DOI：10.16410/j.issn1000-8365.2025.4161

Ti575 合金动态力学性能和绝热剪切行为研究

王怡蕾，唐　斌，戴锦华，王慧琴，王　毅，李金山
（西北工业大学 凝固技术国家重点实验室，陕西 西安 710072）

摘　要：基于兵器领域对轻质抗冲击材料的现实需求，以具备高强度–塑性–冲击韧性匹配的 Ti575 合金为研究对象，通过热处理在 Ti575 合金中调控出三态组织和魏氏组织，并利用霍普金森压杆技术在 3 500 s^{-1} 应变速率下开展动态力学性能测试，结合扫描电子显微镜对微观组织演化进行分析，揭示 Ti575 合金在高应变速率下的变形行为和响应机制，从而为后续研究提供指导意义。研究结果表明，Ti575 合金不同组织状态下的高应变速率变形行为均分为弹性阶段、应变硬化阶段、稳定软化阶段和不稳定软化阶段 4 个阶段。动态压缩结果表明，三态组织冲击吸收功高于魏氏组织（三态组织：228 J/cm^3；魏氏组织：200 J/cm^3），呈现出优于魏氏组织的动态力学性能。此外，经高应变速率变形后，两种组织均呈现绝热剪切失效特征。三态组织较魏氏组织而言，绝热剪切带数量少、宽度大，表明三态组织具有低于魏氏组织的绝热剪切敏感性，而三态组织较低的绝热剪切敏感性是其动态力学性能优于魏氏组织的主要原因。进一步断裂机制研究表明，不同组织 Ti575 合金经高应变速率变形后的断口形貌均由韧窝区和平滑区组成，高倍 SEM 观察表明两种组织均以韧性断裂机制为主，同时存在典型的剪切断裂特征。

关键词：Ti575 钛合金；三态组织；魏氏组织；动态力学性能；绝热剪切；韧性断裂

中图分类号：TG146.2; TG113　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1000-8365(2025)02-0110-10

Dynamic Mechanical Properties and Adiabatic Shear Behavior of Ti575 Alloys

WANG Yilei, TANG Bin, DAI Jinhua, WANG Huiqin, WANG Yi, LI Jinshan
(State Key Laboratory of Solidification Processing, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: On the basis of the realistic demand for lightweight impact-resistant materials in weaponry, a Ti575 alloy, which possesses high strength-plasticity-impact toughness matching, was taken as the object of this research. Ti575 alloys with trimodal and widmanstätten microstructures were prepared through heat treatment, and dynamic mechanical property tests were carried out at a strain rate of 3 500 s^{-1} via the Hopkinson pressure bar technique combined with microstructural evolution analysis by scanning electron microscopy observations. This study aims to reveal the deformation behavior and response mechanisms of Ti575 alloys through these tests, thereby providing guidance for subsequent research. The results indicate that the high strain rate deformation behavior of the Ti575 alloy with these two different microstructures can be divided into four stages: the elastic stage, strain hardening stage, stable softening stage, and unstable softening stage. The results of the dynamic compression tests reveal that the trimodal microstructure results in greater impact absorption energy than does the widmanstätten microstructure (trimodal microstructure: 228 J/cm^3; widmanstätten microstructure: 200 J/cm^3), demonstrating better dynamic mechanical properties of the trimodal structure than that of the widmanstätten microstructure. Additionally, both microstructures display characteristics of adiabatic shear failure during high strain rate deformation. The characteristics of fewer and wider adiabatic shear bands in the trimodal microstructure suggest that it has lower sensitivity to adiabatic shear than the widmanstätten microstructure does, resulting in superior dynamic mechanical properties in the trimodal microstructure relative to the widmanstätten microstructure. Subsequent studies on the fracture mechanisms show that the fracture surfaces of the two microstructures of Ti575 alloys deformed at high strain rates consist of ductile dimple regions and smooth areas. Moreover, high-magnification SEM observations indicate that both microstructures primarily demonstrate ductile fracture characteristics, along with typical signs of shear fracture.

Key words: Ti575 titanium alloy; trimodal microstructure; widmanstätten microstructure; dynamic mechanical properties; adiabitic shear; ductile fracture

收稿日期：2024-08-27

基金项目：国家重点研发计划(2021YFB3702603)

作者简介：王怡蕾，2000 年生，硕士生. 研究方向为钛合金动态力学性能研究. Email: wyl1126@mail.nwpu.edu.cn

通讯作者：唐　斌，1984 年生，博士，教授. 研究方向为先进金属结构材料及其成型技术. Email: toby@nwpu.edu.cn

引用格式：王怡蕾，唐斌，戴锦华，王慧琴，王毅，李金山. Ti575 合金动态力学性能和绝热剪切行为研究[J]. 铸造技术，2025，46(2)：110-119.

WANG Y L, TANG B, DAI J H, WANG H Q, WANG Y, LI J S. Dynamic mechanical properties and adiabatic shear behavior of Ti575 alloys[J]. Foundry Technology,2025, 46(2): 110-119.

中国知网　https://www.cnki.net

为响应现代战场对武器装备快速部署、快速运输等快速机动性能的要求,具有低密度、高比强度等性能特点的钛合金被广泛应用于坦克装甲、防雷披挂、火炮身管等武器装备中[1-5]。然而,上述武器装备在服役过程中经常面临高温、高压、高速气流冲击,即面临高应变速率冲击载荷[6-7]。材料在高应变速率承载时往往呈现出不等同于静态条件下的变形行为和力学性能,严重时甚至引起灾难性的人员伤亡和经济损失[8-9]。因此,考虑实际应用场景下的服役环境,开展钛合金在高应变速率下的动态力学性能实验具有重要意义。

目前,基于霍普金森杆技术,已有大量针对钛合金高应变速率力学性能和变形行为的研究,部分合金的性能研究结果如表 1 所示[10-16]。可见,合金类型、应变速率、组织类型等因素均显著影响材料的动态力学性能。并且,组织类型作为动态力学性能的重要影响因素之一,在不同体系合金中表现出不同程度的影响,甚至呈现出完全相反的规律。例如,应变率一致的情况下,Ning 等[10]发现 Ti6321 合金等轴组织冲击吸收功高于双态组织;而 Chen 等[17]和 Ran 等[18]在其他类型钛合金中得出的结论为双态组织冲击吸收功高于等轴组织。也就是说,组织类型和合金成分共同决定了材料的动态力学性能。因此,具体合金需进行具体分析,新型合金的动态力学性能则需要更全面的探索。

