

DOI:10.16356/j.1005-2615.2025.03.017

## 电弧增材制造 304 不锈钢显微组织与断裂行为

陈超, 任柏桥, 傅彦, 高义皓, 隋昕晨, 陈运好, 赵小辉

(吉林大学材料科学与工程学院, 长春 130025)

**摘要:** 电弧增材构件柱状晶生长特征显著影响其力学性能, 但当前针对电弧增材构件断裂行为研究匮乏。为此, 本文以 304 不锈钢薄壁构件为研究对象, 分别对其沿沉积与扫描方向拉伸及断裂行为进行调查, 并结合光学显微镜 (Optical microscope, OM)、扫描电子显微镜 (Scanning electron microscope, SEM) 与电子背散射衍射 (Electron backscatter diffraction, EBSD) 对断口及其截面进行表征以揭示断裂机理。结果表明: 构件组织沿沉积方向呈明显柱状生长, 导致沉积方向强度低于扫描方向, 但断裂位置发生显著颈缩, 断口分布大量细小韧窝, 表现出更高的塑性行为。然而, 层内的粗大柱状晶成为断裂薄弱点区域, 在平行于柱状晶的拉伸应力下, 最终断裂在层内区域。相反, 扫描方向因柱状晶界抑制位错滑移而表现出高强度和低塑性。断口区域存在大量小角度晶界与应变, 表明位错的非均匀滑移引发应变集中和断裂。

**关键词:** 304 不锈钢; 电弧增材制造; 显微组织; 力学性能; 断裂行为

**中图分类号:** TG444 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-2615(2025)03-0557-05

## Microstructure and Fracture Behavior of 304 Stainless Steel Prepared by Wire Arc Additive Manufacturing

CHEN Chao, REN Boqiao, FU Yan, GAO Yihao, SUI Xinchen, CHEN Yunhao, ZHAO Xiaohui

(School of Materials Science and Engineering, Jilin University, Changchun 130025, China)

**Abstract:** The columnar grains growth characteristics of components prepared by wire arc additive manufacturing have significant effects on mechanical properties. However, current research on fracture behavior is insufficient. The tensile and fracture behaviors of 304 stainless steel thin-wall component along deposition and scanning directions are investigated, and optical microscope (OM), scanning electron microscope (SEM) and electron backscatter diffraction (EBSD) are used to characterize cross-section fractures, aiming at unraveling the fracture mechanism. The findings show that columnar grains grow along deposition direction, inducing a lower strength than that along scanning direction. But the obvious necking appears at fracture position, with numerous fine dimples distributed, signifying greater plastic behavior. However, the interlayer with coarser columnar grains also becomes the weak region, even fracture within the layer under tensile stress paralleling columnar boundaries. Conversely, scanning direction exhibits a higher strength with lower plasticity, attributed to dislocations suppressed by boundaries under vertical stresses. Additionally, numerous low angle grain boundaries and strain are detected in the fracture, indicating non-uniform dislocation slip and eventual fracture under strain concentration.

**Key words:** 304 stainless steel; wire arc additive manufacturing; microstructure; mechanical properties; fracture behavior

**基金项目:** 国家自然科学基金青年科学基金(52305362)。

**收稿日期:** 2024-11-26; **修订日期:** 2024-12-25

**通信作者:** 任柏桥, 男, 博士研究生, E-mail: rbq081677@163.com。

**引用格式:** 陈超, 任柏桥, 傅彦, 等. 电弧增材制造 304 不锈钢显微组织与断裂行为[J]. 南京航空航天大学学报(自然科学版), 2025, 57(3): 557-561. CHEN Chao, REN Boqiao, FU Yan, et al. Microstructure and fracture behavior of 304 stainless steel prepared by wire arc additive manufacturing[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics (Natural Science Edition), 2025, 57(3): 557-561.

