

引用格式:唐俊翔,张得扬,胡琰莹,等.面向大潜深耐压结构的TC4ELI中厚板TIG焊接接头组织调控与断裂失效行为研究[J].热加工工艺,2026,55(9):1-9. TANG Junxiang, ZHANG Deyang, HU Yanying, et al. Microstructural Evolution and Fracture Failure Behavior of TIG Welded Joints of TC4ELI Medium Thick Plate for Deep-sea Pressure-resistant Structures[J]. Hot Working Technology, 2026, 55(9): 1-9.

DOI: 10.14158/j.cnki.1001-3814.26010132

新型金属结构材料专栏

面向大潜深耐压结构的 TC4ELI 中厚板 TIG 焊接接头组织调控与断裂失效行为研究

封面
文章

唐俊翔¹, 张得扬^{2,3}, 胡琰莹¹, 龚灏纬¹, 陈星昊¹, 温冰冰¹, 汪俊^{2,3}

(1. 中山大学 中法核工程与技术学院, 广东 珠海 519082; 2. 中国船舶科学研究中心, 江苏 无锡 214082; 3. 船舶结构安全全国重点实验室, 江苏 无锡 214082)

摘要:作为典型的损伤容限型钛合金,TC4ELI在深海潜水器耐压结构中应用广泛。以8 mm厚的TC4ELI钛合金板为研究对象,对低、中、高三种热输入条件下TC4ELI钛合金TIG焊接接头组织演化、力学性能及裂纹萌生与扩展行为进行研究。结果表明,随着热输入的增加,焊缝中针状 α' 马氏体长宽比和含量均有所增大,片层 α 相厚度增加。焊缝内针状 α' 马氏体通过晶界强化和位错钉扎效应提高了焊缝强度和硬度,接头抗拉强度由低热输入的890.5 MPa提高至高热输入的936.2 MPa。高热输入下接头的加工硬化率在较宽的真应变区间内仍保持稳定上升,这归因于焊缝中的厚片层 α 相延长了位错滑移路径,从而使更多位错参与塑性变形过程。随着应变增加,应变集中区逐步向焊缝底部转移。由于焊缝宽度沿板厚呈上宽下窄特征,拉伸时底部变形能力较中部、上部的弱,导致底部易产生应变集中。断裂表面主要由韧窝和条带状撕裂棱构成,表明焊缝呈韧性断裂特征。进一步分析发现,当片层 α 相相对较薄时,裂纹更易穿透片层 α 相内部而扩展;而当片层 α 相较厚时,裂纹更倾向于沿片层 α 相界面扩展,从而提高裂纹扩展阻力,这是接头伸长率提高的重要原因。本研究结果为深入理解TC4ELI钛合金TIG焊接接头的组织演化与断裂失效行为提供了依据。

关键词:TC4ELI; TIG焊接; 热输入; 力学性能; 断裂行为

中图分类号: TG444⁺.74

文献标识码: A

文章编号: 1001-3814(2026)09-0001-09

Microstructural Evolution and Fracture Failure Behavior of TIG Welded Joints of TC4ELI Medium Thick Plate for Deep-sea Pressure-resistant Structures

TANG Junxiang¹, ZHANG Deyang^{2,3}, HU Yanying¹, GONG Haowei¹,

CHEN Xinghao¹, WEN Bingbing¹, WANG Jun^{2,3}

(1. Sino-French Institute of Nuclear Engineering and Technology, Sun Yat-Sen University, Zhuhai 519082, China; 2. China Ship Scientific Research Center, Wuxi 214082, China; 3. National Key Laboratory of Ship Structural Safety, Wuxi 214082, China)

Abstract: TC4ELI, a typical damage-tolerant titanium alloy, is widely used in pressure-resistant structures of deep-sea submersibles. Taking 8 mm thick TC4ELI plate as the object, the microstructure evolution, mechanical properties, crack initiation and propagation behavior of the TIG welded joints were investigated under low, medium and high heat input conditions. The results show that with the increase of the heat input, the length and content of the acicular α' phase in weld increase, and the thickness of the lamellar α phase increases. The acicular α' martensite in the weld enhances grain boundary strengthening and dislocation pinning, raising the strength and hardness of the joint, and the ultimate tensile strength of the

joint increase from 890.5 MPa at low heat input to 936.2 MPa at high heat input. The work-hardening rate of the joint at high heat input exhibits a stable increase over a wider true strain range, which is attributed to the fact that the thick lamellar α phase in the weld prolongs the dislocation slip path, thereby enabling more dislocations to participate in the plastic deformation process. As the strain increases, the strain concentration zone gradually shifts toward the bottom of the weld. The weld width exhibits a characteristic of

收稿日期: 2026-01-01 修回日期: 2026-02-15

基金项目: 国家自然科学基金项目(52475420); 船舶结构安全全国重点实验室开放基金项目(Naklas2024KF018-S); 国家磁约束核聚变能发展研究专项青年科学家项目(2024YFE03260400); 广东省海上风电联合基金项目(2024A1515240058)

作者简介: 唐俊翔, 男, 硕士研究生, 主要研究方向: 先进连接与焊接技术; E-mail: tangjx27@mail.sysu.edu.cn

通讯作者: 胡琰莹, 女, 博士, 副教授, 主要研究方向: 先进连接与焊接技术; E-mail: huyanying@mail.sysu.edu.cn

being wider at the top and narrower at the bottom along the plate thickness, and the bottom demonstrates weaker deformation capacity compared to the middle and top sections during tension, leading to a higher susceptibility to strain concentration at the bottom. The fracture surface shows a ductile fracture mode with dimples and strip-like tearing ridges. Further analysis indicates that thin lamellar α phases allow cracks to penetrate directly, whereas thick lamellar α phases promote crack propagation along α phase interfaces, increasing crack resistance and contributing to improved elongation. This work provides valuable insight into the microstructural evolution and fracture failure behavior of TC4ELI titanium alloy TIG welded joints.

Key words: TC4ELI; TIG welding; heat input; mechanical properties; fracture behavior

TC4 合金具有高的比强度、良好的综合力学性能、无磁性和耐腐蚀等一系列优点,已成为深潜器用重要结构材料。例如,“蛟龙号”载人潜水器耐压壳体主要采用 TC4 合金制造^[1]。TC4ELI 合金是在传统 TC4 合金的基础上,通过降低间隙元素含量发展而来的一种损伤容限性钛合金^[2-3]。相比于 TC4 合金,TC4ELI 合金强度略有下降,但具有更优异的耐冲击、耐海水腐蚀及焊接适应性能^[4-5],已逐步取代 TC4 合金,成为目前制造深潜器耐压壳的关键材料^[6-7]。由于构件尺寸大、结构复杂,TC4ELI 合金耐压构件在制造过程中难以整体成形,焊接成为关键工艺^[8-9]。在多种焊接方法中,钨极惰性气体保护焊(tungsten inert gas, TIG)因成本低、焊接稳定性高及焊缝成形良好等特点,被广泛应用于钛合金结构件的制造。

国内外研究表明,焊接热输入对钛合金接头中 α 相形貌及原始 β 晶粒尺寸具有显著影响,从而影响接头的强度和伸长率^[10-11]。针对不同焊接方法下热输入对 TC4 系钛合金焊缝力学性能的影响,已有学者开展了相关研究。王厚勤等^[12]对 60mm 厚 TC4ELI 钛合金板开展了电子束焊接,结果表明:随着线能量的增加,焊缝抗拉强度呈现小幅提升。Du 等^[13]对 6mm 厚 TC4 钛合金板开展了窄间隙 TIG 焊,研究表明随着焊接热输入的增加,焊缝抗拉强度呈上升趋势,其力学性能变化主要与焊缝中 α' 相的含量变化及形貌演化有关。Liu 等^[14]研究表明,在 TC4ELI 多道次激光-电弧复合焊接过程中,后续焊道对前一焊道的重复加热会引起复杂的热循环与相变行为,在熔合线附近形成高硬度的针状 α' 相,从而对接头的塑性产生不利影响;并得到控制道间温度和焊接热输入可以防止 β 晶粒反复粗化,促进马氏体分解,最终实现强度与延展性的平衡。

目前,关于 TC4ELI 中厚板多层多道 TIG 焊接在不同热输入条件下的组织演化特征及其对力学性能和断裂行为的影响尚缺乏系统研究,尤其是在拉伸变形过程中局部应变演化、加工硬化行为以及断

