

碳纳米管增强铝基复合材料薄壁椭球件旋压成形实验

冯苏乐¹, 余小鹏², 李志强³, 宋若存², 杨学勤¹, 于忠奇²

(1. 上海航天精密机械研究所, 上海 201600; 2. 上海交通大学 上海市复杂薄壁结构数字化制造重点实验室, 上海 200240;
3. 上海交通大学 材料科学与工程学院, 上海 200240)

摘要: 铝基复合材料作为一种新型轻质高强材料, 在航天型号产品上具有重要的应用前景。以碳纳米管增强铝基复合材料为对象, 开展薄壁母线构件旋压成形和热处理工艺研究, 评估碳纳米管增强铝基复合材料薄壁件工程应用的可行性。旋压实验表明: 通过与现有航天用铝合金材料对比, 获得了碳纳米管增强铝基复合材料“固溶 500 °C×2 h+时效 150 °C×4 h”的最佳参数组合, 并采用多次旋压工艺, 得到的薄壁椭球件具有良好的几何精度; 同时, 经过人工时效后旋压件的拉伸强度可达 580 MPa, 相较于现有铝合金材料提高了 35%。本研究结果为碳纳米管增强铝基复合材料在大型航天薄壁件上的工程应用提供了技术支持。

关键词: 铝基复合材料; 薄壁构件; 旋压成形; 人工时效; 碳纳米管

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2023.05.025

中图分类号: TG306

文献标志码: A

文章编号: 1000-3940 (2023) 05-0183-05

Spinning test for thin-walled hemispherical shell part of CNTs/Al composites

Feng Sule¹, Yu Xiaopeng², Li Zhiqiang³, Song Ruocun², Yang Xueqin¹, Yu Zhongqi²

(1. Shanghai Aerospace Research Institute of Precision Machinery, Shanghai 201600, China;

2. Shanghai Key Laboratory of Digital Manufacture for Thin-walled Structures, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;

3. School of Materials Science and Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: As a new type of lightweight and high-strength material, aluminum matrix composites have important application prospects in aerospace products. Therefore, for carbon nanotube reinforced aluminum matrix composites (CNTs/Al composites), the spinning and heat treatment process of thin-walled curved busbar components were studied to evaluate the feasibility in engineering application of CNTs/Al composites thin-walled part. The spinning tests show that compared with the existing aluminum alloy materials for aerospace, the optimal parameter combination of “solid solution 500 °C×2 h+ aging 150 °C×4 h” of CNTs/Al composites is obtained, and the thin-walled hemispherical shell parts with good geometric accuracy are formed by multi-pass spinning process. At the same time, the tensile strength of spun part can reach 580 MPa after artificial aging, which is 35% higher than that of the existing aluminum alloy material. Thus, the research results provide technical support for the engineering application of CNTs/Al composites in large aerospace thin-walled parts.

Key words: aluminum matrix composites; thin-walled part; spinning; artificial aging; carbon nanotube

燃料贮箱是运载火箭的主承载结构, 为了提高运载火箭的轻量化水平, 贮箱的轻量化设计是重要环节, 减少其结构质量将显著提高火箭的运载能力, 这对于提升火箭的经济效益具有重大意义。贮箱的轻量化高效制造途径主要是采用轻质高强材料和整体成形技术, 例如以铝锂合金^[1]为主体材料的箱底的整体旋压成形技术等^[2]。碳纳米管增强铝基复合材料作为一种新型的轻质高强材料, 在性能上可以与铝锂合金媲美, 并且可以通过结构轻量化来实现

减重, 通过由“碳”代“锂”, 其成本较铝锂合金减少 30%~50%, 使得铝基复合材料成为航天型号产品高性能、低成本的重要可选材料之一。国内外普遍采用整体旋压成形制造箱底来提高贮箱的可靠性, 降低制造周期^[3]。为了实现轻量化贮箱整的体制造, 开展铝基复合材料旋压成形的研究具有重要意义。

相比于已有的航天铝合金材料, 金属基复合材料具有更好的综合性能。近年来, 由于碳纳米管 (Carbon Nanotubes, CNTs) 具有超高强度和刚度等特殊性能, 已成为一种新兴并且拥有广阔前景的增强材料^[4]。而且碳纳米管增强铝基复合材料块体和板材的制备技术已经成熟^[5-6], 作为一种轻质高强材料, 其在航空航天领域具有巨大的应用潜力。然

