

汽车用孪生诱发塑性 (TWIP) 钢的研究进展

彭翔飞^{1*} 张广和²

1 中国兵器科学研究院宁波分院, 浙江宁波, 315103;

2 浙江锐泰悬挂系统科技有限公司, 浙江宁波, 315511;

摘要: 针对国内汽车领域对高性能 TWIP 钢的迫切需求, 通过对国内外近 5 年内发表的相关学术论文进行对比和分析, 总结出 TWIP 钢现阶段的制备、热处理和加工工艺等难点, 以及最新研究方向, 并从 TWIP 钢的制备工艺、微合金化、力学性能、工业化发展进行综述和展望, 为 TWIP 钢在汽车工业领域的发展和应用提供参考。

关键词: 变形孪生; 加工硬化; 力学性能; TWIP 钢

DOI: 10.69979/3029-2727.24.12.054

引言

近年来随着我国新能源汽车的高速发展, 汽车产业已成为国家重点支持方向。在新能源汽车电池能源未有跨越式发展的情况下, 汽车轻量化是提高新能源车续航里程的关键研究方向。零件结构优化、材料性能优化等是汽车轻量化的重要途径和手段, 从“减重”效果看, 铝合金材料替代传统汽车用钢是最直接有效的方式, 但铝合金材料的本征性能与钢相比依旧存在一些差距, 难以完全替代钢材料, 因而对钢轻量化的研究依旧是学术研究重点。钢的轻量化主要是通过提高钢的强韧性来持续优化结构, 即相同服役条件下可以使用结构轻量化的高性能钢来满足汽车零部件性能需要^[1,2]。

孪生诱发塑性 (Twinning Induced Plasticity, TWIP) 钢具有较高的强度、塑性和加工硬化能力, 相比于传统性汽车用钢的强塑积提高了 3 倍 (强塑积可达到 6 万 MPa%)、吸能提高了 2 倍 (吸能 20℃ 下可达 0.5J/mm³) 成为了汽车用钢的一种新型用钢和代表钢种^[3]。TWIP 钢最早由 Hadfield 发现, 属于高锰钢。按照成分分类角度来看, TWIP 钢可分为 Fe-Mn-C-(Al) 和 Fe-Mn-Si-Al 两类, 此两类均为奥氏体显微组织为主。TWIP 钢的高强塑性主要归结于具有较低的层错能, 使其在加工变形时晶粒内部萌生孪晶, 孪晶的出现会极大地提高了 TWIP 钢的加工硬化能力。TWIP 钢在国内工业化生产预研是由宝钢在 2007 年开始, 并在 2012 年成功试制出了冷轧钢。国内另一家钢厂鞍钢在 2017 年研制出了厚 3.5mm、强度达 1200MPa, 伸长率达 60% 以上等新一代 TWIP 钢。目前, TWIP 钢在汽车领域目前主要应用在安全结构件和底盘悬挂系统结构件等区域^[4]。

本文针对国内汽车领域对高性能 TWIP 钢的迫切需求, 通过对国内外近 5 年内发表的相关学术论文进行对

比和分析, 总结出 TWIP 钢现阶段的制备、热处理和加工工艺等难点, 以及最新研究方向, 并从 TWIP 钢的制备工艺、微合金化、力学性能、工业化发展进行综述和展望, 为 TWIP 钢在汽车工业领域的发展和应用提供参考。

1 TWIP 钢制备工艺研究

TWIP 钢性能的好坏主要取决于材料在形变过程中孪晶的形成情况, 即常说的 TWIP 效应。TWIP 钢制备工艺将直接影响奥氏体组织稳定性、层错能和其内部孪晶密度, 如调控热轧/冷轧工艺参数和退火工艺参数来优化材料性能, 因而对 TWIP 钢制备工艺的研究将极大推动 TWIP 钢的产业化发展。

