

# 脉冲磁场对 TC4 合金时效过程中析出相的影响

孙中豪, 邢淑清, 贺 帅, 程 桥, 麻永林, 贺骁勇

(内蒙古科技大学 材料与冶金学院, 内蒙古 包头 014010)

**摘 要:** 将脉冲磁场施加在 TC4 钛合金时效过程中, 分析脉冲磁场对 TC4 时效后显微组织及力学性能的影响。通过引入扩散理论, 探究脉冲磁场在时效过程中对析出相的影响。结果表明, 经过脉冲磁场处理后, 显微组织中的析出相数量明显增多, 尺寸变小, 且分布更加弥散。外加脉冲磁场时效 0.5 h 相较于未施加磁场时效 4 h, 抗压强度增加了 35 MPa, 维氏硬度提高了 357 MPa。脉冲磁场可以促进次生  $\alpha$  相析出, 极大地减少了时效所需的时间。从析出动力学角度分析, 脉冲磁场通过使原子团簇受到电子风力和磁化应力的耦合作用, 从而提升了扩散通量, 促进次生  $\alpha$  相析出。

**关键词:** TC4 钛合金; 脉冲磁场; 显微组织; 扩散理论

**中图分类号:** TG146.23

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1002-185X(2022)01-0273-07

钛及钛合金具有熔点高、密度小、强度大、耐腐蚀及生物相容性好等一系列重要特性, 在航空、航天、船舶、医疗以及化工等领域有着广泛的用途, 被人们誉为第 3 金属、空中金属和海洋金属<sup>[1-3]</sup>。TC4 作为双相合金 ( $\alpha+\beta$ ), 具有良好的综合性能, 相较于  $\beta$  合金, 双相合金有良好的热稳定性, 并且密度较小, 而相较于  $\alpha$  合金, 双相合金可以用热处理来提高自身强度<sup>[4-6]</sup>。由于 TC4 中的合金元素是以置换原子的形式存在的, 这与钢中碳原子存在形式并不相同<sup>[7]</sup>, 导致固溶后的  $\alpha$  相仍然保持着  $\alpha$  相塑性和韧性都良好的特性。随后进行时效处理, 可以使得  $\alpha$  相在时效过程中重新生成弥散细小的次生相, 来阻碍位错的移动。合理的时效工艺能够显著地提升其强度、塑性等力学性能<sup>[8]</sup>。但是目前的人工时效处理所需时间过长 (4~8 h)<sup>[9,10]</sup>, 导致其并不能被广泛应用, 所以需要一种新的热处理工艺来缩短时效时间。

磁场热处理作为一种新型热处理方式已经为广大学者所关注。其中 Luo 等人<sup>[11]</sup>研究了磁场热处理对新型铝合金 Al-Zn-Mg-Cu 的影响, 发现磁场能够提供额外的能量来降低空位形成能 ( $\Delta U_V$ ) 以及原子转变活化能 ( $\Delta U_A$ ), 促进铝合金在时效过程中镁原子和铜原子的析出。项兆龙等人<sup>[12]</sup>探究了磁场热处理对 FeCrCo 合金组织性能的影响, 实验结果表明磁场在退火和回火阶段促进了晶粒的生长, 增强了合金的各向异性, 并且促进了初生相分解的进行。Li 等人<sup>[13]</sup>采用强磁场对 TC4 进行处理, 发现 TC4 具有顺磁性, 使溶质原子被磁化受到磁化应力的作用, 增加了位错密度, 提高了 TC4 的抗

拉强度及塑性, 同时降低了  $\alpha \rightarrow \beta$  相变点。同时还有大量研究指出, 脉冲磁场能够产生高额电磁能, 并且可以施加电磁力的作用。在热处理时外加磁场, 可以有效地改善材料的内部组织, 从而提升性能<sup>[14-16]</sup>。

1986 年, Sprecher 等<sup>[17]</sup>提出电致塑性效应, 指出脉冲电流能在金属内部形成大量定向漂移的“电子风”, 位错和原子因大量电子的定向冲击会受到“电子风力”, 促进了位错在滑移面的移动及原子的扩散。同时 TC4 的顺磁性会使其在脉冲磁场中被磁化, 受到磁化应力的作用。本研究基于脉冲磁场能够磁化顺磁性金属, 并且能在金属内部生成涡流的特性, 将脉冲磁场施加在 TC4 时效过程中, 利用 TC4 受到的磁化应力及电子风力的作用, 通过促进原子扩散来增强次生  $\alpha$  相析出以缩短时效处理的时间, 得到细小弥散的析出相。从析出动力学角度和析出相强化机理进行分析, 为实验现象和结论提供理论支持。