裂失效机理方面的认识仍不充分。为了揭示焊接热输入对 TC4ELI 钛合金中厚板接头组织-力学性能-断裂失效行为之间的内在关联机制,以 TC4ELI 钛合金中厚板为研究对象,采用多层多道 TIG 焊接工艺,结合显微组织表征、硬度测试、拉伸试验及数字图像相关(digital image correlation, DIC)技术,研究接头在不同热输入条件下的显微组织、力学性能及加工硬化行为;并进一步探讨焊缝失效过程中的裂纹萌生与扩展机制,为 TC4ELI 钛合金中厚板焊接工艺优化提供理论依据。

1 试验材料与方法

1.1 试验材料

焊接试验所用材料为依据深潜器实际结构等比例缩减的 8mm 厚退火态 TC4ELI 钛合金板材。焊丝选用成分与 TC4ELI 相近、直径为 1.2mm 的 TC3 焊丝,两者名义成分如表 1 所示。焊前,在工件上加工了单边 35°坡口,坡口底部间隙控制在 2.5mm。坡口表面氧化物会增加焊缝硬脆相的含量,使焊缝变脆,产生裂纹、气孔甚至焊接缺陷。因此,为减少表面氧化物对焊接质量的影响,焊接前用砂纸对坡口进行了充分打磨,并用酒精进行清洗。

表 1 TC4ELI 板与 TC3 焊丝的名义成分(质量分数,%)

Tab.1 Nominal chemical composition of TC4ELI plate and TC3 filler wire (wt%)

材料	Al	V	Fe	C	N	H	O	Ti
TC4ELI	5.5~6.5	3.5~4.5	0.25	0.08	0.03	0.012	0.13	余量
TC3	4.4~5.5	3.5~4.5	0.30	0.08	0.05	0.015	0.015	余量

1.2 试验设备及方法

焊接试验采用 iWave AC/DC 500i 系列 TIG 焊机。为抑制焊接过程中钛合金对氧、氮、氢的吸收,采用焊枪气嘴保护、背部气体保护垫板和保护气拖罩组成的三路氩气保护方式,确保焊缝在整个焊接过程中均处于氩气保护条件下,如图 1(a)所示。焊接采用多层多道 TIG 焊工艺,共 4 道焊接步骤,包括 1

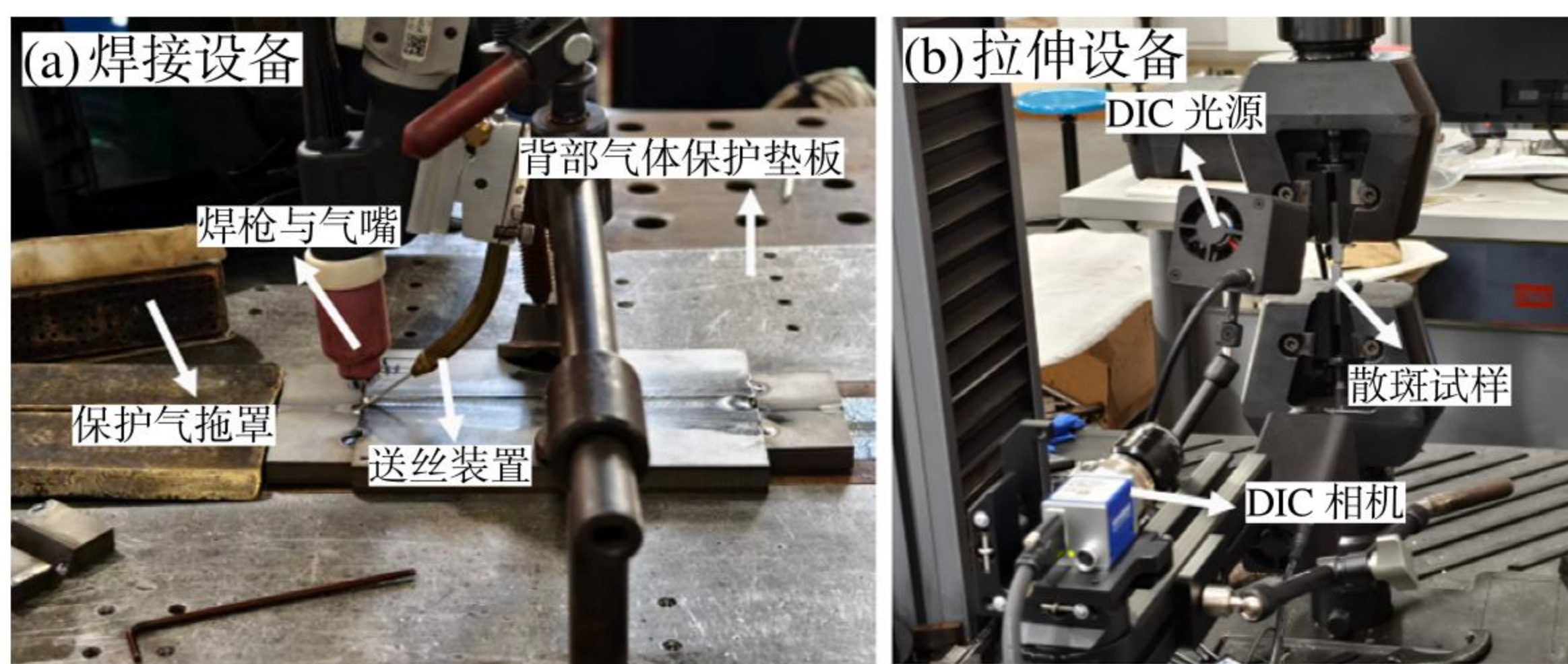


图1 试验设备
Fig.1 Test devices

道打底焊、2道填充焊和1道盖面焊。通过改变填充层与盖面层的焊接参数组合,形成高、中、低3种热输入水平,并据此划分为3种试样,主要焊接参数见表2。其中填充电流均采用脉冲电流模式,脉冲频率为2.2Hz,脉冲占空比和基值电流比例均为50%;打底和盖面均使用电流连续模式。各试样打底焊电流均为105A,焊接速度为8cm/min。

表2 TIG 焊接参数
Tab.2 TIG welding parameters

试样	焊道	电流 /A	焊速 /(cm·min ⁻¹)	热输入 /(J·cm ⁻¹)
高热输入	填充	200	10	1440
	盖面	130	8	1853
中热输入	填充	180	10	1134
	盖面	125	8	1688
低热输入	填充	180	12	945
	盖面	130	12	910

焊后,采用 VHX-6000 超景深显微镜(OM)和 TESCAN 扫描电子显微镜(SEM)对试样的微观组织进行观察,并采用 Mira 3 电子背散射衍射仪(EBSD)对晶体结构特征进行表征。力学性能方面,分别使用 Wilson 维氏硬度计和 MTS 电子万能试验机进行硬度和拉伸性能测试;硬度测试点在焊缝横截面沿厚度方向布置为上、中、下3行,分别距离盖面表面0.5、4和7.5mm。拉伸试验采用0.25mm/min的拉伸速率,并结合DIC技术,对拉伸全过程中的应变场演化进行精确测量,如图1(b)所示。为准确评估试样微观组织对其力学行为的影响,试验前对拉伸试样的焊缝余高进行去除,以避免焊缝几何因素对测试结果的干扰。

