DOI：10.7512/j.issn.1001-2303.2026.08.03

HR-2抗氢高强钢管激光焊接工艺及力学性能研究

张成蹊[1]，涂　画[1]，蒋俊俊[1]，周晓辉[1]，刘福运[1,2]，徐富家[3]，韩晓辉[4]，武鹏博[3]，檀财旺[1,2*]

1. 哈尔滨工业大学（威海）山东省特种焊接技术重点实验室，山东 威海 264209
2. 青岛哈尔滨工业大学（威海）研究院，山东 青岛 266109
3. 中国机械总院集团哈尔滨焊接研究所有限公司，黑龙江 哈尔滨 150028
4. 中车青岛四方机车车辆股份有限公司，山东 青岛 266111

摘　要：针对HR-2抗氢高强钢管止口结构激光焊接中熔透控制和缺陷抑制要求较高的问题，采用+2 mm离焦激光焊接工艺，研究了焊接速度（1.0~2.0 m/min）和激光功率（800~1 400 W）对接头成形质量、内部缺陷、显微组织及拉伸性能的影响规律。结果表明，在试验参数范围内均可获得连续焊缝，截面呈典型“酒杯型”深熔焊形貌。结合止口高度2.2 mm和管壁厚度2.88 mm，选取熔深适中的S1、S2和S3三组工艺进行对比。S2工艺（1.5 m/min、1 300 W）焊缝表面较平整，熔深适中，X射线检测和纵截面观察未见明显缺陷；S1工艺止口附近存在局部未熔合或未完全熔透风险；S3工艺出现少量气孔倾向。焊缝组织主要为奥氏体柱状晶和树枝晶，熔合线及止口附近因冷却速度较快保留少量残余δ-铁素体。S2接头抗拉强度和断后伸长率分别为728 MPa和37.6%，断口内、外侧均以韧窝形貌为主，表现出较好的强塑性匹配。

关键词：抗氢高强钢；激光焊接；止口结构；焊缝成形；力学性能

中图分类号：TG456.7　　**文献标识码：**A　　**文章编号：**1001-2303（2026）08-0032-09

重点专刊—高强钢优质高效焊接

Laser Welding of HR-2 Hydrogen-Resistant High-Strength Steel Pipes: Process Parameters and Mechanical Properties

ZHANG Chengxi[1], TU Hua[1], JIANG Junjun[1], ZHOU Xiaohui[1], LIU Fuyun[1,2], XU Fujia[3], HAN Xiaohui[4], WU Pengbo[3], TAN Caiwang[1,2*]

1. Shandong Provincial Key Laboratory of Special Welding Technology, Harbin Institute of Technology at Weihai, Weihai 264209, China
2. Harbin Institute of Technology (Weihai) Qingdao Research Institute, Qingdao 266109, China
3. Harbin Welding Institute Limited Company, China Academy of Machinery Science and Technology Group, Harbin 150028, China
4. CRRC Qingdao Sifang Co., Ltd., Qingdao 266111, China

Abstract: To meet the requirements for penetration control and defect suppression in laser welding of HR-2 hydrogen-resistant high-strength steel pipes with stepped-groove joints, a laser welding process with a defocusing distance of +2 mm was adopted. The effects of welding speed and laser power on weld formation, defects, microstructure and tensile properties were investigated. The results show that continuous welds can be obtained within the tested parameter range, and the weld cross-sections exhibit a typical wine-glass-shaped deep-penetration morphology. Considering the stepped-groove height of 2.2 mm and the pipe wall thickness of 2.88 mm, three representative parameter sets with moderate penetration depth, namely S1, S2 and S3, were selected for comparison. The S2 condition (1.5 m/min, 1 300 W) produces a relatively smooth weld surface, moderate penetration depth and no obvious defects according to X-ray inspection and longitudinal-section observation. The S1 condition shows a risk of local incomplete fusion or insufficient penetration near the stepped-groove root, whereas the S3 condition exhibits a slight tendency toward pore formation. The weld microstructure is mainly composed of austenitic

收稿日期：2026-07-01　　**修回日期：**2026-08-09
基金项目：国家自然科学基金项目（52475332）；国家自然科学基金项目（52505360）；山东省自然科学基金（ZR2025MS722）
通讯作者：檀财旺（1986—），博士，教授，主要从事激光焊接、熔覆、增材制造技术研究。E-mail：tancaiwang@hitwh.edu.cn。

columnar and dendritic grains, with a small amount of residual δ-ferrite retained near the fusion line and stepped-groove root owing to the relatively high cooling rate. The S2 joint shows a tensile strength of 728 MPa and an elongation of 37.6%, and both the inner and outer fracture surfaces are dominated by dimples, indicating a good strength-ductility balance.

Keywords: hydrogen-resistant high-strength steel; laser welding; stepped-groove joint; weld formation; mechanical properties

引用格式：张成蹊，涂画，蒋俊俊，等. HR-2抗氢高强钢管激光焊接工艺及力学性能研究[J]. 电焊机，2026，56(8)：32-40.

Citation: ZHANG Chengxi, TU Hua, JIANG Junjun, et al. Laser Welding of HR-2 Hydrogen-Resistant High-Strength Steel Pipes: Process Parameters and Mechanical Properties[J]. Electric Welding Machine, 2026, 56(8): 32-40.