## 1 实 验

实验所用的原料是厚度为 9 mm 的轧态 TC4 钛合金, 化学成分见表 1。热处理的试样尺寸为  $\Phi 5 \text{ mm} \times 13 \text{ mm}$ , 利用连续升温金相法测得其相变点为  $(975 \pm 5)^\circ\text{C}$ 。常规固溶时效的固溶温度一般低于相变点  $30^\circ\text{C}$  左右<sup>[18]</sup>, 本实验的固溶温度选定为  $950^\circ\text{C}$ 。常规时效处理的温度通常选取在  $470\sim 530^\circ\text{C}$ <sup>[19]</sup>, 故实验选取的时效温度为  $500^\circ\text{C}$ 。

实验采用的设备为内蒙古科技大学电磁冶金与材料新技术草原英才创新团队自行设计的电磁能管式热

收稿日期: 2021-01-18

基金项目: 内蒙古自治区自然科学基金 (2018MS05008, 2020MS05046)

作者简介: 孙中豪, 男, 1997 年生, 硕士, 内蒙古科技大学材料与冶金学院, 内蒙古 包头 014010, E-mail: 429623353@qq.com

表 1 TC4 合金的化学成分

**Table 1 Chemical composition of TC4 alloy ( $\omega/\%$ )**

Al	V	Fe	C	O	N	H	Ti
5.95	4.01	0.018	0.008	0.062	0.008	0.003	Bal.

处理炉,如图 1 所示,通过给感应线圈输入交变电流,石英管内部生成脉冲磁场。改变电流  $I$ 、频率  $f$  以及占空比  $D$  等参数可以达到控制磁感应强度  $B$  的目的,本实验对线圈施加的感应电流参数为  $I=20\text{ A}$ ;  $f=20\text{ Hz}$ ,  $D=20\%$ 。通过特斯拉计测得此时炉膛内部的脉冲磁场的  $B$  值为  $19.17\text{ mT}$ ,具体处理工艺如表 2 所示。

金相试样的制备按照常规的工序进行,依次为打磨,抛光和腐蚀。抛光剂采用粒度为  $0.06\ \mu\text{m}$  的二氧化硅悬浮液,腐蚀液为  $\text{HF}+\text{HNO}_3+\text{H}_2\text{O}$ (体积比为 2:5:43)的 kroll 试剂。采用 Zeiss 光学显微镜及 Sigma-300 型场发射电子扫描电镜观察其金相和 SEM 组织。使用 WDW-50 型电子万能试验机进行压缩试验,加载速率为  $1\text{ mm/min}$ ,记录其最大压缩强度及应力-应变曲线。

## 2 实验结果

### 2.1 显微组织

#### 2.1.1 脉冲磁场对初生相的影响

图 2 显示了脉冲磁场对 TC4 初生相的影响。在时效时间为  $0.5\text{ h}$  时,常规时效(图 2a)的组织由等轴初生  $\alpha_p$ +针状  $\alpha$  组成,且针状  $\alpha$  数量较少,部分在晶间析出。而相等时效时间外加脉冲磁场时(图 2b),针状  $\alpha$

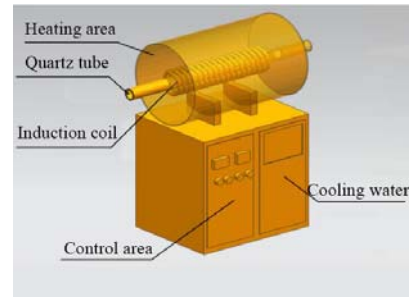


图 1 脉冲磁场管式加热炉示意图

Fig.1 Schematic diagram of pulsed magnetic field tubular heating furnace

表 2 对 TC4 合金进行脉冲磁场时效工艺参数

**Table 2 Process parameters of pulsed magnetic field aging for TC4 alloy**

Temperature of aging, $T/^\circ\text{C}$	Time of aging, $t/\text{h}$	Average value of pulse current, $I/\text{A}$	Magnetic induction intensity, $B/\text{mT}$
500	0.5	20	19.17
500	0.5	0	0
500	4	20	19.17
500	4	0	0