2 试验结果与分析

2.1 焊缝微观组织特征

焊缝表面成形如图2所示。尽管热输入存在较大差异,各焊缝表面均平整连续,未发现飞溅、咬边

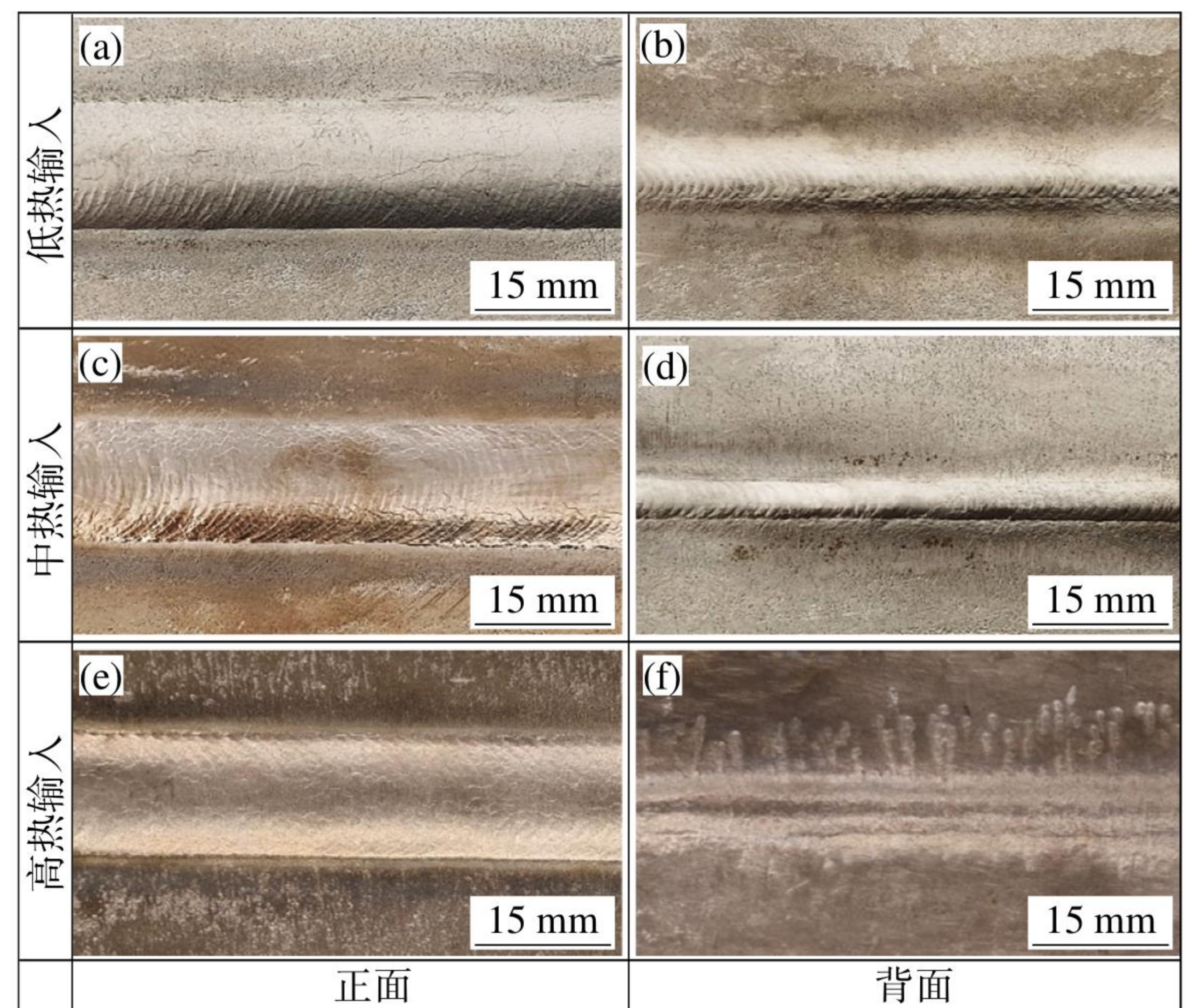


图2 不同热输入下接头表面的宏观形貌
Fig.2 Macroscopic morphologies of surface of the joints under different heat inputs

等宏观缺陷,表明在所选焊接工艺参数范围内,焊缝成形质量良好。高热输入下接头不同位置的 SEM 显微组织如图3所示。可以看出,母材(base metal, BM)组织主要由初生 α 相(α_p)和颗粒状的 $\alpha+\beta$ 相组成, α_p 经过轧制后沿轧制方向呈现明显的伸长形态;热影响区(heat affected zone, HAZ)可细分为靠近母材一侧的细晶区和靠近熔合线的粗晶区。细晶区由于离焊缝中心较远,高温停留时间较短,仅部分 α_p 相发生向 β 相的转变,冷却过程中析出多个平行

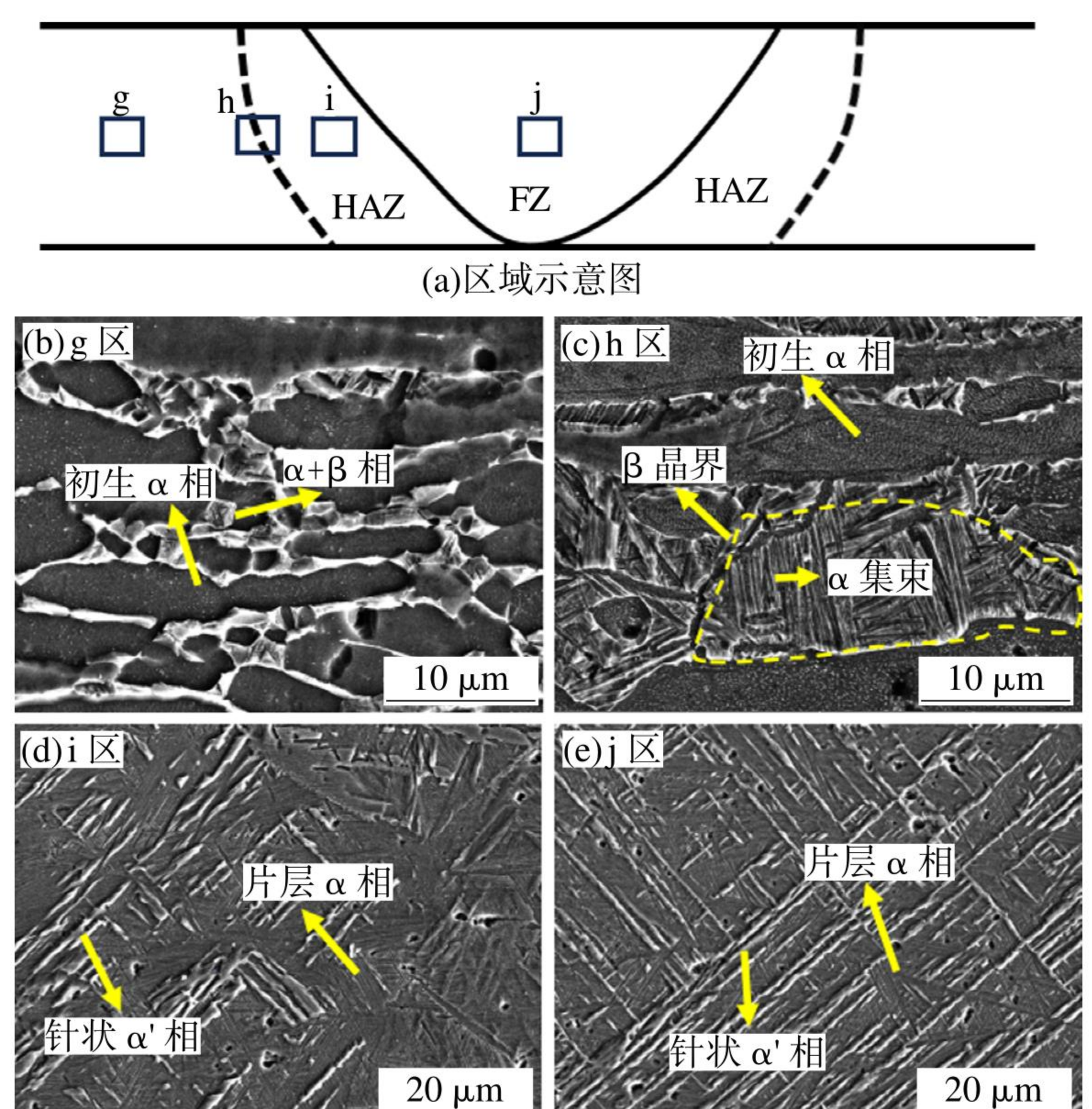


图3 高热输入下接头不同位置的 SEM 显微组织
Fig.3 SEM microstructure of different locations of the joint under high heat input

排列的片层 α 相, 形成 α 集束, 因此其组织由 α_p 相、 β 转变相和 α 集束共同构成。在粗晶区, 由于峰值温度高, 在焊接热循环作用下, 该组织先发生了 β 相转变和生长, 后在冷却过程析出细小的针状 α' 相和片层 α 相的混合组织。熔化区 (fusion zone, FZ) 经历最高的峰值温度及较长的高温停留时间后, 先形成粗大的柱状 β 相, 在随后的快速冷却过程中过饱和 β 相通过剪切方式转变为长宽比较大的针状 α' 马氏体相^[14]。同时, β 相晶内除含针状 α' 相, 还分布着大量的片层 α 相, 使得 FZ 呈粗大的 β 晶粒及其晶内纵横交织的针状 α' 相和片层 α 相混合组织。