此外,就高应变速率条件下材料的变形行为而言,Shahan 等[19]指出,钛合金导热系数低,是绝热剪切敏感材料。所谓绝热剪切,是由材料应变硬化、应变率硬化与热软化间的竞争作用所导致的一种热塑性失稳现象[20],是高应变速率变形的常见特征,常伴随剪切局域化特征,会导致绝热剪切带的形成。绝热剪切带则被认为是材料失效的前兆[21-22],与材料的动态力学性能息息相关。因此,许多学者针对钛合金高应变速率变形中的绝热剪切行为进行研究,并得出显微组织影响合金绝热剪切行为的结论[23-24]。例如,Wang 等[25]通过对 TC4 合金不同组织中绝热剪切带长度、宽度进行测量和统计发现,层状组织绝热剪切带宽度和长度均明显低于等轴组织,进一步结合剪切带耗散能计算结果得出,在相同应变速率下,片层组织具有相较于等轴组织更高的绝热剪切敏感性。Arab 等[26]也得出相同结论。Zheng 等[27]则采用加载时间、临界应变、局域化能等参数定性分析了双态组织细节对 TC4 合金绝热剪切行为的影响,指出转变 β 基体中 α 片层较厚的双态组织具有较低的绝热剪切敏感性。除此之外,Chen 等[17]通过热处理对 Ti6321 合金进行组织调控,得到双态组织、等轴组织和魏氏组织这 3 种典型组织,进而开展动态力学性能测试,并指出双态组织具有明显低于等轴组织和魏氏组织的绝热剪切敏感性以及显著优于等轴组织和魏氏组织的抗冲击性能。由此可见,相同应变率下,同一合金的不同组织由于绝热剪切敏感性的不同呈现出不同程度的绝热剪切行为,较高的绝热剪切敏感性会导致较早的失效和较低的冲击吸收功。综上所述,绝热剪切行为与材料变形行为和失效过程息息相关。因此,有必要开展有关不同组织钛合金绝热剪切行为的研究,以明确不同组织在高应变速率下的响应机制,进而寻求组织和动态力学性能的最优匹配。

Ti-5Al-7.5V-0.5Si-0.25Fe-0.2O 合金(Ti575)是 TIMET 公司基于 Ti-6Al-4V 合金(Ti64)研发的一种

表 1 不同类型钛合金的动态力学性能[10–16]

Tab.1 Dynamic mechanical properties of various titanium alloys[10–16]

Titanium alloys	Type of microstructure	Strain rate/s^{-1}	Flow stress, σ_s/MPa	Maximum plastic strain, ε_{up}/%	Impact absorption energy, E_A/(J·cm^{-3})
Ti6321[10-11]	Equiaxed microstructure	1 500	1 348	0.13	158
		2 500	1 418	0.22	299
		3 000	1 383	0.252	307
		3 500	1 478	0.30	422
	Bimodal microstructure	3 000	1 395	-	300
	Lamellar microstructure	3 000	1 297	-	283
TB8[12]	-	2 400	1 380	0.13	169
TC32[13]	Lamellar microstructure	2 400	1 595	0.20	313
	Bimodal microstructure	2 00	1 623	0.21	343
TA15[14]	Equiaxed microstructure	2 700	1 490	0.21	309
		3 000	1 559	0.24	382
TC4 ELI[15]	Lamellar microstructure	3 000	1 558	0.20	289
TC11[16]	Basketweave microstructure	3 000	1 680	0.21	371

中国知网　https://www.cnki.net

新型高强度(α+β)双相钛合金，具有比 Ti64 更出色的强塑性匹配(UTS=1 176 MPa，EL=15%)和冷驻停留疲劳性能，在航空核心部件(如风扇盘和叶片)及武器装备的应用上显示出较大潜力[28-30]。目前，对于该合金的研究主要集中于微观结构演化及组织形貌等因素对静态疲劳、拉伸性能和中应变速率冲击韧性等性能的影响上[31-35]，而航空及兵器用材料在服役时经常遭遇突发的高应变速率动态冲击载荷[6-9]，因此，Ti575 合金的动态力学性能是一个需要迫切关注的问题。

本研究以 Ti575 合金为研究对象，基于 Dai 等[35]的中应变率冲击韧性实验结果，选取冲击韧性高的三态组织和魏氏组织这两种典型组织进行动态力学性能研究。利用不同制度热处理进行组织调控，随后通过分离式霍普金森压杆技术对具备典型组织的 Ti575 合金进行 3 500 s^{-1} 应变速率下的压缩实验，并进一步结合扫描电子显微镜进行表征，拟初步了解不同组织 Ti575 合金的动态变形行为及力学性能，从而为后续研究提供指导意义。

1 实验材料与方法

实验原材料为中国航空制造技术研究院提供的 Ti575 合金热轧坯。如图 1a 和 b 所示，该合金的原始组织由等轴状 α 相(α_p)、层状 α 相(α_l)以及残余 β 相组成，是典型的近 β 热变形组织。其次，该合金的化学组成见表 2，其 β 转变温度经淬火金相法测得为(920±5) ℃。

表 2 Ti575 合金化学成分
Tab.2 Chemical composition of the Ti575 alloy
(mass fraction/%)

Ti	Al	V	Fe	O	Si
Bal.	5.25	7.50	0.25	0.21	0.43

对原始坯料进行不同制度热处理以获得该合金的不同组织形态，热处理制度及预期组织如表 3 所示。热处理完成后，采用 Tescan Clara GMH 扫描电子显微镜观察热处理组织特征，得到如图 1c~f 所示结果。可知，在两种热处理制度下，T1、T2 试样均于 β 转变基体上析出纳米尺度的次生 α 相，分别表现出三态组织和魏氏组织特征，与预期结果相一致。

表 3 Ti575 合金热处理工艺
Tab.3 Heat treatment procedures for the Ti575 alloy

No.	Heat treatment procedures	Microstructure
T1	850 ℃/1 h/FC+550 ℃/6 h/AC	Trimodal microstructure
T2	940 ℃/1 h/FC+550 ℃/6 h/AC	Widmanstätten microstructure

采用电火花切割技术从热处理态坯料上加工制备尺寸为 ϕ4 mm×4 mm 的动态压缩试样，并利用分离式霍普金森压杆装置进行应变速率为3 500 s^{-1} 的动态力学性能测试，测试方法参考GB/T 34108-2017《金属材料高应变速率室温压缩实验方法》。测试于北京理工大学完成，所用实验装置示意图如图 2 所示，试样置于入射杆与传输杆之间，通过调节气压控制应变速率，从而对试样进行加载。加载完成后沿试样轴线切开，经研磨、抛光、腐蚀后利用配备 OxFord c nano EBSD 探头的 Tescan Clara GMH 扫描电子显微镜对试样截面进行 SEM 及 EBSD 观察，以明晰

