 牟刚, 男, 1989 年生, 硕士生, 四川大学材料科学与工程学院, 四川 成都 610064, 电话: 028-85404370, E-mail: MouGangMail@163.com

location of hardness test (b)

如图 1b 所示。分别在固溶后和时效后测量所标注点处平面的硬度及该段的电导率。硬度采用 Wilson Wolpert Vickers 452SVA 硬度计进行, 硬度测定试验力为 49 N, 保持时间 15 s; 电导率采用 FQR-7501A 涡流导电仪进行测试。采用 NETZSCH STA 449C 对试样进行差示扫描量热法 (DSC) 分析。采用 Tecnai G2 F20 场发射透射电镜观察试样的微观组织结构。

利用 ANSYS 软件对类端淬试验进行了数值模拟, 水的换热系数取  $10000 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$ , 空气换热系数取  $100 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$  [9]。

## 2 结果与讨论

### 2.1 端淬对固溶度的影响

淬火后, 铝合金试样的电导率值反映合金的固溶程度。固溶度越高, 晶格畸变就大, 对电子的散射能力也就强烈, 试样的电导率值就越小。反之, 固溶度低, 则试样的电导率值就大。图 2 为在不同水温端淬实验后的电导率值随水温及端淬面距离变化的曲线。

由图 2 可见, 在同一水温下, 随距端淬面距离的增加, 电导率值增加, 说明试样的固溶度随着距端淬面距离的增加而下降。在距端淬面距离一定的情况下, 水温较低 ( $\leq 40 \text{ }^\circ\text{C}$ ) 时的电导率值低于水温较高 ( $50\sim 60 \text{ }^\circ\text{C}$ ) 时的电导率值, 且  $40 \text{ }^\circ\text{C}$  时淬火后试样的电导率值相对最低。说明在较低温度下进行端淬实验, 试样的固溶度高, 反之试样的固溶度低, 在  $40 \text{ }^\circ\text{C}$  时试样具有相对最高的固溶度。

铝合金的固溶处理是使尽可能多的元素固溶进基体中, 然后选择合适的冷却速度, 使其可以快速地通过淬火敏感温度区间 [6], 使第二相没有足够的时间孕育析出, 从而使过饱和状态得以保留, 在后续的时效阶段通过一定的工艺参数控制, 得到较好的时效析出

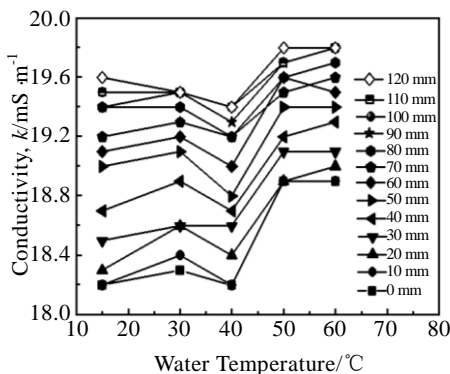


图 2 端淬后试样的电导率随距端淬面距离的变化

Fig.2 Relation between electrical conductivity and distance from

quench surface after end-quenching

相及其分布。在端淬试验中, 离端淬面距离越远的位置, 淬火时所对应的冷却速度越小, 当冷却速度小到一定程度时, 则第二相有足够的时间孕育析出, 从而使其固溶度下降。在水温较低时进行端淬实验, 其冷却速度要明显高于水温较高时的情况, 更容易快速通过淬火敏感温度区。因此, 在较低水温 ( $\leq 40 \text{ }^\circ\text{C}$ ) 端淬试样的固溶度要高于较高温度 ( $>40 \text{ }^\circ\text{C}$ ) 下的。此外淬火是一个综合的、较复杂的换热过程 [10], 从本组实验结果来看, 水温  $40 \text{ }^\circ\text{C}$  时试样具有相对最好的换热效果, 与文献 [10] 对 7075 铝合金厚板的淬火数值模拟结论一致。