得益于良好的焊接性、耐腐蚀性、耐磨性以及经济性等,304 不锈钢近年在航空航天领域上应用尤为突出,如发动机涡轮叶片、飞机蒙皮、燃料罐、火箭壳体、卫星壳体等<sup>[1-2]</sup>。但凭传统工艺难以达到大型复杂航天结构件成形需求。近年基于材料逐层堆积方式的 3D 打印技术为这一难题提供了新思路,这使 304 不锈钢增材制造成为一个研究热点。相较于激光与电子束为热源的增材制造技术,电弧增材制造以低成本、高效率以及环境适应性强等特点,在大型结构件制备中展现出显著优势<sup>[3-4]</sup>。尤其是冷金属过渡(Cold metal transfer, CMT)焊接技术的引入,可精准调控热输入,有效降低变形与飞溅<sup>[5]</sup>,进一步推动了电弧增材制造发展。沈阳工业大学的刘勇系统地调查了 304 不锈钢 CMT 电弧增材工艺对构件成形、组织及性能的影响<sup>[6]</sup>,并通过优化送丝速度、扫描速度等获得质量良好的构件。他们发现在扫描速度恒定下,送丝速度的增大会降低薄壁构件的强度与延伸率;在送丝速度恒定下,增大扫描速度可导致强度与塑性先下降后上升,相似的研究也被任香会、Kumar 等报道<sup>[7-8]</sup>。同时,叶杨藤<sup>[9]</sup>结合有限元方法优化了热输入,结果表明,随着基板距离的增加,抗拉强度与硬度减弱,延伸率增大。此外,控制层间温度、优化沉积路径也可有效改善构件的组织与性能。近年来,冶金调控、能量场辅助及增材后处理等技术的融合进一步提升了增材构件的可靠性<sup>[10-11]</sup>。尽管学者们在优化 304 电弧增材构件组织与性能方面取得大量成果,但对其断裂行为研究相对匮乏,特别是对于增材构件非均匀组织结构特点而言,调查构件的断裂行为,探究其断裂机理对于推进其在航空航天领域应用至关重要。为此,本文以 CMT 电弧增材 304 薄壁构件为研究对象,分别调查其沿沉积与扫描方向的拉伸行为,并结合光学显微镜(Optical microscope, OM)、扫描电子显微镜(Scanning electron microscope, SEM)和电子背散射衍射(Electron backscatter diffraction, EBSD)等表征手段深入剖析构件断裂行为,以期揭示断裂机理。

## 1 实验材料及方法

本实验采用尺寸为 200 mm×100 mm×10 mm 的 AISI 304 不锈钢作为基板,直径为 1.2 mm 304 丝材为沉积材料进行薄壁构件制备。基板与丝材成分如表 1 所示。

本实验中电弧增材制造系统主要由如图 1 所示 Kuka 机器人、Fronius 公司的 TPS 4000 冷金属

表 1 304 不锈钢基板与焊丝成分

Table 1 Chemical composition of 304 stainless steel substrate and wire %

成分	Cr	Ni	Mn	Si	C	S	Fe
基板	16.5~22.5	8~10	≤1.9	≤0.65	≤0.07	≤0.04	余量
焊丝	16.8~22.4	7~10	≤1.8	≤0.62	≤0.05	≤0.03	余量

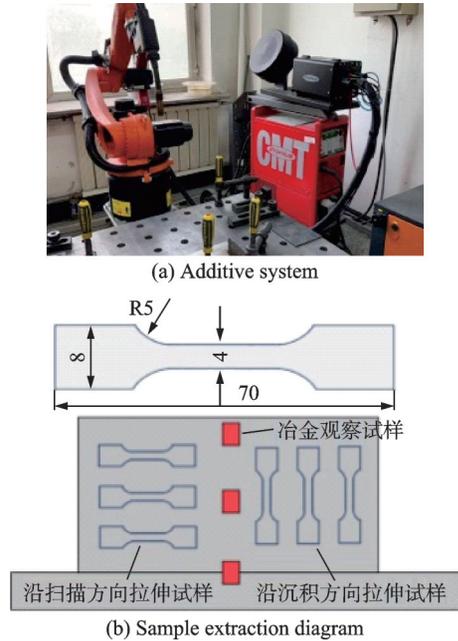


图 1 增材系统与取样示意图

Fig.1 Additive system and sample extraction diagram

过渡焊接电源等构成。在电弧增材前需对基板进行充分打磨以去除表面的油污杂质,进而提高增材构件的质量,同时根据表 2 所示的沉积参数来进行 304 薄壁构件的制备,在沉积过程中采用纯度为 99.99% 氩气进行保护。

