

文章编号: 1004 - 0609(2003)03 - 0635 - 05

6005A 合金的淬火敏感性^①

肖从文, 汪明朴, 王正安, 李 周, 郭明星
(中南大学 材料科学与工程学院, 长沙 410083)

摘 要: 利用 TTP 曲线的测定和透射电镜分析对铝车车体大型材用 6005A 合金的淬火敏感性进行了研究。结果表明, 6005A 合金的 HB 与 σ_b 的 TTP 曲线鼻温均在 370 °C 左右, 高温区淬火敏感性并不太高, 但中温区(280~400 °C)淬火敏感性极高, 低温区则介于二者之间; 大型材生产中在线挤压后淬火时, 型材出口温度最好应大于 480 °C, 自 480 °C 空冷到分解危险温度 400 °C 时间最好小于 60 s, 此后要快速淬火通过中温危险区。透射电镜分析表明: 随着等温时间的延长, 6005A 合金过饱和固溶体不断分解为平衡析出相 Mg_2Si , 强化效果减弱, 同时抑制了强化相 β 的析出, 合金的力学性能也随之降低。

关键词: 6005A 合金; TTP(time-temperature-properties) 曲线; 淬火敏感性

中图分类号: TG 113.25; TG 115.21

文献标识码: A

地铁列车、轻轨列车、高速列车使用铝制车辆是实现我国轨道交通高速化、轻量化、现代化的主要途径。寻找一种具有较高强度和良好力学性能的车体大型材用铝合金尤为关键。目前, 国外铝制车体大型材用铝合金主要采用 6××× 系合金, 最新研究表明 6005A 合金较为理想^[1-5]。德国 VAW、日本 KOK、中国西南铝加工集团等公司均以此合金为基础生产了车体大型材。但同时, 人们也发现 6005A 合金在实际生产中存在在线挤压后难以淬硬的问题, 这对该合金在后续时效中获得良好的综合力学性能影响极大。为此, 作者通过大量实验, 测定了 6005A 合金硬度 HB 和抗拉强度 σ_b 的 TTP 曲线, 研究了该合金的淬火敏感性及其对力学性能的影响, 并利用透射电镜作了微观结构上的分析, 以便为实际生产工艺的制定提供理论依据。

1 实验

实验合金经熔炼后半连续铸造成 d 160 mm 的锭坯, 对锭坯进行锯切、均匀化退火和铣面后, 再经 24.5 MN 挤压机挤压进行矫直处理, 将型材沿挤压方向切割成 150 mm × 20 mm × 4 mm 的长条样品, 制成拉伸试样和硬度试样, 所得样品于 550 °C 固溶处理 1 h 后, 淬入不同温度的盐浴炉中进行不同时间的等温处理, 随后再淬入室温水。上述处理的

样品, 再经 175 °C, 8 h 时效后测量其硬度 HB 值和拉伸强度 σ_b 。

拉伸实验和硬度实验分别在 CSS-44100 电子拉伸试验机和 HBE-3000 硬度计上进行。电子显微观察在 H-800 透射电镜上进行。

2 结果与分析

2.1 6005A 合金 TTP 曲线测定及淬火敏感性分析

图 1 所示为 6005A 合金在典型等温温度下的硬度 HB—等温时间曲线。由图 1 可以看出, 实验合金硬度 HB 随等温时间的延长总体呈下降趋势, 等温温度较高时(430 °C), 等温初期变化比较缓慢, 等温时间 3 min 以内硬度 HB 值相差不大, 后期下降速度有所加快, 等温 7 min 后硬度 HB 已下降到 80 左右。在较低等温温度(250 °C)时, 硬度下降速度要略快于 430 °C, 等温时间为 5 min 时硬度降到 80 附近。而在 370 °C 等温时, 硬度值随等温时间的增加下降非常迅速, 等温 2 min 后淬火硬度 HB 值已下降到 45 左右, 此后硬度值基本不变。图 2 所示为相同处理工艺试样的抗拉强度—等温时间变化曲线, 可见其变化规律与图 1 基本相同。

图 3 所示分别为根据硬度 HB 和拉伸强度 σ_b 随等温温度及等温时间变化规律作出的 TTP 曲线, 由图 3 可以看出, TTP 曲线按孕育期可分为 3 区。

① 基金项目: 国家计委产业化前期关键技术研究项目(980411)