收稿日期: 2023-03-22; 修订日期: 2023-05-04

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (52175346)

作者简介: 冯苏乐 (1987-), 男, 硕士, 高级工程师

E-mail: fengsuleshike@126.com

而，由于增强体的引入，使铝基复合材料的加工窗口变得更为狭窄，从而增加了构件塑性加工的难度。实验表明，通过提高成形温度能够显著提高构件的成形性能，因此，金属基复合材料一般均在加热环境下进行成形，并通过压缩变形为主的体积成形方法实现构件加工，例如锻造^[7]、挤压^[8-9]、轧制^[10]等，这些压缩类成形均能实现高性能构件的加工。然而，针对金属基复合材料薄壁构件，由于其塑性低，旋压成形过程中尺寸精度和性能的调控成为难点，还有待进一步研究。对此，本文针对航天复杂薄壁曲母线构件，研究了碳纳米管增强铝基复合材料的旋压成形性能，通过板材旋压成形技术，借助压缩和剪切的复合应力作用提高了材料的成形性能，实现了复杂几何形状薄壁构件的成形。

本文主要聚焦铝基复合材料中板材的成形性能，以复合材料时效性能以及旋压件的宏观尺寸（回弹量）作为考核指标，开展碳纳米管增强铝基复合材料的板材旋压成形实验及热处理实验，并通过与现有航天材料对比，评估该材料在复杂薄壁构件上应用的可行性，为碳纳米管增强铝基复合材料的工程化应用提供技术支持。

1 实验准备

本实验选择 CNTs/2A12 铝基复合材料板为实验材料。该材料是在 2A12 铝合金的基础上采用料浆辅助分散碳纳米管的“叠片粉末冶金”技术，获得具有微纳叠层结构的 CNTs/2A12 铝基复合材料。一方面，保持了 CNTs 结构的完整性，可实现更高模量与强度的增强效率；另一方面，片状结构基元构筑的微纳叠层结构设计，可通过调控层内晶粒的位错存储与位错运动，赋予 CNTs/2A12 铝基复合材料高强度、高模量的良好匹配性能^[11]。

本文工艺采用先旋压后固溶时效的方式，旋压实验在直径为 $\Phi 334$ mm、长短轴比为 1.6 的椭球形芯模上开展，如图 1 所示。以现有航天箱底常用的多道次剪切-拉深复合旋压方法为实验工艺，坯料直径为 $\Phi 400$ mm、厚度为 6.5 mm。首先将板坯预热，随后快速安装于双旋轮旋压机上，采用火焰枪进行补热，并通过红外摄像监控温度。旋压工艺参数为：旋轮圆角半径为 10 mm，进给比为 $1.5\text{ mm} \cdot \text{r}^{-1}$ ，按照预设的剪旋+多道次恒攻角普旋轨迹进行旋压，具体的旋轮轨迹如图 2 所示。

