

DOI: 10.3901/JME.2021.02.053

# 12Cr/30Cr2Ni4MoV 异种转子钢焊接接头 微区冲击韧性研究\*

朱 波<sup>1</sup> 王文科<sup>1</sup> 郭 洋<sup>1,2</sup> 熊建坤<sup>2</sup> 张建勋<sup>1</sup>

(1. 西安交通大学金属材料强度国家重点实验室 西安 710049;

2. 东方电气集团东方汽轮机有限公司长寿命高温材料国家重点实验室 德阳 618000)

**摘要:** 采用窄间隙钨极氩弧焊(Narrow-gap tungsten inert gas, NG-TIG)和窄间隙埋弧焊(Narrow-gap submerged arc welding, NG-SAW)组合焊接技术制造了带有过渡层的异种转子钢焊接接头(12Cr/30Cr2Ni4MoV)。采用微剪切试验获得了接头微区的剪切强度,通过分区测试法获得了微区脆转变温度 FATT<sub>50</sub>,研究了显微组织对微区硬度、强度和韧性的影响。研究表明,焊接接头的硬度和剪切强度分布特征基本一致,热影响区力学性能梯度分布,熔合线界面两侧力学性能不匹配;过渡层存在局部弱化区,显微硬度为 227 HV,为整个焊接接头最为薄弱的区域;由母材 12Cr 过渡至 30Cr2Ni4MoV,接头微区脆转变温度 FATT<sub>50</sub> 逐渐降低;20 ℃下,母材 30Cr2Ni4MoV 及其热影响区冲击韧性优异,裂纹萌生于基体/第二相界面,通过微孔聚集发生韧性断裂,其余微区均发生准解理断裂,焊缝冲击韧性最差。

**关键词:** 异种转子钢; 焊接接头; 显微组织; 力学性能

**中图分类号:** TG407

## Research on Impact Toughness in Microzones of 12Cr/30Cr2Ni4MoV Dissimilar Rotor Steel Welded Joint

ZHU Bo<sup>1</sup> WANG Wenke<sup>1</sup> GUO Yang<sup>1,2</sup> XIONG Jiankun<sup>2</sup> ZHANG Jianxun<sup>1</sup>

(1. State key Laboratory of Mechanical Behavior for Materials, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049;

2. State Key Laboratory of Long-life High Temperature Materials,  
Dongfang Steam Turbine Limited Company, Deyang 618000)

**Abstract:** The dissimilar rotor steel welded joint (12Cr/30Cr2Ni4MoV) with buttering layer is fabricated by using the combined welding technology of narrow-gap tungsten inert gas (NG-TIG) and narrow-gap submerged arc welding (NG-SAW). The shear strength of joint microzone is obtained by microshear test, and the ductile-brittle transition temperature FATT<sub>50</sub> of microzones is obtained by partition test. The influence of microstructure on hardness, strength and toughness of microzones is investigated. The results indicate that the distribution characteristics of hardness and shear strength in welded joint are basically the same. The mechanical properties of HAZs exhibit gradient distribution, and interface mechanical properties mismatch on both sides of the fusion line. There is a local weakening area in buttering layer, and the micro-hardness value is 227 HV, which is the weakest area of the whole welded joint. From base metal 12Cr to 30Cr2Ni4MoV, the ductile-brittle transition temperature FATT<sub>50</sub> of joint microzones gradually decreases. At 20 ℃, the impact toughness of 30Cr2Ni4MoV and its heat affected zone is excellent, with generation of cracks at the interface between matrix and second phase, ductile fracture occurs through the aggregation of micropores. Quasi-cleavage fracture occurs in all the other microrozones, and the impact toughness of welded metal is the weakest.

**Key words:** dissimilar rotor steel; welded joint; microstructure; mechanical properties

\* 国家自然科学基金(51875442)和国家科技重大专项(2010ZX06004-013-03-03HZ02)资助项目。20200606 收到初稿, 20200920 收到修改稿

## 0 前言

转子作为汽轮机核心部件之一,其安全可靠性是机组正常运行的重要保证。由于锻件尺寸的限制,大功率汽轮机广泛采用焊接转子<sup>[1]</sup>。高温和低温工作区采用不同等级材料进行焊接的转子,具有生产周期短、制造成本低、满足转子不同部位工况要求等优势,合理地解决了整锻转子的局限性,逐渐成为国内外研究的热点。由于异种材料的回火软化行为差别较大,较难通过一次焊后热处理实现两种材料热影响区(Heat affected zone, HAZ)的性能调整,故通常在异种材料中间加入过渡层<sup>[2]</sup>,不仅解决了热处理问题,还可抑制元素迁移和减小残余应力。

由于非均匀的焊接热循环作用,焊接接头微区及微区内部会产生不同程度的组织梯度和力学不均匀性。特别是对于异种转子材料的焊接,焊接接头易成为整个焊接转子最为薄弱的区域,故有必要对接头微区的组织及力学性能进行深入研究。

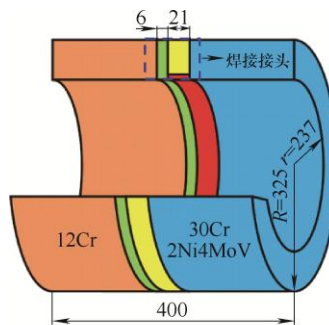
蔡雄军等<sup>[3]</sup>研究了 28CrMoNiV/25Cr2Ni4MoV 异种转子钢焊接接头的组织与力学性能,研究表明焊接接头的室温抗拉强度低于母材(Base metal, BM),断裂位置位于过渡层(Buttering layer, BL),同时,接头硬度最低值出现在了过渡层区域,冲击韧性最差位置位于 28CrMoNiV 和 SAW 焊缝(Welded metal, WM)区域。WANG 等<sup>[4-5]</sup>采用了局部分层拉伸法和漏斗形试样对加入过渡层的异种钢焊接转子接头(30Cr1Mo1V/30Cr2Ni4MoV)的完整性进行了研究,并对接头微区性能进行了评价,研究发现接头局部力学性能具有不均匀性,特别是对于热影响区和熔合线,呈现出梯度分布的特征。谭龙等<sup>[6]</sup>通过数值模拟方法研究了 20Cr2NiMo 转子钢窄间隙焊接接头微区的冲击韧性,研究发现接头微区冲击韧性受屈服强度和失效应变影响较大,焊缝中心的冲击韧性最差。