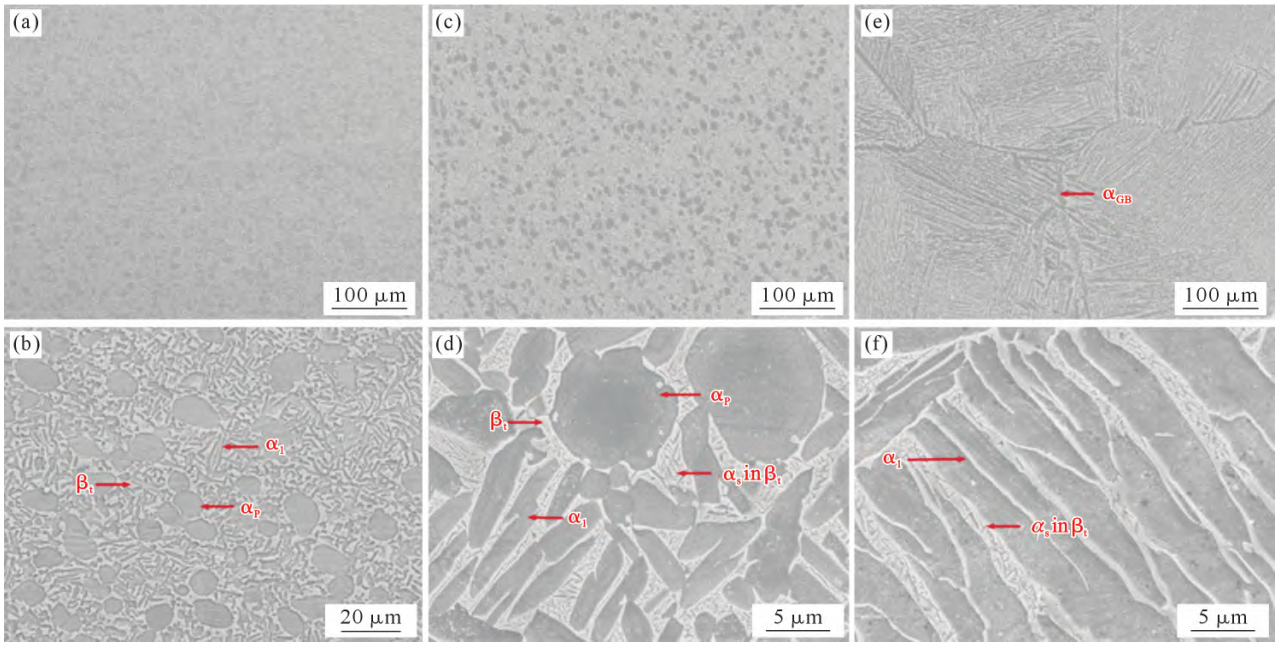

图 1 Ti575 合金的原始组织及热处理组织：(a, b) 原始组织；(c, d) 三态组织；(e, f) 魏氏组织
Fig.1 Initial and heat-treated microstructures of the Ti575 alloy: (a, b) initial microstructure; (c, d) trimodal microstructure; (e, f) widmanstätten microstructure

中国知网 https://www.cnki.net

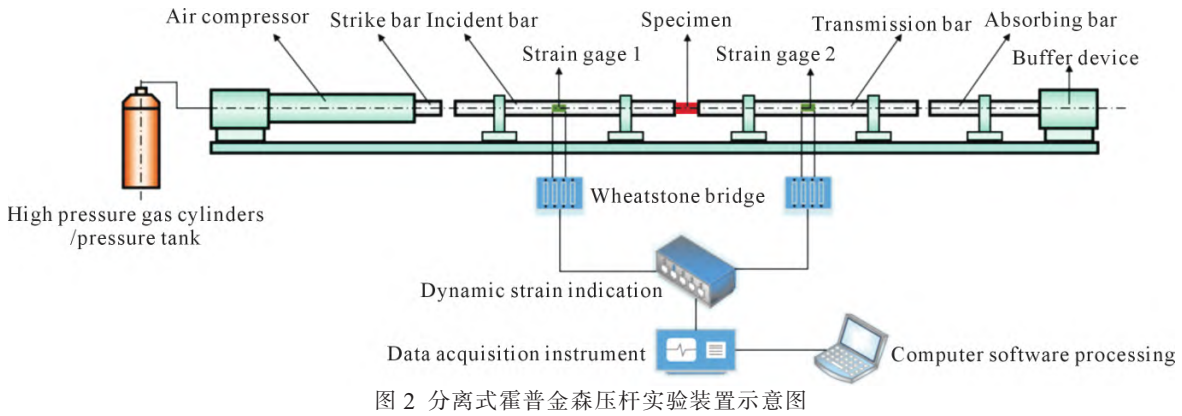

图 2　分离式霍普金森压杆实验装置示意图

Fig.2　Schematic diagram of the split Hopkinson pressure bar setup

不同组织 Ti575 合金的绝热剪切行为和组织演变特征。其中，用于表征的样品均在机械抛光后利用体积比为氢氟酸:硝酸:水=1:1:8 的混合试剂腐蚀得到。EBSD 表征在 20 kV 的加速电压下进行，扫描步长为 0.4 μm。

2　实验结果及讨论

2.1　动态压缩性能

图 3 为三态组织及魏氏组织 Ti575 合金的工程应力–应变曲线、真实应力–应变曲线以及加工硬化率曲线。由图 3a 和 c 可知，两种组织的工程应力–应变曲线均由弹性阶段(AB)、应变硬化阶段(BC)、热软化阶段(CD)以及不稳定软化阶段(DE)4 部分组成，这与 Hao 等[36]的研究结论相一致。这种不同于静态压缩曲线[11,18,37]的阶段变化，主要是由高应变速率下应变硬化与绝热温升引起的热软化间的竞争作用所导致[18,36-38]。除此之外，图 3b 和 d 示出了由真实应力–应变曲线微分所得到的加工硬化率曲线。可以看出，两种组织 Ti575 合金的加工硬化均分为 4 个阶段：在第 Ⅰ 阶段，三态组织的加工硬化率由 87.6 GPa 迅速降至约 0 GPa，魏氏组织的加工硬化率也由 94.3 GPa 迅速降至约 0 GPa。根据 Cheng 等[16]的研究，这主要是由于位错随应变增加逐渐饱和所致。随后，在第 Ⅱ 阶段，由于加工硬化和热软化之间的动态竞争达到平衡，试样在此阶段发生均匀塑性变形[11]，加工硬化率趋于稳定，约等于 0 GPa。在第 Ⅲ 阶段，当热软化效应超过应变硬化效应时，应变硬化率在卸载前迅速下降到 0 GPa 以下。最后，在第 Ⅳ 阶段，

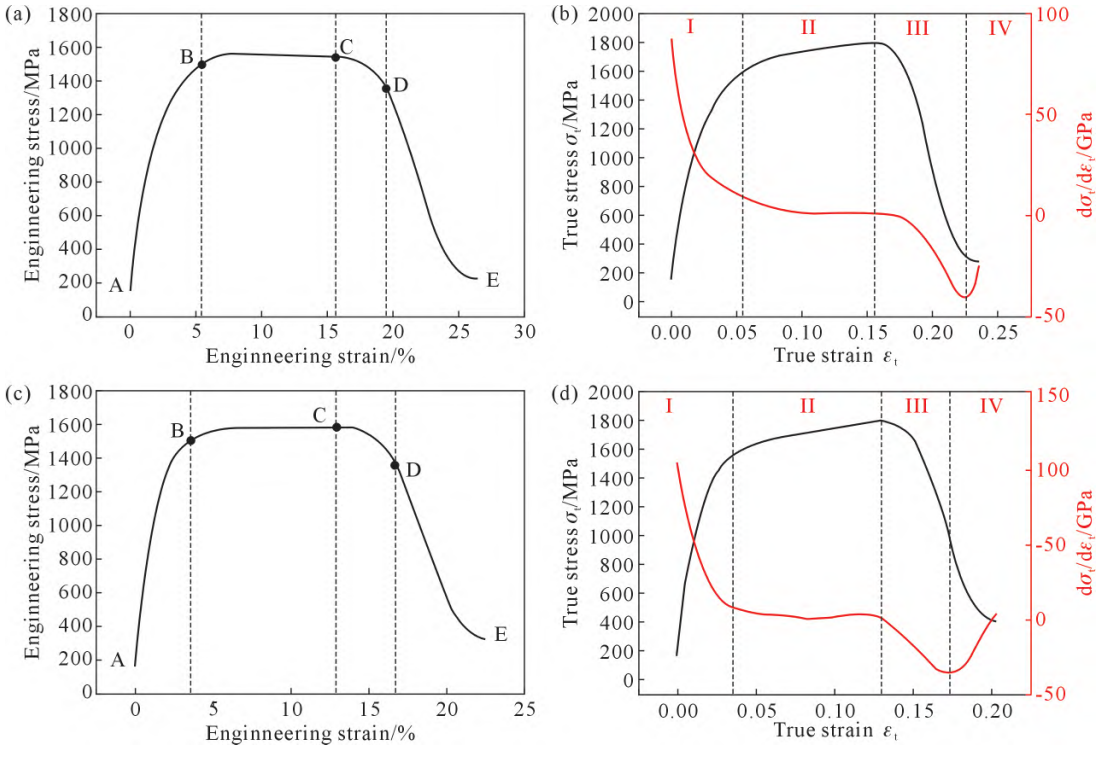

图 3　不同组织 Ti575 合金的动态压缩工程应力–应变曲线、真实应力–应变曲线以及应变硬化速率曲线：(a, b) 三态组织；(c, d) 魏氏组织

Fig.3　Engineering stress-strain curve, true stress-strain curve and strain-hardening rate curve for Ti575 alloys with different microstructures: (a, b) trimodal microstructure; (c, d) widmanstätten microstructure