收稿日期: 2002-08-03; 修订日期: 2002-10-27

作者简介: 肖从文(1983-), 男, 硕士研究生。

通讯联系人: 肖从文, 电话: 0731-8830264

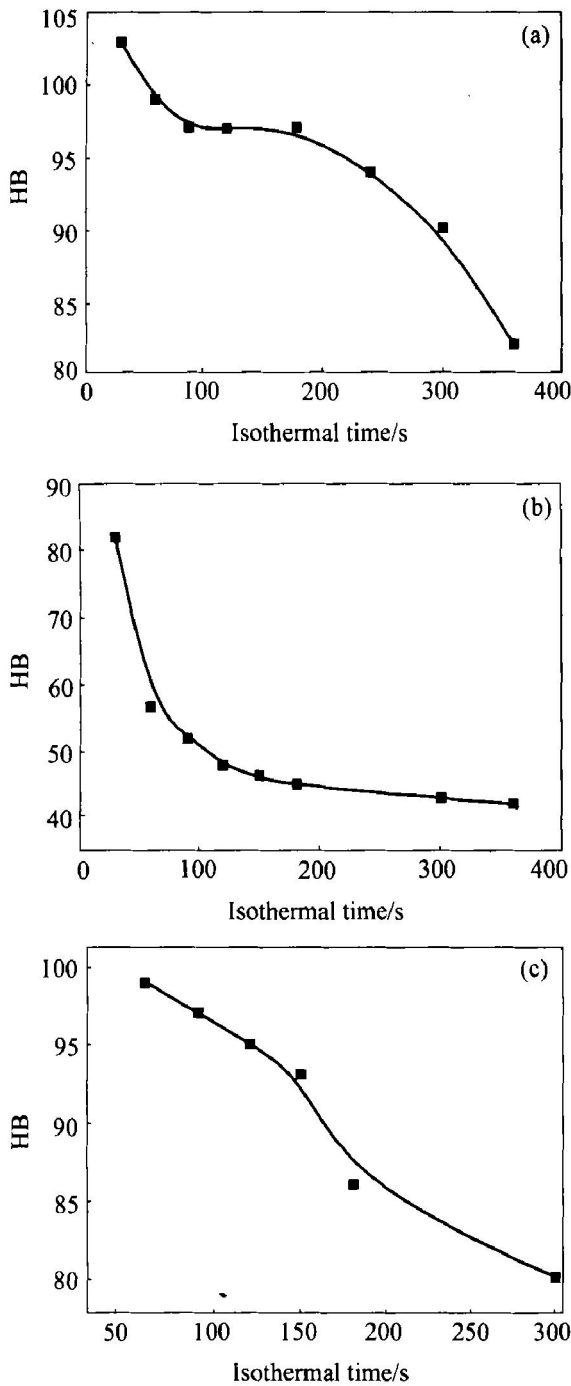


图1 不同等温温度的硬度HB—等温时间关系曲线

Fig. 1 Hardness—isothermal time curves at different isothermal temperatures (a) -430 °C; (b) -370 °C; (c) -250 °C