目前关于 12Cr/30Cr2Ni4MoV 异种转子钢焊接接头的组织及力学性能研究甚少,本文全面考察了 12Cr/30Cr2Ni4MoV 异种接头的微观组织及常规力学性能,研究了微观组织对接头硬度、强度及冲击韧性的影响,为同类异种焊接转子的安全设计及运行提供试验依据和理论研究。

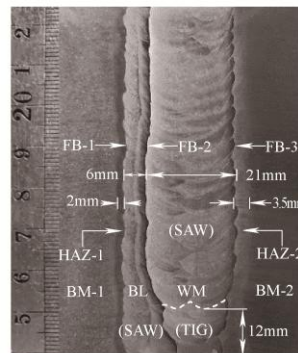
## 1 试验材料和过程

### 1.1 试验材料及焊接

研究对象为东方电气集团东方汽轮机有限公司制造的高中低压一体式异种焊接转子模拟件,其接头结构与宏观形貌如图 1 所示。



(a) 焊接转子模拟件示意图



(b) 焊接接头宏观形貌

图 1 焊接转子模拟件与接头宏观形貌

母材 12Cr(BM-1)为高中压转子材料,与传统的 CrMoV 钢相比,具有更高的蠕变强度,长期运行后的蠕变变形量及寿命损耗为 CrMoV 钢的 1/2~1/3,韧度为其 1.3~1.5 倍<sup>[7]</sup>。母材 30Cr2Ni4MoV (BM-2)具有淬透性高、综合力学性能好、抗应力腐蚀性能好等优点,通常用作火电和核电的低压转子材料<sup>[8-9]</sup>。

过渡层采用埋弧焊堆焊,焊材为 TG-S2CMH,接头对接采用 NG-TIG 和 NG-SAW 组合焊接技术,所用焊材为 ER110S-G,焊接接头各区域的化学成分如表 1 所示。

表 1 焊接接头各区域化学成分(质量分数) %

区域	C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo
BM-1	0.14	0.54	0.02	10.04	0.67	1.15
BL	0.10	1.16	0.19	3.23	0.11	1.22
WM	0.12	1.07	0.40	0.31	1.84	0.44
BM-2	0.22	0.23	0.02	1.56	3.6	0.37

焊缝由 BL 和 WM 组成,二者平均宽度为 6 mm 和 21 mm。WM 呈现出明显的多层多道焊形貌(23 层),由 TIG 和 SAW 焊接成形,其中 TIG 部分厚度约为 12 mm。HAZ-1 宽度较窄,约为 2 mm,HAZ-2 宽度为 3.5 mm。由于 WM 焊接成形过程中的热作用,在 BL 区域也可明显观察到热影响区的存在。另外,在接头宏观形貌上,还观察到 3 个熔合界面存在(Fusion boundary, FB)。

首先在 12Cr 一侧堆焊过渡层,完成后进行 650 °C/8 h 回火热处理,然后采用 NG-TIG 进行打底焊,再采用 NG-SAW 进行多层双道填充焊接,最后对焊接接头整体进行 580 °C/20 h 焊后热处理,焊接工艺如表 2、3 所示。

表 2 NG-TIG 焊接工艺

焊接 电流/A	焊接速度/ (mm/s)	预热 温度/°C	层间 温度/°C	焊丝 直径/mm
240	2.5	200	200~250	1.0

表 3 NG-SAW 焊接工艺

焊接 电流/A	电弧 电压/V	焊接速度/ (mm/s)	预热 温度/°C	层间 温度/°C	焊丝 直径/mm
410~450	26~28	8~9	200	200~250	3.0

## 1.2 试验过程

对母材和焊接接头微区(BM-1、HAZ-1、BL、WM、HAZ-2 和 BM-2)进行一系列不同温度的冲击试验,对冲击韧性及韧脆转变温度  $FATT_{50}$ (脆性断面率为 50% 时的温度)进行研究。冲击试验在 JBS-500B 数显半自动冲击试验机上进行,试样为标准 V 型缺口试样。

对焊接转子模拟件进行切割、磨削、抛光等处理,然后分别选用硫酸铜盐酸溶液(5 g  $CuSO_4$ +50 mL  $HCl$ +50 mL  $H_2O$ , BM-2 和 HAZ-2)和 4% 硝酸酒精(其余微区)进行腐蚀,再利用无水乙醇清洗试样表面并吹干。采用尼康 SMZ-745T 宏观显微镜、尼康 MA200 微观光学显微镜(Optical microscope, OM)、日立 SU3500 钨灯丝扫描电镜(Scanning electron microscopy, SEM)和 JEM-200CX 透射电镜(Transmission electron microscopy, TEM)进行宏观形貌和微观组织观察。显微硬度试验使用 HXD-1000TMC/LCD 显微硬度计,试验力 1.96 N,保载时间 15 s,取点间隔为 0.3 mm。微剪切试验在 INSTRON-1195 电液伺服材料试验机上进行,压头直径 2 mm,试样尺寸为 90 mm×18 mm×0.5 mm,在两个试样上共压剪 15 个点,BM 区域取 2 个点,HAZ 区域取 1 个点,BL 区域取 3 个点,WM 区域取 3 个点,熔合线界面 FB 取 1 个点,根据文献推荐的方法和公式求得微区的剪切强度<sup>[6]</sup>。

## 2 试验结果与分析

### 2.1 焊接接头冲击韧性

焊接接头微区冲击试验结果如图 2 和图 3 所示。BM-1、HAZ-1、BL、WM、HAZ-2 和 BM-2 的测试温度区间分别为 0~100 °C、-20~80 °C、-40~60 °C、-40~60 °C、-60~60 °C 和 -100~90 °C,随着试验温度的降低,接头微区的冲击吸收能量逐渐降低,脆性断面率逐渐增加。