相数量增多,且出现了集束  $\alpha$  相,可以发现外加磁场促进了针状  $\alpha$  相的析出。当时效时间延长到  $4\text{ h}$  时,不加磁场的试样(图 2c)  $\alpha_p$  尺寸变大,且针状马氏体被吞并。而施加脉冲磁场同样处理  $4\text{ h}$  后(图 2d)发现还残留着部分针状  $\alpha$  相,但是其初生  $\alpha$  相晶粒急剧长大。

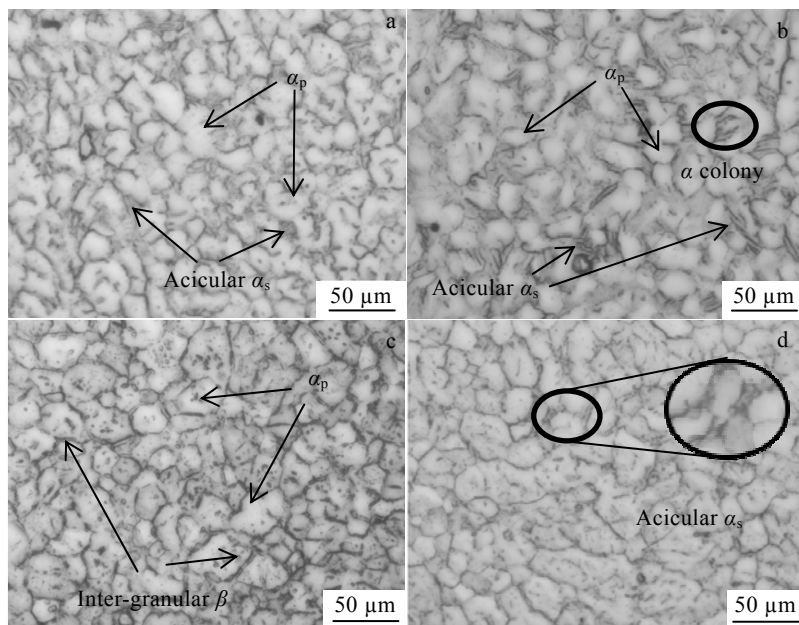


图 2 TC4 合金不同工艺时效后的光学显微组织

Fig.2 OM microstructures of TC4 alloy after aging for  $0.5\text{ h}$  (a, b) and  $4\text{ h}$  (c, d) without (a, c) and with (b, d) magnetic field

利用 Nano Measurer 软件测得了图 2 中 4 张图片的晶粒尺寸如图 3 所示。在施加脉冲磁场时, 磁场能够提供给原子额外的能量(磁化能量  $\Delta U$ )<sup>[20,21]</sup>, 从而降低空位形成能和原子跃迁所需能量, 导致初生  $\alpha_p$  晶粒尺寸变大。在未施加脉冲磁场延长时效时间时, 晶粒尺寸由 17.78  $\mu\text{m}$  增加到 25.42  $\mu\text{m}$ ; 施加脉冲磁场时, 晶粒尺寸由 19.46  $\mu\text{m}$  增加到 28.01  $\mu\text{m}$ 。从数据上可以观察到时效时间对晶粒长大的影响比施加脉冲磁场更加明显。

### 2.1.2 脉冲磁场对次生相的影响

得到细小弥散的次生  $\alpha$  相是 TC4 时效处理的主要目的, 次生相的存在可以阻碍位错运动, 增大位错运动的阻力, 从而提高金属的力学性能。在施加脉冲磁场时, 试样内部也会同时产生傅科电流, 形成大量定向移动的电子, 这些电子对位错不断冲击时, 会产生“电子风力”的作用。同时, TC4 由于具有顺磁性可以在磁场中被磁化从而受到“磁化应力”。这 2 种力促使亚稳态  $\beta$  相更快分解为次生  $\alpha$  相, 使 TC4 能够在较短的时效时间内达到更优的强化效果。值得注意的是时效时间越长, 原子有充分的时间进行长程扩散, 次生相晶粒就越粗大, 所以减少时效时间有利于得到更为细小的组织。

图 4 为 TC4 时效后的 SEM 组织。利用 Image-pro 测得次生  $\alpha$  相体积分数  $f$ , 同时利用等积圆直径来表示其晶粒尺寸  $D$ , 统计结果如表 3 所示。当时效时间为 0.5 h 时, 未施加脉冲磁场(图 4a)的析出并不充分, 只存在少量析出物, 而相同时间下施加脉冲磁场(图 4b)后, 其析出相含量明显增多, 由 6.24% 增加至 11.28%。并且析出物细小且弥散, 这表明施加脉冲磁场后析出更加充分。当时效时间增加至 4 h, 未施加脉冲磁场时(图 4c)出现了少量块状析出物, 这是由于