使用激光三维扫描仪 AltairScan 对旋压件进行

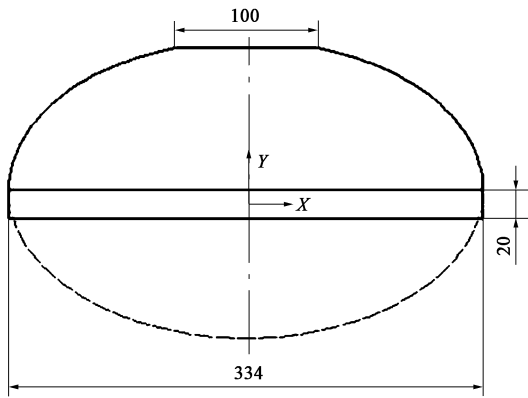


图 1 芯模外形尺寸

Fig. 1 Dimensions of mandrel contour

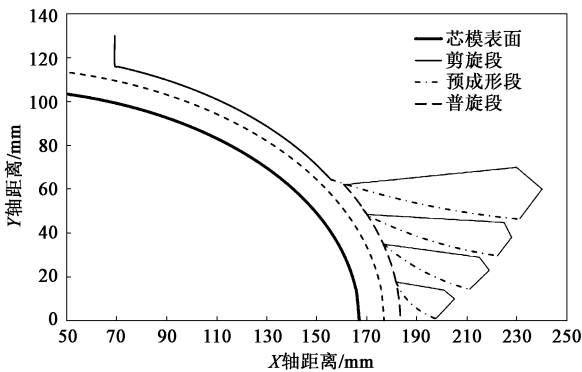


图 2 旋轮轨迹示意图

Fig. 2 Schematic diagram of roller trajectory

扫描，通过 Geomagic Qualify 软件逆向获得旋压件重构几何模型，评估旋压成形质量。

根据相关的热处理结果可以得到 2024 铝合金的最佳固溶参数为 $500\text{ }^{\circ}\text{C} \times 2\text{ h}$ ，最佳时效参数为 $180\text{ }^{\circ}\text{C} \times 10\text{ h}$ ^[12]。考虑到 CNTs 的存在会影响基体强化相的析出动力学，因此，本研究主要对时效制度进行研究，设计的固溶+人工时效热处理实验方案如表 1 所示。

表 1 热处理实验方案

Table 1 Test schemes for heat treatment

参数	固溶温度/ $^{\circ}\text{C}$	固溶时间/ h	时效温度/ $^{\circ}\text{C}$	时效时间/ h
数值	500	2	150、170、 190	每种时效温度分别 进行 4、8、12 h 保温

采用真空管式炉对 CNTs/2A12 铝基复合材料试样进行固溶处理，固溶温度设置为 $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，加热速率为 $10\text{ }^{\circ}\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$ ，保温时间为 2 h，并通过水冷将高温试样冷却至室温。提前将烘箱加热至指定温度，并将试样擦干后置于烘箱中保温至指定时长后取出进行

空冷。CNTs/2A12 铝基复合材料试样经过时效强化后，在 Zwick-100 万能材料试验机上进行时效态材料单向拉伸性能测试。

2 实验结果与讨论

2.1 CNTs/2A12 铝基复合材料的时效性能

人工时效后的 CNTs/2A12 铝基复合材料试样的拉伸性能如图 3 所示，所用单向拉伸试样的宽度为 5 mm，标距为 20 mm。从图 3 中可以看出：150 ℃ 时效的试样在抗拉强度上具有最好的表现，其次为 170 ℃，最后为 190 ℃；而伸长率的大致规律是随温度的增加而减小。在时效温度为 150 ℃ 时，时效

8 和 12 h 得到的试样的力学性能相比于热处理前均有较大提升，但是两者差距不大，抗拉强度提升约 38%，伸长率提升约 30%；相比之下，时效 4 h 能够更好地提升 CNTs/2A12 铝基复合材料的力学性能，抗拉强度能够提升 40%，伸长率的提升差距不大。在时效温度为 170 ℃ 时，3 种时效时间对力学性能的影响差距不大，抗拉强度提升约 29%，伸长率提升约 31%。在时效温度为 190 ℃ 时，时效 4 h 对试样抗拉强度的提升最大，能够达到 16%，伸长率提升 26%；时效 8 和 12 h 对抗拉强度的提升均不明显，均未达到 10%，但是使伸长率有较为明显的提升，时效 8 h 能使伸长率提高 32%，时效 12 h 能使伸长率提高 50%。