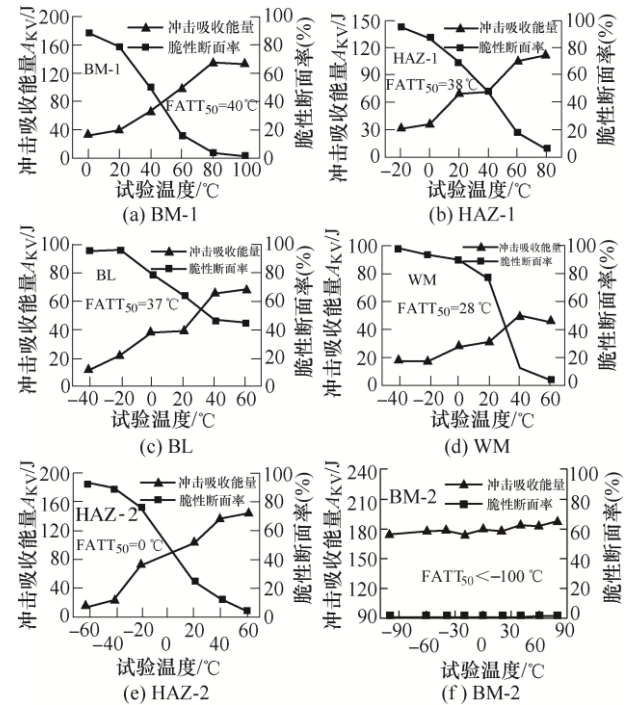
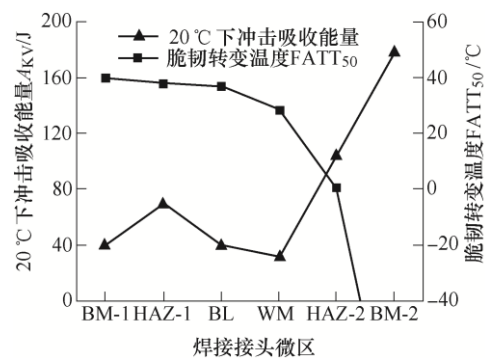


图 2 焊接接头微区冲击试验结果

图 3 焊接接头微区 20 °C 下冲击吸收能量与  $FATT_{50}$ 

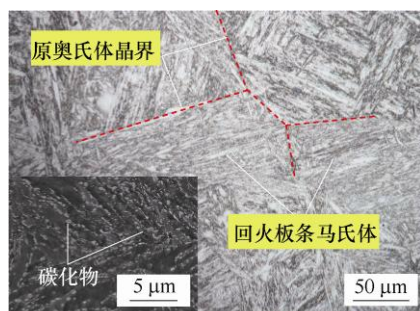
BM-1 的  $FATT_{50}$  为 40 °C,对于 BM-2,试验温度从 90 °C 降至 -100 °C,其冲击吸收能量和脆性断面率未发生明显的变化,在本次有限的试验条件下,并未获得 BM-2 的  $FATT_{50}$ ,但试验结果足以说明 BM-2 优异的冲击韧性。在 20 °C 室温试验条件下,BM-2 的冲击吸收能量为 178 J,为整个焊接接头冲击韧性最好的区域。



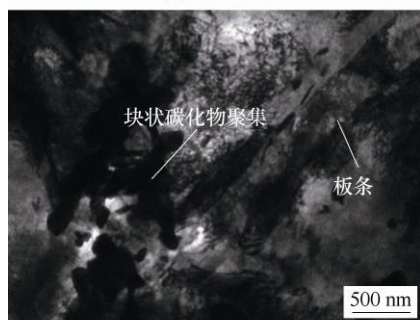
对于 HAZ, HAZ-2 的冲击韧性优于 HAZ-1, HAZ-1 和 HAZ-2 的  $FATT_{50}$  分别为 38 °C 和 0 °C。WM、BL 的  $FATT_{50}$  分别为 28 °C 和 37 °C, WM 室温冲击吸收能量最低, 为 31 J。由 BM-1 过渡至 BM-2, 焊接接头微区的  $FATT_{50}$  逐渐降低, 冲击韧性在焊接接头上呈现出梯度分布的特征。

## 2.2 影响冲击韧性的显微组织因素

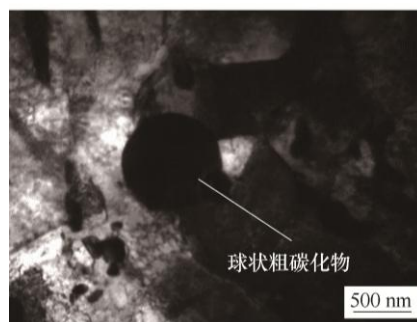
影响金属材料冲击韧性的因素很多, 就转子材料而言, 主要包括化学成分、微观组织类型、晶粒和第二相尺寸及分布特征等。BM-1 显微组织如图 4 所示, BM-1 组织为回火板条马氏体, 在原奥氏体晶粒内部分布着粗大的同向、交叉马氏体板条束。大量粒状碳化物在原奥氏体晶界和马氏体板条边界上呈链状分布, 而在马氏体板条内部只有少量碳化物存在。BM-1 原奥氏体晶粒粗大, 平均晶粒尺寸为 70~80  $\mu\text{m}$ 。晶粒尺寸对  $FATT_{50}$  影响显著, 粗晶粒受到外力作用发生塑性变形时, 晶粒变形更为不均匀, 容易造成应力集中。晶界总面积的减小, 降低了阻碍位错运动和裂纹扩展的能力; 另外, 晶界上 P、S 等杂质元素的浓度将增加, 诱发晶界有害相的析出, 从而降低钢的韧性, 提高韧脆转变温度<sup>[10]</sup>。在 TEM 下, 可观察马氏体板条形貌, 板条宽度约为 400 nm, 块状碳化物在板条边界上发生聚集, 且存在球状粗碳化物, 尺寸约为 850 nm。块状碳化物聚集和大尺寸球状碳化物由于应力集中而易成为裂纹源, 对材料韧性产生不利影响。因此, BM-1 的冲击韧性较差, 室温冲击吸收能量为 40 J, 为焊接接头中韧脆转变温度最高的区域。