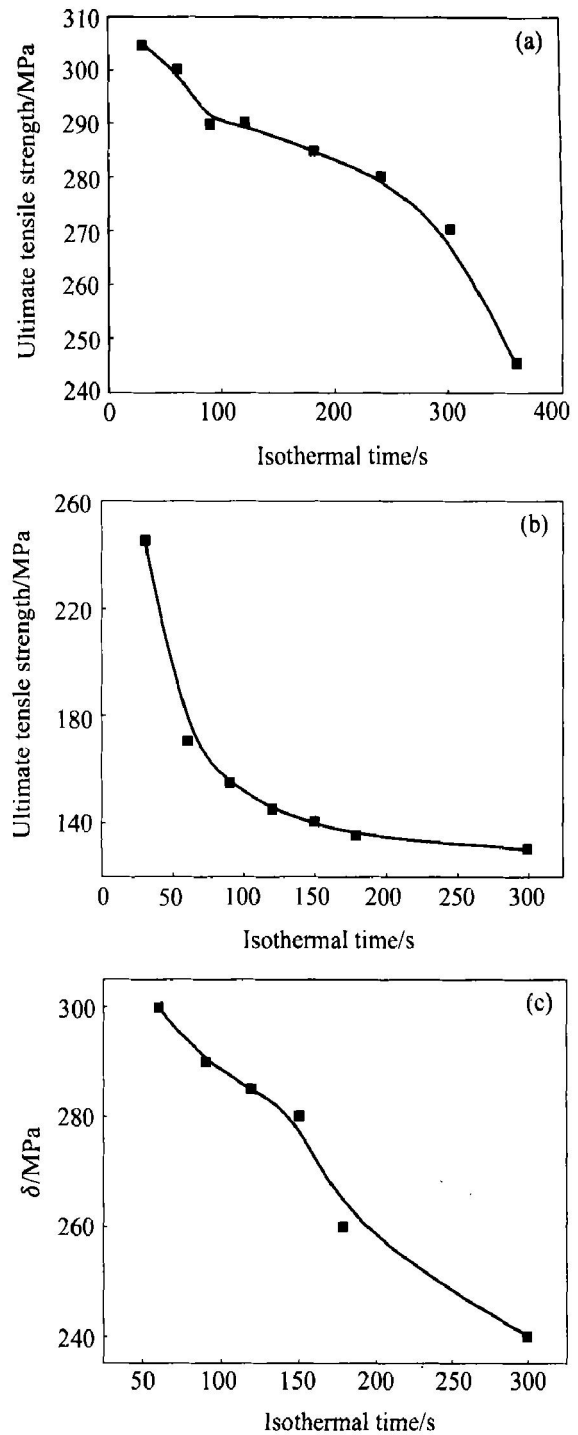


图2 抗拉强度—等温时间关系曲线

Fig. 2 Tensile strength—isothermal time curves at different isothermal temperatures (a) -430 °C; (b) -370 °C; (c) -250 °C

合金鼻温约在 370 °C，鼻温附近的中温区(280 °C~400 °C)孕育期非常短，合金硬度 HB 和抗拉强度 σ_b 在 2 min 以后分别降到 65 和 220 MPa 以下，而在高温区(> 400 °C)和低温区(< 280 °C)孕育期相对较长，其中高温区的孕育期最长，430 °C等温 4 min 后硬度 HB 仍大于 90， σ_b 在 280 MPa 左右，可见 6005A 在高温区的淬火敏感性并不太高，但在中温区淬火敏感性很高，孕育期极短，低温区淬火敏感性介于二者之间。因此在大型材的在线挤压淬火工

序中，应尽量提高中低温区的淬火速度。

2.2 等温处理对 6005A 合金微观组织的影响

合金力学性能的差异必然与其微观组织的变化相对应。为此，对不同等温处理样品进行了透射电镜对比观察，图 4 所示为典型的实验结果。图 4(a)所示为 390 °C等温 30 s，HB 110 时的 TEM 像，从图中可清楚地看到合金中存在大量弥散分布的呈花