0　引言

抗氢高强钢在高温高压临氢环境中表现出良好的抗氢损伤能力、优异的抗氢脆性能和力学性能[1-2]，在能源、化工与机械等工业领域常被用作内流道结构材料。抗氢高强钢管材焊接接头的质量直接关系到整个系统的安全性与运行可靠性。由于内流道结构特殊，该类管材焊接需满足极为严格的技术要求，包括气孔的严格控制、熔透深度的可靠保证、高精度加工质量以及优良的接头强度。

目前，抗氢钢管的焊接研究采用电弧焊或电子束焊等方法。陈保国等[3]采用焊条电弧焊和埋弧自动焊工艺焊接R-HIC抗氢钢，获得了满足脱硫反应器技术参数要求的优质接头。王群等[4]基于Box-Behnken设计试验方案和响应面法，建立了HR-2抗氢钢电子束插接焊焊接工艺参数与预测响应值之间的统计模型，实现了焊缝截面形貌与接头强度的最佳组合，优化了焊接工艺参数。Liu等[5]通过调整束流、焊接速度、聚焦电流和摆动幅度等参数对HR-2抗氢钢进行真空电子束焊接，获得了钟罩形焊缝接头，其综合力学性能最佳。

然而，常规电弧焊存在热影响区大、热量分布不均匀等问题，易导致焊接变形和应力集中，且效率较低等；电子束焊接设备价格昂贵且需在真空环境下操作，对真空系统的维护要求高[6]，限制了其大规模推广和部件制备效率。相比之下，激光焊接技术因能量密度高、焊接速度快、热影响区小、焊接变形小、试验成本相对低等优点[7-9]，在高效、高精度、高质量焊接领域备受关注。

针对抗氢钢的激光焊接，相关学者进行了一系列研究。雷华东等[10]采用抗氢不锈钢棒制备焊接试件，研究了激光焊接抗氢不锈钢的接头力学性能和金相组织，发现激光焊接抗氢不锈钢接头塑性与母材相比有所降低。刘航天等[11]研究了05Cr17Ni4Cu4Nb马氏体不锈钢/HR-2抗氢钢激光焊接接头的组织和性能，发现焊缝中心区域因冷却时间长，晶粒易长大，熔合线附近主要为柱状树枝晶，而熔池快速冷却区域的晶粒生长受到抑制。然而，当前抗氢钢激光焊接接头仍存在气孔缺陷及焊缝组织劣化等问题，力学性能难以满足实际工程应用的高标准要求，需进一步开展激光焊接工艺优化、气孔抑制方法以及焊缝组织调控与性能提升方面的深入研究。

基于以上研究背景，本文以HR-2抗氢高强钢管为研究对象，在+2 mm正离焦条件下，通过调整焊接速度和激光功率，系统研究工艺参数对接头气孔缺陷、微观组织及力学性能的影响规律，旨在为该类管材的激光焊接工程应用提供工艺依据和数据支撑。

1　试验材料及方法

1.1　试验材料

焊接材料为HR-2抗氢高强钢，化学成分如表1所示。图1所示为两种不同材料规格。其中，不带夹持端的小尺寸试样为工艺试验用件（见图1a），带有夹持端的大尺寸试样为拉伸试验样件（见图1b）。图1c为母材的微观组织，该材料呈典型奥氏体基体组织，奥氏体多呈现等轴晶粒，有大量奥氏体孪晶存在，且在奥氏体晶粒内部或晶粒边界分布有细小的高温铁素体。

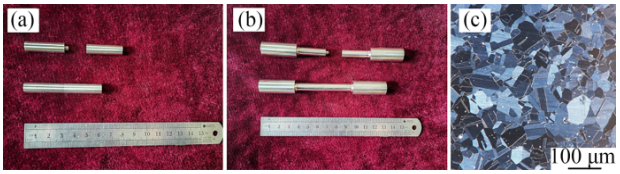
1.2　激光焊接过程

为保证焊接质量稳定可控，焊前对试样进行表面预处理。首先采用有机清洗剂去除试样表面油污，再以无水乙醇超声清洗去除残留清洗剂和酸洗残留物；随后将试样置于90 ℃条件下烘干1~2 h，取

表1 HR-2母材化学成分(质量分数,%)

Table 1 Chemical composition of base metal(BM) HR-2 (wt. %)

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	N	Fe
0.033	0.230	9.235	0.005	0.004	19.30	7.40	0.32	Bal.



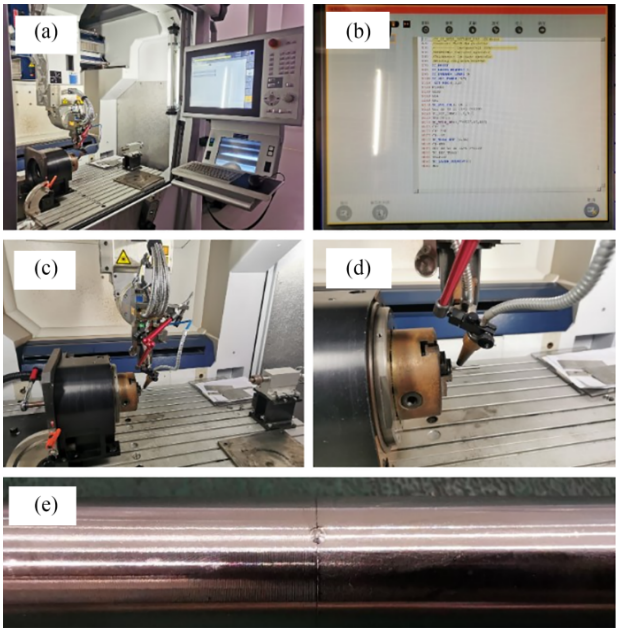
(a)工艺试验件 (b)拉伸试验件 (c)母材组织状态

图1 试验材料

Fig. 1 Experimental materials

出后立即进行焊接试验。

焊接设备及焊接装配如图2所示。焊接设备为通快公司TLC3002激光器,最大输出功率3 kW,光束质量8 mm·mrad,焦点光束半径0.54 mm,激光波长1.03 μm。焊接前先对工件进行激光点固(功率700 W,占空比50%,离焦量0 mm)。共点焊两点,间隔180°。点固后(见图2e)调整工件装配位置,保护气以与光束轴线成45°旁轴方式吹送,保护气为99.99%氩气,流量20 L/min。对设备进行激光焊接程序编写,为减小收光弧坑对表面成形质量的影响,采用焊接360°后继续输出光束,并在90°内持续