中国知网　https://www.cnki.net

由于应力波在试样中的反复传递，试样在余波作用下再次承载，导致应变硬化率上升。

为了更好地分析不同组织 Ti575 合金的动态压缩力学性能，对三态与魏氏组织的动态流变应力、动态最大塑性应变和冲击吸收能等参数进行统计。其中，动态流变应力是合金塑性变形阶段的平均流变应力，最大塑性应变是塑性变形段终点所对应的应变；冲击吸收功则为真实应力–应变曲线塑性变形阶段的积分，是综合考虑合金强度和塑性两方面因素，用以衡量材料动态力学性能的重要指标[36,39]，其详细计算方法已在 Xu 等[11]的研究中指出。由该方法得到如表 4 所示的结果。可知，对于三态组织和魏氏组织而言，两种组织塑性变形阶段的平均流变应力及最大塑性应变相近，但三态组织的冲击吸收功为 228 J/cm³ 略高于魏氏组织的 200 J/cm³，说明三态组织具有优于魏氏组织的动态力学性能。此外，相较于表 1 所示的不同体系合金的动态力学性能而言，Ti575 合金的冲击吸收功处于中等水平，后续仍需通过成分优化或热处理组织调控等方法进行性能提升。

表4 不同组织Ti575合金的动态压缩性能
Tab.4 Dynamic compression properties of Ti575 alloys with different microstructures

No.	Flow stress, σ_s/MPa	Maximum plastic strain, ε_{up}/%	Energy absorbed, E_A/(J·cm^{-3})
T1	1 536	15	228
T2	1 567	13	200

2.2 绝热剪切特征

经高应变速率压缩后，试样发生一定程度的塑性变形，并表现出沿最大剪切力平面的断裂特征。图 4 和 5 分别为三态组织及魏氏组织沿试样轴线剖面不同位置的显微组织形貌。如图 4a 和图 5a 所示，对于两种组织而言，均在与压缩轴线呈 45°方向的最大剪应力平面存在一条主裂纹，并同时在与压缩轴线呈 135°的方向存在次级裂纹。根据已有研究，出现这种现象的主要原因是，单轴压缩过程中，应力集中于与轴线呈 45°的方向，并呈“双锥状”分布[40]。除此之外，图 4c 和图 5c 对主裂纹区域的进一步高倍观察表明，裂纹两侧存在绝热剪切带特征。结合图 4a$_1$ 和图 5a$_1$ 所示的次级裂纹沿绝热剪切带扩展以及裂纹扩展前端存在微孔这些现象可知，裂纹源于绝热剪切带，由带内微孔聚集所致，并沿剪切带扩展，最终导致了沿最大剪应力平面的断裂。

其次，对于两种组织而言，绝热剪切带两侧绝热剪切影响区内的组织均沿相反方向被拉长，呈现出典型的绝热剪切带特征。对于三态组织而言，绝热剪切影响区中的等轴 α 相、棒状 α 相、次生 α 相以及 β 转变基体均沿剪切方向拉长成为绝热剪切带内部组织；而对于魏氏组织绝热剪切影响区而言，绝热剪切带穿过粗大的原始 β 晶粒，并穿过不同方向片层扩展。已有研究指出，绝热剪切带周围组织的塑性变形，能够起到减缓绝热剪切带扩展的效果，从而延长整个绝热剪切失稳过程，而失稳过程的延缓可能会导致冲击吸收功的提升[41-42]。结合上述绝热剪切特征，三态组织绝热剪切影响区内的各形态 α 相及 β 转变基体均存在不同程度塑性变形，而魏氏组织绝热剪切影响区中的塑性变形与片层方向有关。魏氏组织绝热剪切影响区中与绝热剪切带方向平行的组织几乎不存在拉长特征，而与绝热剪切带呈相交方

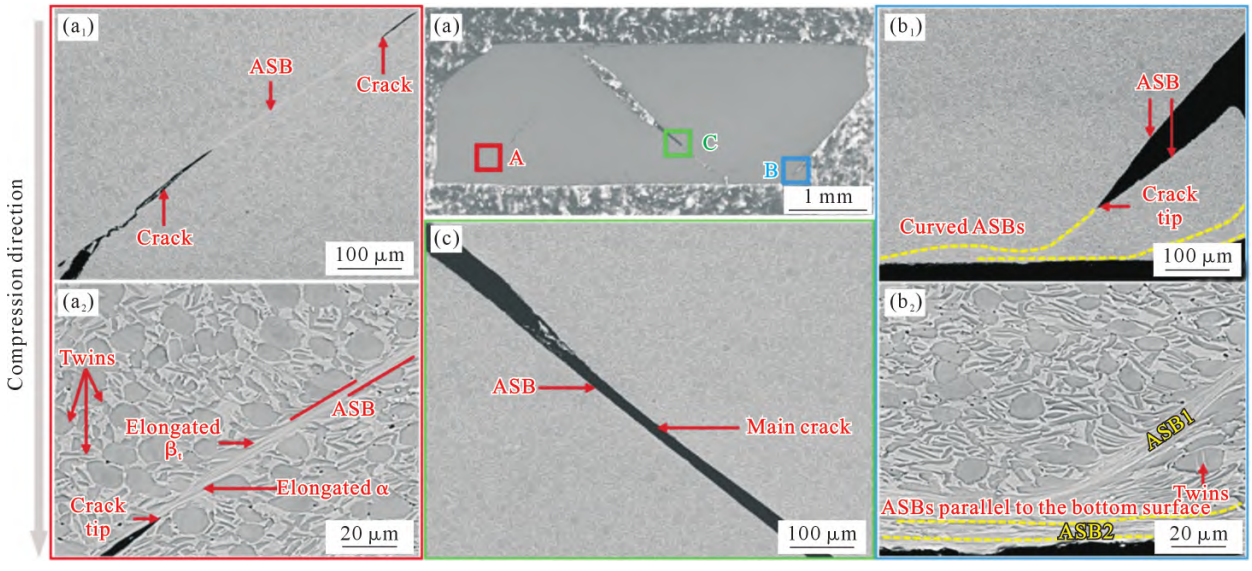

图 4 三态组织沿轴线剖面不同区域 SEM 表征：(a) 低倍下组织；(a$_1$, a$_2$) A 区域；(b$_1$,b$_2$) B 区域；(c) C 区域
Fig.4 SEM characterization of different regions along the axial section of the trimodal microstructure: (a) microstructure at low magnification; (a$_1$, a$_2$) region A; (b$_1$, b$_2$) region B; (c) region C