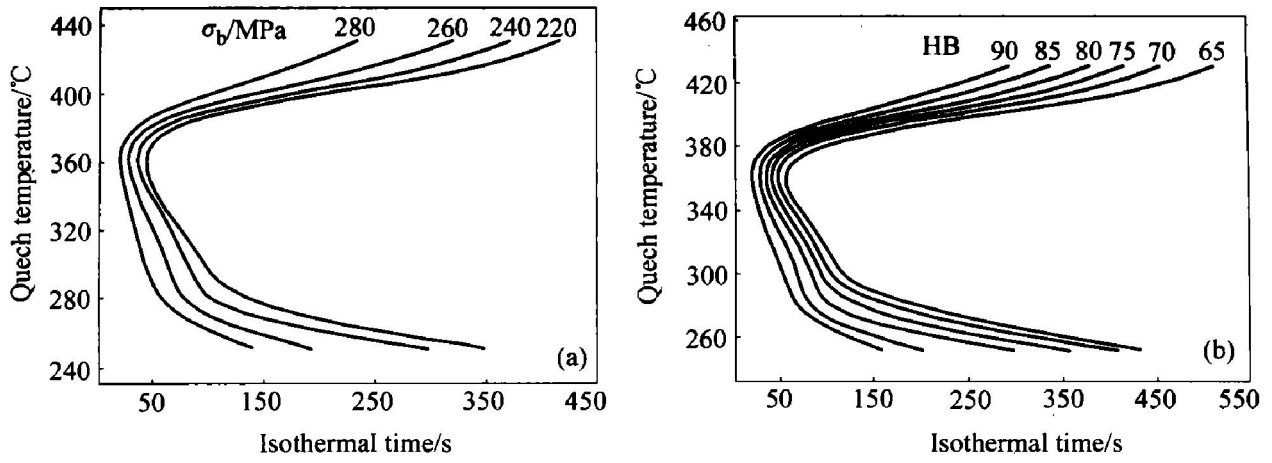


图 3 6005A 合金 TTP 曲线
 Fig. 3 TTP curves of 6005A
 (a) — σ_b ; (b) —HB

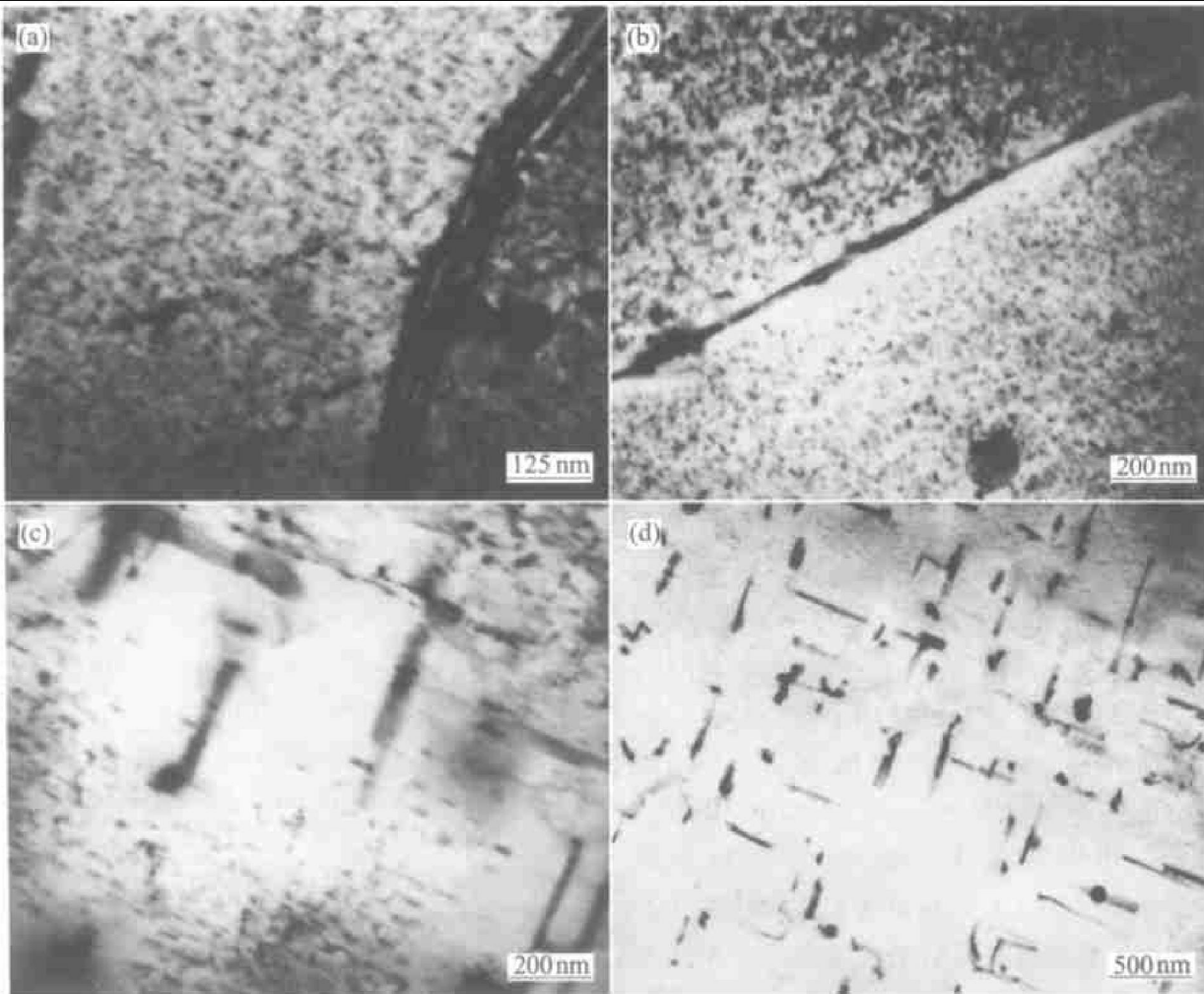


图 4 实验合金不同等温处理状态的典型透射电镜衍衬像

Fig. 4 Typical TEM images under different isothermal treatments

- (a), (b) —Solution treated at 550 °C for 1 h, then isothermal treated at 390 °C for 30 s;
- (c) —Solution treated at 550 °C for 1 h, then isothermal treated at 390 °C for 60 s;
- (d) —Solution treated at 550 °C for 1 h, then isothermal treated at 390 °C for 120 s

格尼形貌的析出相, 析出相平均长度约为 10~ 20 nm。为试验合金在时效时析出的 β 强化相^[6]。由于

弥散析出相分布密度很大,其强化效果明显,所以此试样硬度值高。图4(b)所示为上述试样另一视场的TEM像。显微组织中的晶界两侧存在无沉淀带,但无沉淀带非常窄,宽度仅为 $200\text{ }\mu\text{m}$ 。这也可能是该处理条件试样力学性能较高的原因之一^[6,9],晶界两侧存在与图4(a)相同的极细小的强化相 β' 。图4(c)所示为等温时间为60 s, HB 90时的样品的TEM像。可见,图中出现了粗大平衡析出相 β ,其分布密度也有所下降,因此它的强化效果不如强化相 β' 显著。由于平衡 β 相的析出,其周围基体中溶质原子浓度下降,抑制了强化相 β' 的析出,同时随着平衡 β 相的长大发生的溶质贫化,周围出现了无沉淀区,所以其硬度低于等温30 s时的硬度。图4(d)所示为等温时间为120 s, HB 60时的透射电镜像。从图中可以清楚地看到试验合金已经析出了大量的 Mg_2Si 平衡相。整个视场中几乎看不到弥散分布的强化相 β' 。这进一步说明了随着等温时间的延长,合金中溶质原子绝大部分都以形成平衡相 β 的方式析出,强化相 β' 越来越少,合金的力学性能也随之下降。