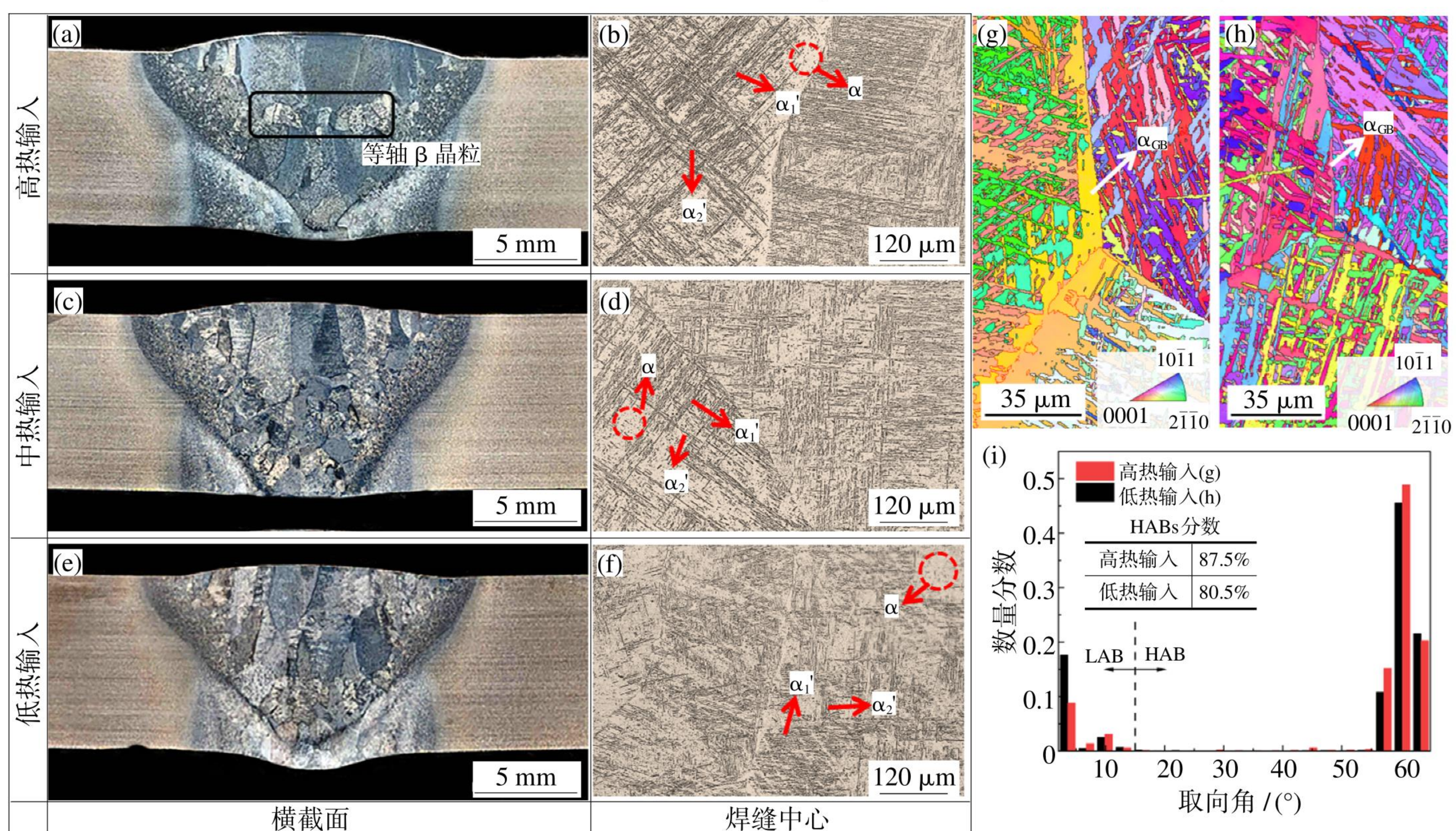
综上, 从 BM 到 FZ, 微观组织由以 α_p 相和颗粒状 $\alpha+\beta$ 相为主逐步演化为以针状 α' 相和片层 α 相为主。与 HAZ 相比, FZ 针状 α' 相长宽比明显增大。

2.2 焊接热输入对微观组织的影响

为揭示焊接热输入变化对焊缝组织特征的影响规律, 对不同热输入条件下焊缝截面组织进行了对比分析, 结果如图 4 所示。在本研究所采用的焊接参数范围内, 未观察到未熔合、裂纹等宏观焊接缺陷, 因此焊接质量较高。如图 4(a)、(c) 和 (e) 所示, FZ 均由粗大的原始 β 柱状晶构成, 其生长方向大致沿焊缝的散热方向, 即由熔合线向焊缝中心延伸。随着焊接热输入升高, 原始 β 柱状晶尺寸增加。这是由于在较高热输入条件下, 焊缝经历了较高的峰值温度

和较长的高温停留时间, 为原始 β 晶粒的长大提供了有利的热力学与动力学条件, 从而导致原始 β 晶粒粗化。值得注意的是, 在 FZ 中部或中下部可观察到局部原始 β 等轴晶, 该现象可能与 TIG 焊接过程中熔池内的热对流及脉冲电流作用下的熔池扰动有关; 局部的枝晶碎化及溶质再分配有利于等轴 β 晶的形核^[15], 总体上该区域等轴晶的形成机制较为复杂, 仍可能受到多种因素的共同影响。

高、中、低热输入条件下焊缝中心微观组织分别如图 4(b)、(d) 和 (f) 所示。焊缝在冷却过程中, 原始 β 相晶粒内部依次析出了针状 α'_1 和 α'_2 相, 二者之间满足 Burgers 取向关系^[16]。与中、低热输入焊缝相比, 高热输入焊缝冷却过程中析出了更多的针状 α' 相, 且其呈现出更大的长宽比。这一现象主要受原始 β 相晶粒尺寸影响^[17-18]: 随着热输入增加, 原始 β 晶粒尺寸增大, 从而为针状 α' 相在晶内生长提供了更宽裕的空间。图 4(g) 和 (h) 分别为高、低热输入条件下焊缝中心原始 β 相晶界处的 IPF 图。可以看出, 高热输入条件下原始 β 相晶界处形成的晶界 α 相 (α_{GB}) 厚度大于低热输入条件下的。此外, 通过对比高、低热输入条件下焊缝中心组织取向角分布 (图 4(i)), 发现取向角分布主要集中在 60° 附近, 这一特征与高温 β 相在冷却过程中向 α' 相转变时遵循 Burgers 取向关系密切相关。由 β 向 α' 相转变过程中



(g)、(h) 分别为高、低热输入下焊缝中心 IPF; (i) 晶界取向角分布

图 4 不同热输入下焊缝横截面的宏观形貌与微观组织特征

Fig.4 Macroscopic cross-sectional morphologies and microstructural characteristics of the welds under different heat inputs

可形成 12 种取向变体,不同 α' 之间的取向差特征出现的频率主要集中在 60° 、 60.8° 以及 63.3° ^[19],从而使取向角在约 60° 位置呈现明显聚集。与低热输入时相比,高热输入条件所得焊缝中大角度晶界比例 ($HABs > 15^\circ$) 相对更高。

基于以上结果可知,在多层多道 TIG 焊接过程中,焊接热输入可以调控原始 β 晶粒尺寸、针状 α' 相含量和长宽比及取向角分布。高热输入有利于焊缝内部针状 α' 相的析出与充分长大,使针状 α' 相的含量和长宽比有所增加,并伴随着 α_{GB} 的增厚以及大角度晶界比例的提高。

2.3 焊接热输入对硬度的影响

图 5 为不同焊接热输入条件下接头的硬度分布。如图 5(a)~(c)所示,接头上部、中部、底部的 FZ 硬度均低于 BM 和 HAZ,而 HAZ 硬度略高于 BM。这与 TIG 焊接过程中焊缝经历多次热循环密切相关。反复的热循环作用使得焊缝金属在冷却过程中