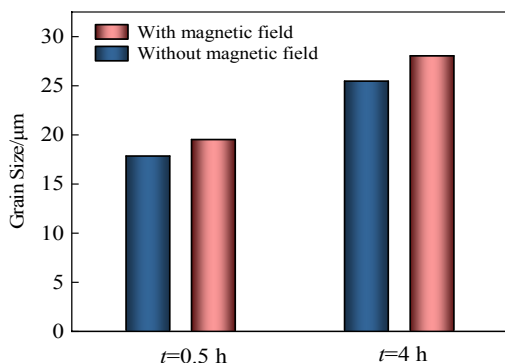


图 3 图 2 中不同时效工艺下 TC4 合金的初生  $\alpha$  相晶粒尺寸  
Fig.3 Grain sizes of primary  $\alpha$  phase of TC4 alloy under different aging processes in Fig.2

随着时效时间的延长, 大晶粒会通过浓度梯度来吞并周围的小晶粒。而在相同时间下施加脉冲磁场后(图 4d), 可以发现生成了巨大的片状次生相, 析出物尺寸由 132.29 nm 增加至 209.14 nm, 且出现了更加明显的聚集现象。

由此可见, 脉冲磁场能够促进次生  $\alpha$  相的析出, 在外加磁场时将时效时间延长到 4 h(图 4d)后, 出现了过时效的现象。由 Ostwald 熟化机制可知, 在过饱和固溶体析出沉淀相时, 由于沉淀颗粒大小并不相同, 小粒子周围母相组元浓度高于大粒子周围母相组元浓度, 随着时效时间的延长, 导致高浓度区向低浓度区扩散, 这时小粒子重新溶解消失, 而大粒子继续长大。这与图 4d 中的现象一致, 大晶粒粗化, 而小晶粒的数量急剧减少。析出相尺寸的增大会导致对位错的阻碍能力减弱, TC4 的力学性能也会因此而降低。

## 2.2 力学性能

不同时效工艺下 TC4 合金的力学性能如表 4 所示。由表 4 可知, 时效时间为 0.5 h 时, 施加磁场使抗压强度增加了 60 MPa, 但是硬度降低了 408 MPa。由于磁场可以对原子团施加洛伦兹力, 可以使原子打破位错陷阱, 从而促进次生  $\alpha$  相的析出, 提升了 TC4 的抗压强度。而维氏硬度的主要影响因素为初生  $\alpha$  相尺寸, 外加磁场为  $\alpha$  晶界移动提供了驱动力, 所以导致初生  $\alpha$  相的晶粒尺寸会略微增大, 硬度由 3100 MPa 降低到 2692 MPa。

在 TC4 的时效过程中, 时效时间不宜过长, 否则脉冲磁场和温度的共同作用将会使次生  $\alpha$  相受到较大的驱动力, 尺寸急剧增加, 导致时效过度, 会降低强度以及硬度。在时效过程中外加磁场下, 时效时间由 0.5 h 上升到 4 h 时, 抗压强度从 1980 MPa 降低到 1895 MPa, 硬度从 2692 MPa 降低到 2322 MPa。

施加脉冲磁场仅使用 0.5 h 就可以略微优于普通时效 4 h 的效果(抗压强度增加 35 MPa, 维氏硬度提高 357 MPa), 并且从实验结果得知, 延长时效时间使晶粒尺寸的长大效果比脉冲磁场更加明显(图 3)。所以用施加脉冲磁场时效来代替长时间普通时效工艺, 可以得到更加细小的组织。

图 5 为 TC4 在不同时效条件下 4 种试样的应力-应变曲线。在图 5a 中可以观察到, 在时效时间为 0.5 h 时施加脉冲磁场, 抗压强度和变形量均有所提高。但是当时效时间上升到 4 h 时(图 5b)可以发现, 施加脉冲磁场的强度和塑性反而会降低。这是由于如果在外加磁场的同时又延长了时效时间后, 会导致之前提到的时效过度, 使力学性能显著下降。脉冲磁场在时效过程中起到了促进次生  $\alpha$  相析出的作用。