上海大学材料科学与工程学院的王鹏等人^[5]通过控制变量法在 93.3% 的压下率条件下, 对 Fe-16Mn-4.1Al-0.4C TWIP 钢进行不同轧制温度的温轧研究, 发现随着轧制温度的升高, 在 650~850℃ 范围内, TWIP 钢晶粒由狭长状转变为等轴状, 且生成了退火孪晶, 如图 1 所示, 其屈服和抗拉强度总体呈下降趋势, 但伸长率上升。香港大学的胡晨等人^[6]通过对比不同温度轧制 TWIP 钢, 发现温轧状态下的组织具有异质结构特征, 即内部组织包含高密度的位错和孪晶, 温轧可使 TWIP 钢获得高屈服强度和高韧性。Li 等人^[7]采用不同还原率的温轧工艺加工了一种 TWIP 钢, 其发现位错密度高可能与间隙碳原子的存在有关, 位错强化主导流动应力, 占最大流动应力 (颈缩处) 的 50% 以上, 尽管位错起主导作用, 但预温轧制可能会增强孪晶硬化。除了温轧以外, 对于冷轧的研究华北理工大学黄玖龙等人^[8]通过深入探究高碳含量的 Fe-8Mn-1C TWIP 钢的冷轧性能, 以冷轧压下量和退火温度为变量, 研究发现随着下压量的增加, TWIP

钢的强度显著提高,但塑性明显降低,并且在拉伸过程中产生了动态应变时效现象。西安工程大学的艾根根^[9]和成都大学的葛美伶^[10]等人分别采用不同热处理工艺对 TWIP 钢进行了深入研究,发现 TWIP 钢的耐腐蚀性能

随着退火温度的升高而变高,而 TWIP 钢的强塑积则在 850℃ 最高,此情况的出现主要是由于存在孪晶-位错交互作用。

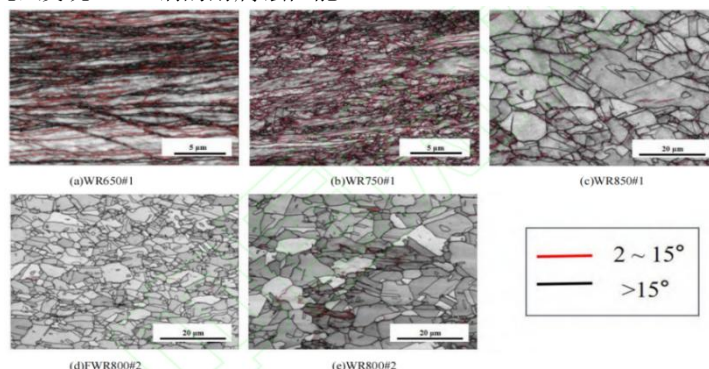


图 1 温轧 TWIP 钢晶界^[5]

2 TWIP 钢微合金化研究

通过优化 TWIP 钢成分来提升其综合性能是一个比较常规的方法,目前 TWIP 钢微合金化研究是该领域的重点,主要通过添加 Nb、V、Cr、Si、N、Cu、Ti 等微合金元素利用析出的第二相来改善其组织结构和力学性能。

Nb 元素是汽车用钢中比较典型的微合金化元素,其可以显著改善钢的力学性能和加工性能。周景一等人^[11]通过总结近年来国内外 Nb 微合金化汽车用 TWIP 钢的发展情况,发现 Nb 微合金化后的 TWIP 显微组织内存在弥散分布的 Nb (C, N) 化合物,其碳氮化合物物会起到弥散强化的作用,显著提高 TWIP 钢的综合性能. Nb 元素的添加会使 TWIP 钢在高温作用下析出的碳氮化物,其氢陷阱结合能在 65kJ/mol 左右,可推测为不可逆氢陷阱,从而增加了 TWIP 钢中不可逆氢陷阱的数量。不可逆氢陷阱的数量增加又在一定程度上对氢元素具有限制作用,抑制氢的扩散,降低 TWIP 钢的延迟断裂敏感性。

北京科技大学的张应超博士^[12]在温轧制备工艺基础上进行了含 V 微合金化 TWIP 钢的组织与性能研究,研究发现 TWIP 钢的超高屈服强度的出现主要归结于组织中出现了高密度的纳米 VC 析出物,纳米级析出相的出现从本征角度极大提高了材料的综合力学性能。中国科学院合肥物质科学研究院的司永礼等人^[13]通过对 Cr 微合金化的 TWIP 钢进行电化学测试,发现 Cr 含量逐渐增加对使 TWIP 钢的腐蚀电位不断提高,而腐蚀电流密度则不断降低,这种情况的出现是由于钝化膜体系中增加了 Cr₂O₃ 和 Cr(OH)₃ 两种钝化膜,并且在 Cr 含量增加时, Cr₂O₃ 和 Cr(OH)₃ 两种更耐腐蚀钝化膜会逐步替代 Fe 氧化物和 Mn 氧化物。Barbier 等人^[14]通过对 TWIP 钢分别添加 5%Cr 和 10%Cr 来分析 TWIP 钢力学性能的差异性,采用拉伸实验和显微组织表征的方法发现,层错能随铬含量的增加而减小,并影响塑性变形过程中产生的机械孪晶百分比,从而影响应变硬化速率,其拉伸组织如图 2 所示。