中国知网 https://www.cnki.net

向的片层存在明显拉长。也就是说，在魏氏组织绝热剪切影响区内虽然存在组织的塑性变形，但相较于三态组织而言，魏氏组织塑性变形不均匀性高、变形程度小，与图 6 所示几何必需位错(geometrically necessary dislocation, GND)图结果一致。因此，魏氏组织中绝热剪切带的扩展可能快于三态组织，即魏氏组织更易形成绝热剪切带，从而可能更容易在短时间内发生绝热剪切失稳，在性能上则表现为魏氏组织的冲击吸收功低于三态组织。

除以上对于试样较中心区域的显微组织观察外，图 $4b_1$ 和 b_2 及图 $5b_1$ 和 b_2 还示出了靠近试样上下表面的显微组织观察结果。图 $4b_1$ 和 b_2 表明，三态组织试样中存在多条平行于下表面的绝热剪切带，而与轴线呈 135°方向的绝热剪切带与其相交，且在交点处方向偏折，最终汇聚成为了平行于下表面的绝热剪切带的一部分。根据 He 等[43]对相交绝热剪切带交点处的受力分析可知，绝热剪切带相交处往往存在应力不平衡，从而可能导致开裂或绝热剪切带沿力较大方向的偏转。结合该结论，可以推断此处绝热剪切带方向的偏转便是由交点处平行于下表面方向较大的应力所导致的。同样地，图 $5b_1$ 和 b_2 对于魏氏组织上表面的观察表明，靠近上表面区域存在绝热剪切带相交的现象，并出现了由相交处严重的应力不平衡而导致的开裂。

进一步对试样内部 135°方向的绝热剪切带宽度进行测量，以衡量绝热剪切带在三态及魏氏组织中形成和扩展的难易程度。结果表明，三态组织和魏氏组织中绝热剪切带的宽度分别为5.02 和 3.81 μm。有文献指出，绝热剪切带越窄，表明组织响应时间越短，绝热剪切敏感性越高[25,27,41-42]。本研究中魏氏组织的绝热剪切带窄于三态组织，也就是说，魏氏组织具有高于三态组织的绝热剪切敏感性，更易在短时间内因绝热剪切而发生失效。并且，绝热剪切带条数、分叉、相交等情况也可作为绝热剪切敏感性的衡量标准[41-42]。魏氏组织中绝热剪切带条数以及相交、开叉的情况明显多于三态组织，进一步证实了魏氏组织较高的绝热剪切敏感性。除此之外，冲击吸收能越大表明材料抗绝热剪切能力越强，材料越不敏感。结合前述表 4 所示动态压缩性能来看，三态组织的冲击吸收能高于魏氏组织，即三态组织抗绝热剪切能力更强，绝热剪切敏感性更低。这与组织分析结果相一致。综上所述，组织和性能两方面的分析都表明三态组织具有更低的绝热剪切敏感性，更不容易在短时间内发生绝热剪切失稳。因此，三态组织具有高于魏氏组织的冲击吸收功。

如图 $4b_2$ 和图 $5d_2$ 所示，两种组织绝热剪切影响区内的 α 相内部均出现衬度明显变化且贯穿 α 相的特征组织。根据已有对于中应变率变形条件下钛合金冲击韧性的研究[44-45]可知，这种衬度变化常代表 α 相内部孪晶的生成。利用 EBSD 技术对该特征进行更精细的表征，得到如图 6 所示的结果。图 6a 和 b、d 和 e 进一步证实了三态组织和魏氏组织中孪晶的存在，也表明两种组织中均存在对应于 85°<11$\bar{2}$0> 和 35°<10$\bar{1}$0> 边界的{10$\bar{1}$2}和{11$\bar{2}$1}拉伸孪晶。有研究表明，受限于 HCP 结构有限的滑移系统，当高应变速率变形下滑移受阻时，通常在应力集中处产生变形孪晶以释放应力，确保均匀塑性变形[16,46-48]。结合图 6c 和 f 所示的 GND 图来看，孪晶多存在于几何必需位错密度较高的区域。因此，推测孪晶可能为不同组织 Ti575 合金在高应变速率下的塑性变形做出了一定贡献，可能起到了调节晶体取向，促进滑移开启和均匀塑性变形的作用，但后续仍需通过更精细的表征解释其变形协调作用机理。

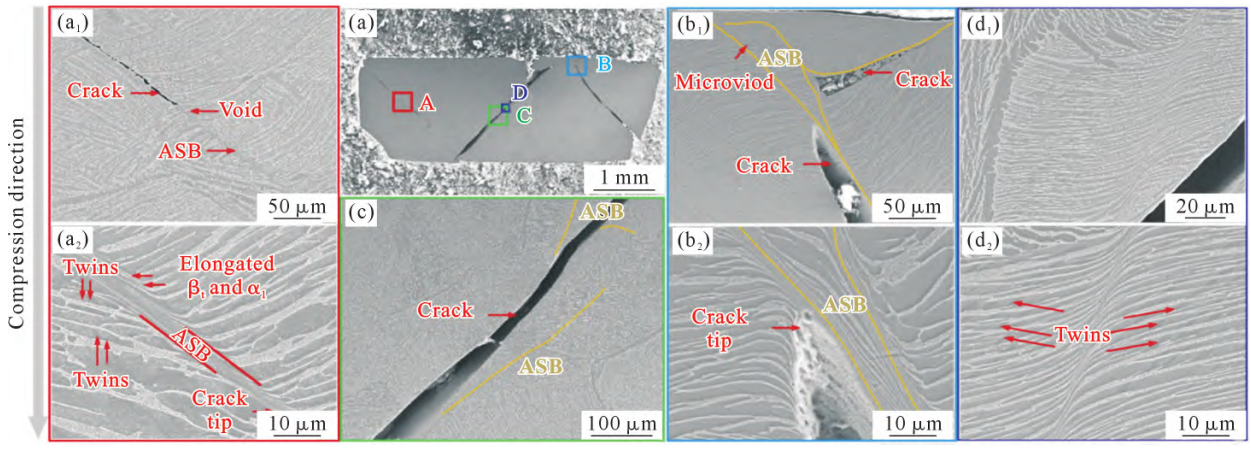

图 5　魏氏组织沿轴线剖面不同区域 SEM 表征：(a) 低倍下组织；(a_1, a_2) A 区域；(b_1, b_2) B 区域；(c) C 区域；(d_1, d_2) D 区域

Fig.5　SEM characterization of different regions along the axial section of the widmanstätten microstructure: (a) microstructure at low magnification; (a_1, a_2) region A; (b_1, b_2) region B; (c) region C; (d_1, d_2) region D