(a)焊接设备;(b)焊接程序;(c)焊接装配;(d)保护气及光束位置定位;(e)试验件点固

图2 焊接设备及焊接装配

Fig. 2 Welding equipment and welding assembly

衰减光束至停止出光(见图2b)。焊接后,使用钢丝刷对表面烟尘进行打磨。

相关研究表明,正离焦和高焊速可优化焊缝成形并抑制气孔缺陷[12]。因此,本研究在+2 mm离焦量下,系统研究了不同焊接速度和激光功率对焊接质量的影响。

1.3 试验分析方法

焊接完成后,首先对焊接接头进行宏观形貌观察以评估其表面成形质量。随后对焊缝部位进行X射线无损探伤以评价焊缝气孔率。利用电火花线切割截取焊缝处金相试样,分析接头的熔透情况、焊接缺陷及显微组织形态等。焊缝横截面金相试样宽度为10 mm,纵截面金相用于观察气孔状态,取样方法如图3所示。

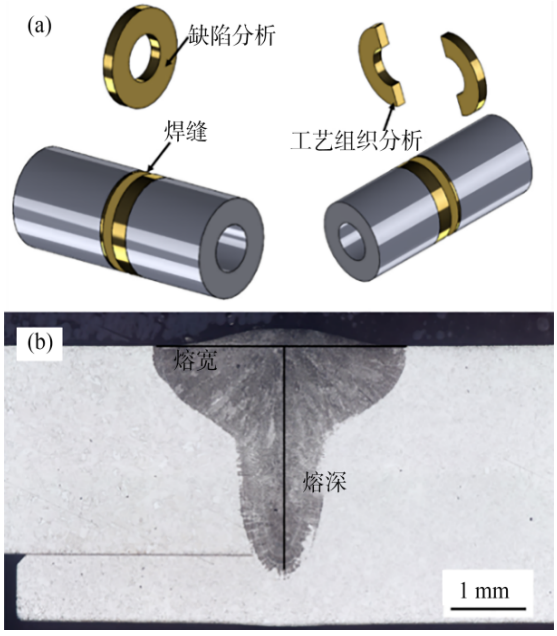


图3 取样位置和典型截面形貌特征

Fig. 3 Sampling position and typical weld cross-section morphology

对微观组织和缺陷分析试样进行金相镶嵌、砂纸打磨和抛光后,使用10%草酸溶液在恒压10 V下电解腐蚀90 s。通过DSX510光学显微镜观察横截面金相组织及成形特征,在ZeissMERLINCompact场发射扫描电子显微镜(SEM)上通过背散射电子衍射技术(EBSD)技术分析组织类型和取向。使用SUNSUTM5105X电子万能试验机进行室温拉伸测试,拉伸速率为1.5 mm/min,并对断口表面进行SEM观察。

2　试验结果及讨论

2.1　焊缝成形特征

图 4 为+2 mm 离焦量条件下不同焊接速度和激光功率组合下焊缝的表面形貌。各参数下焊缝均可连续成形，表面未见明显咬边和飞溅粘附，表明本试验参数范围内焊接过程稳定性良好。

图 5 为不同工艺参数下焊缝截面形貌。所有试样的焊缝横截面均无明显气孔、夹杂、裂纹缺陷，呈典型的“酒杯型”深熔焊特征——上部宽、下部深而窄，左右基本对称。表面平整度存在差异：低焊速配合较高功率时，焊缝表面更易出现中心余高；而 1.5~2.0 m/min 较高焊速下，焊缝表面更平直、成形一致性更好，表明提高焊接速度有利于抑制熔池金属过度堆积并改善外观质量。

按图 3b 提取焊缝成形特征，结果如图 6 所示。焊接速度为 1.0 m/min 时，随着激光功率的增大，熔深和熔宽均增大，深宽比变化较小；而当焊接速度较大时（1.5 m/min 和 2.0 m/min），熔深随激光功率增大显著提高，熔宽则基本不变，焊缝深宽比显著增大。这一差异源于熔深和熔宽的形成机制不同：熔深主要取决于匙孔的形成与稳定以及能量沿厚

图 4　焊缝表面成形

Fig. 4　Surface morphology of welds under different welding speeds and laser powers