3 讨论

6005A合金主要强化机制是沉淀析出强化,基本析出序列为 $\text{SSS} \rightarrow \text{GP区} \rightarrow \beta' \rightarrow \beta$ (Mg_2Si 平衡相),其主要强化相为过渡相 $77\beta'$ ^[10]。 β' 相为密排六方结构, $a = 7.05\text{ }\mu\text{m}$, $c = 4.50\text{ }\mu\text{m}$ (001) $_{\beta}$ //(110) $_{\text{Al}}$, (110) $_{\beta}$ //(001) $_{\text{Al}}$, β' 相与基体 $\alpha(\text{Al})$ 保持半共格关系,它能钉扎位错,阻碍位错运动,大量均匀分布的细小 β' 相能使合金力学性能大大提高^[9-13]。但由于6005A合金淬火敏感性高,淬火过程中鼻温附近易出现平衡相 β ,其周围基体中溶质原子浓度下降,引起附近弥散分布的过渡相减少,同时存在无细小沉淀相的区域,最终导致力学性能下降。为满足地铁列车、高速列车、轻轨列车使用要求,一般对6005A合金的指标要求为: $\sigma_b \geq 270\text{ MPa}$, $\text{HB} \geq 80$ 。工业生产中要达到这一要求,应尽量利用6005A合金在大于 $400\text{ }^\circ\text{C}$ 的高温区淬火敏感性并不太高这一特性。考虑到实际型材挤压在出口和淬火区之间存在一段空冷距离,建议6005A合金在线挤压淬火时,出口温度最好大于 $480\text{ }^\circ\text{C}$,淬火时自 $480\text{ }^\circ\text{C}$ 空冷到淬火区所用时间最好小于90 s,进入淬火区初始温度最好大于 $400\text{ }^\circ\text{C}$,这样才能使合金实现正确淬火,经时效后力学性能才能获得达标。

4 结论

1) 6005A合金HB与 σ_b 的TTP曲线鼻温均在 $370\text{ }^\circ\text{C}$ 左右,高温区淬火敏感性并不太高,但中温区($280\sim 400$)淬火敏感性极高,低温区则介于二者之间。