中国知网　https://www.cnki.net

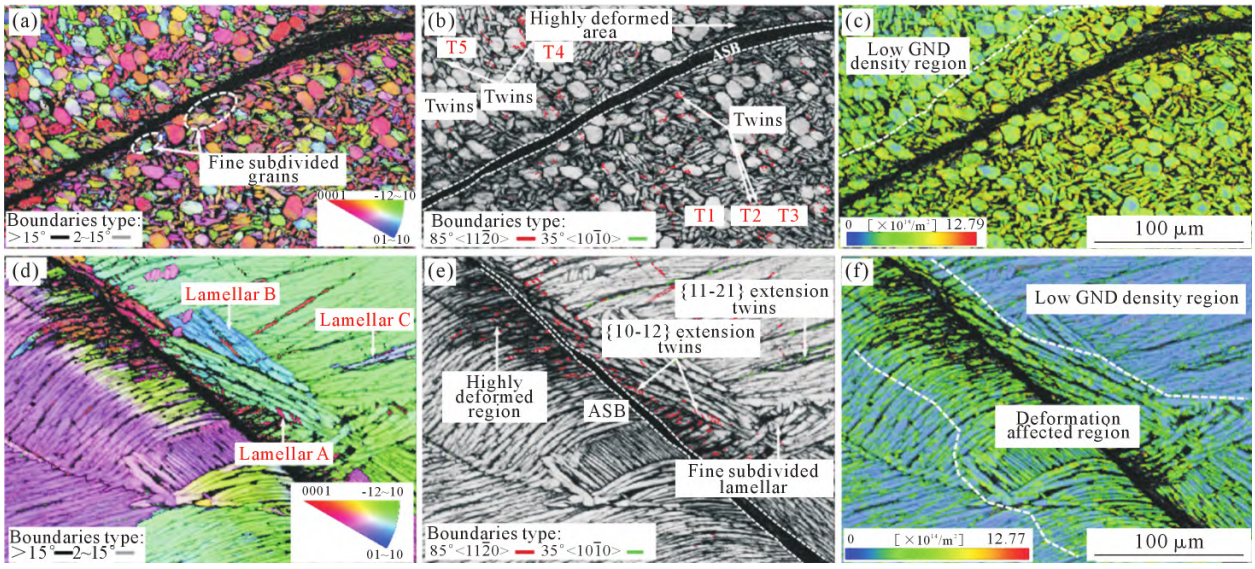

图 6 不同组织 Ti575 合金沿轴线剖面典型区域的 EBSD 表征:(a~c) 三态组织的 IPF 图、BC+SB 图及 GND 图;(d~f) 魏氏组织的 IPF 图、BC+SB 图及 GND 图

Fig.6 EBSD characterization of typical regions along the axial section of the Ti575 alloy with different microstructures: (a~c) IPF, BC+SB and GND maps of the trimodal microstructure; (d~f) IPF, BC+SB and GND maps of the widmanstätten microstructure

2.3 断口形貌分析

三态组织及魏氏组织经高应变速率压缩后的断口形貌如图 7 所示,可以发现,两者的断面均较为平整,除存在大量沿剪切方向的“抛物线”型韧窝外,还存在部分较为平滑的剪切区域,呈现出典型的绝热剪切断裂特征。此外,三态组织与魏氏组织断面上的韧窝区和平滑区均相间分布,但三态组织的韧窝区和平滑区聚集程度更高,魏氏组织则相对分布更离散。并且,三态组织与魏氏组织韧窝区与平滑区的交界处均存在部分被明显拉长的韧窝,表明两者的断裂机制均以韧性断裂为主;三态组织在此处还存在接近“卵形”的被充分拉长的韧窝,呈现出典型的剪切断裂特征。魏氏组织由于韧窝区和平滑区更离散的分布,韧窝未被充分拉长,使其断裂失效所需的塑性变形能量低于三态组织,因此其最大塑性应变小于三态组织。其次,两种组织断口中的韧窝底部均存在微孔,表明“抛物线”型韧窝均由微孔在剪应力作用下的形变所引起,进一步证实了三态组织与魏氏组织高应变速率变形下的韧性断裂机制。

3 结论

(1)由于高应变速率变形时应变硬化与热软化

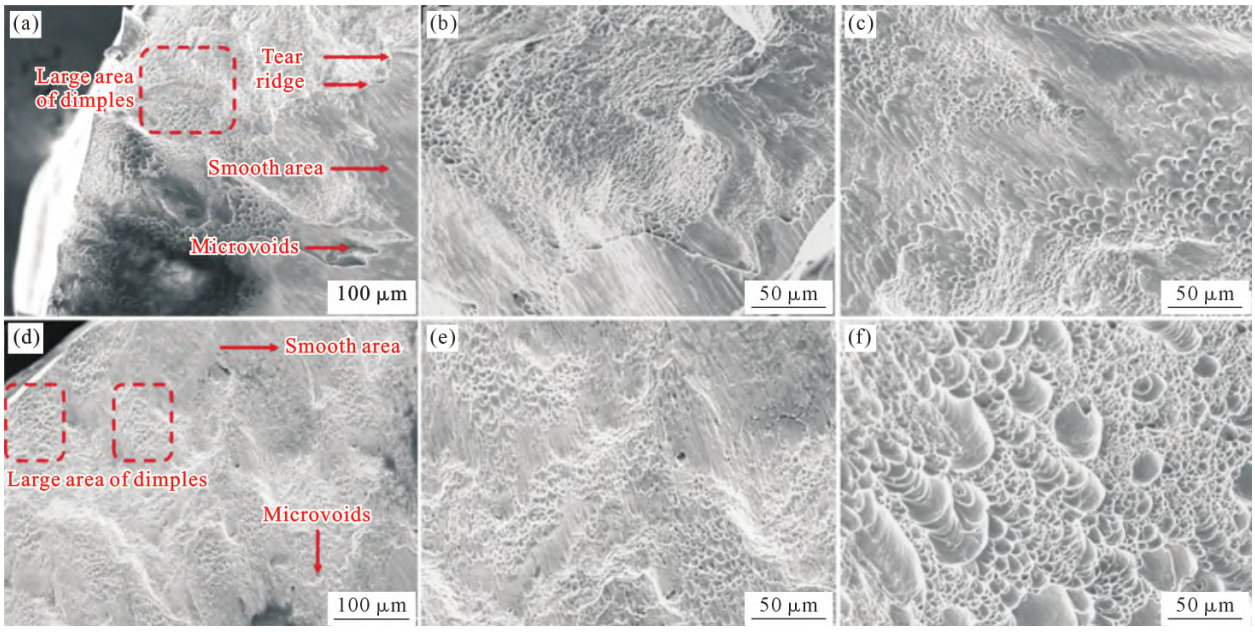

图 7 不同组织 Ti575 合金的断口 SEM 图像:(a~c) 三态组织;(d~f) 魏氏组织

Fig.7 SEM images of fractures in Ti575 alloys with different microstructures: (a~c) trimodal microstructures; (d~f) widmanstätten microstructure

中国知网 https://www.cnki.net

间的竞争作用，三态组织及魏氏组织 Ti575 合金在 3 500 s^{-1} 应变速率下的变形行为均经历 4 个阶段：弹性阶段、应变硬化阶段、不稳定软化阶段以及稳定软化阶段。

(2)动态压缩实验结果显示，三态组织的冲击吸收功为 228 J/cm^3，高于魏氏组织的 200 J/cm^3，表明三态组织具有较魏氏组织更好的动态力学性能。进一步结合组织表征结果发现，三态组织较魏氏组织高的冲击吸收功是由其低的绝热剪切敏感性导致。

(3)经高应变速率变形后，三态组织及魏氏组织 Ti575 合金均发生绝热剪切失效，断口表面呈现典型绝热剪切断裂特征和韧性断裂特征。进一步高倍观察表明，三态组织韧性断裂特征更充分，与其高塑性特征相对应。

参考文献：

[1] CUI C X, HU B M, ZHAO L C, LIU S J. Titanium alloy production technology, market prospects and industry development[J]. Materials & Design, 2011, 32(3): 1684-1691.

[2] BANERJEE D, WILLIAMS J C. Perspectives on titanium science and technology[J]. Acta Materialia, 2013, 61(3): 844-879.