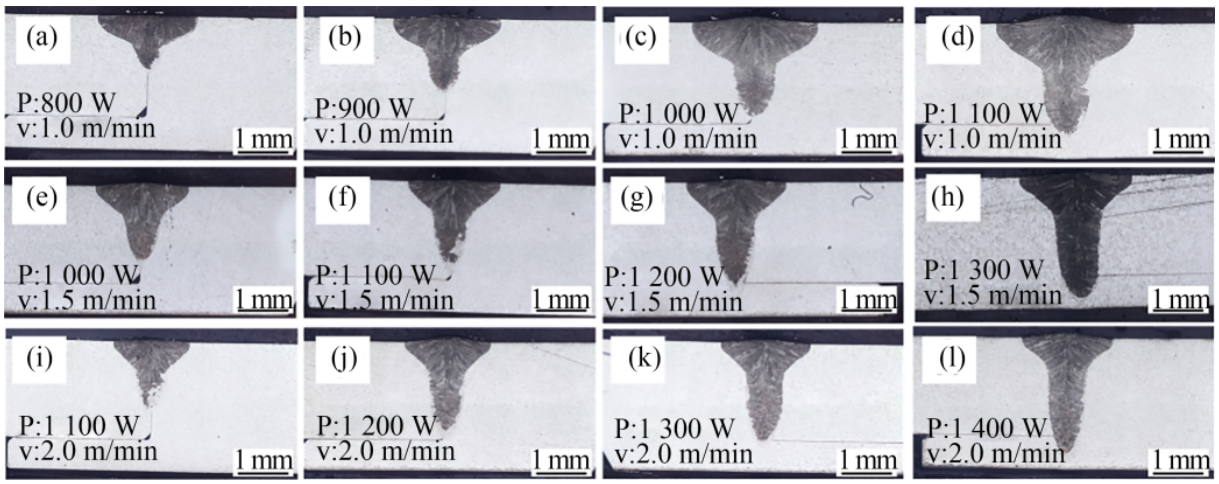
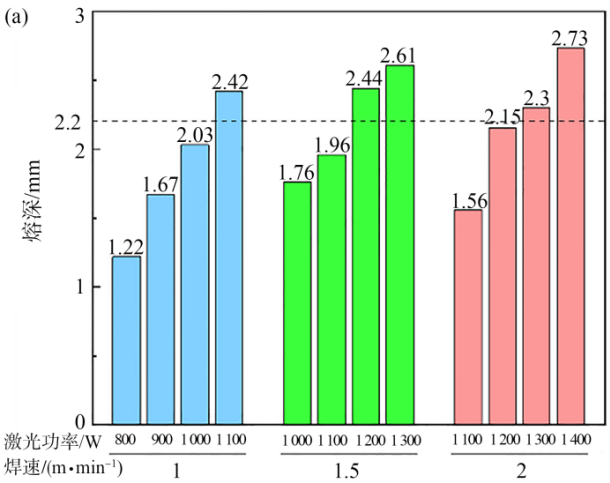
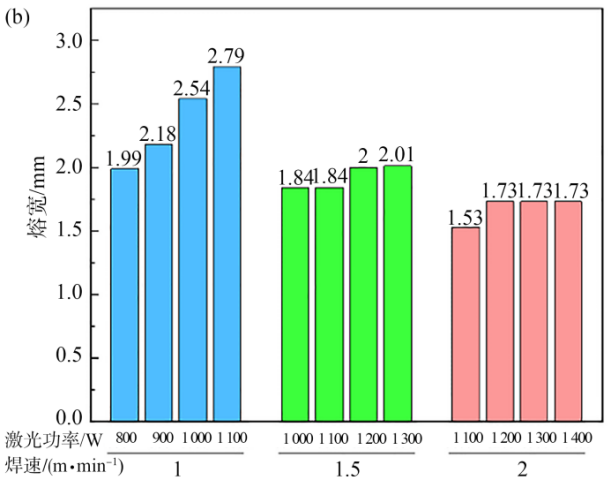


图 5　焊缝截面形貌

Fig. 5　Cross-sectional morphology of welds under different welding speeds and laser powers



(a)不同焊速下的熔深变化



(b)不同焊速下的熔宽变化

图6 焊接参数对焊缝横截面尺寸的影响

Fig. 6 Effects of welding parameters on weld cross-sectional dimensions

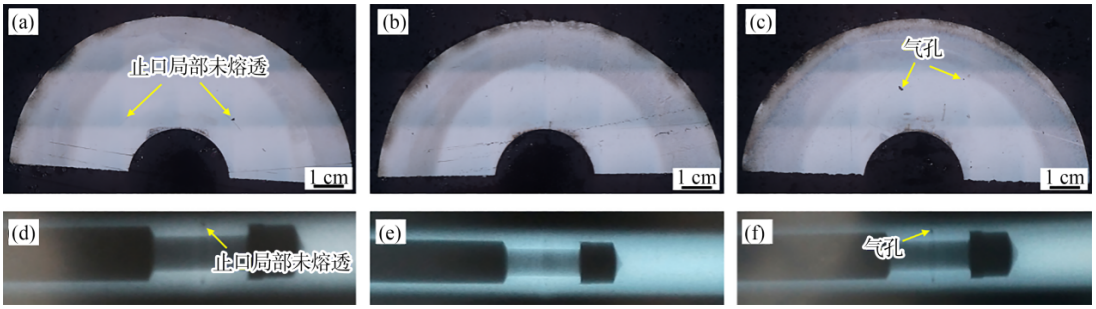
度方向的沉积，几乎等同匙孔深度，对激光功率和焊接速度变化更为敏感，功率提高时，能量向深部耦合的能力增强，直接表现为熔深增加。相比之下，熔宽远远超过激光斑点范围，其形成除受热输入影响外，还与熔池表层热传导、液态金属横向流动以及熔池存在时间密切相关。当焊接速度较高时，热源在材料表面的作用时间缩短，熔池横向铺展和热扩散受到限制，因此即使功率增加，熔宽增大仍相对有限。