(a) OM+SEM



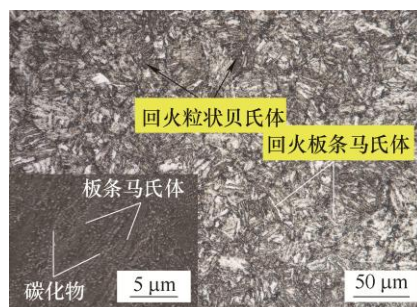
(b) TEM-1



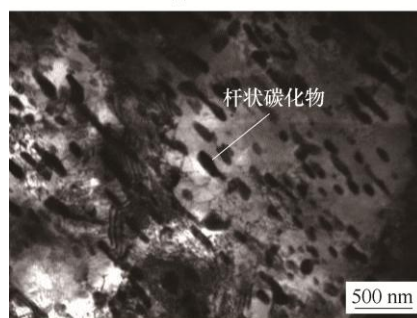
(c) TEM-2

图 4 BM-1 显微组织

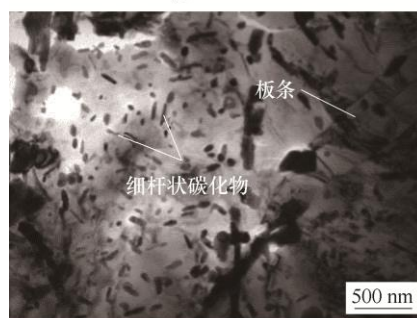
BM-2 显微组织如图 5 所示, BM-2 组织为回火板条马氏体和回火粒状贝氏体, 平均晶粒尺寸约为 30  $\mu\text{m}$ 。SEM 中可观察到平行排列的板条马氏体和弥散分布的细碳化物。BM-2 中含有更高的 Ni 含量, Ni 不形成碳化物, 几乎完全溶解于铁素体, 从而起到固溶强化的作用, Ni 可以改善材料的塑性和韧性, 尤其是材料的低温冲击性能, 从而降低了韧脆转变温度<sup>[11]</sup>。在 TEM 下, 可观察到马氏体板条形



(a) OM+SEM



(b) TEM-1



(c) TEM-2

图 5 BM-2 显微组织

貌, 宽度约为 250 nm, 杆状碳化物沿马氏体板条方向弥散分布, 平均尺寸约为 100 nm, 同时, 发现大量细小杆状碳化物弥散分布, 尺寸约为 40 nm。BM-2 中板条马氏体使其具有一定的强度, 而回火贝氏体增加了基体的韧性, 弥散分布的细小碳化物不仅可提高强度, 还可提高对位错运动及裂纹扩展的阻碍作用, 进一步增强基体的塑韧性<sup>[12]</sup>。同时, 粒状贝氏体中的铁素体呈针状, 裂纹在扩展过程中会受到这些彼此咬合、相互交错分布的针状铁素体的阻碍, 从而有效提高其强度和韧性, 内部的高密度位错和亚晶界结构也很大程度上提高了韧性, 降低了韧脆转变温度, 因此 BM-2 的冲击韧性最优异, 在低温下仍保持良好的冲击韧性。

HAZ 内部区域经历了不同的焊接热循环, 熔合线附近的组织由于过热而发生粗化, 故远离焊缝呈现出粗、细晶区渐变的过程。图 6 和图 7 为 HAZ 的显微组织, HAZ-1 组织为回火板条马氏体, 但粗晶区马氏体板条明显宽于细晶区。HAZ-1 与 BM-1 的组织组成相同, 但是 HAZ-1 的平均晶粒尺寸和晶粒内部的马氏体板条束尺寸均明显小于 BM-1, 马氏体的脆性较大, 但板条马氏体的尺寸越小, 则阻碍位错运动及裂纹扩展能力越强, 冲击韧性将得到改善。HAZ-1 中的第二相碳化物尺寸小于 BM-1 这也有利于提高其冲击韧性。因此, HAZ-1 室温冲击韧性优于 BM-1, 室温冲击吸收能量为 69 J。HAZ-2 组织为回火粒状贝氏体和回火马氏体, 由于回火原因, 其板条形貌特征并不明显。HAZ-2 具有与 BM-2

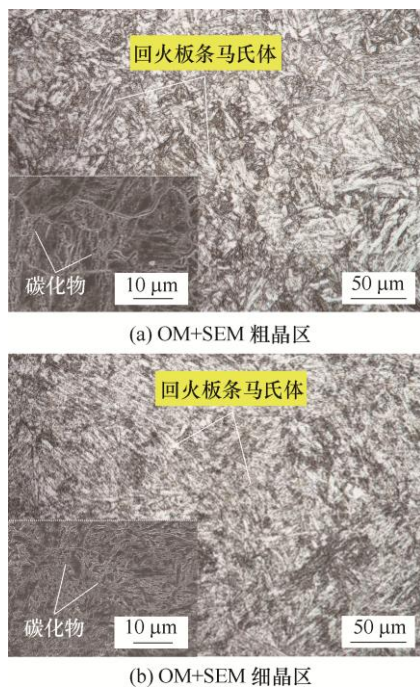


图 6 HAZ-1 显微组织

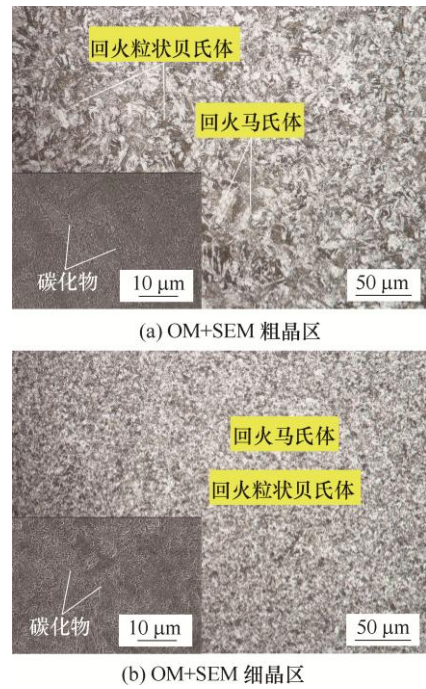
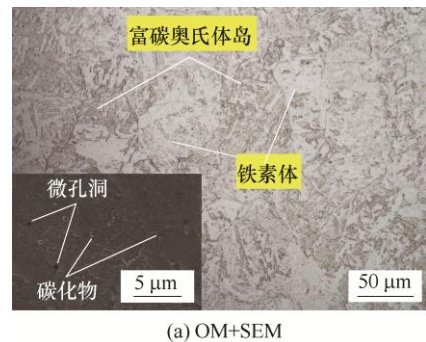