图 3 为试样经过端淬后的硬度值变化 (图中数据通过 99.99% 的 F 检验, 有显著性差异)。该铝合金未固溶处理前的硬度为 760 MPa, 可以看到, 虽然端淬后试样硬度有所提高但仍不超过 900 MPa。铝合金在不同水温下端淬后各条硬度曲线最大值与最小值相差基本在 150 MPa 内。从试验结果来看, 过饱和固溶程度对其硬度值的影响总的来说不大。因此, 端淬后的硬度值不适宜用来评价 211Z 铝合金的淬透能力, 这与钢的淬透性评价是不同的。

### 2.2 端淬对时效后材料性能的影响

图 4 为时效后试样的硬度曲线。可见, 在同一水温下, 硬度值随距端淬面距离的增加而下降; 在距端淬面距离一定的情况下, 水温较低 ( $\leq 40 \text{ }^\circ\text{C}$ ) 时的硬度值明显高于水温较高 ( $50\sim 60 \text{ }^\circ\text{C}$ ) 时的硬度值,  $40 \text{ }^\circ\text{C}$  时淬火后时效试样的硬度值最高。与电导率的变化规律基本一致。其原因与淬火后试样的过饱和固溶程度有关, 固溶程度高的试样, 在随后的时效过程中析出的强化相越多, 时效强化效果越好; 反之则强化效果差。

图 5 是图 4 中 A、A1、G、M 所对应试样时效后的 DSC 热分析结果。在 DSC 曲线中, 随温度的升高, 会依次出现各时效析出相的特征峰, 首先是 GP 区溶