由于本研究所用材料的止口高度为2.2 mm，整体壁厚为2.88 mm，结合材料结构特征与实际工况要求，筛选熔深满足2.2<h<2.88 mm的范围作为较合适的工艺窗口。该范围既有利于保证止口连接强度，也有助于避免整体壁厚完全熔穿，从而维持管件内壁成形与结构完整性。在此基础上，选取三组熔深适中的典型工艺参数用于进一步分析，即1.0 m/min–1 100 W、1.5 m/min–1 300 W和2.0 m/min–1 400 W，并依次编号为S1、S2和S3。

2.2 焊缝缺陷表征

为进一步评估气孔缺陷，对S1、S2、S3接头进行焊缝纵截面和X射线缺陷检测，结果如图7所示。可以发现，三组接头纵截面均未发现明显大尺寸气孔，但在局部熔合状态和缺陷倾向方面存在差异。

S1试样的止口区域仍可辨识出局部止口高度线，如图7a所示，说明低焊速条件下局部未熔合或未完全熔透的风险较高。X射线检测中，由于管焊件为空心结构，接头整体呈现黑色背景；其中部分熔深不足参数下止口部位会出现局部黑色斑点，如图7d所示，表明低焊速工艺下焊缝熔透稳定性不足。相比之下，S2试样未见明显气孔指示，焊缝整体熔透较好；而焊速进一步提高至2.0 m/min后，S3接头纵截面出现少量气孔，如图7c所示，说明在高焊速高功率组合下，成形效率提升的同时，气孔敏



(a-c)S1、S2、S3焊缝纵截面形貌；(d-f)S1、S2、S3焊缝X射线检测结果

图7 S1、S2和S3焊缝缺陷检测结果

Fig. 7 Defect inspection results of S1, S2 and S3 welds

感性有所增加。

2.3　焊缝微观组织

为分析焊缝组织特征，基于JMatPro采用热力学计算方法获得了本研究焊缝的平衡相分布，如图8所示。随着焊缝熔池温度逐渐降低，初生相δ-铁素体率先从液相中析出；随后奥氏体自液相中形核并开始析出，此时熔池内呈现液态金属、δ-铁素体与奥氏体三相共存状态，且δ-铁素体与奥氏体持续生长。当温度降至1 385 ℃左右时，焊缝中的δ-铁素体发生向奥氏体的固态相变。平衡状态下室温组织最终趋于单一奥氏体。

图9为S2焊缝的典型微观组织，其中图9b、9d、9f分别为图9a、9c、9e的局部放大图，图9a、9c、9e分别为焊缝的左侧、中心以及右侧。可以发现，焊缝为典型的柱状枝晶，说明熔池冷却时的温度梯度较大，导致明显的向中心的生长取向，并且焊缝中心未发现等轴晶，表明凝固后期未形成足够的大范围异质形核条件，熔池凝固主要沿原有树枝晶持续外延生长。焊缝组织以奥氏体为主，枝晶间可以发现部分黑色蠕虫状组织，推测可能形成残余δ-铁素体。

为进一步研究焊缝内的组织及晶体结构，通过EBSD对典型焊缝区域进行分析，图10为S2焊缝上层区域的EBSD结果。图10a为该区域的反极图，

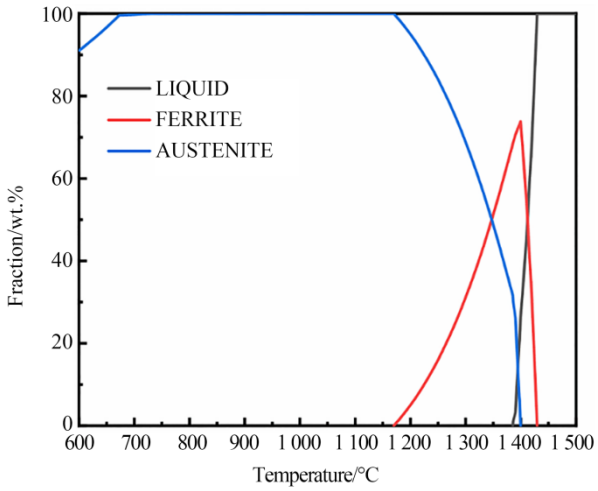
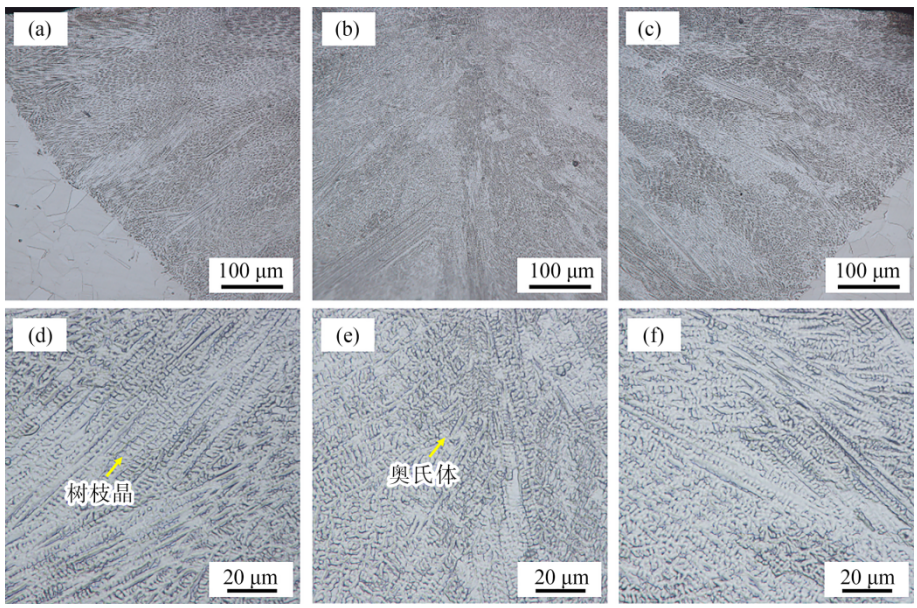