图 7 HAZ-2 显微组织

类似的组织组成, 故相比于其他微区, 具有更高的冲击吸收能量和更低的韧脆转变温度。由于焊接热循环作用, HAZ-2 晶粒尺寸梯度较大, 协调变形的能力降低, 故其冲击韧性弱于 BM-2, 室温冲击吸收能量为 103 J。

BL 显微组织如图 8 所示, BL 组织为回火粒状贝氏体, 黑色富碳奥氏体岛分布在白色块状铁素体上, SEM 中观察到少量尺寸较大的碳化物沿晶界分布, 在晶粒内部几乎无碳化物存在, 基体表面还可观察到微孔洞。BL 中铁素体呈块状且尺寸较大, 在冲击载荷作用下, 尺寸较大的块状铁素体与回火粒状贝氏体变形不协调, 更易产生裂纹, 而发生断裂。TEM 下, 可观察到只有极少量的短杆状碳化物沿晶界分布, 这与 SEM 观察结果一致, 同时, 发现存在较多的球状粗碳化物, 尺寸约为 1 400 nm, 这进一步降低了 BL 的冲击韧性。因此, BL 的冲击韧性相对较差, 室温冲击吸收能量为 39 J。



(a) OM+SEM



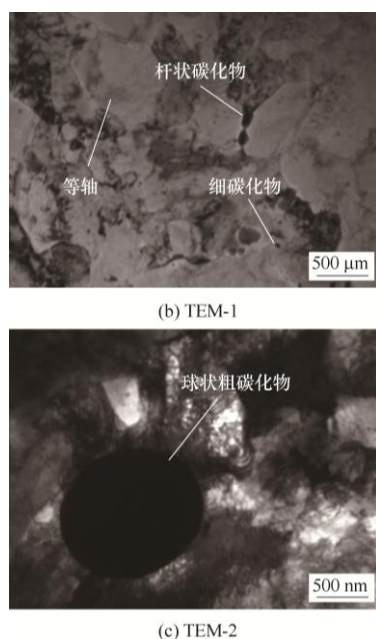


图 8 BL 显微组织

WM 显微组织如图 9 所示, WM 组织为回火贝氏体, 由于采用多层多道焊接工艺, 故形成了柱状晶区和等轴晶区交替排列的组织特征。相比于柱状

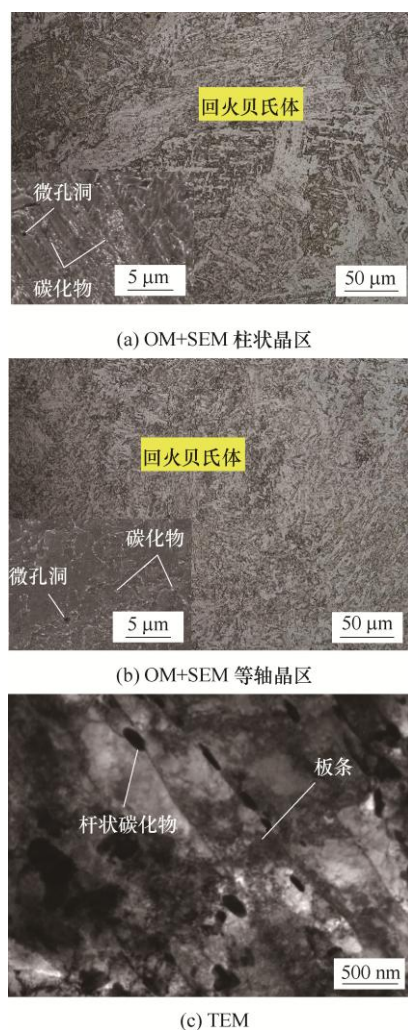


图 9 WM 显微组织

晶区, 等轴晶区因回火作用, 柱状晶形态不明显, 且回火粒状贝氏体更加细小。另外, WM 组织中也存在微孔洞, 由于窄间隙焊接熔池的冷却速度较快, 气体来不及析出, 故易形成气孔<sup>[13]</sup>。TEM 下, 可观察到少量的杆状碳化物沿板条边界分布, 平均尺寸约为 100 nm, 板条宽度约为 600 nm。WM 组织绝大部分为柱状晶, 柱状晶尺寸粗大, 协调变形能力差, 故 WM 的冲击韧性较差, 室温冲击吸收能量最低, 仅有 31 J。

相比于 BM, BL 和 WM 中碳化物数量较少, 且主要沿晶界分布, 对其强韧性增强效果不明显。微孔洞的存在, 会对二者冲击韧性产生不利影响。

### 2.3 冲击断口与组织的关系

焊接接头微区 20 °C 下冲击断口微观形貌如图 10 所示。BM-1 断口上可观察到撕裂棱和“类解理”小平面, 为准解理断裂。BM-1 组织为回火板条马氏体, 第二相尺寸粗大且在板条边界发生聚集, 易造成晶界和条界脆化, 而板条马氏体的条界脆化是引起回火马氏体脆性的机制之一, 断口呈准解理断裂<sup>[14]</sup>。BM-2 断口上可观察到大量深且宽的撕裂韧窝, 表明裂纹在扩展过程中经历了较大的塑性变形, 为典型的韧性断裂。一般在断裂条件相同时, 韧窝尺寸越大, 表示材料的塑韧性越好<sup>[15]</sup>。BM-2 组织为细小的回火板条马氏体和回火粒状贝氏体, 兼具强度和塑韧性。马氏体板条界面和弥散分布的细小碳化物可引起不同程度的位错塞积, 从而强化基体。冲击载荷作用下, 在第二相碳化物/基体界面处会产生应力集中, 若碳化物脆性较大, 则易导致碳化物开裂而产生微孔洞, 否则在界面处发生第二相/基体分离而产生微孔洞, 随后微孔洞不断长大、聚集, 最终发生断裂。在 BM-2 微观断口上, 可以观察到在韧窝底部存在尺寸不一的完整第二相颗粒, 说明第二相具有一定的韧性, 随着应力集中的增加, 第二相/基体首先发生分离而萌生微孔洞。在大韧窝周围还可观察到尺寸较小的韧窝, 说明在裂纹扩展过程中, 存在微孔洞长大、聚集, 以及大韧窝“吞噬”小韧窝的现象, 因此, BM-2 的断裂方式为典型的微孔聚集型断裂。