发生一定程度的组织回复^[20],从而降低了 FZ 的显微硬度。由于针状 α' 相是过饱和固溶体,其硬度高于 α 相以及 β 相,HAZ 由针状 α' 相和片层 α 相构成,因此 HAZ 硬度相较于 BM 略有提高。图 5(d)为不同焊接热输入条件下 FZ 平均硬度随深度的变化趋势。可以看出,随着填充层和盖面层焊接热输入的提高,FZ 中部及上部区域的平均硬度整体呈现逐步升高的趋势,而由于各试样打底参数一致,FZ 底部区域平均硬度变化相对较小。基于前文显微组织特征,较高热输入条件下焊缝区针状 α' 相长宽比和含量有所增加,由于针状 α' 相边界储存了大量的位错^[14],产生晶界强化效应,从而提高了硬度。此外,大角度晶界抗变形能力通常比小角度晶界强^[18],高热输入条件下的大角度晶界占比更大,对硬度提升起到一定的贡献。因此,随着焊接热输入的增加,针状 α' 相含量及大角度晶界比例的提高共同导致 FZ 硬度值的上升。

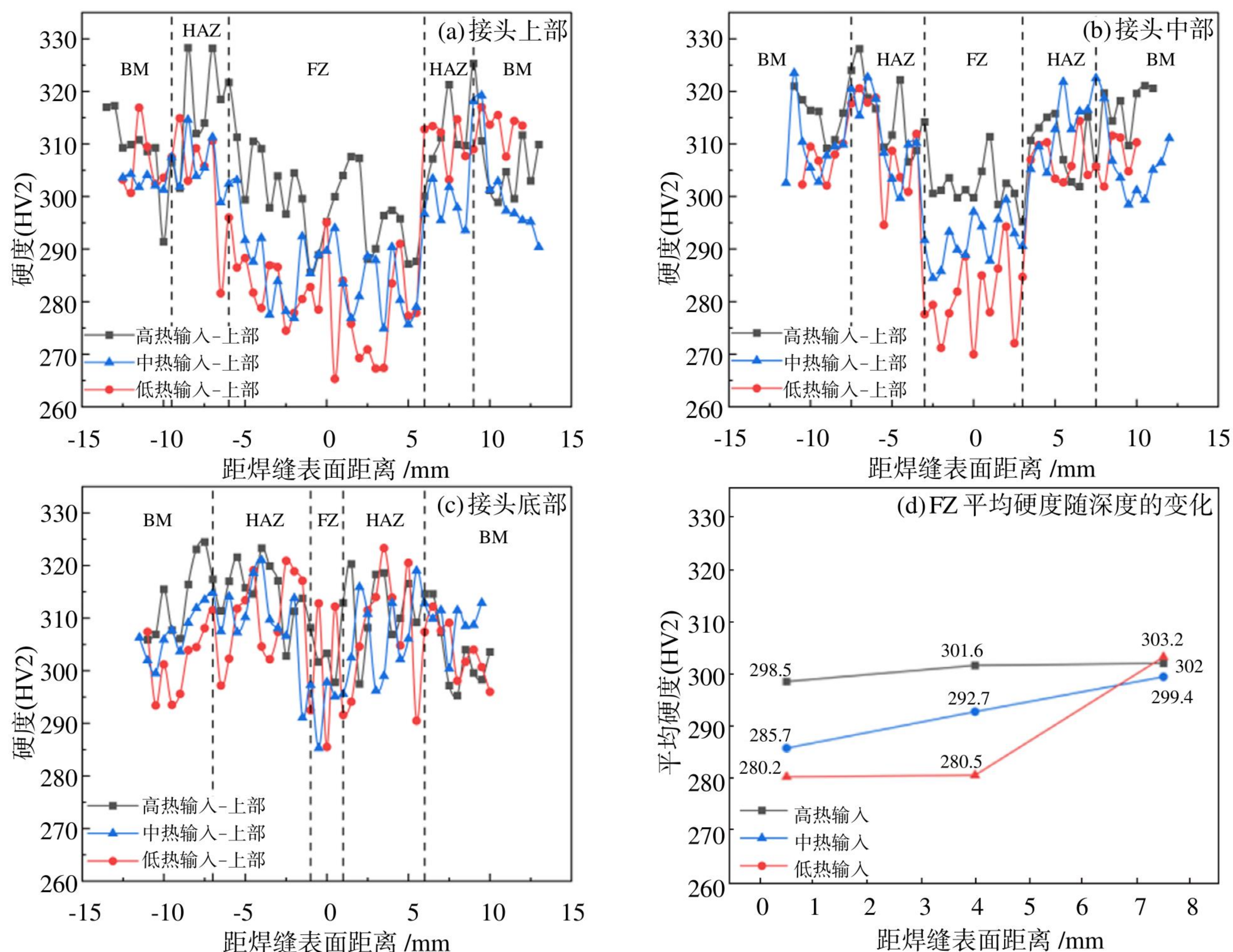


图 5 不同焊接热输入条件下接头的硬度分布

Fig.5 Hardness distribution of welded joints under different heat inputs

2.4 焊接热输入对拉伸性能的影响

图 6 为接头的拉伸性能与应变演化。如图 6(a)工程应力-应变曲线所示,在本研究采用的不同焊接热输入条件下,接头的抗拉强度均高于 GB/T

3621—2007 对 TC4ELI 钛合金板材的规定 (>860 MPa)。其中,BM 的抗拉强度为 930.5 MPa,伸长率为 16.3%。高、中、低热输入条件下接头的抗拉强度分别为 936.2、910.1 和 890.5 MPa,对应的伸长率分