表 2 沉积参数

Table 2 Depositing parameters

送丝速度/ ( $\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$ )	电流/ A	电压/ V	速度/ ( $\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$ )	气流量/ ( $\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$ )
6.5	192	18.1	3	15

为系统探究构件显微组织与力学性能,依据图 1(b)示意图对薄壁构件进行切割提取。如图分别沿沉积与扫描方向提取拉伸厚度为 2 mm 的拉伸试样,用于对比分析不同方向的断裂行为。采用 MTS 公司制造的万能拉伸试验机,在室温下以 2 mm/min 的速率进行拉伸测试。为了提升数据的准确性,每个方向至少取 5 个平行试样。测试后利用 SEM 对样品的断口进行观察。此外,为进一步揭示构件不同方向的断裂机制,在经历一系列磨抛后,将断口截面浸入王水溶液(盐酸:硝酸=3:1)中侵蚀 20 s,通过 OM 对断口侧截面进行观察。同时采用 EBSD 技术分析断口周围区域应力位错变化,

这为揭示构件断裂行为提供了进一步的理论支持。用于EBSD测试样品需在10%高氯酸酒精溶液中进行电解抛光,抛光电压、抛光时间分别为20 V与40 s。EBSD扫描测试步长为1 μm。

## 2 实验结果及讨论

### 2.1 显微组织分析

随增材高度增加,散热条件恶化,熔池热输入持续增大,导致不同沉积层经历差异化的热循环历史,进而显著影响显微组织演变。图2为304薄壁件沿沉积方向不同位置金相显微组织特征结果。图2(a)中沉积层间存在明显的熔合线,组织沿沉积方向呈明显方向性,以窄长树枝晶结构为主要特征,枝晶甚至跨越熔合线<sup>[12]</sup>。根据图2(b)所示,邻近基板的初始沉积层因高冷却速率与陡峭温度梯度,形成细小的垂直柱状晶与胞状晶,尺寸明显低于顶部与中部区域。尽管初始沉积层经历多次热循环,但对该区域晶粒尺寸变化不大。不同于构件的底部区域,中部区域柱状晶尺寸显著增大,同时在枝晶间形成二次枝晶。该现象在顶部区域更明显,枝晶间距也略有增大,但枝晶的长度减小。在多次热循环以及热积累下,中部区域与顶部区域热输入增大,使半凝固态熔池内枝晶具备充足的生长时间<sup>[13]</sup>,同时逐层堆积诱发更大的温度梯度,这也是促使枝晶生长的主要原因之一。

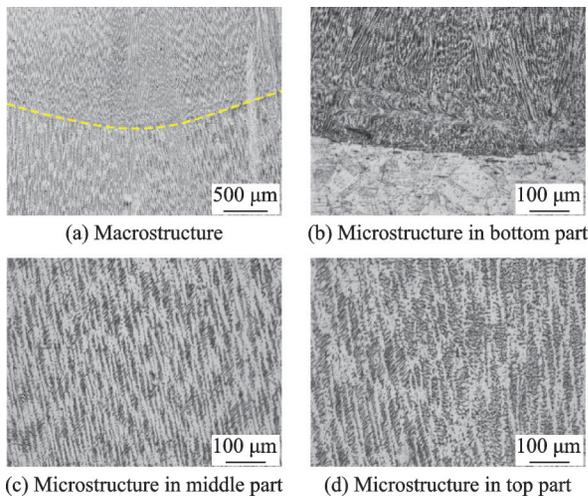


图2 304薄壁构件不同区域显微组织

Fig.2 Microstructures in different regions of 304 thin-walled component

图3为扫描电镜下的304电弧增材构件显微组织形貌。图3(a)所示304构件呈现黑白交替层状枝晶结构。通过能谱仪(Energy dispersive spectrometer, EDS)分别对黑白两相化学成分进行分析,其结果如图3(c,d)所示。图中表明腐蚀后枝