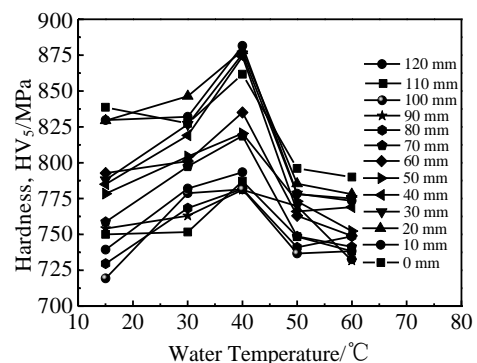


图 3 试样端淬后的硬度值变化

Fig.3 Hardness of samples after end-quenching

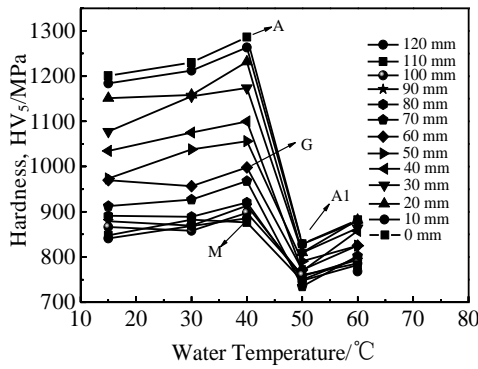


图 4 时效后试样的硬度值

Fig.4 Hardness of samples after aging treatment

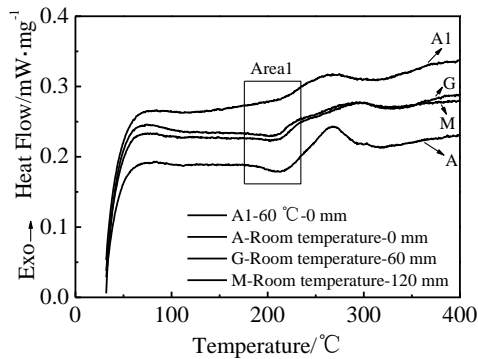


图 5 时效后试样的 DSC 热分析

Fig.5 DSC analysis of samples after aging treatment

解吸热峰，如区域 1 所示，然后依次分别是  $\theta''$ 、 $\theta'$ 、 $\theta$  的放热峰<sup>[11,12]</sup>。从图上可见，15 °C 水温下淬火的 A、G、M 试样均有较明显的 GP 区吸热峰存在，而 60 °C 淬火时 A1 试样（端淬面处）的 GP 区吸热峰很微弱。对于 A 试样，在紧挨 GP 区吸热峰后出现放热单峰，对应过渡相  $\theta''$  的溶解，该峰积分面积较大，说明试样 A 含有较多的过渡相  $\theta''$ ，试样 A 的 TEM 分析也证明了试样中含有较多的  $\theta''$  相（图 6 所示）；试样 A1、G、M 在紧挨 GP 区吸热峰后存在一个斜向上的平台，且温度区域较宽，这是混合相（可能是  $\theta''$ 、 $\theta'$  或  $\theta$  相之间的混合）的溶解放热峰，说明这些试样中除了含有  $\theta''$ ，还有  $\theta'$  或者  $\theta$  相。相比较 A 试样，A1、G、M 试样的冷却速度较慢，在冷却过程中发生了不同程度的第二相提前析出，在正常时效时间下，这些提前析出相因过时效而成了  $\theta'$  或者  $\theta$  相。

以最大硬度下降 10% 作为淬透标准<sup>[7]</sup>，根据图 4 的数据，得到试样在不同水温下的淬透深度和最大硬度值，如图 7 所示。水温在 40 °C 之前存在较高的最大硬度值和较低的淬透深度，此时最大硬度值可大于

1200 MPa，淬透深度在 30 mm 左右；而水温高于 40 °C

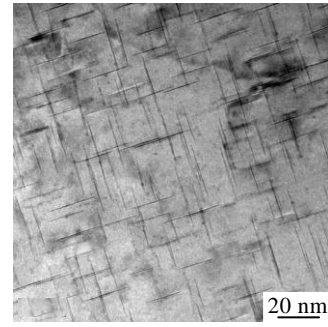


图 6 试样 A 的 TEM 照片

Fig.6 TEM micrograph of sample A

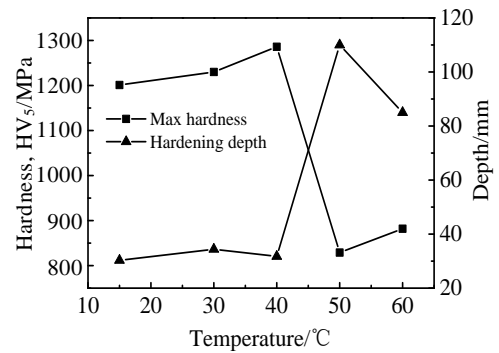


图 7 不同水温下的最大硬度及淬透深度

Fig.7 Maximum hardness and quenching depth at different water quenching temperatures

后最大硬度值下降到 800~900 MPa 之间，但淬透深度提高到 80 mm 以上。

### 2.3 端淬实验的模拟

#### 2.3.1 平均冷却速度的计算

利用 ANSYS 模拟该合金的在 40 °C 水温下的端淬实验，得到图 1 中 A~M 各点的温度-时间曲线，为方便观察，只选取 A、G、M 3 点的冷却曲线示意，如图 8 所示。根据该合金的主要合金元素 Cu 及 Mn 的含量，估算该合金的淬火敏感温度区间在 140~380 °C 之间<sup>[13]</sup>。利用冷却曲线可以得到 A 到 M 各点在温度区间 140~380 °C 的平均冷却速度，如图 9 所示。计算公式如式（1）所示。 $n$  表示在 140~380 °C 温度区间的取样点的个数。

$$V_c = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{\partial T_i}{\partial t_i}}{n} \quad (1)$$