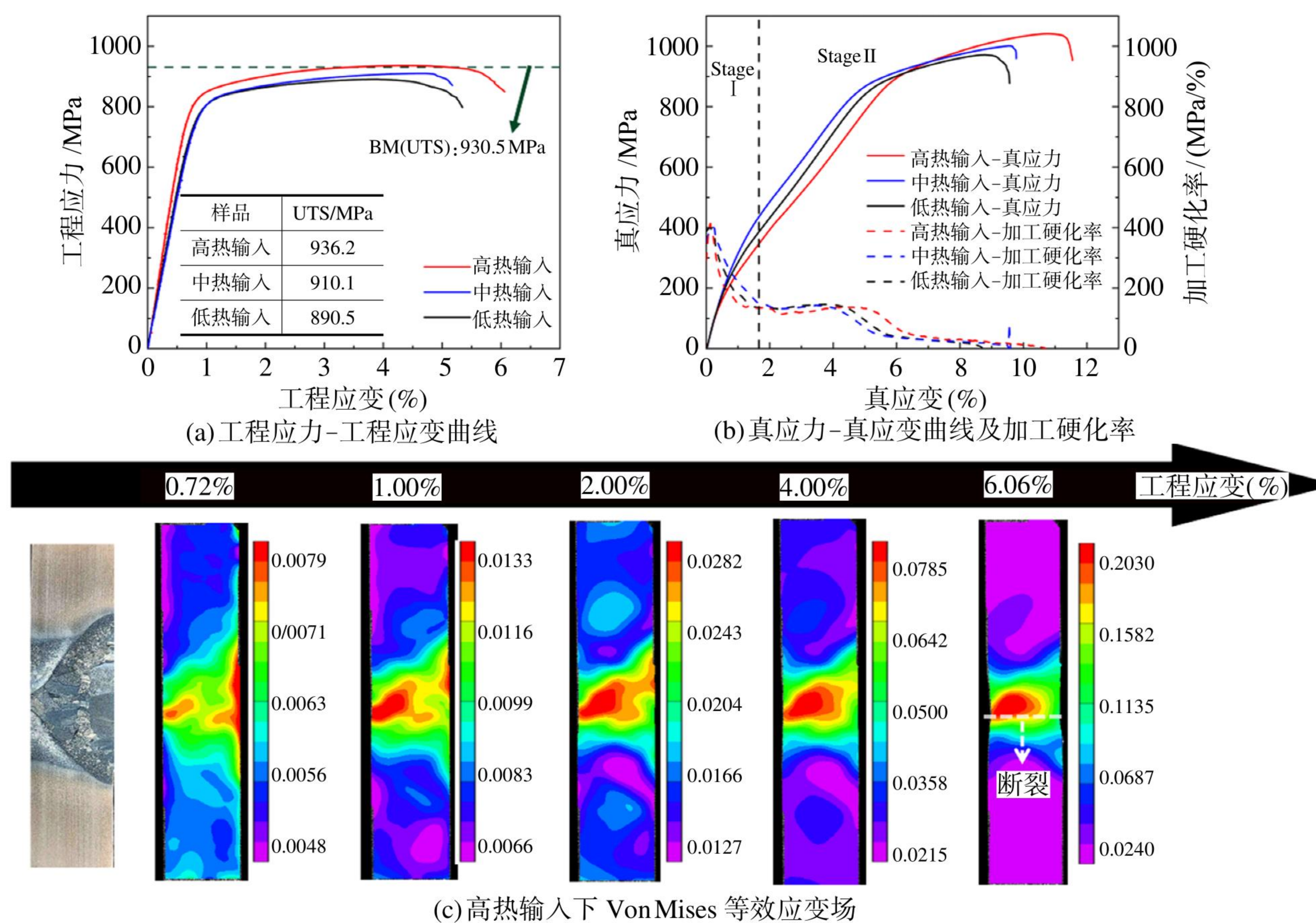


图 6 接头的拉伸曲线与应变演化
Fig.6 Tensile curves and strain evolution of welded joints

别为 6.1%、5.2%和 5.3%。总体来看,接头的抗拉强度随焊接热输入的增加而逐渐升高,而伸长率均远低于母材。这一趋势与焊缝区显微组织特征密切相关,随着热输入的增大,FZ 中原始 β 晶粒尺寸增大,析出的针状 α' 相的长宽比与含量均有所增加, α' 相引起的晶界强化作用以及位错钉扎效应^[14]提高了接头的强度。然而,这些针状 α' 相也一定程度上阻碍了位错的滑移和攀移,导致接头伸长率相较于母材有所降低。高热输入所得接头的伸长率略大于中、低热输入所得接头,这一现象得益于 α 相厚度的增加。相关研究表明,当钛合金中 Al 含量大于 5wt%时,HCP 结构的 α 相中孪晶变形受到抑制,而位错滑移逐渐成为主导的塑性变形机制^[21]。Dai 等^[22]进一步指出,片层 α 相的粗化可延长位错的平均自由滑移路径,从而增强由位错滑移主导的塑性变形能力。结合本研究结果表明,在高热输入条件下,焊缝中晶界 α 相及片层 α 相厚度的增加有利于接头伸长率的提高。

为深入理解接头变形行为,分析了不同热输入条件下的真应力-真应变曲线及加工硬化曲线,结果如图 6(b)所示。加工硬化过程可分为 Stage I 和 Stage II 两个典型阶段:Stage I 对应材料屈服前的变形阶段,可以看出加工硬化率随应变增加迅速下降;在 Stage II 变形阶段,高热输入接头在 1.5%~4.0%

真应变区间内的加工硬化率低于中、低热输入接头,但其加工硬化率在更宽的真应变范围内缓慢上升,表现出更为持续的加工硬化能力。由于针状 α' 相较薄,其内部可供位错滑移的有效距离有限,因此难以长期维持均匀塑性变形。在高热输入下可以获得更厚的片层 α 相和晶界 α 相,该条件下接头较为持续的加工硬化行为更可能与焊缝中片层 α 相和晶界 α 相的粗化有关:一方面,较厚的 α 相为位错运动提供了更大的活动空间,有效延长了位错在晶内的平均自由滑移路径^[23],从而在一定程度上减缓位错在 α 晶界处的早期塞积与应力集中,使前期 (1.5%~4.0%真应变) 的加工硬化率较低。另一方面,厚片层 α 需要更多的滑动位错,位错易发生更长距离的滑移^[23],随着位错在厚 α 片层内逐步累积,导致原有滑移带硬化并产生局部应力集中,促使更多其他低临界分切应力的滑移系统被激活,使加工硬化率在较大真应变范围缓慢上升。

为阐明接头失效行为,对拉伸过程中接头的应变分布进行研究,结果如图 6(c)所示。当工程应变超过 0.72%时,接头进入屈服阶段,变形由弹性变形转变为塑性变形,可以看出塑性应变主要集中于焊缝区。随着工程应变逐渐增加,在焊缝底部与上部两侧观察到明显的应变集中。当工程应变达到 2.00%

时,两侧的应变集中区逐渐扩展并相互连通。此后,应变主要集中于焊缝底部和中部区域,并向焊缝底部发展。从焊缝的几何形貌来看,上部和中部的 FZ 宽度相对较大,在拉伸过程中能够承担更多的塑性变形,从而缓解局部应变集中程度;相比之下,底部的 FZ 宽度较小,其承载和分散塑性变形的能力相对有限,导致应变更易集中,成为裂纹优先萌生区域。

综上,焊缝中针状 α' 相长宽比及其含量的增加有利于提高接头的抗拉强度; α 相厚度的增大则在一定程度上改善了接头的伸长率,并对其加工硬化行为起到调控作用。此外,焊缝几何形貌显著影响不同区域对塑性变形的承载与分配,从而对接头的拉伸失效行为产生重要影响。

2.5 焊缝拉伸断裂行为研究

为揭示接头断裂机理,有必要对其断口形貌特征进行分析。图 7 为不同焊接热输入条件下拉伸试

样的宏观和微观断口 SEM 形貌。其中,高热输入条件下宏观断口表面起伏相对明显,说明裂纹扩展路径较中、低热输入条件更为曲折。不同焊接热输入条件下的断口表面均存在大量韧窝,表明焊缝呈韧性断裂特征。此外,SEM 高倍下还可观察到呈条带状分布的撕裂棱,其方向与焊缝中 α 相的排列方向具有良好的-致性(图 7(c)),这反映其形成与焊缝内部 α 相组织特征之间存在关联。研究表明^[24],裂纹扩展行为与片层 α 相的厚度及其空间分布特征密切相关:当片层 α 相相对较细时,裂纹在外加载荷作用下更容易穿透 α 相内部扩展,裂纹扩展路径相对平直,裂纹扩展阻力较小;而焊缝中片层 α 相较厚时,裂纹在扩展过程中更倾向于沿片层 α 相界面发生扩展,从而形成条带状撕裂棱。随着焊接热输入的提高,条带状撕裂棱的厚度和数量均有所增加,这也证明较高的热输入促进了片层 α 相增厚。