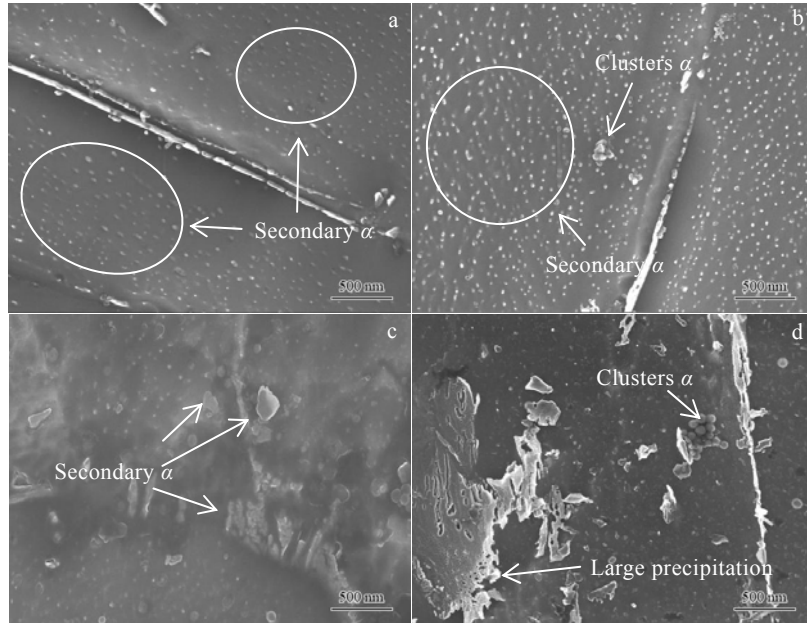


图 4 TC4 合金不同工艺时效后的 SEM 微观组织

Fig.4 SEM microstructures of TC4 alloy after aging for 0.5 h (a, b) and 4 h (c, d) without (a, c) and with (b, d) magnetic field

表 3 图 4 中不同时效工艺下 TC4 钛合金析出相尺寸及体积分数

Table 3 Size and volume fraction of precipitates in TC4 titanium alloy under different aging processes in Fig.4

Time of aging, <i>t</i> /h	Magnetic induction intensity, <i>B</i> /mT	Size of precipitates, <i>D</i> /nm	Volume fraction of precipitates, <i>f</i> /%
0.5	0	34.26	6.24
0.5	19.17	36.54	11.28
4	0	132.29	13.26
4	19.17	209.14	26.34

表 4 TC4 合金在不同时效工艺下的力学性能

Table 4 Mechanical properties of TC4 alloy under different aging processes

Temperature of aging/ $^{\circ}\text{C}$	Time of aging/h	Magnetic intensity/mT	Compressive strength/MPa	HV Hardness/ $\times 10$ MPa
500	0.5	19.17	1980	269.2
500	0.5	0	1920	310.0
500	4	19.17	1895	232.2
500	4	0	1945	233.5

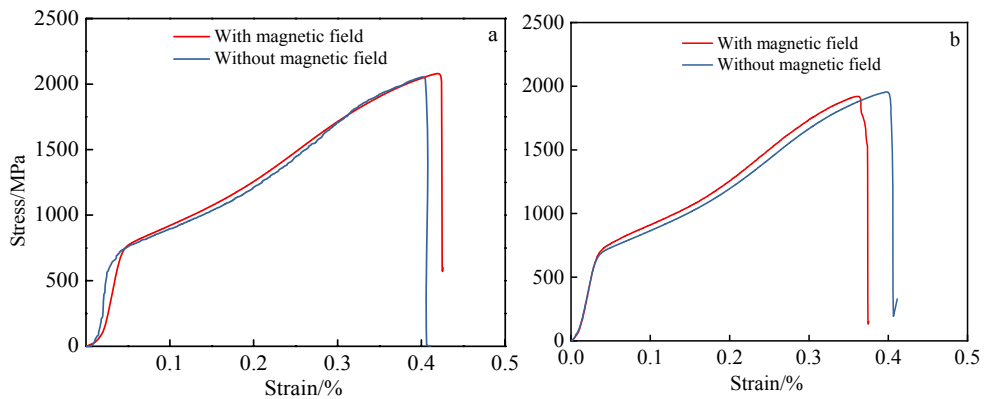


图 5 TC4 在不同时效条件下的应力-应变曲线

Fig.5 Stress-strain curves of TC4 alloy under different aging conditions: (a)  $t=0.5$  h and (b)  $t=4$  h



### 3 分析和讨论

通过 Ansys 数值模拟可计算 TC4 表面  $B$  值以及渗透深度。表面  $B$  值计算结果如图 6a 所示,可以观察到, TC4 表面磁感应强度在两端为 20 mT 左右, 整体在 7.89~28.689 mT 之间, 与测量值 19.17 mT 基本接近。图 6b 为试样内部的轴向磁场分布。可以看出, 从两端到中心磁感应强度呈衰减趋势, 这与理论保持一致。在中心位置的磁感应强度为 6.833 mT, 这证明本实验磁场能够渗透到试样心部。

