

DOI: 10.11973/jxgccl202308005

低强度脉冲磁场下时效温度和时间对 A356 铝合金组织和性能的影响

潘浩¹, 杨帆², 宫美娜¹, 刘永珍¹, 周金鑫¹, 黄宇欣¹, 麻永林¹

(1. 内蒙古科技大学材料与冶金学院, 包头 014010; 2. 内蒙古上都发电有限责任公司, 锡林郭勒盟 027200)

摘要: 对 A356 铝合金进行 T6 热处理, 在时效时施加 33 mT 低强度脉冲磁场, 研究了时效温度(175, 185 °C)和时效时间(50, 60, 70 min)对 A356 铝合金显微组织和力学性能的影响。结果表明: 在脉冲磁场作用下时效后, A356 铝合金的二次枝晶间距随时效温度升高或时效时间延长而减小, 共晶硅的长径比随时效时间延长先减小后增大; 时效温度为 185 °C 时共晶硅的直径和长径比较 175 °C 时有所增大, 但其数量减少; 在脉冲磁场作用下时效后, A356 铝合金的抗拉强度和屈服强度随时效时间延长或时效温度升高而增大; A356 铝合金的热处理工艺可改进为 540 °C 固溶 60 min+175 °C 时效 70 min, 时效时施加 33 mT 脉冲磁场, 该工艺处理后铝合金的拉伸性能满足使用要求。

关键词: A356 铝合金; 时效热处理; 低强度脉冲磁场; 共晶硅; 力学性能**中图分类号:** TG146.2**文献标志码:** A**文章编号:** 1000-3738(2023)08-0029-05

Effect of Aging Temperature and Time on Structure and Properties of A356 Aluminum Alloy under Low Intensity Pulse Magnetic Field

PAN Hao¹, YANG Fan², GONG Meina¹, LIU Yongzhen¹, ZHOU Jinxin¹, HUANG Yuxin¹, MA Yonglin¹

(1. School of Materials and Metallurgy, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou 014010, China;

2. Inner Mongolia Shangdu Power Co., Ltd., Xilin Gol 027200, China)

Abstract: T6 heat treatment was conducted on A356 aluminum alloy, whose aging process was carried out under 33 mT low intensity pulse magnetic field. The effects of aging temperature (175, 185 °C) and aging time (50, 60, 70 min) on the microstructure and mechanical properties of A356 aluminum alloy were studied. The results show that after aging under pulse magnetic field, the secondary dendrite spacing of A356 aluminum alloy decreased with the increase of aging temperature or aging time, and the aspect ratio of eutectic silicon decreased first and then increased with the increase of aging time. The size and aspect ratio of eutectic silicon at 185 °C aging temperature were higher than those at 175 °C, but the quantity decreased. After aging under pulse magnetic field, the tensile strength and yield strength of A356 aluminum alloy increased with the increase of aging time or aging temperature. The improved heat treatment process for A356 aluminum alloy was solid solution at 540 °C for 60 min+aging at 175 °C for 70 min, and during aging applying 33 mT pulse magnetic field. Treated by this process, the tensile properties of the aluminum alloy met the requirements.

Key words: A356 aluminum alloy; aging heat treatment; low intensity pulse magnetic field; eutectic silicon; mechanical property

0 引言

A356 铸造铝合金是一种 Al-Si-Mg 系亚共晶合金, 其密度小, 铸造性、耐腐蚀性和焊接性良好, 广泛应用于汽车和航空航天等领域^[1-3]。随着汽车工业

收稿日期: 2022-04-04; 修订日期: 2023-04-19

基金项目: 内蒙古自治区科技计划项目(2021GG0096)