HAZ-1 断口上可观察到撕裂棱和韧窝带, 为准解理断裂, 部分较宽的撕裂棱表面可观察到韧窝, 在小平面上存在微孔洞。韧窝的存在, 说明 HAZ-1 具有一定的韧性, 相比于 BM-1, 其断口的韧性特征更加明显, HAZ-1 晶粒、马氏体板条和第二相尺寸均小于 BM-1, 故其冲击韧性更好, HAZ-1 冲击

断口形貌与显微组织能较好的对应。HAZ-2 断口上可观察到尺寸较大的撕裂韧窝, 与 BM-2 断口特征及断裂机制类似, 但从韧窝规模及尺寸来看, 其冲

击韧性要弱于 BM-2, 这主要与显微组织有关。相比于 BM-2, 其晶粒尺寸的不均匀, 会对冲击韧性产生不利的影响。

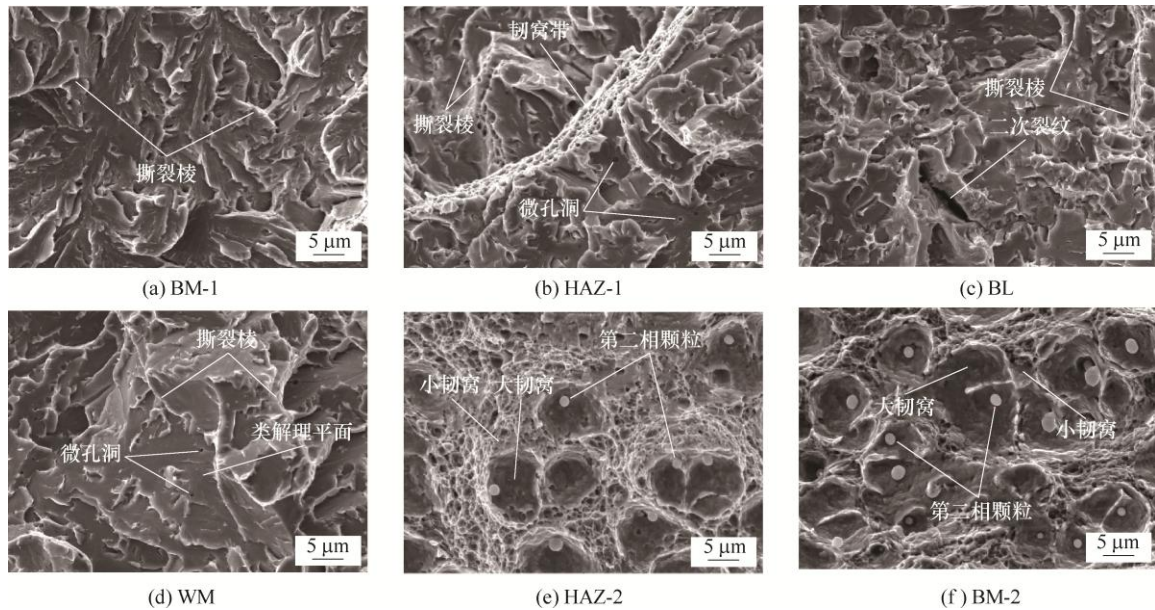


图 10 焊接接头微区 20 °C 下冲击断口

BL 断口上可观察到“类解理”小平面、撕裂棱和二次裂纹, 在部分较宽撕裂棱表面可观察到韧窝存在, 断裂机制为准解理断裂。WM 断口上可观察到较为平坦的“类解理”平面, 平面上存在微孔洞, 属于准解理断裂。从断口形貌特征来看, BL 和 WM 断口脆性特征相比于其他微区更加明显, 且 BL 的冲击韧性要略优于 WM。BL 和 WM 的组织均为回火贝氏体, 其内部的块状铁素体尺寸较大, 二者协调变形能力差, 更易发生应力集中而诱发脆性断裂。

通过对比显微组织与冲击断口, 可以发现相比于单一的回火板条马氏体或回火粒状贝氏体, 回火板条马氏体和回火粒状贝氏体的混合物具有更优异的冲击韧性, 断口韧窝明显, 以微孔聚集方式发生韧性断裂。晶粒、马氏体板条和第二相碳化物尺寸和分布特征均会对转子钢的冲击断裂方式产生不同程度的影响, 随着尺寸的增加和第二相聚集, 冲击断口中的脆性特征将会更加明显。

#### 2.4 冲击韧性与硬度、强度和塑性的关系

本研究采用的微剪切试验可对接头微区局部性能进行测试, 从而探究焊接接头的力学性能分布特征。微剪切试验不仅可获得微区强度性能, 还可通过比较剪切位移来对比微区的相对塑性好坏。

焊接接头显微硬度和剪切强度测试结果如图 11 所示。BM-1、WM 和 BM-2 的显微硬度和

剪切强度均较为平稳, 未产生大梯度变化, 这与其组织均匀性有关, 三者的平均显微硬度为 272 HV、277 HV 和 294 HV, 剪切强度为 639 MPa、637 MPa 和 682 MPa。HAZ 的显微硬度和剪切强度均呈现出大梯度分布的特征, HAZ-1、HAZ-2 和 BL 区域右侧 HAZ 的显微硬度分别在 265~322 HV、294~355 HV 和 261~364 HV 间变化。HAZ 的组织不均匀性导致其力学性能呈现出梯度分布的特征。由于经历了不同的焊接热循环, HAZ 组织呈现出粗、细晶区渐变的过程, 临近 FB 区域的组织变化更加剧烈, 靠近 FB 的粗晶区更易生成粗大的板条马氏体<sup>[16]</sup>, 这也是 FB 上存在局部硬度最大值的主要原因。在 FB 附近, 力学性能的大幅转变说明熔合线界面两侧力学性能的不匹配, 而界面力学性能的不匹配源于界面两侧组织的剧烈变化。相比于 BM, HAZ 的强度和硬度较高, 虽然 HAZ 与 BM 的组织组成相同, 但是 HAZ 的平均晶粒尺寸明显小于 BM; 另外, 由于焊接热循环作用以及后续的焊后回火热处理, 使得 HAZ 基体和晶界上析出更多碳化物, 因此, HAZ 表现出了更高的强度和硬度。BL 存在局部薄弱区, 左侧区域显微硬度和剪切强度值最低, 平均显微硬度和剪切强度为 227 HV 和 569 MPa, 为整个焊接接头最为薄弱的区域。另外, 对比焊接接头显微硬度与剪切强度的分布规律, 发现二者基本一致, 说明显微硬度与剪切强度之间存在一定