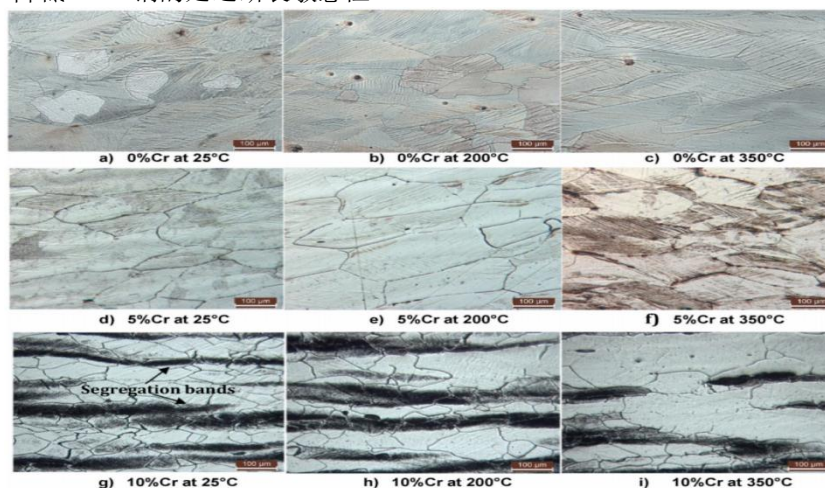


图 2 不同 Cr%含量的 TWIP 钢拉伸试样组织图^[14]

曾泽瑶等人^[15]通过对 Si 微合金化的高 Mn-N TWIP 钢进行不同热处理温度下的对比分析,发现 Si 元素的添加可以提高合金的应变硬化率。华北理工大学齐程伟等人^[16]开展了铜合金化对 TWIP 钢低温性能的影响,以不同 Cu 含量微合金化 TWIP 钢,Cu 元素会显著细化对 TWIP 钢的晶粒组织,且晶界取向差相比于未添加 Cu 元素的 TWIP 钢呈现更加均匀的状态。Cu 元素对 TWIP 钢的冲击韧性的提高也起到了作用,冲击功随着 Cu 含量的提升而逐渐增大,主要是由于 Cu 微合金化增高了低温下的层错能,提高了固溶强化的作用。大连交通大学的吴之栋^[17]对 TWIP 钢进行 N 微合金化的耐点蚀性能研究,其通过等离子渗氮技术对 TWIP 钢进行了渗氮,再经过极化曲线等方法探究了其渗氮改性层,研究发现渗氮层为均匀致密无氮化物层,硬度可达 1498 HV,渗氮层所形成的钝化膜具有较低的载流子浓度,这主要归结于氢氧化物占据了主导地位,从而使 TWIP 钢呈现较好的抗点蚀性能。马莹^[18]对 TWIP 钢进行了微合金化数值模拟研究,通过在传统 TWIP 钢模型基础上输入不同微合金化材料参数,验证了不同元素对 TWIP 钢的力学性能影响规律。

3 TWIP 钢力学性能研究

TWIP 钢的力学性能主要有高强度、高塑性、优异的加工硬化能力、良好的冲击韧性、低疲劳裂纹扩散速率和高应变率敏感性。TWIP 效应是孪生诱发塑性钢力学性能的主要体现,即晶粒内部在形变过程中出现孪晶,而孪晶的出现会反过来阻碍位错的滑移运动,延缓了 TWIP 钢缩颈断裂,从而使 TWIP 钢呈现出了高强度和高塑性。图 3 为 TWIP 钢力学性能对比图。