作者简介: 潘浩(1993—), 男, 山东潍坊人, 硕士研究生

通信作者(导师): 麻永林教授

的迅猛发展,研究人员对 A356 铸造铝合金的抗拉强度和断后伸长率提出了更高的要求。

脉冲磁场作为一种绿色无污染的清洁能源,具有非接触式、大能量密度及瞬时非连续高能量等优点,被广泛用于铸造和热处理过程,以改善材料的组织和性能。研究^[4-5]表明,脉冲磁场能对共晶硅和 α -Al 相起到明显的细化作用,使共晶硅分布更加均匀,进而提升材料的抗拉强度和断后伸长率。李腾等^[6]研究表明,脉冲磁场可使原子团簇越过形核势垒,增大形核率,细化晶粒。赵作福等^[7]研究了脉冲磁场对 Al-5%Cu 合金时效行为的影响,结果表明脉冲磁场可加快合金原子的扩散速率,缩短时效时间,使合金的显微组织进一步细化,硬度增大。师亚洲等^[8]研究了脉冲磁场对 7075 铝合金组织及力学性能的影响,结果表明在施加脉冲磁场条件下进行时效处理能改善铝合金组织,在不降低抗拉强度的前提下明显提升其韧性。高强度脉冲磁场能源消耗多,对设备要求高,建设成本高。低强度脉冲磁场可以降低合金固态相变中的形核功,增加系统能量起伏和结构起伏,不仅能降低能源消耗,还可以依靠高周期变化率对合金进行快速过饱和能量冲击,起到改善组织、提高力学性能和缩短热处理时间的目的。

A356 铝合金转向节经差压铸造成型而成,需要进行 T6 热处理以提高其力学性能。某工厂提供的

常规 T6 热处理工艺为 540 ℃固溶 450 min+175 ℃时效 250 min,此工艺下制备的铝合金性能符合要求,但是固溶和时效时间总长达 700 min。为降低生产和时间成本,提高市场竞争力,迫切需要对现有工艺进行改进。鉴于脉冲磁场的辅助作用,作者对 A356 铝合金的 T6 热处理工艺进行改进,在低强度脉冲磁场下进行时效处理,研究了时效温度和时效时间对 A356 铝合金组织和力学性能的影响,为制定 1 种降低能源消耗、提高企业竞争力和工件综合性能的快速 T6 热处理工艺提供依据。

1 试样制备与试验方法

试验材料取自差压铸造成型的 A356 铝合金汽车转向节,A356 铝合金的化学成分如表 1 所示。从转向节上截取尺寸为 5 mm×10 mm×15 mm 的金相试样和如图 1 所示的拉伸试样。在自制的脉冲磁场热处理炉中对金相试样和拉伸试样进行热处理,该装置主要由脉冲磁场发生系统和电阻丝加热控温系统组成。先升温至 540 ℃进行固溶处理,保温时间为 60 min,水淬,再分别升温至 175,185 ℃,开启脉冲磁场电源对经固溶处理的试样进行磁场作用下的时效处理,时效时间分别为 50,60,70 min,空冷至室温。脉冲磁场的峰值电流为 130 A,频率为 20 Hz,占空比为 20%,峰值磁感应强度为 33 mT。

表 1 A356 铝合金的化学成分

Table 1 Chemical composition of A356 aluminum alloy

元素	Si	Mg	Fe	Cu	Mn	Zn	Ti	Ni	Sr	Al
质量分数/%	6.83	0.424	0.108	0.000 2	0.001	0.015 8	0.112	0.004	0.018 7	余

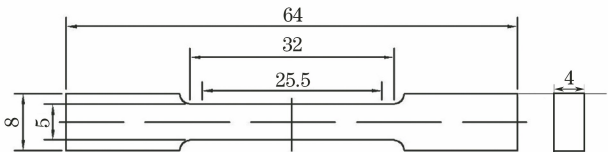


图 1 拉伸试样形状和尺寸

Fig.1 Shape and size of tensile specimen

将金相试样磨抛后,使用体积分数 0.5% HF 水溶液进行腐蚀,腐蚀时间为 10~12 s,用乙醇清洗,吹干。使用 XTL-12B 型光学显微镜(OM)和 Sigma-300 型扫描电镜(SEM)进行组织和形貌分析,并使用 Image-Pro Plus 软件测量时效处理后试样的二次枝晶间距以及共晶硅直径和长径比,统计共晶硅数量。使用 WDW-50B 型电子万能试验机在室温下进行拉伸试验,拉伸速度为 1 mm·min⁻¹,