[3] ZHAO Q Y, SUN Q Y, XIN S W, CHEN Y N, WU C, WANG H, XU J W, WAN M P, ZENG W D, ZHAO Y Q. High-strength titanium alloys for aerospace engineering applications: A review on melting-forging process[J]. Materials Science and Engineering: A, 2022, 845: 143260.

[4] 刘全明，张朝晖，刘世锋，杨海瑛. 钛合金在航空航天及武器装备领域的应用与发展[J]. 钢铁研究学报，2015, 27(3): 1-4.
LIU Q M, ZHANG Z H, LIU S F, YANG H Y. Application and development of titanium alloy in aerospace and military hardware[J]. Journal of Iron and Steel Research, 2015, 27(3): 1-4.

[5] 王金梅，钟险峰，王万朋，于大勇. 武器系统轻量化设计技术研究[J]. 兵器装备工程学报，2017, 38(12): 131-134.
WANG J M, ZHONG X F, WANG W P, YU D Y. The technique of weapon's light weight design[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2017, 38(12):131-134.

[6] 巩博瑞，王向胜，王天文，张信虎，任启愿，周文卿. 轻量化在火炮设计中的应用综述[J]. 火炮发射与控制学报，2023, 44(1): 94-98, 106.
GONG B R, WANG X S, WANG T W, ZHANG X H, REN Q Y, ZHOU W Q. Summary of lightweight application in artillery design[J]. Journal of Gun Launch & Control, 2023, 44(1): 94-98, 106.

[7] 陈京生，孙葆森，安康. 钛合金在兵器装备上的应用[J]. 兵器装备工程学报，2020, 41(12): 14-20.
CHEN J S, SUN B S, AN K. Titanium alloys for ordnance equipment applications[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2020, 41(12): 14-20.

[8] DAI J C, MIN X H, WANG L. Dynamic response and adiabatic shear behavior of β-type Ti-Mo alloys with different deformation modes[J]. Materials Science and Engineering: A, 2022, 857: 144108.

[9] LEI L, ZHAO Y Q, ZHAO Q Y, WU C, HUANG S X, JIA W J, ZENG W D. Impact toughness and deformation modes of Ti-6Al-4V alloy with different microstructures[J]. Materials Science and Engineering: A, 2021, 801: 140411.

[10] 宁子轩，王琳，程兴旺，程焕武，刘安晋，徐雪峰，周哲，张斌斌. 分离式霍普金森压杆加载下不同组织 Ti-6321 钛合金的动态响应行为[J]. 兵工学报，2021, 42(4): 862-870.
NING Z X, WANG L, CHENG X W, CHENG H W, LIU A J, XU X F, ZHOU Z, ZHANG B B. Dynamic response behaviors of Ti-6321 titanium alloys with different microstructures under split Hopkinson pressure bar loading[J]. Acta Armamentarii, 2021, 42(4): 862-870.

[11] XU X F, TAYYEB A, WANG L, CHEN H W, ZHOU Z, NING Z X, LIU X P, LIU A J, ZHANG B B, CHENG X W. Research on dynamic compression properties and deformation mechanism of Ti6321 titanium alloy[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2020, 9(5): 11509-11516.

[12] 陈稳，郭保桥，郭岩松，栾可迪，冉春，陈鹏万. 时效温度对 TB8 钛合金动态力学性能的影响[J]. 高压物理学报，2022, 36(5): 64-74.
CHEN W, GUO B Q, GUO Y S, LUAN K D, RAN C, CHEN P W. Effect of aging temperature on dynamic mechanical properties of TB8 titanium alloy[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2022, 36(5): 64-74.

[13] 李明兵，朱知寿，王新南，费跃，祝力伟，商国强，李静. TC32 钛合金的动态力学性能及损伤特点[J]. 航空材料学报，2016, 36(5): 7-13.
LI M B, ZHU Z S, WANG X N, FEI Y, ZHU L W, SHANG G Q, LI J. Investigation of dynamic mechanical behavior and damage characteristics in TC32 alloy[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2016, 36(5): 7-13.

[14] 隋楠，曹京霞，黄旭，高帆，谭启明. 合金成分对 TA15 钛合金组织及力学性能的影响[J]. 航空材料学报，2019, 39(1): 48-54.
SUI N, CAO J X, HUANG X, GAO F, TAN Q M. Effect of composition on microstructure and mechanical properties of TA15 titanium alloy[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2019, 39(1): 48-54.

[15] 徐雪峰，王琳，沙彦刚，杨思琪，刘安晋，TAYYEB A，张斌斌，赵登辉. TC4 ELI 钛合金动态压缩性能及绝热剪切敏感性的研究[J]. 兵工学报，2020, 41(2): 366-373.
XU X F, WANG L, SHA Y G, YANG S Q, LIU J A, TAYYEB A, ZHANG B B, ZHAO D H. Research on dynamic mechanical properties of TC4 ELI titanium alloy and its sensitivity to adiabatic shear banding[J]. Acta Armamentarii, 2020, 41(2): 366-373.

[16] CHENG F, WANG H M, LI Z, CHENG X, ZHENG D D, ZHANG S Q, HU X, ZHANG H, LIU M. Dynamic compression deformation behavior of laser directed energy deposited α+β duplex titanium alloy with basket-weave morphology[J]. Additive Manufacturing, 2023, 61: 103336.

[17] CHEN H S, HAO F, HUANG S X, YANG J, LI S Q, WANG K X, DU Y X, LIU X H, YU X T. The effects of microstructure on the dynamic mechanical response and adiabatic shearing behaviors of a near-α Ti-6Al-3Nb-2Zr-1Mo alloy[J]. Materials, 2023, 16(4): 1406.

中国知网　https://www.cnki.net

[18] RAN C, SHENG Z M, CHEN P W, ZHANG W F, CHEN Q. Effect of microstructure on the mechanical properties of Ti-5Al-5Mo-5V-1Cr-1Fe alloy[J]. Materials Science and Engineering: A, 2020, 773: 138728.

[19] SHAHAN A R, TAHERI A K. Adiabatic shear bands in titanium and titanium alloys: A critical review[J]. Materials & Design, 1993, 14(4): 243-250.

[20] ALAGHMANDFARD R, DHARMENDRA C, ODESHI A G, MOHAMMADI M. Dynamic mechanical properties and failure characteristics of electron beam melted Ti-6Al-4V under high strain rate impact loadings[J]. Materials Science and Engineering: A, 2020, 793: 139794.

[21] YANG Y, HE J L, HUANG J Y. Effect of heat treatment on adiabatic shear susceptibility of Ti-6Al-4V titanium alloy manufactured by selective electron beam melting[J]. Materials Science and Engineering: A, 2022, 851: 143647.

[22] GUAN X R, CHEN Q, QU S J, GAO G J, WANG H, FENG A H, CHEN D L. Adiabatic shear instability in a titanium alloy: Extreme deformation-induced phase transformation, nanotwinning, and grain refinement[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2023, 150: 104-113.

[23] CHEN K, FAN Q B, YANG L, YAO J H, XU S, LEI W, GAO Y. Deciphering the microstructural evolution and adiabatic shearing behavior of the titanium alloy with stress-induced ω phase trans formation during dynamic compression [J]. Materials & Design, 2022, 221: 110939.

[24] GUO Y S, LIU R, ARAB A, ZHOU Q, GUO B Q, REN Y P, CHEN W, RAN C, CHEN P W. Dynamic behavior and adiabatic shearing formation of the commercially pure titanium with explosion-induced gradient microstructure[J]. Materials Science and Engineering: A, 2022, 833: 142340.