晶间富含C、Cr元素,而黑色基体中Ni元素含量略高。Cr作为δ-铁素体稳定元素,在凝固过程中优先偏聚于晶界,形成残留铁素体,同时与少量C元素结合形成Cr—C化合物;Ni作为奥氏体形成元素,促进基体奥氏体相的形成。而Mn与Si元素弥散分布在基体中,产生固溶强化的作用<sup>[14]</sup>。铁素体与奥氏体之间的转变主要依靠Cr、Ni原子之间的扩散。在熔池非平衡凝固过程中,高熔点Cr元素优先析出并富集于晶界,导致晶内贫Cr,这会促使后续凝固中Cr互扩散,造成奥氏体晶界向铁素体推移。但增材制造中多次热循环形成明显温度梯度,严重影响Cr与Ni的扩散行为,使得部分铁素体被保留。

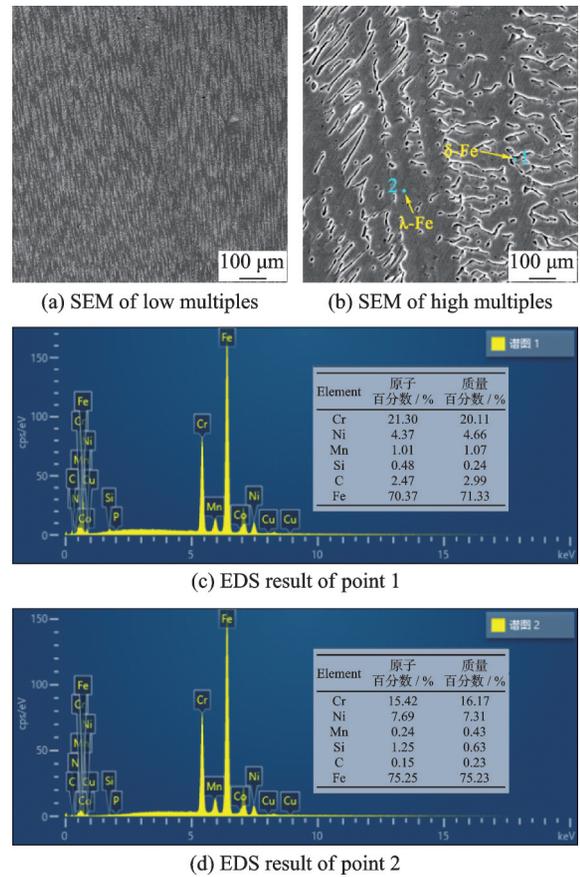


图3 304薄壁构件中部SEM与EDS结果

Fig.3 SEM and EDS results in middle region of 304 thin-walled component

### 2.2 拉伸性能分析

304电弧增材构件沿沉积方向与扫描方向的抗拉强度与伸长率结果如图4所示。结果显示,沿沉积方向拉伸强度显著低于扫描方向。扫描方向的抗拉强度达到了630.33 MPa,高于沉积方向37.51 MPa。相反地,沉积方向的伸长率却优于沉积方向。这主要归因于增材过程中多次热循环所致的组织各向异性。组织结果已经表明沿沉积方

向呈现明显的柱状晶特征,致使性能也出现不同程度各向异性。在图 5 所示沿沉积与扫描方向拉伸试样断口形貌中均发现大量等轴韧窝。结合伸长率结果可见,304 电弧增材构件主要以塑性断裂模式为主。但与沉积方向断口相比,扫描方向断口中出现一些台阶状的撕裂特征,并伴随部分未熔合夹渣区域,这是拉伸过程中裂纹扩展至熔合区夹渣所留痕迹。

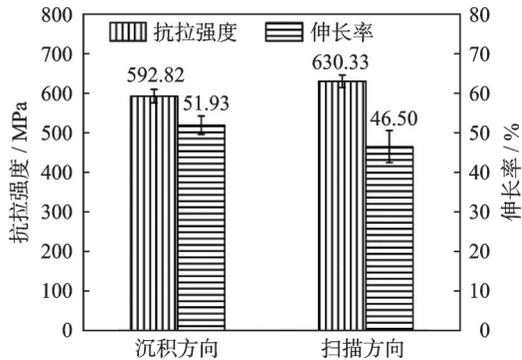


图 4 沉积与扫描方向抗拉强度与伸长率

Fig.4 Ultimate tensile strength and elongation of samples along deposition and scanning directions