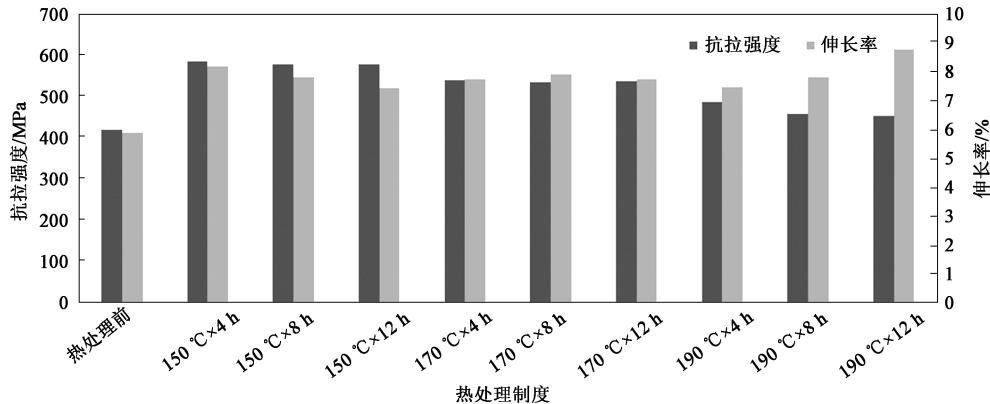


图 3 时效试样的力学性能
Fig. 3 Mechanical properties of aged specimens

通过上述实验可以得到，对于该 CNTs/2A12 铝基复合材料，比较合适的时效参数为 150 ℃×4 h，此参数下，抗拉强度和伸长率的综合性能在本次实验中最佳。

2.2 旋压件的宏观尺寸

旋压加工获得的 CNTs/2A12 铝基复合材料椭球形实验件如图 4 所示。在 250 ℃ 条件下，在剪旋加

工阶段旋压件发生开裂，而在 300 ℃ 条件下获得了合格的旋压件。这主要是由于在 250 ℃ 时热激活不够高，CNTs/2A12 铝基复合材料的动态回复不强烈，无法完全抵消加工硬化，这一温度下流动应力表现为以加工硬化为主，材料的塑性较低，旋压加工性能不高。

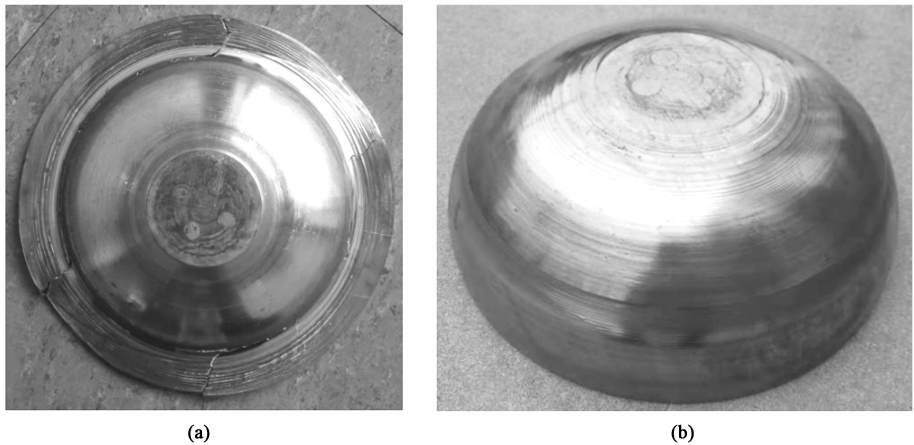


图 4 不同温度下获得的 CNTs/2A12 铝基复合材料旋压件
(a) 250 ℃ (b) 300 ℃

Fig. 4 Spun parts of CNTs/2A12 composites obtained at different temperatures

图5为350℃下成形的旋压件质量的评估结果。从图5a中可以看出,壁厚最小区域位于椭球件的腰部,即剪旋轨迹与普旋轨迹的交界处,壁厚最小值约为4.64 mm,旋压件顶部厚度为6.52 mm,与初

始CNTs/2A12铝基复合材料板坯的厚度(6.50 mm)大致相同。提取旋压件一条母线上的壁厚分布并与理论剪旋厚度对比,发现剪旋部分的壁厚变化规律基本遵循正弦规律(图5b)。