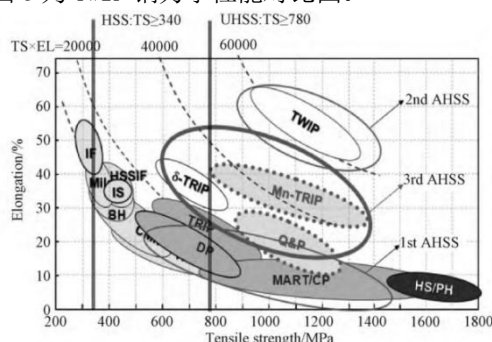


图 3 TWIP 钢力学性能对比图^[19]

汽车的使用环境多,在严寒地区的使用是考验汽车性能的关键,而汽车各零部件材料的低温性能更是研究的重点。北京科技大学的李雷雷博士^[20]对 Fe-Mn-Al-C

系高锰钢进行极低温度下的力学性能研究,低温时 TWIP 钢强度提高而塑性降低,在低温时位错、层错和孪生是其在低温下具有高的加工硬化率。Harsha 等人^[21]对 TWIP 钢的硬化行为和力学性能进行了综述探讨分析,通过在淬火和时效过程中对 TWIP 钢进行合金化,沉淀硬化是其强化重要原因,但是过长的时效时间将导致析出化合物变粗,从而使材料的强度降低。Huang 等人^[22]对 TWIP 钢进行了压缩-拉伸形变强化机理研究,研究发现压缩程度大时将显著提高 TWIP 钢的强度,且延伸率却不会降低,这种情况也就是预应变钢中很少实现的强度-延性协同作用。在高的应变情况下, TWIP 钢内部的位错滑移路径会呈现复杂化,这主要是由于显微组织中的高密度位错和纳米孪晶等微观结构的存在,从而使材料出现强度和塑性平衡。中科院金属所的韩婧等人^[23]以晶粒尺寸角度研究了第三代 TWIP 钢的低周疲劳性能,发现在低应变幅度下,大晶粒尺寸呈现差低周疲劳性能,小晶粒尺寸呈现较好的低周疲劳性能,而高应变幅度下情况却恰恰相反,出现这种情况的原因主要为不同应变幅下,材料的疲劳主导机制不同,低应变幅由应力损伤主导,高应变幅由应变损伤主导。

总结而言, TWIP 钢在变形过程中应变路径的变化会重新激活了新的变形孪晶,从而生成新界面,且改变晶体取向。孪晶的增多会提高材料的位错储存能力,从而使 TWIP 在拉伸断裂时缩颈会延缓。晶粒细化会使 TWIP 钢内部位错在滑移时相互作用并形成位错网格,从而提升变形硬化的能力。

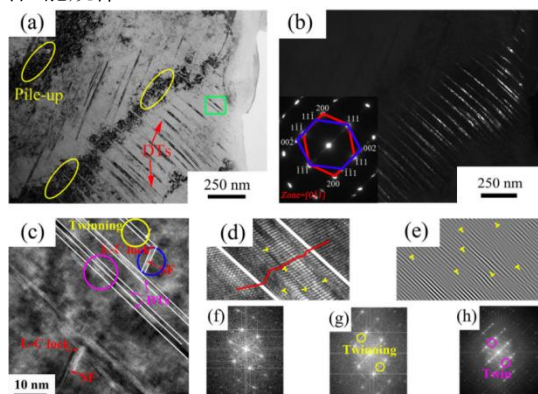
4 TWIP 钢工业化发展

TWIP 钢就目前应用和发展情况来看,主要应用于汽车领域的结构件,通过冲压等方式获得各种类型零件。而针对其他产业领域, TWIP 的应用推广暂时存在限制,如成本高、焊接性能差、难制备复杂结构件等。

焊接性能差成为产品组装或结合的关键点,近年来国内已针对 TWIP 钢的焊接进行了激光焊接、气体钨弧焊、电阻焊和搅拌摩擦焊等。传统焊接方法在焊接 TWIP 钢时会在熔融处生成脆性碳化物,从而造成了焊接接头显著低于 TWIP 钢基体性能,但搅拌摩擦焊的使用可能会解决这一问题,因而搅拌摩擦焊为低热输入固态焊接技术,可以避免焊接时出现碳化物沉淀和元素挥发。Qiao 等人^[24]针对 TWIP 钢进行了搅拌摩擦焊对组织和变形行为研究,验证了 TWIP 钢搅拌摩擦焊的可焊性,并