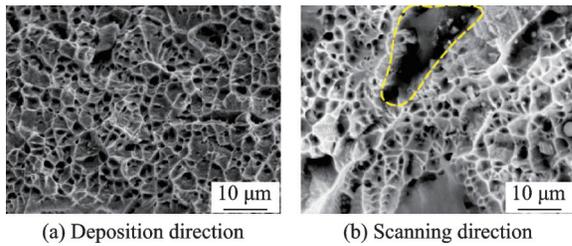


图 5 沉积与扫描方向断口形貌

Fig.5 Morphology of fractures along deposition and scanning directions

### 2.3 断裂行为分析

图 6 为沿两个方向拉伸后断口截面形貌,图中清晰发现每一沉积层间的熔合线。沿沉积方向拉伸试样主要断裂在层内区域,由图 6(a)表明,在断裂位置周围发生明显的颈缩现象。相比于沉积方向,沿扫描方向拉伸试样的断裂位置处塑性变形程度略低,这主要与组织形态差异相关。当拉伸方向与粗大柱状晶的生长方向一致时(即沿沉积方向拉伸),由于柱状晶长轴方向提供更大的滑移路径,位错更易沿柱状晶生长方向开动,最终导致更好的塑性<sup>[15]</sup>。伴随位错滑移,柱状晶同样也会成为裂纹萌生点,致使其强度低于扫描方向拉伸试样。值得关注的是,沿扫描方向拉伸断口中,裂纹扩展路径在熔合线处发生显著变化,呈现出复杂的 S 形。图 6(b)中的平行段内检测到大量柱状晶,同时由于拉伸方向垂直于柱状晶界,致使拉伸变形过程中位错

运动被柱状晶界抑制。在持续的应力加载下,晶界附近产生局部位错塞积,抑制裂纹扩展。另外,当裂纹扩展至熔合线处的细晶区时,在晶界强化下,裂纹发生偏转,直至应变达到足以穿过熔合线程度,裂纹继续沿柱状晶界进行扩展。

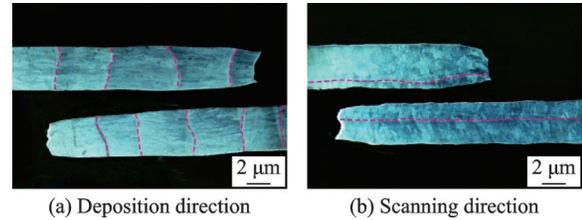


图 6 沉积与扫描方向断口截面形貌

Fig.6 Sectional morphology of fractures along deposition and scanning directions

从图 7(a)可知,构件内部的条状奥氏体发生强烈塑性变形,在拉应力作用下转变为更长的带状组织。同时,高密度的小角度晶界( $2^{\circ}\sim 15^{\circ}$ )在断裂位置处被检测到,这源于拉伸应变诱导的位错滑移。结合局部取向差角(Kernel average misorientation, KAM)图(图 7(b)),在断裂位置周围检测到大量的应变。通常情况下,细小的等轴晶之间更有利于位错滑移的协调,促进材料均匀塑性变形。但基于粗大的柱状晶结构,电弧增材构件内部发生不均匀的位错滑移,致使构件局部位置位错塞积,最终出现应力集中,产生断裂。这也是颈缩部位中产生较大应变的主要原因。

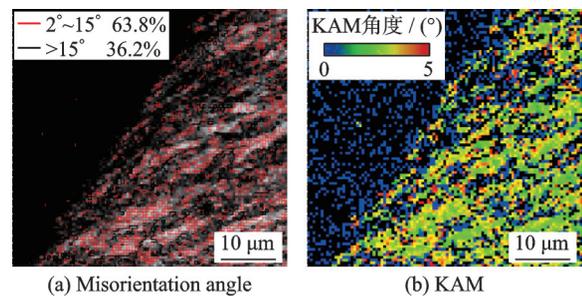


图 7 扫描方向断口截面错配角与 KAM

Fig.7 Misorientation angle and KAM maps of fracture section along scanning direction