当给试样施加脉冲磁场  $B$  时, 感应脉冲电流  $J$  也会在试样内部产生。脉冲磁场  $B$  可以使顺磁性材料受到磁化应力  $F_B$ <sup>[13]</sup>, 而感应脉冲电流  $J$  也会使团簇受到电子风力  $F_1$  的作用<sup>[22]</sup>, 2 个应力的表达式为:

$$F_B = \frac{M}{2\mu_0(H+M)}B^2 \quad (1)$$

$$F_1 = k_{cw}J \quad (2)$$

式中,  $\mu_0$  为真空磁导率,  $M$  为 TC4 的磁化强度,  $H$  为磁场强度,  $B$  为磁感应强度,  $k_{cw}$  为电子风力系数,  $J$  为电流密度。式(1)和(2)表明了脉冲磁场可以使被施加磁场的金属导体受到这 2 个力的作用, 而内应力会影响

其扩散通量, 所以施加脉冲磁场时的扩散通量除了有浓度梯度扩散, 还包含磁应力扩散和电子风应力扩散, 所以扩散通量应当分为以下 3 部分:

$$J_c = -D \frac{d\rho}{dx} \quad (3)$$

$$J_1 = \frac{D}{kT}(k_{cw}J\Omega) \quad (4)$$

$$J_B = \frac{D}{kT} \left[ \frac{MB^2\Omega}{2\mu_0(H+M)} \right] \quad (5)$$

式中,  $J_c$  为浓度梯度扩散通量,  $d\rho/dx$  为元素浓度关于位置的微分, 式(3)中负号代表扩散的方向为逆浓度梯度。 $J_1$  为电子风应力扩散通量,  $\Omega$  为原子体积。 $J_B$  为磁应力扩散通量,  $k$  为玻尔兹曼常数,  $T$  为开氏温度。由式 (3)、(4)、(5) 可得外加脉冲磁场时的总扩散通量  $J_{EPM}$  为:

$$J_{EPM} = J_c + J_1 + J_B \quad (6)$$

可以看出, 试样内部的  $B$  值和电流密度  $J$  与扩散通量成正相关, 及施加脉冲磁场后可以提升原子的扩散通量。同时根据扩散第一定律可以反推出施加脉冲磁场的扩散通量与扩散系数的关系:

$$D_{EPM} = \frac{dx}{-d\rho} J_{EPM} \quad (7)$$

扩散通量的增加意味着扩散系数  $D$  的提升。 $D$  对于次生  $\alpha$  相的析出起到了决定性作用, 为了定量对比扩散系数对次生  $\alpha$  相析出的影响, 一般采用修正后的 Avrami-Johnson-Meh (AJM)<sup>[23]</sup> 方程进行分析:

$$f = 1 - \exp[-k(D_{EPM}t)^n] \quad (8)$$

由式 (7) 和式 (8) 可得:

$$f = 1 - \exp \left[ k \left( \frac{dx}{d\rho} Jt \right)^n \right] \quad (9)$$

式中,  $f$  为时间  $t$  内析出相的体积分数,  $k$  为定值,  $n$  为与形核类型和长大方式有关的常数, 当团簇和 Guinier-Preston (GP) 区析出时,  $n$  取 1。由于扩散是逆浓度梯度进行, 所以  $d\rho$  为负值。可以看出, 随着扩散系数的增加, 析出相的体积分数也会随之增加。

在 2.1.2 的 SEM 组织中可以观察到, 外加磁场时析出相体积分数增加。施加脉冲磁场时, 由于电子风力和磁化应力的耦合作用, 提高了扩散通量, 加速次生  $\alpha$  相析出, 这与式(9)最终得到的结果一致。析出相体积分数越多, 晶粒尺寸越细小, 强化效果就越明显。次生  $\alpha$  相强化效果可表示为:

$$\Gamma_c = \frac{2\sqrt{6}}{\pi} \frac{f r_s}{r} \quad (10)$$

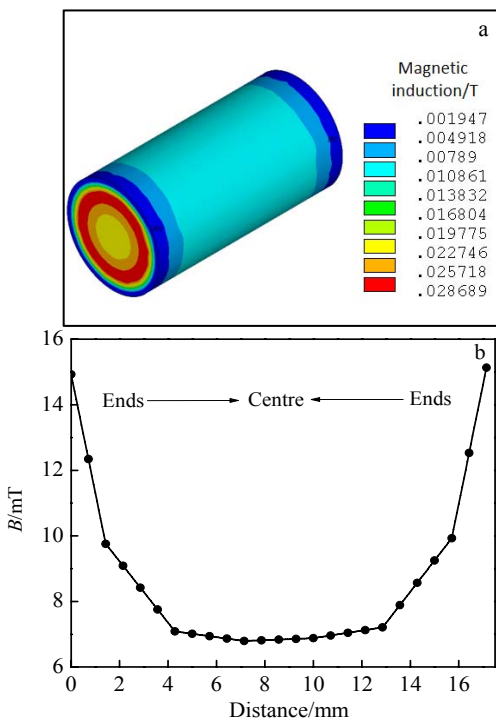


图 6 试样表面及内部轴向的磁场分布

Fig.6 Cloud diagram of magnetic field intensity on the surface of the sample (a) and axial magnetic field distribution inside the sample (b)

式中,  $\Gamma_c$  为临界应力增量,  $f$  表示析出相的体积分,  $r_s$  为界面能,  $r$  为析出相的晶粒半径。所以脉冲磁场通过磁化应力和电子风应力提高扩散通量, 从而促进次生  $\alpha$  相的析出。以上推论可以通过图 7 表示。

基于上述分析, 脉冲磁场可以提高扩散通量从而促进时效过程中的析出。在力学性能上: 当施加脉冲磁场, 时效时间为 0.5 h 时, 强化效果得到了明显提

升。从 SEM 组织可以观察到次生  $\alpha$  相的数量明显增多, 尺寸相对细小。这表明施加脉冲磁场可以缩短时效的时间。但当时效时间上升到 4 h 时, 既延长了时效时间, 又施加了脉冲磁场, 此时出现了过时效现象, 导致析出相晶粒尺寸迅速增大, 力学性能大幅度下降, 所以外加脉冲磁场时, 时效时间必须要小于常规时效时间。

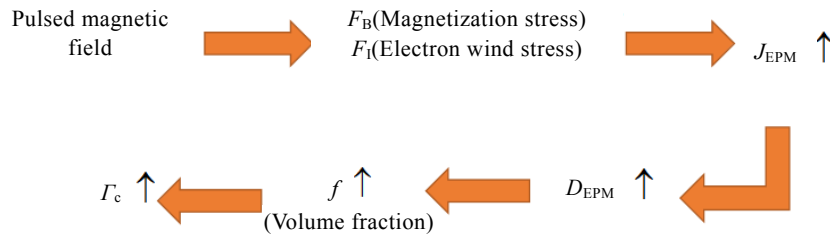


图 7 脉冲磁场对次生  $\alpha$  相强化的机理

Fig.7 Mechanism of secondary  $\alpha$  phase enhancement by pulsed magnetic field

### 4 结 论

1) 对施加脉冲磁场的 TC4 合金进行时效, 仅用 0.5 h 的力学性能要优于普通时效 4 h (未施加磁场), 抗压强度由 1945 MPa 提高到 1980 MPa; 硬度由 2335 MPa 提高到了 2692 MPa。

2) 基于扩散机理分析, 由于脉冲磁场可以渗透到试样心部, 并且在内部产生感应电流, 磁化应力、电子风力与浓度梯度 3 种作用相互耦合, 从而提高扩散通量  $J$ , 使次生  $\alpha$  相更容易析出, 显著增强了其强化效果。

3) 由于脉冲磁场有促进次生  $\alpha$  相析出的作用, 时效时间若与普通时效一致 (4 h), 将会导致过度时效, 使析出物尺寸迅速增大, 临界强化应力降低, 从而使 TC4 合金的硬度和抗拉强度降低, 强化效果减弱。

#### 参考文献 References

[1] Lv Donglan(吕冬兰). *World Nonferrous Metals*(世界有色金属)[J], 2018(5): 230  
 [2] Yang F, Pi Z Q, Zhao Q Y et al. *JOM*[J], 2019, 71: 1056  
 [3] Bao Jianxing, Bai Jianan, Lv Shoudan et al. *Tribology International*[J], 2020, 151: 106 457  
 [4] Yang Fei, Gabbitas Brian. *Journal of Alloys and Compounds*[J], 2017, 695: 1445  
 [5] Li Gang, Qu Shengguan, Guan Shan et al. *Surface & Coatings*