由图 9 可见，随着距端淬面距离的增加，平均冷却速度快速减小，当达到 60 mm 后，平均冷却速度变

化放缓,这也是图 2 中当距端淬面距离大于 60 mm 后,试样所对应的电导率值变化放缓的原因。

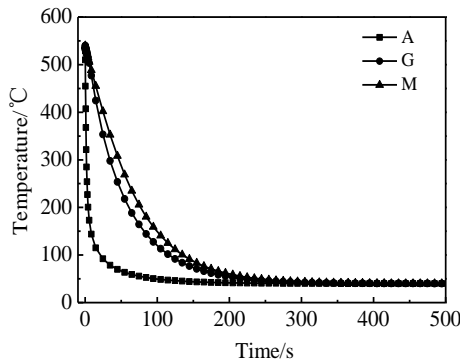


图 8 各点冷却曲线

Fig.8 Cooling curves of samples at different location (40 °C)

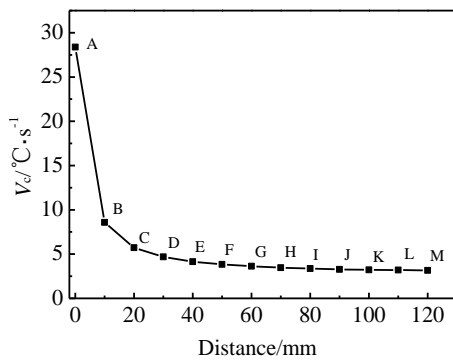


图 9 各点平均冷却速度

Fig.9 Average cooling rate of different location (40 °C)

### 2.3.2 平均冷却速度与硬度

依据式 (1) 计算不同水温下各点在 140~380 °C 温度区间的平均冷却速度,并结合图 4 的硬度值,得到不同淬火水温下的平均冷却速度与硬度值之间的关系,见图 10。从图 10 可以看到,在不同的淬火水温下,平均冷却速度均存在一临界值,当平均冷却速度超过这一临界值后,硬度值均存在一平台,可以认为在超过该平均冷却速度后固溶体的过饱和程度基本不

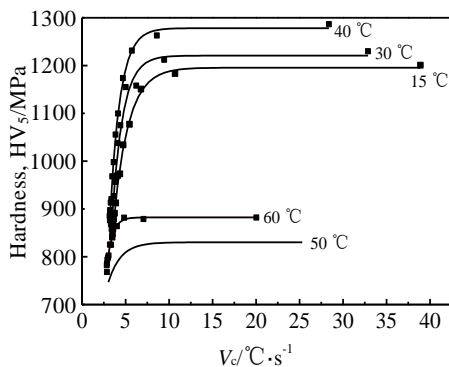


图 10 硬度值与平均冷却速度的关系曲线

变,平均冷却速度未达到该临界值,则过饱和程度随着平均冷却速度的增大而增大,时效后的硬度值也随之增大。从图上估算出不同淬火水温下在 140~380 °C 淬火敏感温度区间的临界平均冷却速度见表 1。

表 1 不同淬火水温下的临界平均冷却速度

Table 1 Critical average cooling rate at different quenching temperatures

Quenching temperature/°C	15	30	40	50	60
Critical rate/°C s <sup>-1</sup>	8.63	7.80	7.20	6.38	5.55

## 3 结 论

1) 在淬水水温一定的情况下,试样的过饱和和固溶程度随着距端淬面距离的增加而下降;在距端淬面距离一定的情况下,水温较低(≤40 °C)时淬火,试样的过饱和和固溶程度高于水温较高(50~60 °C)时的过饱和程度,在 40 °C 时试样具有最高的过饱和固溶度。

2) 对于 211Z 高强韧耐热铝合金,端淬后的硬度值不适宜用来评价 211Z 铝合金的淬透能力。时效处理后的硬度值适于用来评价该合金的淬透能力。以最大硬度下降 10% 作为淬透的标准,发现水温在 40 °C 之前该合金存在较高的最大硬度值(>1200 MPa)和较低的淬透深度(~30 mm);而水温高于 40 °C 后最大硬度值下降到 800~900 MPa 之间,但淬透深度提高到 80 mm 以上。

3) 在不同的淬火水温下,试样在 140~380 °C 温度区间的平均冷却速度与最终硬度值之间存在一定关系,当平均冷却速度超过临界值后,硬度值基本保持不变;当平均冷却速度未达到临界值时,时效后的硬度值随平均冷却速度的增加而增大。