的正相关关系, 这与现有研究结果一致<sup>[17-18]</sup>。

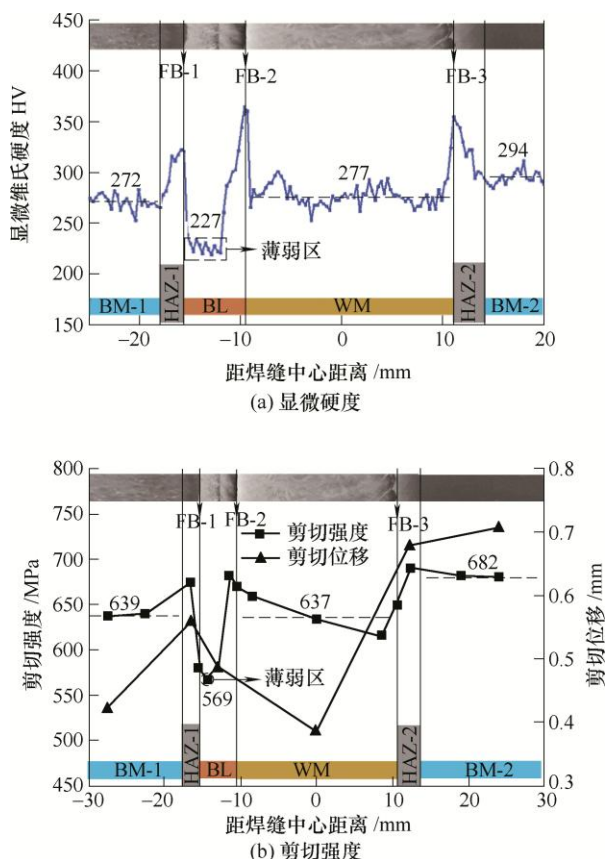


图 11 焊接接头微区的显微硬度和剪切强度

韧性是材料强度和塑性的综合表现, 通常材料的强度和塑性越好, 则其韧性也越好。由于硬度与强度之间存在相关关系, 故硬度也会在一定程度上反应出材料韧性的好坏。室温条件下, 接头微区冲击韧性由强到弱分别为  $BM-2 > HAZ-2 > HAZ-1 > BM-1 > BL > WM$ , 其中,  $BM-1$ 、 $BL$  和  $WM$  间的冲击韧性差距较小。微区中心剪切强度由大到小分别为  $HAZ-2 > BM-2 > HAZ-1 > BM-1 > WM > BL$ , 剪切位移由大到小分别为  $BM-2 > HAZ-2 > HAZ-1 > BL > BM-1 > WM$ , 剪切位移越大, 则表示微区塑性越好。 $BM-2$  和  $HAZ-2$  均表现出较高的强度和塑性, 二者强度较为接近, 但是  $BM-2$  表现出更为优异塑性, 故室温下  $BM-2$  为整个焊接接头冲击韧性最好的区域,  $HAZ-2$  次之。 $HAZ-1$  的强度和塑性仅次于  $BM-2$  和  $HAZ-2$ , 故其冲击韧性优于  $BM-1$ 、 $BL$  和  $WM$ 。 $BL$  的强度和塑性均较低, 故其冲击韧性表现一般。虽然  $BM-1$  和  $WM$  的剪切强度远高于  $BL$ , 但是由于其塑性弱于  $BL$ , 特别是对于  $WM$ , 从而导致三者的冲击韧性较为接近, 其中,  $WM$  的冲击韧性最差。由此可见, 焊接接头硬度、强度和塑性的梯度分布, 也可反映出其冲击韧性的不均性。

### 3 结论

(1)  $12Cr/30Cr2Ni4MoV$  异种转子钢焊接接头的组织及力学性能不均匀, 剪切强度分布规律与硬度基本一致, 热影响区力学性能呈现出梯度分布的特征, 熔合线界面存在力学性能不匹配现象。过渡层存在局部弱化区, 显微硬度为 227 HV, 为整个焊接接头最为薄弱的区域。

(2)  $12Cr/30Cr2Ni4MoV$  异种转子钢焊接接头由  $12Cr$  向  $30Cr2Ni4MoV$  过渡, 微区韧脆转变温度  $FATT_{50}$  逐渐降低。20 °C 下, 母材  $30Cr2Ni4MoV$  及其热影响区的韧性优异, 裂纹萌生于基体/第二相界面, 通过微孔聚集发生韧性断裂, 其余微区均发生准解理断裂, 焊缝的冲击韧性最差。

(3)  $12Cr/30Cr2Ni4MoV$  异种转子钢焊接接头冲击韧性的梯度分布源于其组织不均匀性, 回火板条马氏体和回火粒状贝氏体的混合物具有良好的韧性, 晶粒、第二相尺寸及分布特征会直接影响韧性; 微区硬度、强度和塑性越高, 其冲击韧性越好。

### 参 考 文 献

- [1] 谢永慧, 邓实, 张荻, 等. 汽轮机转子焊接的三维有限元数值模型研究[J]. 热力透平, 2010, 39(1): 12-18.  
XIE Yonghui, DENG Shi, ZHANG Di, et al. Study on numerical model for welding process of steam turbine rotor based on three-dimensional finite element method[J]. Thermal Turbine, 2010, 39(1): 12-18.
- [2] SHIGE T, MAGOSHI R, ITOU S, et al. Development of large-capacity, highly efficient welded rotor for steam turbines[J]. Mitsubishi Heavy Industries, 2001, 38(1): 6-11.
- [3] 蔡雄军, 冷进明, 熊建坤.  $28CrMoNiV$  与  $25Cr2Ni4MoV$  异种转子钢焊接接头性能研究[J]. 电焊机, 2018, 48(8): 114-120.  
CAI Xiongjun, LENG Jinming, XIONG Jiankun. Research on properties of welded joints of  $28CrMoNiV$  and  $25Cr2Ni4MoV$  dissimilar rotor steel[J]. Electric Welding Machine, 2018, 48(8): 114-120.
- [4] WANG W K, ZHANG J X, ZHANG L J, et al. Microstructure and local mechanical properties of a dissimilar metal welded joint with buttering layer in steam turbine rotor[J]. Materials Science & Engineering A, 2019, 747(18): 244-254.