*Technology*[J], 2019, 379: 124 971  
 [6] Gao Peng(高 鹏), Liu Lingyu(刘玲玉). *Transactions of Materials and Heat Treatment*(材料热处理学报)[J], 2019, 40(9): 39  
 [7] Wang Wenbo(王文博). *Dissertation for Master*(硕士论文)[D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2019  
 [8] Wang Wenbo(王文博), Ma Ruixin(马瑞鑫), Jing Zhicheng(井志成) et al. *Chinese Journal of Lasers*(中国激光)[J], 2019, 46(10): 113  
 [9] Liu Zheng, Zhao Zibo, Liu Jianrong et al. *Materials Science and Engineering A*[J], 2021, 800: 140 380  
 [10] Jing Ran(景 然). *Heat Treatment of Metals*(金属热处理)[J], 2018, 43(8): 152  
 [11] Luo Jun, Luo Hongyun, Liu Chu et al. *Materials Science and Engineering A*[J], 2020, 798: 139 990  
 [12] Xiang Zhaolong(项兆龙), Zhang Lin(张 林), Huang Minghao(黄明浩) et al. *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2017, 46(11): 3532  
 [13] Li G R, Li Y M, Wang F F et al. *Journal of Alloys and Compounds*[J], 2015, 644: 750  
 [14] Bai Qingwei(白庆伟), Ma Yonglin(麻永林), Xing Shuqing(邢淑清) et al. *Materials Reports*(材料导报)[J], 2018, 32 (12): 2021  
 [15] Shao Quan, Wang Gang, Wang Haidou et al. *Materials Science and Engineering A*[J], 2021, 799: 140 143

- [16] Fu J W, Yang Y S. *Materials Letters*[J], 2012, 67(1): 252
- [17] Sprecher A F, Mannan S L, Conrad H. *Acta Metallurgica*[J], 1986, 34(7): 1145
- [18] Xu Jian(徐 坚), Wang Wenyan(王文焱), Zhang Haoyin(张豪胤) *et al. Powder Metallurgy Industry*(粉末冶金工业)[J], 2014, 24(5): 29
- [19] Ding Can(丁 灿), Wang Changliang(汪常亮), Li Feng(李 峰) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2020, 49(3): 962
- [20] Bai Qingwei(白庆伟), Ma Yonglin(麻永林), Xing Shuqing(邢淑清) *et al. Chinese Journal of Engineering*(工程科学学报)[J], 2017, 39(12): 1828
- [21] He Chen, Li Yong, Li Jiadong *et al. Materials Science and Engineering A*[J], 2019, 766: 138 328
- [22] Chong Xueying(种雪颖). *Dissertation for Master*(硕士论文)[D]. Changchun: Jilin University, 2020
- [23] Zhu Liang(朱 亮), Guo Mingxing(郭明星), Yuan Bo(袁 波) *et al. Acta Metallurgica Sinica*(金属学报)[J], 2020, 56(7): 997

## Effect of Pulsed Magnetic Field on Precipitated Phase in Aging Process of TC4 Alloy

Sun Zhonghao, Xing Shuqing, He Shuai, Cheng Qiao, Ma Yonglin, He Xiaoyong

(School of Materials and Metallurgy, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou 014010, China)

**Abstract:** A pulsed magnetic field was applied to the aging process of TC4 titanium alloy. The effect of pulsed magnetic field on microstructure and the mechanical properties of TC4 alloy after aging was analyzed. By introducing atomic diffusion theory, the effect of pulsed magnetic field on precipitated phase in aging process was investigated. The results show that after pulsed magnetic field treatment, the number of precipitated phases in the microstructure increases obviously, the size becomes smaller, and the distribution becomes more disperse. Compared with those of the alloy aged for 4 h without magnetic field, the Vickers hardness and compressive strength of the alloy aged for 0.5 h with pulsed magnetic field increase by 357 MPa and 35 MPa, respectively. Pulsed magnetic field can promote the precipitation of secondary  $\alpha$  phase, which greatly reduces the aging time. From the perspective of precipitation kinetics, the pulsed magnetic field can increase the diffusion flux and promote the secondary  $\alpha$  phase precipitation by coupling effect of the electron wind force and magnetization stress.

**Key words:** TC4 titanium alloy; pulsed magnetic field; microstructure; diffusion theory

---

Corresponding author: He Shuai, Ph. D., Professor, School of Materials and Metallurgy, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou 014010, P. R. China, E-mail: neuheshuai2016@126.com