发现搅拌区的再结晶比例显著高于基体材料,而退火孪晶显著低于基体材料,同时焊接接头的强度和延伸率均高于基体 TWIP 钢,这种微观组织变化的出现会显著提高焊接接头处堆垛层错能和孪晶临界应力,从而提高焊接接头处的形变硬化能力,如图 4 所示为其 TEM 图。

为了符合轻量化发展方向和提高 TWIP 钢的应用竞争力, TWIP 钢也往低密度方向研究, Bai 等人^[25]综述了 Fe-MnC-Al 系钢的低密度发展, 重点讨论了其成分设计、制备工艺、强化机理、微观组织和综合性能, 并给出了展望, 认为冶炼深度净化是解决 Mn、Al 富集的关键手段, 制备工艺方向上建议可以开发粉末冶金等方法来制备高性能 TWIP 钢, 研究方向上应用更多模拟手段来探索其性能规律。

图 4 搅拌摩擦焊 TWIP 的 TEM 图^[24]

汽车、轨道交通、航空等领域均需要复杂结构的部件,而目前的 TWIP 钢主要是采用轧制工艺获得的,难以通过冷加工手段制备复杂结构零部件,因而结合现阶段较火热、较先进的增材制造技术,可以扩展 TWIP 钢的应用方向。中国科学技术大学的陈幼筠博士^[26]使用激光粉末床熔融成功制备了 TWIP 钢,并研究了其组织和力学性能,发现其密度为 7.33g/cm³,晶粒尺寸约为 5.4 μm,显微组织具有高密度位错、超细晶粒和纳米级氧化物颗粒,屈服强度约为 544MPa,断裂强度约为 837MPa,延伸率约为 41.5%。

5 总结

TWIP 钢作为一种具有优异强塑性结合能力的汽车用高强钢,使其在汽车轻量化、安全性能提升等领域潜力巨大。在材料优化和工业化发展方向上,TWIP 钢依旧还需围绕性能优化、成本调控和多领域应用展开,未来主要在如下几个方面深入探讨和研究:

5.1 成分和组织优化

1) 合金成分优化设计, 通过调控 Mn 元素含量来降低成本和冶炼难度, 并结合微合金化性能调节, 开发出新型低锰 TWIP 钢。2) 热机械控制工艺, 通过探究轧制工艺方法, 细化 TWIP 钢原始晶粒, 进而调控孪晶密度, 提高 TWIP 钢整体性能。3) 耐腐蚀性能研究, 针对典型环境腐蚀条件, 开展 TWIP 钢耐腐蚀研究, 通过添加抗腐蚀元素或表面处理来解决。

5.2 生产工艺改进

1) 进一步探索 TWIP 钢粉末的激光选区熔化 (Selective Laser Melting, SLM) 技术研究, 使 TWIP 钢可广泛应用于复杂、精密结构件的制造。2) TWIP 钢焊接技术研究, TWIP 钢焊接时易出现热影响区软化等问题, 需进一步开展搅拌摩擦焊等低热输入工艺研究。

5.3 应用领域拓展

1) 轨道交通领域, 如高铁车厢结构件等。2) 航空航天领域, 如飞机起落架部件等。3) 新能源领域, 用于电池包壳体或氢燃料储罐, 满足高强度与密封性需求。4) 可持续性与循环经济领域, 采用电炉短流程炼钢, 降低碳排放, 同时建立高锰钢专用回收体系或开发成分分离技术。

参考文献

- [1]王坤, 王邦林, 廖兴利, 等. 表面喷丸及退火处理对Fe-30Mn-3Al-3Si TWIP钢组织与性能的影响[J]. 材料保护, 2024, 57(5): 61-67.
- [2]Sohrabi M J, Mirzadeh H, Sadeghpour S, et al. Interplay between temperature-dependent strengthening mechanisms and mechanical stability in high-performance austenitic stainless steels[J]. International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials, 2024, 31(10): 2182-2188.
- [3]Wang D, Huang L, Wang K, et al. Microstructure and mechanical properties of a novel twinning induced plasticity steel with two different grain morphologies[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2023, 24: 3746-3758.
- [4]汤迁. 车身TWIP钢在冲击载荷下的动力学行为与本构建模[D]. 中南林业科技大学, 2023.
- [5]王鹏, 王华. 温轧Fe-16Mn-4.1Al-0.4C TWIP钢的显微组织与力学性能[J]. 上海金属, 2024.