- [5] WANG W K, ZHANG J X, XU Z Z, et al. High cycle fatigue behavior of a dissimilar metal welded joint in ultra-supercritical steam turbine rotor[J]. *Materials Research Express*, 2020(7): 1-11.
- [6] 谭龙, 张从平, 张建勋. 焊接转子窄间隙焊接接头冲击韧性数值研究[J]. *焊管*, 2013, 36(9): 5-10.  
TAN Long, ZHANG Congping, ZHANG Jianxun. Numerical simulation study on welded joints impact toughness for welded rotor narrow gap[J]. *Welded Pipe and Tube*, 2013, 36(9): 5-10.
- [7] 林腾昌, 王慧, 王成杰, 等. 超临界高中压转子用 12%Cr 钢的研究现状[J]. *铸造技术*, 2012, 33(11): 1267-1269.  
LIN Tengchang, WANG Hui, WANG Chengjie, et al. Research status of 12%Cr HP-IP supercritical rotor steel[J]. *Foundry Technology*, 2012, 33(11): 1267-1269.
- [8] 赵双群, 林富生. 长期服役后低压转子 30Cr2Ni4MoV 钢的性能研究[J]. *动力工程学报*, 2013, 33(2): 153-159.  
ZHAO Shuangqun, LIN Fusheng. Investigation on mechanical properties of 30Cr2Ni4MoV LP rotor steel after long-term service[J]. *Journal of Chinese Society of Power Engineering*, 2013, 33(2): 153-159.
- [9] JAMES E, WITTIG, ROBERT S. Carbide evolution in temper embrittled NiCrMoV bainitic steel[J]. *Steel Research International*, 2004, 75(1): 47-54.
- [10] 宋思远, 刘中华, 黄淑秋, 等. 浅析工业汽轮机转子材料的 FATT[J]. *工业汽轮机*, 2009(2): 1-8.  
SONG Siyuan, LIU Zhonghua, HUANG Shuqiu, et al. Analysis on FATT of industrial steam turbine rotor materials[J]. *Industrial Steam Turbine*, 2009(2): 1-8.
- [11] 刘中华, 何成, 刘京伟, 等. 工业汽轮机转子用钢 28CrMoNiV 脆性转变温度的研究[J]. *机电工程*, 2015, 32(12): 1564-1568.  
LIU Zhonghua, HE Cheng, LIU Jingwei, et al. Research on the fracture appearance transition temperature of industrial steam turbine rotor steel 28CrMoNiV[J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2015, 32(12): 1564-1568.
- [12] 陈睿恺. 30Cr2Ni4MoV 钢低压转子热处理工艺的研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2012.  
CHEN Ruikai. Research on heat treatment technology of low pressure rotor steel 30Cr2Ni4MoV[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2012.
- [13] 高玉芬, 王绍智, 唐元生. 单丝窄间隙埋弧焊接缺陷分析及预防[J]. *金属加工(热加工)*, 2010(8): 54-56.  
GAO Yufen, WANG Shaozhi, TANG Yuansheng. Analysis and prevention of welding defects in single wire narrow gap submerged arc welding[J]. *MW Metal Forming*, 2010(8): 54-56.
- [14] 俞学节. 回火结构钢的断裂行为和显微组织的关系[J]. *上海钢研*, 1985, 132(5): 37-43.  
YU Xuejie. Relationship between fracture behavior and microstructure of tempered structural steel[J]. *Journal of Shanghai Iron & Steel Research*, 1985, 132(5): 37-43.
- [15] 李杰, 王丽, 李志, 等. 热处理对高 Co-Ni 超高强度钢冲击断口的影响[J]. *航空材料学报*, 2008, 28(1): 35-39.  
LI Jie, WANG Li, LI Zhi, et al. Effect of heat treatment on impact fracture of ultra-high strength Co-Ni steel[J]. *Journal of Aerospace Materials*, 2008, 28(1): 35-39.
- [16] HAN Y C, CHEN X D, FAN Z C, et al. Influence of second thermal cycle on reheat cracking susceptibility of welding CGHAZ in vanadium-modified 2.25Cr1Mo steel[J]. *Procedia Engineering*, 2015, 130: 487-496.
- [17] 沈林, 陈辉, 徐力栋, 等. 不锈钢激光-MAG 复合焊接头微区性能研究[J]. *材料科学与工艺*, 2018, 26(5): 40-46.  
SHEN Lin, CHEN Hui, XU Lidong, et al. Research on micro-zone properties of laser-MAG hybrid welded stainless steel joint[J]. *Materials Science and Technology*, 2018, 26(5): 40-46.
- [18] 张建勋, 孙茜, 毕宗岳, 等. X100 螺旋埋弧焊管焊接 HAZ 微区组织与性能研究[J]. *焊管*, 2012, 35(12): 5-10.  
ZHANG Jianxun, SUN Xi, BI Zongyue, et al. Research on microstructure and performance in welding HAZ of X100 SAWH pipe[J]. *Welded Pipe and Tube*, 2012, 35(12): 5-10.

作者简介: 朱波, 男, 1994 年出生。主要研究方向为汽轮机焊接转子力学性能和高温合金焊接性。

E-mail: zhuxbo@stu.xjtu.edu.cn

张建勋(通信作者), 男, 1958 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为材料智能焊接、增材制造与修复再制造、材料服役可靠性等。

E-mail: jxzhang@mail.xjtu.edu.cn