### 参考文献 References

[1] Liu Shengdan(刘胜胆), Zhang Xinming(张新明), You Jianghai(游江海) et al. *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2007, 36(4): 607

[2] Hu Shaoqiu(胡少虬), Zeng Sumin(曾苏民). *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2006, 35(4): 538

[3] Hu Shaoqiu(胡少虬), Zeng Sumin(曾苏民). *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2006, 35(5): 774

[4] Zhang Yong(张勇), Deng Yunlai(邓运来), Zhang Xinming(张新明) et al. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*(中国有色金属学报)[J], 2008, 18(10): 1788

- [5] Conserva M, Fiorini P. *Metallurgical Transactions*[J], 1973(4): 857
- [6] Xiong Baiqing(熊柏青), Li Xiwu(李锡武), Zhang Yongan(张永安) *et al. The Chinese Journal of Nonferrous Metals*(中国有色金属学报)[J], 2011, 21(10): 2631
- [7] Wan Li(万里), Deng Yunlai(邓运来), Zhang Yunya(张云崖) *et al. Journal of Central South University, Science and Technology*(中南大学学报自然科学版)[J], 2011, 42(11): 3289
- [8] Mou Gang(牟 刚), Mao Jian(毛 健), Zhang Xiaomin(张晓敏) *et al. Hot Working Technology*(热加工工艺)[J], 2013, 42(8): 207
- [9] Tao Wenquan(陶文铨). *Heat Conduction*(传热学)[M]. Xi'an: Northwester Polytechnical University, 2006: 12
- [10] Hu Shaoqiu(胡少虬), Zhang Hui(张 辉), Yang Libin(杨立斌) *et al. Natural Science Journal of Xiangtan University*(湘潭大学自然科学学报)[J], 2004, 26(2): 66
- [11] Liu Juncheng(刘君城), Zhang Yongan(张永安), Liu Hongwei(刘红伟) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2010, 20(11): 2118
- [12] Zhang Baochang(张宝昌). *Nonferrous Metal and Heat Treatment*(有色金属及其热处理)[M]. Xi'an: Northwester Polytechnical University, 1993: 24
- [13] Li Hongying(李红英), Zhao Yankuo(赵延阔), Tang Yi(唐 宜) *et al. The Chinese Journal of Nonferrous Metals*(中国有色金属学报) [J], 2011, 21(5): 968

## Water-Quenching Hardenability of 211Z High Strength and Toughness Heatproof Aluminum Alloy

Mou Gang<sup>1</sup>, Che Yun<sup>2</sup>, Jiang Yu<sup>1</sup>, Zhang Zhongke<sup>2</sup>, Mao Jian<sup>1</sup>

(1. Sichuan University, Chengdu 610064, China)

(2. Guizhou Aluminum Materials Engineering Research Center, Guiyang 550001, China)

**Abstract:** The water quenching hardening property of 211Z aluminum alloy was investigated by end-quenching instrument, electrical conductivity meter, differential scanning calorimetry, transmission electron microscopy and numerical simulation method. The results show that the supersaturation degree as well as the hardness after aging treatment of samples treated by water quenching below 40 °C are higher than those of samples treated by higher temperature (50~60 °C) water quenching. But, the influence of water temperature on quenching depth is reverse. Hardness of samples after aging treatment is influenced by average cooling rate during quench sensitivity temperature interval (140~380 °C). When the average cooling rate exceeds a critical value, the hardness remains the maximum and unchanged. However, the hardness increases with the increase of average cooling rate when it is less than the critical value.

**Key words:** 211Z high strength and toughness heatproof aluminum alloy; quenching sensitivity; quenching depth; hardness; numerical simulation

---

Corresponding author: Mao Jian, Professor, College of Materials Science and Engineering, Sichuan University, Chengdu 610064, P. R. China, Tel: 0086-28-85404370, E-mail: maojian@scu.edu.cn