[25] WANG P Y, MAO P L, ZHOU L, WANG Z, WANG F, WEI Z Q, LIU X Y, LIU Z. Effect of α phase morphologies on shear localization behavior of TC4 titanium alloy at high strain rate [J]. Journal of Materials Science, 2024, 59: 3984-3999.

[26] ARAB A, CHEN P W, GUO Y S. Effects of microstructure on the dynamic properties of TA15 titanium alloy[J]. Mechanics of Materials, 2019, 137: 103121.

[27] ZHENG C, WANG F C, CHENG X W, LIU J X, LIU T T, ZHU Z X, YANG K W, PENG M Q, JIN D. Capturing of the propagating processes of adiabatic shear band in Ti-6Al-4V alloys under dynamic compression [J]. Materials Science and Engineering: A, 2016, 658: 60-67.

[28] ANDRIEU S, THUNGEN I V, LENAIN A, MILLET Y. Ti575: A new timet alloy for structural parts in aeronautics[M]//VENKATESH V, PILCHAK A L, ALLISON J E, ANKEM S, BOYER R, CHRISTODOULOU J, FRASER H L, ASHRAF IMAM M, KOSAKA Y, RACK H J, CHATTERJEE A, WOODFIELD A. Proceedings of the 13th world conference on titanium. Pittsburgh: The Minerals, Metals & Materials Society, 2016: 1537-1541.

[29] HEWITT J S, DAVIES P D, THOMAS M J, GARRATT P, BACHE M R. Titanium alloy developments for aeroengine fan systems[J]. Materials Science and Technology, 2014, 30(15): 1919-1924.

[30] ALLAN M, THOMAS M, BROOKS J, BLACKWELL P. β Recrystallisation characteristics of α+β titanium alloys for aerospace applications[M]//VENKATESH V, PILCHAK A L, ALLISON J E, ANKEM S, BOYER R, CHRISTODOULOU J, FRASER H L, ASHRAF IMAM M, KOSAKA Y, RACK H J, CHATTERJEE A, WOODFIELD A. Proceedings of the 13th world conference on titanium. Pittsburgh: The Minerals, Metals & Materials Society, 2016: 203-208.

[31] THOMAS M, HEWITT J, BACHE M, THOMAS R, GARRATT P, KOSAKA Y. Determination and analysis of the cyclic and dwell fatigue performance of TIMETAL 575®[M]//VENKATESH V, PILCHAK A L, ALLISON J E, ANKEM S, BOYER R, CHRISTODOULOU J, FRASER H L, ASHRAF IMAM M, KOSAKA Y, RACK H J, CHATTERJEE A, WOODFIELD A. Proceedings of the 13th world conference on titanium. Pittsburgh: The Minerals, Metals & Materials Society, 2016: 979-984.

[32] FRUTOS-MYRO E, MACLAREN I, LI P F, BERMENT-PARR I, THOMAS M. Nano-scale characterisation of tri-modal microstructures in TIMETAL® 575 [J]. MATEC Web of Conferences, 2020, 321: 12025.

[33] BACHE M R, THOMAS M. Alloy development and optimisation informed by an understanding of cold dwell fatigue sensitivity[J]. MATEC Web of Conferences, 2020, 321: 11043.

[34] BODIE M, THOMAS M, AYUB A. Effect of microstructure and cooling rate on the fatigue performance of TIMETAL® 575 [J]. MATEC Web of Conferences, 2020, 321: 12019.

[35] DAI J H, TANG B, CHU Y D, LIU K H, ZHENG G M, CHEN X F, LI J S, ZHANG P X. Effect of microstructure on impact fracture mechanism of a high-strength Ti-5Al-7.5V-0.5Si-0.25Fe-0.2O alloy[J]. Metrials Science and Engineering: A, 2024, 890: 145900.

[36] HAO F, LIU X H, DU Y X, MAO Y C, CHEN H S, LI S Q, WANG K X, LEI L. Excellent dynamic mechanical properties of a newly developed titanium alloy with bimodal structure[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2023, 961: 170980.

[37] LEI L, ZHAO Y Q, ZHAO Q Y, XIN S W, WU C, JIA W J, ZENG W D. Quasi-static, dynamic compressive properties and deformation mechanisms of Ti-6Al-4V alloy with gradient structure [J]. Metals, 2021, 11(12): 1928.

[38] KARANTZA K D, MANOLAKOS D E. A review on the adiabatic shear banding mechanism in metals and alloys considering microstructural characteristics, morphology and fracture [J]. Metals, 2023, 13(12): 1988.

[39] LI Z Z, WANG B F, ZHAO S T, VALIEV R Z, VECCHIO K S, MEYERS M A. Dynamic deformation and failure of ultrafine-grained titanium[J]. Acta Materialia, 2017, 125: 210-218.

[40] JIANG Y H, CHEN Z Y, ZHAN C K, CHEN T, WANG R K, LIU C M. Adiabatic shear localization in pure titanium deformed by dynamic loading: Microstructure and microtexture characteristic [J]. Materials Science and Engineering: A, 2015, 640: 436-442.

[41] 刘新芹,张敏,李淑华. TC4 和 DT4 合金的绝热剪切行为[J]. 材料科学与工程学报,2009, 27(5): 755-757, 803.
LIU X Q, ZHANG M, LI S H. Localized adiabatic shear deformation of TC4 and DT4 alloys [J]. Journal of Materials Science & Engineering, 2009, 27(5): 755-757, 803.

中国知网 https://www.cnki.net

[42] 桂林. 微观组织对 TC4 钛合金绝热剪切行为的影响[D]. 沈阳：沈阳工业大学，2021.
GUI L. Effect of microstructure on the adiabatic shear behaviour of TC4 titanium alloy[D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2021.

[43] HE S T, ZENG W D, JIA R C, XU J W, ZHANG X. The mechanical response and failure mechanism of a near α titanium alloy under high-strain-rate compression at different temperatures [J]. Materials Science and Engineering: A, 2021, 814: 140749.

[44] ZHANG R Q, ZHAO Q Y, GUO D Z, YING Y, WANG H, QIAO Z L, ZHANG Y B, WANG L, ZHAO Y Q. High impact toughness of CT20 alloy induced by multi-factor coupling[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2024, 192: 65-81.

[45] ZHANG L, WANG Q, REN J Q, XIN C, CHEN D J, LU X F. Comparative study on the effect of test temperature on tensile and charpy impact properties of Ti-5Al-1V-1Sn-1Zr-0.8Mo alloy[J]. Materials Science and Engineering: A, 2023, 879: 145231.

[46] DU Y X, YANG X L, LI Z S, HAO F, MAO Y C, LI S Q, LIU X H, FENG Y, YAN Z M. Shear localization behavior in hat-shaped specimen of near-α Ti-6Al-2Zr-1Mo-1V titanium alloy loaded at high strain rate[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2021, 31: 1641-1655.

[47] REN Y, ZHANG X Y, XIA T, SUN Q, LIU Q. Microstructural and textural evolution of high-purity titanium under dynamic loading [J]. Materials & Design, 2017, 126: 123-134.

[48] KUANG L J, CHEN Z Y, JIANG Y H, WANG Z M, WANG R K, LIU C M. Adiabatic shear behaviors in rolled and annealed pure titanium subjected to dynamic impact loading[J]. Materials Science and Engineering: A, 2017, 685: 95-106.

中国知网　https://www.cnki.net