图8　焊缝组织平衡相分布

Fig. 8　Equilibrium phase distribution of weld microstructure

可以看出该材料的焊缝中心为纵向生长的树枝晶而非等轴晶，说明在纵向存在较明显的温度梯度，导致冷却时的定向散热趋势，使晶粒沿该方向快速长大，这与光镜下观察到的现象一致（见图9e）；而在中心两侧则为垂直焊缝边界生长至中心的树枝晶。图10b为该区域的相分布图，可以看出在焊缝上层区域仅存在奥氏体，而无铁素体生成，这表明在熔池上部区域冷却速度慢，铁素体向奥氏体的转变更完全。图10c为该区域的KAM图，可以发现焊缝中心区域的KAM值较小，这主要是由于该处形

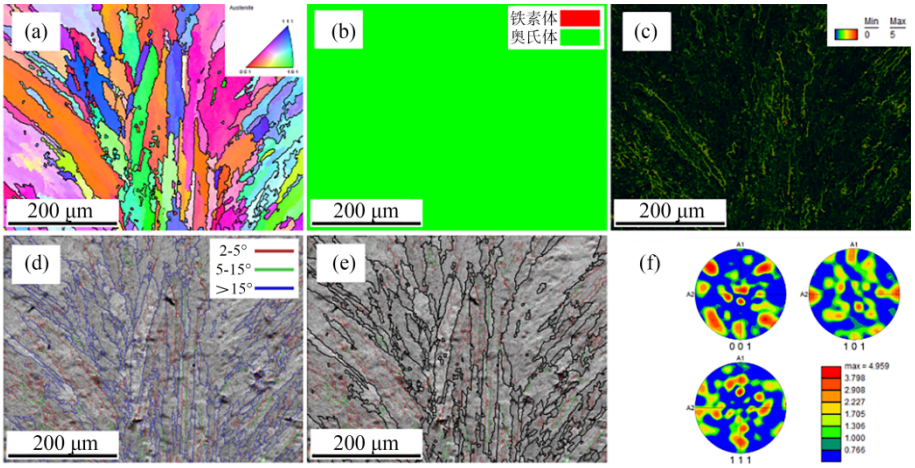


(a)焊缝左侧；(b)焊缝中心；(c)焊缝右侧；(d)左侧局部放大图；(e)中心局部放大图；(f)右侧局部放大图

图9　焊缝的典型微观组织

Fig. 9　Typical microstructures of the weld

成了全奥氏体组织，而无残余铁素体存在，导致不存在较大的晶格错配和畸变，因而位错密度较小，应力集中程度较小。图10d~10e为晶界分布，其中晶界取向差>15°的被认为是大角度晶界，5°~15°的为小角度晶界，而2°~5°的为亚晶界及位错缠结等。从该图中发现树枝晶间均为大角度晶界，而小角度晶界、亚晶界等则分布于其内部，并且可以发现正是这些区域的KAM值稍高于其他晶内区域。图10f为该区域的极图，其中A1，A2方向分别对应竖直方向和水平方向，即垂直壁厚方向和管长度方向，图中显示为奥氏体的(001)(101)(111)晶面的标准极射投影图。可以发现在该区域具有较强的晶粒生长的趋向性。对其进行进一步标定，可以发现在(001)晶面极图中央存在明显的取向集中区域，说明(001)族晶面在此区域存在大量晶粒的取向为基面取向(001)平行于A1OA2试样平面，存在基面织构。另外，发现在基圆圆周的四个对称方位存在集中取向，标定发现为{001}<110>/<$\bar{1}$10>/<1$\bar{1}$0>织构的晶粒取向，并且由此可以推断中心(001)基面织构为中心树枝晶的生长趋向。

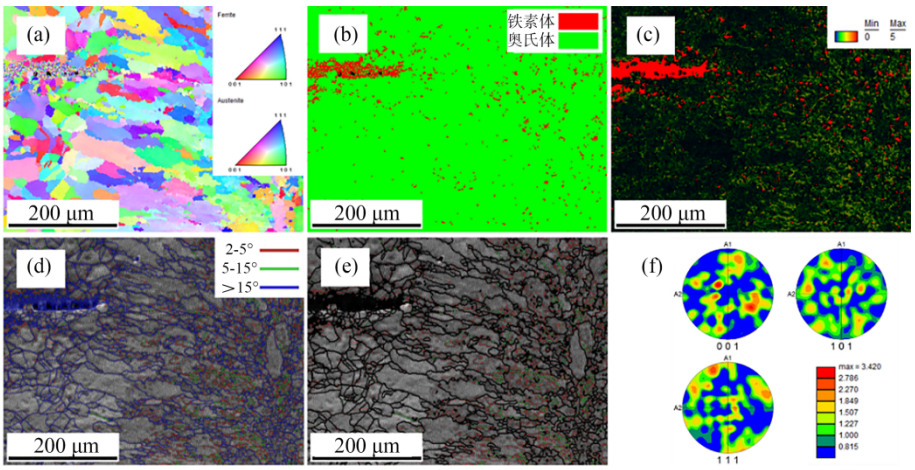


(a)反极图；(b)相分布图；(c)KAM图；(d)(e)晶粒取向差分布；(f)极图

图10　焊缝中心EBSD结果

Fig. 10　EBSD results of the weld center

图11为熔池下部熔合区边界止口处EBSD分析结果。对比可以发现，该区域焊缝内生成了部分铁素体，且在铁素体位置的KAM值较高，这是由于该处的晶格错配较大，具有较大的位错密度和晶格畸变能。相比于焊缝中心，该区域明显存在更大的位错密度。此外奥氏体边界的亚结构以及小角度