各测 3 个试样取平均值。

2 试验结果与讨论

2.1 对显微组织的影响

由图 2 可见:低强度脉冲磁场作用下时效后,A356 铝合金的显微组织均主要由 α -Al(白色)和共晶硅(黑色)组成,两者组成枝晶状的微观结构;随时效温度升高或时效时间延长,晶粒尺寸减小。在时效温度为 175 ℃下分别时效 50,60,70 min 后,铝合金的二次枝晶间距平均值分别为 4.9,4.2,4.0 μm ;在时效温度为 185 ℃下分别时效 50,60,70 min 后,二次枝晶间距平均值分别为 4.1,3.8,3.4 μm 。由此可见,低强度脉冲磁场作用下 A356 铝合金的二次枝晶间距随时效时间的延长或时效温度的升高而减小。

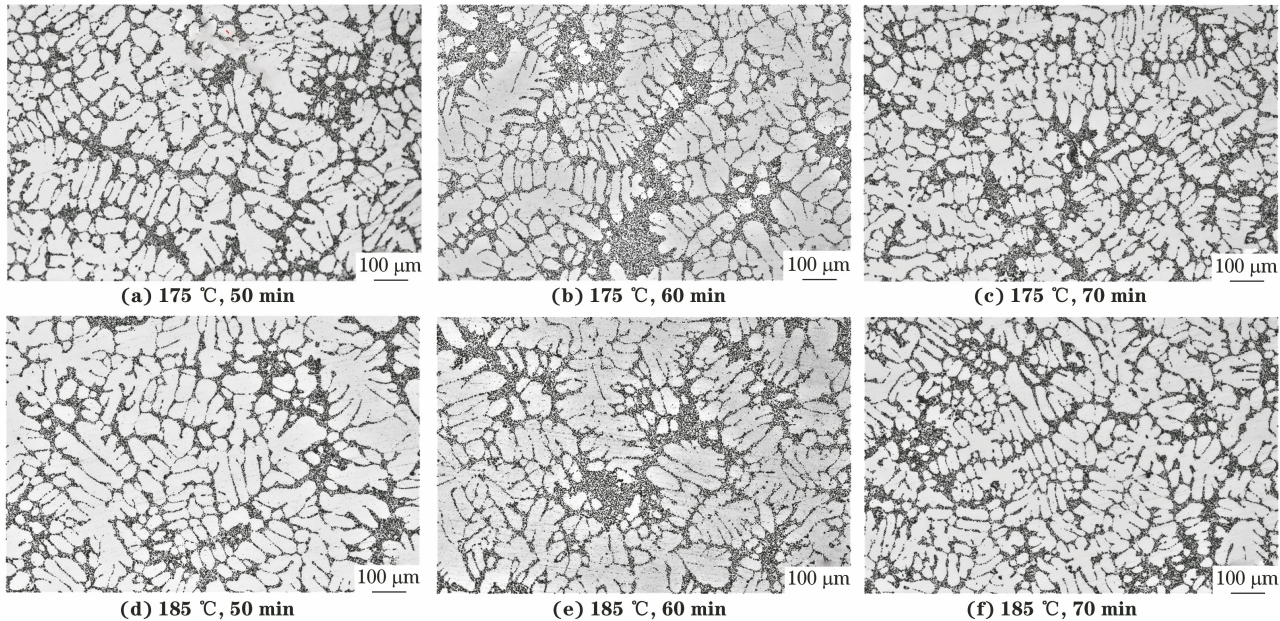


图 2 低强度脉冲磁场下不同温度和时间时效后 A356 铝合金的显微组织

Fig.2 Microstructure of A356 aluminum alloy after aging at different temperatures and times under low intensity pulse magnetic field

由图 3 可见,低强度脉冲磁场作用下时效后,A356 铝合金中的共晶硅均以蠕虫状和椭圆状小颗粒为主,分布较为均匀。在时效温度为 175 °C 下分别时效 50,60,70 min 后,测得共晶硅的平均直径分别为 1.56,1.60,1.53 μm,长径比分别为 1.41,1.33,1.36,共晶硅数量分别为 93,87,102 个;在时效温度为 185 °C 下分别时效 50,60,70 min 后,测得共晶硅

的平均直径分别为 1.69,1.74,1.63 μm,长径比分别为 1.37,1.29,1.35,共晶硅数量分别为 80,84,97 个。由此可见:2 种时效温度下,共晶硅的长径比均随时效时间的延长先减小后增大;时效温度为 185 °C 时共晶硅的尺寸和长径比较时效温度为 175 °C 时均有所增大,但共晶硅数量减少。这是因为温度越高,原子扩散速率越快,共晶硅可吸收更多的硅、铝原子而