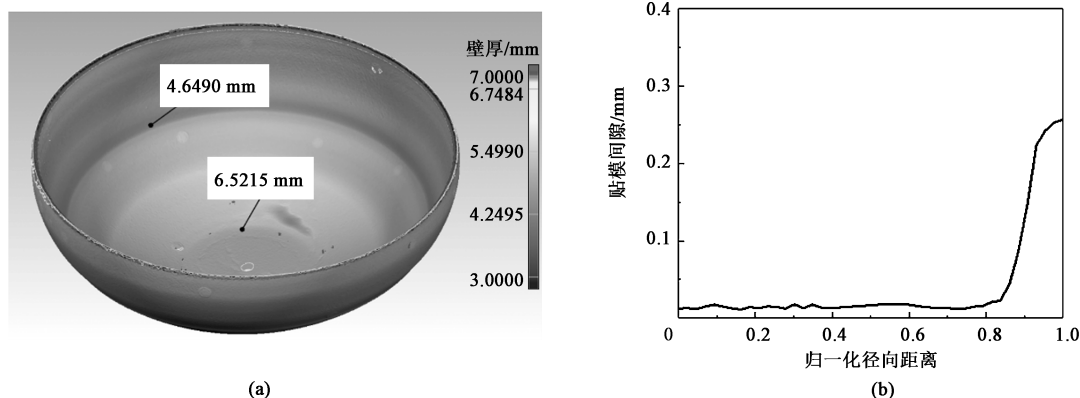


图5 旋压件成形质量评估

(a) 厚度分布 (b) 形状偏差

Fig. 5 Forming quality evaluation of spun part

(a) Thickness distribution (b) Shape deviation

选取靠近大端且垂直于轴向的截面来评估旋压件的圆度。在圆周上每隔30°测量一组内圆直径,得到的最大直径为 $\Phi 323.80$ mm、最小直径为 $\Phi 323.41$ mm,说明该椭球件在圆周方向上的成形精度较好。

通过对椭球件中心截面上内表面的母线与芯模形状进行对比来评估旋压件的贴模度。提取内表面与芯模距离从小端至大端沿轴向分布的数据,如图5b所示。可以看出:旋压件整体贴模精度较好,仅在端口处存在0.25 mm左右的回弹,说明该椭球件

具有高的形状精度。

2.3 旋压件力学的性能

利用上述研究得到的热处理制度对旋压件进行500℃×2 h(固溶)+150℃×4 h(时效)的热处理。由于椭球件剪旋部分的应变较大,为了研究热处理对变形后CNTs/2A12铝基复合材料拉伸性能的影响,同时考虑到各向异性对结果也可能产生的影响,因此,沿椭球件剪旋部分的母线方向和圆周方向进行取样,具体的取样方法如图6所示。

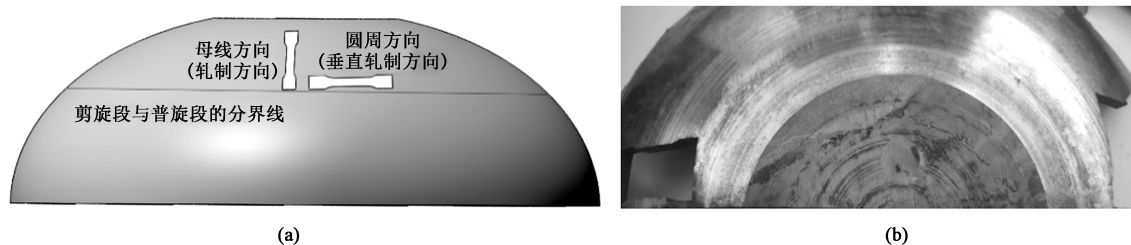


图6 旋压件时效性能实验

(a) 取样示意图 (b) 旋压实验件

Fig. 6 Aging property test of spun part

(a) Schematic diagram of sampling (b) Spinning test part

得到母线方向试样的抗拉强度为600 MPa,圆周方向试样的抗拉强度为580 MPa,现有2219铝合金时效后的抗拉强度为430 MPa,相对于现役运载火箭贮箱材料性能提升了35%。母线方向试样的抗拉强度和伸长率均较圆周方向试样略高,这说明

CNTs/2A12铝基复合材料存在一定的各向异性,沿轧制方向的力学性能好于垂直轧制方向,这与CNTs/2A12铝基复合材料的强化机制相关。CNTs/2A12铝基复合材料中,CNTs基本平行于轧制方向,并分布于基体晶粒之间,对轧制方向起到较大的强

化作用,而且单向排列 CNTs-Al 长条晶粒能够在提高强度的同时保持伸长率降低较少,相对而言,垂直于轧制方向的强化作用较弱。此外,母线方向(轧制方向)试样的性能与 2.1 节中热处理得到的 CNTs/2A12 铝基复合材料的力学性能相当,这说明该热处理制度能够用于强化 CNTs/2A12 铝基复合材料旋压件。