## 3 结 论

(1) 沿沉积方向分布的柱状晶结构是 304 不锈钢电弧增材构件的主要组织特征,导致明显的组织各向异性。

(2) 由于组织显著方向性,构件沉积方向抗拉强度较扫描方向低 37.51 MPa,但伸长率相对高出 5.43%。

(3) 当拉伸应力平行于柱状晶生长方向时,样

品断裂在层内区域的柱状晶中,断口展现出明显的塑性变形。而应力施加方向垂直于柱状晶界时,位错滑移受晶界抑制,导致较高的抗拉强度与较低塑性。

#### 参考文献:

- [1] KUMAR A, SHARMA R, KUMAR S, et al. A review on machining performance of AISI 304 steel[J]. *Materials Today: Proceedings*, 2022, 56: 2945-2951.
- [2] 杨范轩, 孙玉利, 马杰, 等. 航空用不锈钢磨粒流光整加工表面完整性研究[J]. *南京航空航天大学学报*, 2023, 55(3): 452-460.
- YANG Fanxuan, SUN Yuli, MA Jie, et al. Study on surface integrity of aviation stainless steel in abrasive flow machining[J]. *Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics*, 2023, 55(3): 452-460.
- [3] LIN Z D, SONG K J, YU X H. A review on wire and arc additive manufacturing of titanium alloy[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2021, 70: 24-45.
- [4] HUANG L, CHEN X Z, KONOVALOV S, et al. A review of challenges for wire and arc additive manufacturing (WAAM)[J]. *Transactions of the Indian Institute of Metals*, 2023, 76(5): 1123-1139.
- [5] SELVI S, VISHVAKSENAN A, RAJASEKAR E. Cold metal transfer (CMT) technology—An overview [J]. *Defence Technology*, 2018, 14(1): 28-44.
- [6] 刘勇. CMT电弧熔丝增材制造304不锈钢组织和性能研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2018.
- LIU Yong. Research on the microstructure and mechanical properties of 304 stainless steel produced by CMT wire arc additive manufacturing[D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2018.
- [7] 任香会, 王磊磊, 董春林, 等. 304不锈钢冷金属过渡电弧增材制造组织及力学性能[J]. *焊接*, 2019(9): 44-48, 67.
- REN Xianghui, WANG Leilei, DONG Chunlin, et al. Microstructure and mechanical properties of cold metal transfer arc additive manufactured 304 stainless steel[J]. *Welding & Joining*, 2019(9): 44-48, 67.
- [8] KUMAR M S, YANG C H, ARAVINTHAN V, et al. Influence of low heat input by CMT powered WAAM on attaining the microstructural and mechanical homogeneity of printed 304 SS cylindrical component[J]. *Results in Engineering*, 2024, 21: 101846.
- [9] 叶杨藤. 基于CMT-WAAM技术的304不锈钢成形研究与数值模拟[D]. 温州: 温州大学, 2021.
- YE Yangteng. Research and numerical simulation of 304 stainless steel forming based on CMT-WAAM technology[D]. Wenzhou: Wenzhou University, 2021.
- [10] LIU J N, XU Y L, GE Y, et al. Wire and arc additive manufacturing of metal components: A review of recent research developments[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2020, 111(1): 149-198.
- [11] JAFARI D, VANEKER T H J, GIBSON I. Wire and arc additive manufacturing: Opportunities and challenges to control the quality and accuracy of manufactured parts[J]. *Materials & Design*, 2021, 202: 109471.
- [12] CHEN M T, GONG Z C, ZHANG T Y, et al. Mechanical behavior of austenitic stainless steels produced by wire arc additive manufacturing[J]. *Thin-Walled Structures*, 2024, 196: 111455.
- [13] JIN W W, ZHANG C Q, JIN S Y, et al. Wire arc additive manufacturing of stainless steels: A review[J]. *Applied Sciences*, 2020, 10(5): 1563.
- [14] 侯旭儒, 徐东安, 王艳杰, 等. 脉冲对电弧增材制造304不锈钢构件组织与性能的影响[J]. *焊接技术*, 2021, 50(8): 6-10, 105.
- HOU Xuru, XU Dongan, WANG Yanjie, et al. Effect of pulse on microstructure and properties of 304 stainless steel fabricated by wire arc additive manufacturing[J]. *Welding Technology*, 2021, 50(8): 6-10, 105.
- [15] FANG Q, SANZOZ F. Columnar grain-driven plasticity and cracking in nanotwinned FCC metals[J]. *Acta Materialia*, 2021, 212: 116925.

(编辑: 胥橙庭)