2) 大型材生产中在线挤压后淬火时,型材出口温度最好应大于 $480\text{ }^\circ\text{C}$,自 $480\text{ }^\circ\text{C}$ 空冷到分解危险温度 $400\text{ }^\circ\text{C}$ 时间最好小于90 s,此后要快速淬火通过中温危险区。

3) 随着等温时间的延长,6005A合金过饱和固溶体不断分解为平衡析出相 Mg_2Si ,强化效果减弱,同时抑制了强化相 β' 的析出,合金的力学性能也随之降低。

REFERENCES

- [1] Marchand D, Faivre P. Medium strength extrusion alloys in the 6000 series Part II [J]. Light Metal Age, 1983, 41(6): 14-18.
- [2] Mukhopadhyay A K, Yang Q B, Singh S R. The influence of zirconium on the early stages of aging of a ternary Al-Zr-Mg alloy [J]. Acta Metall Mater, 1994, 42(9): 3083-3091.
- [3] Cantor B. Differential scanning calorimetry and the advanced solidification processing in metals and alloys [J]. J Therm Anal, 1994, 42(4): 647-665.
- [4] Swift T. Damage tolerance capability [J]. J Fatigue, 1994, 6(1): 75-94.
- [5] Andersen S J. Quantification of the Mg_2Si β' and β phase in AlMgSi alloys by transmission electron microscope [J]. Metall Mater Trans A, 1995, 26A: 1931-1937.
- [6] 蒙多尔福 L F. 铝合金的组织与性能 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 1988. 1046-1082.
Mondolfo L F. Structure and Properties of Aluminum Alloys [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1988. 1046-1082.
- [7] 侯增寿, 卢光熙. 金属学原理. 上海: 上海科技出版社, 1993. 125-126.
HOU Zeng-shou, LU Guang-xi. Metal Physics [M]. Shanghai: Shanghai Science & Technology Press, 1993. 125-126.
- [8] Singh P, Evans J T. Strain concentration at grain boundaries in AlMgSi alloys [J]. Metal Sci Eng A, 1992, 9: 1-8.
- [9] Geisler A H. Phase Transformation in Solids [M]. New York: Wiley, 1951. 387-389.
- [10] Zhen L, Kang S B, Kim H W. Effects of natural aging and preaging on subsequent precipitation process of an Al-Mg-Si

- alloy with high excess silicon [J]. *Material Science and Technology*, 1997, 10: 905 - 910.
- [11] GU Wan li, PENG Hua xin, LIU Zong rong, et al. Roles of orientation relationship and recrystallization in superplasticity of SiC_w/6061Al alloy composite[J]. *Trans Nonferrous Met Soc China*, 1997, 7(1): 134 - 136.
- [12] WANG Jiar qian, GENG Ping, ZHANG Bao jin, et al. Microstructure and features of RS Al based thermal strengthened alloys[J]. *Trans Nonferrous Met Soc China*, 1997, 7(1): 56 - 60.
- [13] ZHANG Kui, ZHANG Yong hong, LIU Guo jun, et al. Structural evolution of non-dendritic AlSi7Mg alloy during reheating[J]. *Trans Nonferrous Met Soc China*, 1999, 9(3): 553 - 556.

Quench sensitivity of 6005A aluminum alloy

XIAO Cong-wen, WANG Ming-pu, WANG Zheng-an, LI Zhou, GUO Ming-xing
(School of Materials Science and Engineering, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: The quench sensitivity of 6005A alloy was studied using TTP (time—temperature—properties) diagrams plotted by HB and σ_p values and transmission electron microscopy (TEM). The results show that the nose temperatures of TTP curves are about 370 °C. The quench sensitivity at low temperature is quite lower than that at moderate temperature, but is much higher than that at high temperature. It is concluded that, in the industrial production of section material, the outlet temperature after on-line extruding should be higher than 480 °C, air cooling time from 480 °C to critical temperature (400 °C) should be shorter than 60 s and the quench rate should be quick enough through moderate temperature. It is ascribed to the fact that supersaturated solid solution decomposes into equilibrium phase Mg₂Si continuously with increasing isothermal time so that the strengthening effect decreases. It suppresses the formation of major strengthening phase β' and is detrimental to mechanical properties of 6005A alloy.

Key words: 6005A aluminum alloy; TTP diagrams; quench sensitivity

(编辑 黄劲松)