3 结论

(1) 针对所研究的 CNTs/2A12 铝基复合材料,比较合适的时效参数为 $150\text{ }^{\circ}\text{C}\times 4\text{ h}$,此参数下的抗拉强度和伸长率的综合性能达到最佳。

(2) 在 $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ 条件下采用多道次复合旋压工艺获得了 CNTs/2A12 铝基复合材料薄壁椭球构件,成形质量评估表明,该旋压件具有较高的旋压成形精度。

(3) 基于 $500\text{ }^{\circ}\text{C}\times 2\text{ h}$ (固溶) + $150\text{ }^{\circ}\text{C}\times 4\text{ h}$ (时效) 的热处理制度的试样的抗拉强度能够达到 580 MPa 以上,相较于现有 2219 铝合金材料强度提高了 35%,为该材料应用于贮箱制造提供了技术基础。

参考文献:

- [1] 赵天章,金龙,贾震,等. 2198 铝锂合金新淬火状态旋压成形研究 [J]. 塑性工程学报, 2020, 27 (6): 66-71.
Zhao T Z, Jin L, Jia Z, et al. Study on spinning forming of 2198 Al-Li alloy under new-quenched state [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2020, 27 (6): 66-71.
- [2] Kong Q S, Yu Z Q, Zhao Y X, et al. Theoretical prediction of flange wrinkling in first-pass conventional spinning of hemispherical part [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2017, 246: 56-68.
- [3] 张洪瑞,詹梅,郑泽邦,等. 航天大型薄壁回转曲面构件成形制造技术的发展与挑战 [J]. 机械工程学报, 2022, 58 (20): 166-185.
Zhang H R, Zhan M, Zheng Z B, et al. Development and challenge of forming manufacturing technologies for aerospace large-scale thin-wall axisymmetric curved-surface components [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2022, 58 (20): 166-185.
- [4] George R, Kashyap K T, Rahul R, et al. Strengthening in carbon nanotube/aluminium (CNT/Al) composites [J]. Scripta Materialia, 2005, 53 (10): 1159-1163.
- [5] Yu Z Y, Tan Z Q, Fan G L, et al. Effect of interfacial reaction on Young's modulus in CNT/Al nanocomposite: A quantitative analysis [J]. Materials Characterization, 2018, 137: 84-90.
- [6] Xu R, Tan Z Q, Fan G L, et al. Microstructure-based modeling on the structure-mechanical property relationship in CNT/Al composites [J]. International Journal of Plasticity, 2019, 120: 278-295.
- [7] 马凤仓,吕维洁,覃继宁. 锻造对 (TiB+TiC) 增强钛基复合材料组织和高温性能的影响 [J]. 稀有金属, 2006, 30 (2): 236-240.
Ma F C, Lyu W J, Tan J N. Effect of forging on microstructure and mechanical properties of (TiB+TiC)/Ti composite [J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2006, 30 (2): 236-240.
- [8] Deng C F, Zhang X X, Wang D Z, et al. Preparation and characterization of carbon nanotubes/aluminum matrix composites [J]. Materials Letters, 2007, 61 (8/9): 1725-1728.
- [9] 鞠晓菲. 原位自生 TiB_2 /7050 复合材料的超塑性行为及其变形机制 [D]. 上海: 上海交通大学, 2018.
Ju X F. Superplastic Behaviour and Mechanism of In-situ TiB_2 /7050 Composite [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2018.
- [10] Rastegari H A, Asgari S, Abbasi S M. Producing Ti-6Al-4V/TiC composite with good ductility by vacuum induction melting furnace and hot rolling process [J]. Materials & Design, 2011, 32 (10): 5010-5014.
- [11] 徐润. 碳纳米管增强铝基复合材料的微结构调控与强塑性研究 [D]. 上海: 上海交通大学, 2019.
Xu R. Investigation on the Microstructure Tailoring and Strength-ductility Behavior in Carbon Nanotube Reinforced Al Matrix Composites [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2019.
- [12] 张彦民. 2024 高强铝合金热处理工艺研究 [J]. 热加工工艺, 2020, 49 (24): 122-124.
Zhang Y M. Study on heat treatment process of 2024 high strength aluminum alloy [J]. Hot Working Technology, 2020, 49 (24): 122-124.

请关注更加新颖的公众号

www.qctester.com