- [6] 胡晨, 潘帅, 黄明欣. 高强高韧异质结构温轧 TWIP 钢[J]. 金属学报, 2022, 58(11): 1519-1526.
- [7] Li Y Z, Liang Z Y, Huang M X. Strengthening contributions of dislocations and twins in warm-rolled TWIP steels[J]. International Journal of Plasticity, 2022, 150: 103198.
- [8] 黄玖龙, 孙威杰, 张岩, et al. 轧制退火工艺对高碳含量孪晶诱发塑性钢拉伸变形行为的影响[J]. 塑性工程学报, 2024, 31(5): 64-70.
- [9] 艾根根, 姜凤阳, 思芳, et al. 退火工艺对高锰 TWIP 钢组织及耐蚀性能的影响[J]. 金属热处理, 2024, 49(7): 313-321.
- [10] 葛美伶. 热处理工艺对 Fe-0.52C-11Mn-5.14Al-1Cr 轻质钢组织与性能影响的研究[D]. 成都大学, 2024.
- [11] 周景一, 朱立光, 孙立根, et al. Nb 微合金化汽车用 TWIP 钢的研究进展[J]. 中国冶金, 2022, 32(03): 9-16, 33.
- [12] 张应超. 含 V 温轧 8Mn 中锰钢的组织性能调控及增强增塑机制研究[D]. 北京科技大学, 2024.
- [13] 司永礼, 薛金涛, 王幸福, 等. Cr 添加对孪生诱发塑性钢腐蚀行为的影响[J]. 金属学报, 2023, 59(07): 905-914.
- [14] De Barbieri F, Jorge-Badiola D, Allende R, et al. Effect of Cr content in temperature-dependent mechanical properties and strain hardening of a twinning-induced plasticity steel[J]. Materials Science and Engineering: A, 2024, 889: 145865.
- [15] 曾泽瑶, 罗许. Si 添加对高 Mn-N 型 TWIP 不锈钢力学性能的影响研究[J]. 钢铁钒钛, 2024, 45(04): 170-175.
- [16] 齐程伟, 董福涛, 张文文, 等. 铜合金化对 Fe-18Mn-0.6C TWIP 钢低温韧性的影响[J]. 钢铁, 2024, 59(05): 145-152.
- [17] 吴之栋. 渗氮 Fe27Mn3Al7Cr0.5C 奥氏体 TWIP 钢抗点蚀性研究[D]. 大连交通大学, 2024.
- [18] 马莹. 微合金化对 TWIP 钢的力学性能影响的数值模拟研究[J]. 装备维修技术, 2024(05): 91-93.
- [19] 李枝梅, 代永娟. 汽车用 TWIP 钢性能的研究进展[J]. 材料热处理学报, 2019, 40(02): 1-7.
- [20] 李雷雷. Fe-Mn-Al-C 系高锰钢极低温度力学性能与变形机制研究[D]. 北京科技大学, 2024.
- [21] Harsha B P, Patnaik A, Banerjee M K, et al. Hardening behaviour, mechanical properties and wear evaluation of TRIP/TWIP manganese steels: A comprehensive review[J]. Materials Today: Proceedings, 2023.
- [22] Huang Z, Luo S, Wang G, et al. Mechanistic exploration of high strain-hardening and TWIP effects in Fe-15.5 Mn-0.6 C-1.4 Al steel under compression-tensile loading[J]. International Journal of Plasticity, 2025, 188: 104292.
- [23] 韩婧, 邵琛玮, 邱子浩, et al. 晶粒尺寸对 Fe-Mn-Al-C 系第三代 TWIP 钢低周疲劳性能的影响[J]. 金属学报, 2024, eisciscsd.
- [24] Qiao K, Wang K, Wang J, et al. Microstructural evolution and deformation behavior of friction stir welded twin-induced plasticity steel[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2024, 169: 68-81.
- [25] Bai S, Chen Y, Liu X, et al. Research status and development prospect of Fe-Mn-C-Al system low-density steels[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2023, 25: 1537-1559.
- [26] 陈幼筠. 激光粉末床熔融成形 TWIP 钢组织调控与力学性能研究[D]. 中国科学技术大学, 2024.
- 基金项目: 宁波市科技创新 2025 重大专项(2022Z048)