(a)反极图；(b)相分布图；(c)KAM图；(d)(e)晶粒取向差分布；(f)极图

图11　止口处EBSD结果

Fig. 11　EBSD results at the root of the bottom-locking joint

晶界也印证了前文关于快速凝固与不完全相变的分析。另外，此区域形成的少量铁素体，主要是由于熔池底部较窄，凝固时冷却快，此时高温铁素体向奥氏体转变，元素扩散时间较短，Cr元素来不及完全从铁素体中析出，形成局部富集而稳定了铁素体，导致其保留下来，并因此与周围的奥氏体保持较小的位相差。而焊缝上部区域宽度大，峰值温度高，凝固末期冷却速度相对较小，使其最终形成了全部的奥氏体组织。对极图分析可看出，该区域晶粒生长趋向对称性较差，但是存在集中取向，为{001}<111>织构的晶粒取向，这是由于此处为熔合线一侧，晶粒生长为垂直熔池边缘指向熔池内部，故而表现对称性差。由于该方向的温度梯度较大，散热速度快，且(111)晶面具有最小的晶面间距和最高的晶面指数，生长速度最快，因而在定向散热的条件下形成择优的晶粒取向。

2.4　接头力学性能

焊接接头拉伸性能测试结果如图 12 所示。结果表明，三组典型接头抗拉强度均在 670 MPa 以上，最高达到 728 MPa，延伸率最高达到 37.6%，其余接头延伸率也均在 35% 以上。其中，低焊速 S1 接头的强度和延伸率最低，分别为 675 MPa 和 35.1%；S2 试样的接头强度和延伸率最高，相比 S1 分别提高了 7.9% 和 7.1%；当焊接速度进一步增大至 2.0 m/min 时，S3 接头强度和延伸率均略有下降。结合前述成形、缺陷和组织结果可知，在本研究中，接头拉伸性能对止口熔合状态、气孔的敏感性较高，并非熔深增大即可必然带来性能同步提升，因此 1.5 m/min–1 300 W 工艺表现出更优的强塑性匹配。

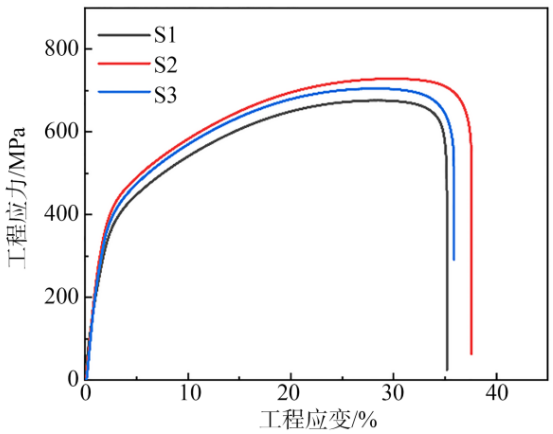
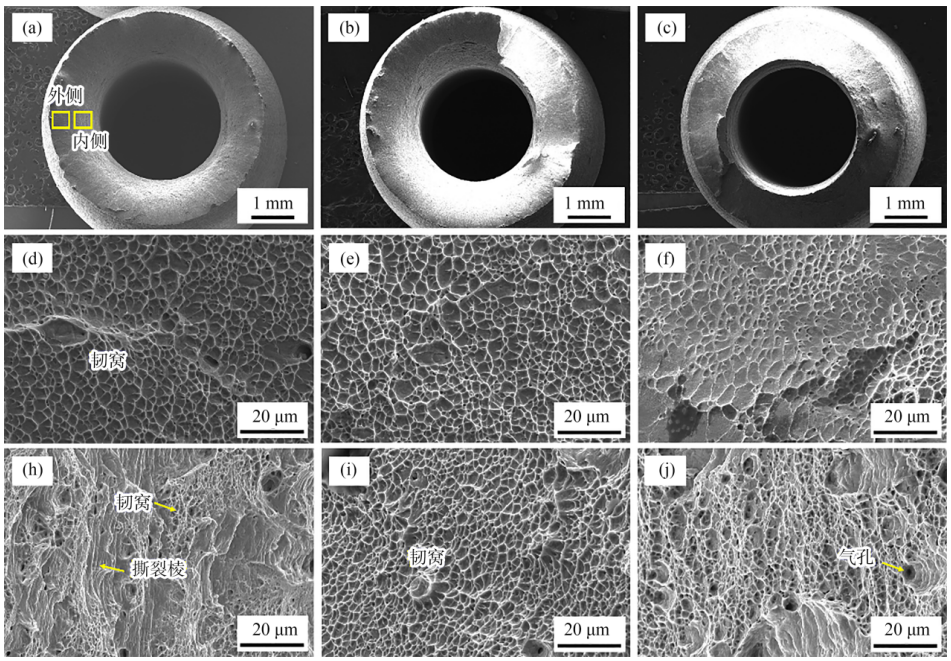