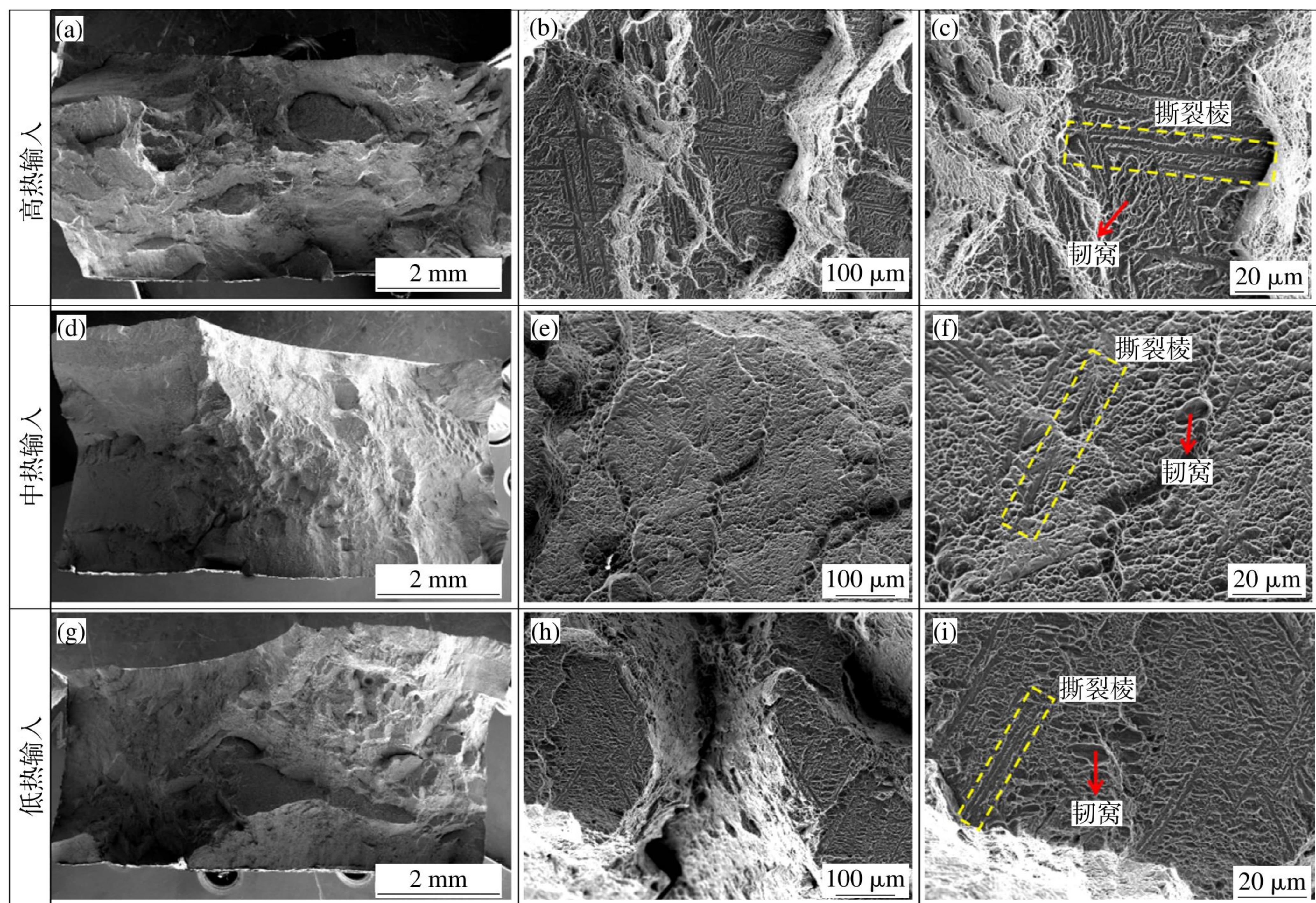


图 7 不同焊接热输入条件下拉伸试样的断口形貌

Fig.7 Fracture morphologies of tensile specimens under different welding heat inputs

为进一步阐明接头的断裂失效机制,对拉伸断口截面金相进行了分析。图 8 为高热输入条件下接头拉伸断裂截面的显微组织。在二次裂纹末端可观察到大量微孔以及微裂纹,如图 8(a)中箭头所指,由此可知裂纹基于微孔的形核、长大与聚集而萌生。从图 8(b)可观察到二次裂纹萌生于原始 β 相晶界

位置,这主要由两个原始 β 相晶内的片层 α 相之间通常存在较大的取向差(图 4(g))所致。Book 等^[24]利用高分辨数字图像相关技术在微米尺度下研究了拉伸过程中原始 β 相晶界处的应变传递行为。结果发现当原始 β 相晶界处两侧 α 片层取向差较大时,滑移在晶界处受到阻碍并引起显著的局部应变集中,

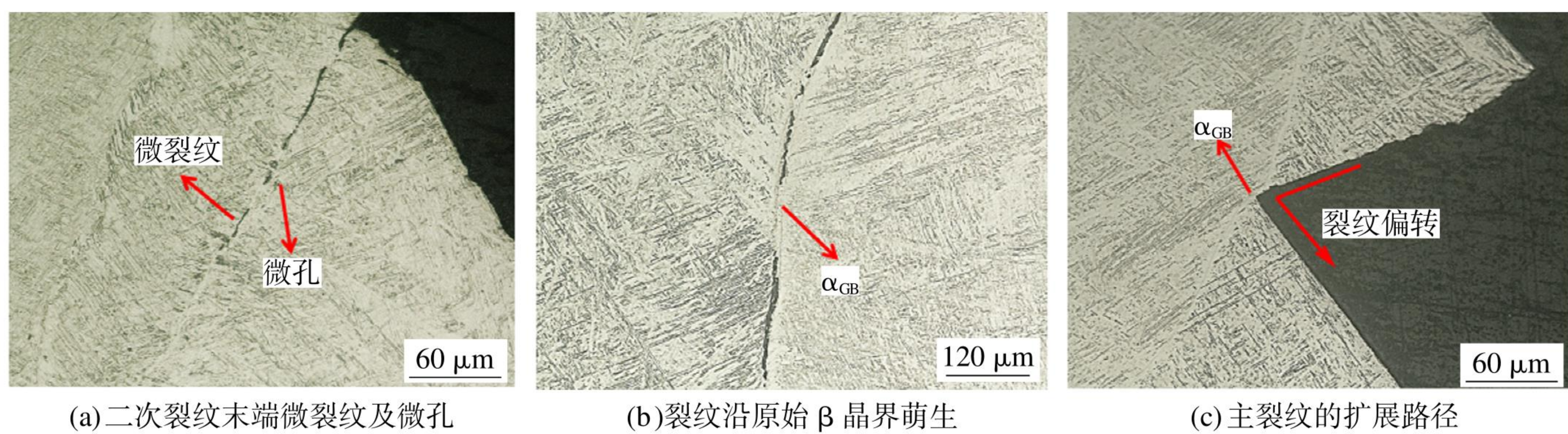


图 8 高热输入下接头拉伸断裂横截面显微组织

Fig.8 Microstructure of tensile fracture cross-section of the welded joint at high heat input

这证明了原始 β 相晶界区域是裂纹萌生的敏感位置。图 8(c)为主裂纹在扩展过程中的偏转图。当裂纹扩展至较厚的晶界 α 相时,其扩展方向发生明显偏转。这表明较厚的片层 α 相及其界面特征对裂纹扩展起到了有效的阻碍作用,使扩展路径更曲折,从而增加裂纹扩展所需的能量,提高接头韧性。

基于上述试验结果,得到接头在拉伸载荷作用下的裂纹萌生与扩展机制,如图 9 所示。由于焊缝内原始 β 相晶界两侧片层 α 层之间存在较大的取向差,微孔优先在粗大的柱状原始 β 相晶界处形核。随着应变的增加,微孔不断长大并发生聚集,从而演化为微裂纹,该微裂纹进一步扩展并相互连通形成裂纹。由于晶界 α 相分布不连续且与相邻片层 α 相和针状 α' 相取向存在差异,导致裂纹在扩展过程中发生偏转,使其扩展路径由原始 β 相晶界逐渐转入晶内。裂纹在原始 β 相晶内扩展过程中,当遇到较薄的片层 α 相时,倾向于直接穿透 α 相内部扩展;当遇到较厚的片层 α 相或针状 α' 相时,裂纹更易沿 α 或 α' 晶界进行扩展;当裂纹扩展至下一个原始 β 相晶界时,若晶界上存在一定厚度的 α_{GB} 相时,会对裂纹扩展起到一定阻碍作用,使裂纹发生偏转。