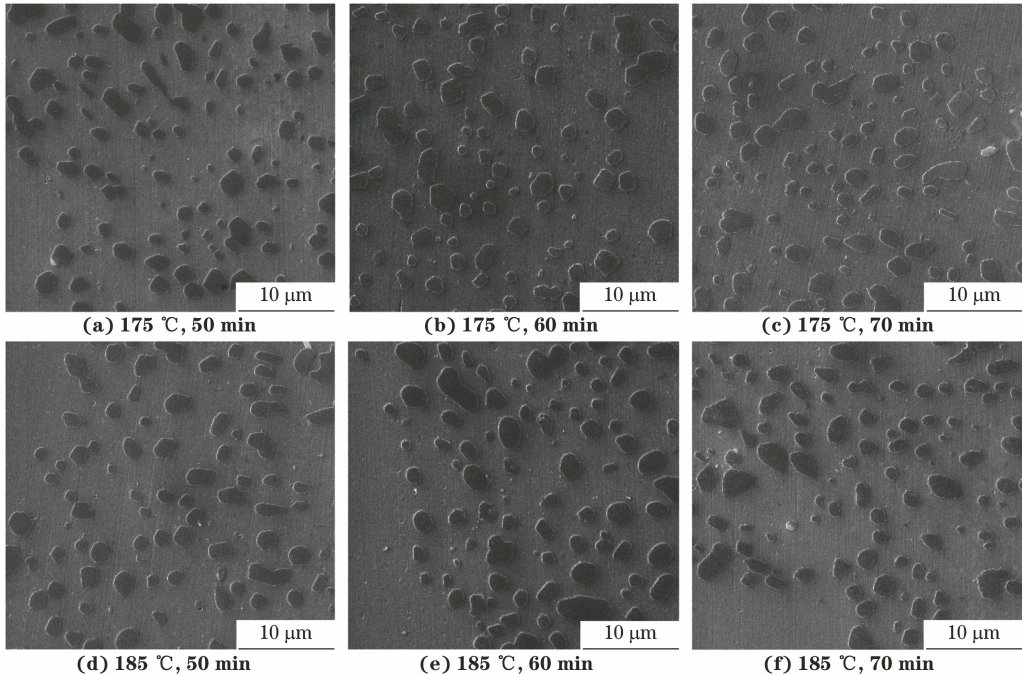


图 3 低强度脉冲磁场下不同温度和时间时效后 A356 铝合金的共晶硅形貌

Fig.3 Morphology of eutectic silicon of A356 aluminum alloy after aging at different temperatures and times under low intensity pulse magnetic field

长大^[9-10];并且,随着温度的升高,共晶硅的临界形核半径和形核功增大,形核率降低,因此共晶硅数量减少^[11-13]。

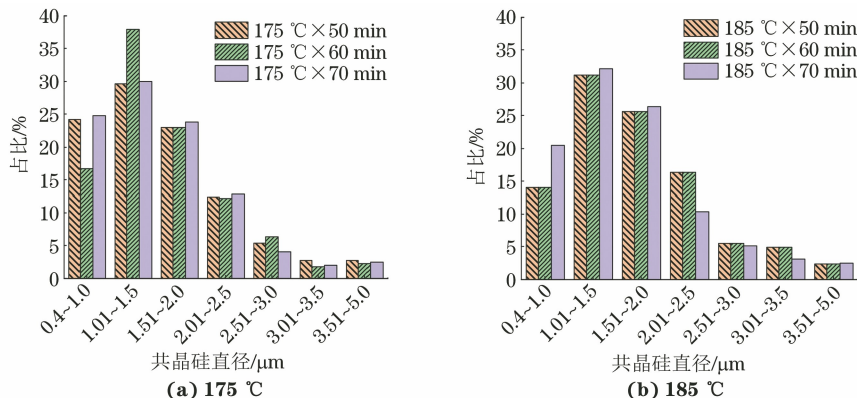


图4 低强度脉冲磁场下不同温度和时间时效后 A356 铝合金的共晶硅尺寸分布

Fig. 4 Size distribution of eutectic silicon of A356 aluminum alloy after aging at different temperatures and times under low intensity pulse magnetic field