图 12　焊接接头拉伸性能曲线

Fig. 12　Engineering tensile curves of the welded joint

进一步对焊接断口进行 SEM 观察，结果如图 13 所示。对应熔池上部的断口外侧和止口区域的断口内侧（见图 13a），对断口表面形貌进行了进一步



(a-c)S1、S2、S3 宏观断口形貌；(d-f)S1、S2、S3 断口外侧局部放大图；(h-j)S1、S2、S3 断口内侧局部放大图

图 13　拉伸断口表面形貌

Fig. 13　Fracture surface morphologies of tensile samples

放大分析。可以发现，在熔池上部的断口外侧区域，S1、S2、S3试样断口表面均呈现明显韧窝形貌，说明该区域具有较好的塑性变形能力。而在止口附近的断口内侧区域，S1试样出现较明显的撕裂棱并伴有局部韧窝，表明该处抗裂纹扩展能力偏弱，这与其局部熔合不良导致的应力集中相对应；S3试样则可观察到较多浅韧窝和微气孔，说明局部气孔缺陷是其性能下降的重要影响因素。相比之下，S2试样断口内侧仍保持较均匀的韧窝形貌，说明其止口区域附近的熔合状态和组织更好，因此表现出最优的综合强塑性。该结果进一步说明，对于本研究的抗氢高强钢管焊接结构，熔透控制和缺陷抑制至关重要；由于止口处存在几何不连续，偶发熔透不稳定或局部微气孔均可能导致接头性能降低。因此，对该区域熔透状态和组织均匀性的控制，应作为后续工艺优化的重要方向。

3 结论

本文针对HR-2抗氢高强钢止口结构的激光焊接工艺进行了研究，在+2 mm离焦条件下，研究了焊接速度和激光功率对焊缝成形尺寸、缺陷特征、显微组织及力学性能的影响，主要结论如下：

（1）高焊速（1.5 m/min或2.0 m/min）对应更宽的工艺适配范围和更好的表面成形一致性。随着激光功率提高，焊缝熔深显著增加，而熔宽变化相对有限，且焊缝表面保持光滑无明显余高。其中，1.5 m/min-1 300 W和2.0 m/min-1 400 W均可获得适度熔深，但综合外观成形与缺陷控制结果，1.5 m/min-1 300 W工艺稳定性更优。

（2）适度熔深工艺下的焊缝组织以奥氏体柱状/树枝晶为主，焊缝中心区域为全奥氏体组织，组织均匀性较好；熔合线及止口附近可见少量残余δ-铁素体。EBSD结果表明，焊缝中心区域晶格畸变较小、位错密度较低，而熔合线止口处KAM值更高、组织不均匀性更明显，因此该区域更可能成为接头的局部薄弱部位。

（3）三组典型接头抗拉强度均高于670 MPa，最高达到728 MPa，延伸率最高为37.6%，其余试样延伸率均超过35%。断口总体呈现典型塑性断裂特征，表面以韧窝形貌为主。综合拉伸与断口分析可知，S2接头具有最佳强塑性匹配；S1性能下降主要与止口局部熔合不足有关，S3性能降低则与少量气孔缺陷相关。

参考文献：

[1] 赵卫君，徐祥久. Q345R（R-HIC）抗氢钢的焊接工艺研究[J]. 金属加工（热加工），2020（8）：26-28.
ZHAO W J，XU X J. Research on welding technology of Q345R（R-HIC）hydrogen resistant steel[J]. MW Metal Forming，2020（8）：26-28.

[2] 陈坤，傅延波，仲继彬，等. Q345R（R-HIC）抗氢钢高压容器制造工艺及质量控制[J]. 石油和化工设备，2024，27（7）：18-20.
CHEN K，FU Y B，ZHONG J B，et al. Manufacturing process and quality control of Q345R（R-HIC）anti-hydrogen steel pressure vessels[J]. Petro & Chemical Equipment，2024，27（7）：18-20.

[3] 陈保国，史维琴，李晓龙. 循环氢脱硫塔用Q345R（R-HIC）钢焊接工艺评定[J]. 电焊机，2015，45（12）：145-148.
CHEN B G，SHI W Q，LI X L. Welding procedure qualification of Q345R（R-HIC）steel for circulating hydrogen desulfurization tower[J]. Electric Welding Machine，2015，45（12）：145-148.

[4] 王群，余洋，钱志强. 基于响应面法的HR-2抗氢钢电子束插接焊工艺参数优化[J]. 焊接学报，2023，44（4）：50-57.
WANG Q，YU Y，QIAN Z Q. Optimization of electron beam plug welding parameters of HR-2 hydrogen-resistant steel based on response surface method[J]. Transactions of the China Welding Institution，2023，44（4）：50-57.

[5] LIU H K，ZHAO J，HAN K，et al. Comparative study on microstructure and properties of HR-2 anti-hydrogen steel weld joints with different section shapes by vacuum electron beam welding[J]. Journal of Materials Research and Technology，2024，30：9343-9354.

[6] 王泽鹏，唱通，白正军. 激光焊接技术在新能源汽车电机制造领域的应用及发展[J]. 金属加工（热加工），2015（4）：33-34.
WANG Z P，CHANG T，BAI Z J. Application and development of laser welding technology in the manufacturing field of new energy vehicle motors[J]. MW Metal Forming，2015（4）：33-34.

[7] 吴会强，冯吉才，何景山，等. 电子束焊接过程温度应

下转第67页