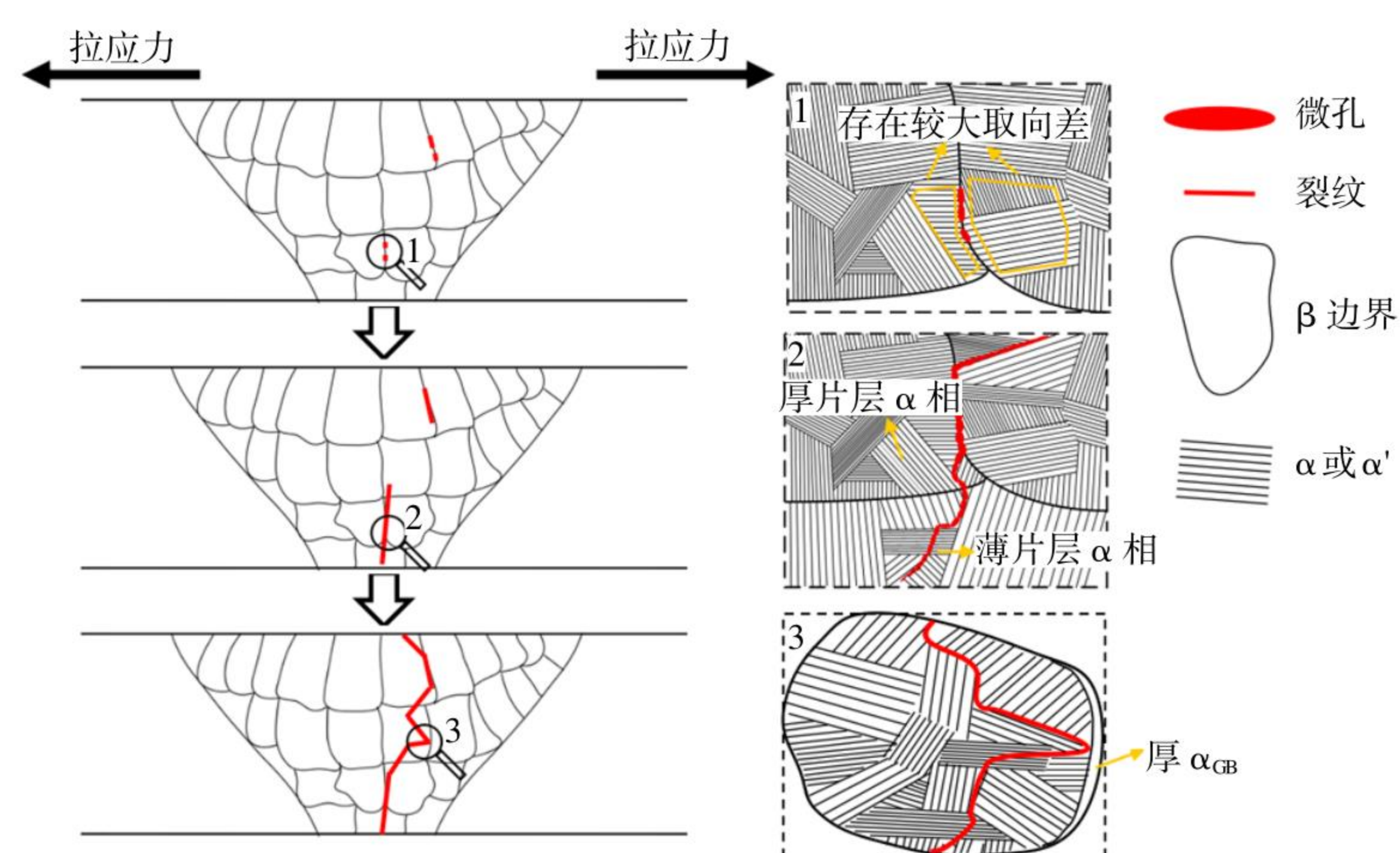


图 9 拉伸载荷下焊缝断裂失效过程示意图

Fig.9 Schematic of fracture failure process of the welded joint under tensile loading

随着裂纹尺寸的增大,裂纹扩展驱动力迅速增大,当其超过焊缝组织所提供的阻裂能力时,裂纹发生了失稳扩展,裂纹之间迅速连通,最终导致接头发生瞬间断裂。

综上所述,高热输入条件下较厚的片层 α 相和晶界 α 相,对裂纹扩展路径起到阻碍作用,使裂纹扩展更加曲折,从而延缓裂纹的失稳扩展,提升了接头的韧性。

3 结论

(1) 在本研究所采用的焊接参数范围内,采用多层多道 TIG 焊接工艺可获得成形良好、未出现明显宏观缺陷的 TC4ELI 钛合金接头。接头组织沿 BM 到焊缝 FZ 呈现明显的梯度演化,由初生 α_p 相和颗粒状 $\beta+\alpha$ 相逐步过渡为针状 α' 相和片层 α 相。

(2) 随着焊接热输入的增加,焊缝熔合区原始 β 晶粒尺寸整体呈增大的趋势,针状 α' 相的长宽比及含量增加,晶界 α 相和片层 α 相增厚,焊缝组织中大角度晶界比例有所提高。

(3) 在本文参数范围内,随焊接热输入的增加,FZ 硬度和接头抗拉强度均有所升高。高热输入下接头的伸长率相对中、低热输入接头更高。焊缝内的针状 α' 相有利于提高焊缝硬度和抗拉强度,厚片层 α 相则能改善接头的伸长率。

(4) 拉伸断口均呈现以韧窝为主的形貌特征,呈韧性断裂特征。高焊接热输入条件下 β 晶内形成的厚片层 α 和晶界 α 相,使裂纹扩展过程更加曲折,从而延缓裂纹的失稳扩展,提升了接头的韧性。

参考文献:

- [1] 马小俊,王金杰,张得扬,等. TC4ELI 钛合金 TIG 焊接头超声冲击后的性能研究 [J]. 兵器材料科学与工程,2026,49(1):62-67.

- [2] 刘清华,惠松骁,叶文君,等. 不同组织状态 TC4ELI 钛合金动态力学性能研究[J]. 稀有金属,2012,36(4):517-522.
- [3] 张纪奎,酆正能,邱志平,等. 钛合金结构损伤容限设计可行性研究[J]. 航空学报,2009,30(4):763-767.
- [4] 王海,魏芬绒,崔文俊,等. 超低间隙 TC4 钛合金形变热处理工艺[J]. 材料热处理学报,2015,36(1):52-55.
- [5] 张进前,熊毅,刘学文,等. 激光冲击强化对 TC4ELI 合金焊接接头微观组织及腐蚀性能的影响[J]. 中国激光,2025,52(8):133-144.
- [6] Wang F, Cui W. Experimental investigation on dwell-fatigue property of Ti-6Al-4V ELI used in deep-sea manned cabin[J]. Materials Science and Engineering A,2015,642:136-141.
- [7] 张滨,田达,宋竹满,等. 深潜器耐压壳用钛合金保载疲劳服役可靠性研究进展[J]. 金属学报,2023,59(6):713-726.
- [8] 陈昊睿,罗玖田,冯志强,等. 钛合金熔化焊技术研究现状及发展趋势[J]. 电焊机,2025,55(8):1-23.
- [9] 孙文君,王善林,陈玉华,等. 钛合金先进焊接技术研究现状[J]. 航空制造技术,2019,62(18):63-72.
- [10] Tolvanen S, Pederson R, Klement U. Microstructure and mechanical properties of Ti-6Al-4V welds produced with different processes[J]. Materials,2024,17(4):782.
- [11] Yi H, Lee Y, Lee K. Influences of the welding heat input and the repeated repair welding on Ti-3Al-2.5V titanium alloy[J]. Acta Metallurgica Sinica(English Letters),2015,28(6):684-691.
- [12] 王厚勤,甘书赫,王一帆,等. 60 mm 厚 TC4ELI 钛合金电子束焊接接头组织与力学性能研究[J]. 材料开发与应用,2024,39(6):35-43.
- [13] Du J, Liu H, Wang F, et al. Effects of heat input on microstructure evolution,mechanical and corrosion properties of TC4 alloy by keyhole TIG welding[J]. Journal of Materials Research and Technology,2023,27:5266-5277.
- [14] Liu H, Ding X, Zhang D, et al. Study on microstructural evolution and fracture mechanism of titanium alloy narrow gap laser-arc hybrid welded joints under different heat inputs [J]. Metallurgical and Materials Transactions B,2026,57:848-868.
- [15] Vypana J, Babu N K, Talari M K, et al. Effect of DC micro-pulsing on microstructure and mechanical properties of TIG welded Ti-6Al-4V[J]. Crystals,2024,14(11):919.
- [16] Li Z, Zhao W, Xiao G, et al. Impact of microstructure evolution on the corrosion behaviour of the Ti-6Al-4V alloy welded joint using high-frequency pulse wave laser [J]. Journal of Materials Research and Technology,2023,24:4300-4314.
- [17] Rao H, Liu D, Jin F, et al. Cooling rate-mediated evolution of lamellar α colony microtexture in a near- α titanium alloy during β processing [J]. Materials & Design,2025,259:114890.
- [18] 郑剑云. TC4 钛合金中厚板脉冲 TIG 焊接接头组织及性能研究[D]. 湘潭:湘潭大学,2024.
- [19] Karthikeyan T, Saroja S, Vijayalakshmi M. Evaluation of misorientation angle-axis set between variants during transformation of bcc to hcp phase obeying Burgers orientation relation [J]. Scripta Materialia,2006,55(9):771-774.
- [20] 杨清福,曾才有,张宇鹏,等. 大厚度 TC4 钛合金窄间隙焊接接头组织性能研究[J]. 电焊机,2023,53(8):8-15.
- [21] Li H, Sun E, Wang K. Influence of lamellar- α geometry characteristics on mechanical properties of bimodal microstructure in Ti-6Al-4V alloy [J]. Materials Science and Engineering A,2025,927:148018.
- [22] Dai J, Tang B, Wang C, et al. Deciphering the impact toughening mechanism of $\alpha + \beta$ titanium alloy with lamellar microstructure;from crack initiation and propagation perspectives [J]. Journal of Materials Science & Technology,2025,249:214-229.
- [23] 龙玮,张松,梁益龙,等. 不同片层厚度 TC4 合金的原位拉伸变形行为[J]. 材料热处理学报,2019,40(6):61-68.
- [24] Book T A, Sangid M D. Strain localization in Ti-6Al-4V Widmanstätten microstructures produced by additive manufacturing [J]. Materials Characterization,2016,122:104-112. 