2.2 对力学性能的影响

由图 5 可见:在低强度脉冲磁场作用下时效后,当时效温度为 175 °C 时,A356 铝合金的抗拉强度、屈服强度和断后伸长率均随时效时间的延长而增大,当时效时间为 70 min 时分别为 324 MPa, 250 MPa, 18%;当时效温度为 185 °C 时,A356 铝合金的抗拉强度和屈服强度均随时效时间的延长而增

大,但断后伸率先减小后略微增大,当时效时间为 70 min 时 A356 铝合金的抗拉强度、屈服强度和断后伸长率分别为 332 MPa, 260 MPa, 12%。铝合金的主要强化机制包括固溶强化、沉淀强化、位错强化和晶界强化^[14]。当时效时间为 70 min 时 A356 铝合金中的晶粒最为细小,根据霍尔-佩奇公式^[14],抗拉强度最高。

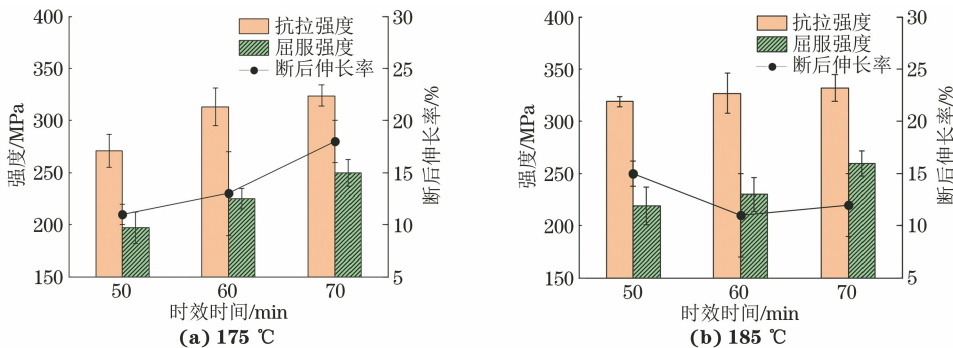


图5 低强度脉冲磁场下不同温度和时间时效后 A356 铝合金的拉伸性能

Fig. 5 Tensile properties of A356 aluminum alloy after aging at different temperatures and times under low intensity pulse magnetic field

在低强度脉冲磁场作用下时效后,当时效时间为 70 min 时,2 种时效温度处理的 A356 铝合金的拉伸性能均能满足使用要求(抗拉强度达到 320 MPa,断后伸长率达到 9%),而相应的热处理总时间仅为 130 min(固溶处理时间为 60 min),相比原工艺缩短了 570 min。相对而言,时效温度为 175 °C 时的能耗和生产成本更低。因此,可将 A356 铝合金转向节的热处理工艺设定为 540 °C 固溶 60 min+175 °C 时效 70 min,时效时施加 33 mT 的低强度脉冲磁场。

3 结 论

(1) 在 T6 热处理的时效过程中施加低强度脉冲磁场后,A356 铝合金的二次枝晶间距随时效温度升高或时效时间的延长而减小。

(2) 低强度脉冲磁场作用下时效后,A356 铝合金中共晶硅的长径比随时效时间的延长先减小后增大;时效温度为 185 °C 时共晶硅的直径和长径比较时效温度为 175 °C 时均有所增大,但共晶硅数量减少。

(3) 低强度脉冲磁场作用下时效后, A356 铝合金的抗拉强度和屈服强度随时效时间延长或时效温度的升高而增大。A356 铝合金转向节的热处理工艺可修正为 540 ℃ 固溶 60 min + 175 ℃ 时效 70 min, 时效过程中施加 33 mT 的低强度脉冲磁场。该工艺相比于原热处理工艺, 所用总时长缩短了 570 min, 热处理后材料的拉伸性能满足使用要求。

参考文献:

- [1] COLOMBO M, GARIBOLDI E, MORRI A. Er addition to Al-Si-Mg-based casting alloy: Effects on microstructure, room and high temperature mechanical properties[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2017, 708: 1234-1244.
- [2] QIU K Q, WANG R C, PENG C, et al. Effect of individual and combined additions of Al-5Ti-B, Mn and Sn on sliding wear behavior of A356 alloy[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2015, 25: 3886-3892.
- [3] TSAI Y C, CHOU C Y, LEE S L, et al. Effect of trace La addition on the microstructures and mechanical properties of A356 (Al-7Si-0.35Mg) aluminum alloys[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2009, 487: 157-162.
- [4] 王晨, 姜文勇, 冯义成, 等. 脉冲磁场对 Al-12.6Si-1Cu 合金组织的影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2016, 36(3): 302-305.
WANG C, JIANG W Y, FENG Y C, et al. Effect of pulsed magnetic field on microstructure of Al-12.6Si-1Cu alloy[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2016, 36(3): 302-305.
- [5] 张磊, 袁秀妹, 尧军平. 低压脉冲磁场对 Al-12.4Si 合金组织与力学性能的影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2013, 33(11): 1074-1077.
ZHANG L, YUAN X M, YAO J P. Effects of low voltage pulsed magnetic field (LVPMF) on microstructure and mechanical properties of Al-12.4Si alloy[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2013, 33(11): 1074-1077.
- [6] 李腾, 傅明喜, 陈斌, 等. 脉冲磁场处理对 $(\text{Fe}_{74}\text{Ga}_2\text{P}_{9.65}\text{B}_{4.6}\text{Si}_3\text{C}_{6.75})_{98}\text{Nb}_2$ 结构及性能的影响[J]. 热加工工艺, 2018, 47(10): 79-81.
LI T, FU M X, CHEN B, et al. Effects of pulse magnetic field treatment on structure and property of $(\text{Fe}_{74}\text{Ga}_2\text{P}_{9.65}\text{B}_{4.6}\text{Si}_3\text{C}_{6.75})_{98}\text{Nb}_2$ [J]. Hot Working Technology, 2018, 47(10): 79-81.
- [7] 赵作福, 刘亮, 齐锦刚, 等. 脉冲磁场作用下 Al-5%Cu 合金的时效机理[J]. 金属热处理, 2016, 41(5): 113-116.
ZHAO Z F, LIU L, QI J G, et al. Aging mechanism of Al-5% Cu alloy under pulse magnetic field[J]. Heat Treatment of Metals, 2016, 41(5): 113-116.
- [8] 师亚洲, 逯广平, 高翌, 等. 脉冲磁场处理对 7075 铝合金性能及组织的影响[J]. 金属热处理, 2021, 46(9): 159-164.
SHI Y Z, LU G P, GAO Y, et al. Effect of pulsed magnetic field treatment on properties and microstructure of 7075 aluminum alloy[J]. Heat Treatment of Metals, 2021, 46(9): 159-164.
- [9] 白庆伟, 麻永林, 邢淑清, 等. 可控电磁能 (CEME) 时效处理下 Al-Zn-Mg-Cu 合金的析出及强化机理研究[J]. 材料导报, 2021, 35(20): 20143-20148.
BAI Q W, MA Y L, XING S Q, et al. Precipitation and strengthening mechanism of Al-Zn-Mg-Cu alloy under controllable electromagnetic energy (CEME) aging treatment [J]. Materials Review, 2021, 35(20): 20143-20148.
- [10] ZHANG K C, LI H Z, LIANG X P, et al. Effect of aging time on discontinuous precipitates, continuous precipitates and mechanical properties of AZ80A magnesium alloy [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2022, 32(9): 2838-2851.
- [11] 朱景川, 来忠红. 固态相变原理[M]. 北京: 科学出版社, 2010.
ZHU J C, LAI Z H. Solid-state phase transition principle [M]. Beijing: Science Press, 2010.
- [12] 白英龙, 吴冲浒, 杨霞, 等. 实际初始 WC 颗粒尺寸选择的 LSW 理论分析[J]. 粉末冶金材料科学与工程, 2012, 17(2): 139-146.
BAI Y L, WU C H, YANG X, et al. LSW theory analysis on size selection for initial WC particles[J]. Materials Science and Engineering of Powder Metallurgy, 2012, 17(2): 139-146.
- [13] ZHU M, JIAN Z Y, YANG G C, et al. Effects of T6 heat treatment on the microstructure, tensile properties, and fracture behavior of the modified A356 alloys[J]. Materials and Design, 2012, 36: 243-249.
- [14] ZHAO Z X, WU R Q, WANG B, et al. Effects of aging on the microstructure and properties of 7075 Al sheets [J]. Materials, 2020, 13(18): 4022-4022.

欢迎来稿

欢迎订阅

欢迎刊登广告