

DOI: 10.7512/j.issn.1001-2303.2025.06.19

# 机械振动对核电用16MND5埋弧焊焊缝组织与性能的影响

郑浩, 涂腾, 李海博, 吴坤任

中国核动力研究设计院, 四川 成都 610213

**摘要:** 针对核反应堆压力容器(RPV)用低合金高强度钢16MND5埋弧焊接头的残余应力集中与组织调控难题, 提出机械振动辅助焊接工艺, 研究了振动对焊缝微观组织、力学性能及残余应力分布的影响机制。通过开展振动焊接试验(频率98~100 Hz), 结合轮廓法逆向重构焊接接头残余应力场, 并利用显微表征与力学测试揭示组织性能演变规律。结果表明, 振动可促进针状铁素体(AF)含量增加, 抑制粒状贝氏体(GB)形成, 实现晶粒细化; 焊缝纵向残余应力峰值显著降低且分布均匀化, 屈服强度与硬度轻微下降, 而延伸率与低温冲击韧性未明显劣化。微观机理表明, 振动通过提升熔池冷却速率调控过冷奥氏体相变路径, 并借助位错滑移释放晶格畸变能, 从而协同实现残余应力松弛与组织优化。研究证实, 振动焊接在无需额外热处理的条件下可有效改善核电厚壁构件焊缝的应力状态, 为RPV主环焊缝的制造工艺革新提供了理论依据与技术支持。

**关键词:** 核反应堆压力容器; 埋弧焊; 焊缝金属; 残余应力; 轮廓法; 振动焊接

中图分类号: TG444 文献标识码: A 文章编号: 1001-2303(2025)06-0140-07

## Effect of Mechanical Vibration on the Microstructure and Mechanical Properties of 16MND5 Submerged Arc Welded Joints for Nuclear Power Applications

ZHENG Hao, TU Teng, LI Haibo, WU Kunren

Nuclear Power Institute of China, Chengdu 610213, China

**Abstract:** To address the challenges of residual stress concentration and microstructural control in submerged arc welded joints of low-alloy high-strength steel 16MND5 for nuclear reactor pressure vessels (RPV), this study proposes a mechanical vibration-assisted welding process and systematically investigates the effects of vibration on weld microstructure, mechanical properties, and residual stress distribution. Vibration welding experiments (98-100 Hz frequency) were conducted, and the contour method was employed to reconstruct the residual stress field of welded joints through reverse analysis. Microstructural characterization and mechanical testing were performed to reveal the evolution of microstructure and properties. Results indicate that mechanical vibration promotes the formation of acicular ferrite (AF), suppresses granular bainite (GB) formation, and achieves grain refinement. The peak longitudinal residual stress in the weld joint is significantly reduced and uniformly distributed, while yield strength and hardness exhibit slight decreases. Notably, elongation and low-temperature impact toughness remain unaffected. Mechanistic analysis reveals that vibration enhances the cooling rate of the weld pool, modulates the under-cooled austenite phase transformation pathway, and releases lattice distortion energy through dislocation slip, thereby synergistically alleviating residual stress and optimizing microstructure. This study demonstrates that vibration-assisted welding effectively improves the stress state of thick-walled nuclear components without additional post-weld heat treatment, offering theoretical and technical insights for advancing manufacturing processes of RPV critical welds.

**Keywords:** nuclear reactor pressure vessel (RPV); submerged arc welding; weld metal; residual stress; contour method; vibration welding

收稿日期: 2025-05-06 修回日期: 2025-05-30

作者简介: 郑浩(1993—),男,硕士,工程师,主要从事核反应堆压力容器相关研究设计工作。E-mail:584125968@qq.com。

引用格式:郑浩,涂腾,李海博,等.机械振动对核电用16MND5埋弧焊缝组织与性能的影响[J].电焊机,2025,55(6):140-146.

Citation:ZHENG Hao, TU Teng, LI Haibo, et al. Effect of Mechanical Vibration on the Microstructure and Mechanical Properties of 16MND5 Submerged Arc Welded Joints for Nuclear Power Applications[J]. Electric Welding Machine, 2025, 55(6): 140-146.

## 0 引言

核反应堆压力容器(RPV)筒体是RPV性能要求最高的部分,锻造后应具备一定的强度、韧性和性能均一性,其焊缝的综合性能更是关系着RPV的安全运行。RPV长期服役于高温高压与中子辐照的环境,其众多焊缝中,主环焊缝处于强辐照区,最易产生脆化倾向,因此主环焊缝组织的塑、韧性储备尤为重要。由于RPV筒体内壁较厚,在多层多道焊时会产生较大的残余应力,由文献[1]可知1镍基合金的异种焊缝在残余应力作用下极易产生微裂纹,即结晶裂纹和高温低塑性裂纹,对设备安全运行产生重大影响,这种微裂纹尺度小,难以察觉,其形成机理尚在理论研究阶段,是业内公认的难题与顽症。对此,行业内通常采用焊后消应力热处理来缓和环焊缝与热影响区的应力集中,以降低并均化反应堆压力容器筒体的残余应力分布,从而减小微裂纹萌生的倾向。但大型构件的消应力热处理过程繁琐、费时、成本较高,因此亟待提出一种操作简单、行之有效的新型消应力方式。

振动辅助焊接作为一种在焊接过程中向凝固中的焊缝金属直接输入机械振动能量的特殊焊接工艺,对焊缝金属组织和接头应力的调控能力具有传统焊后热处理和振动时效无法比拟的优势<sup>[2]</sup>。通过复合振动与焊接热过程来改善焊接接头的综合质量,可在一定程度上降低材料的残余应力,并且具有细化晶粒、提高尺寸稳定性、缩短生产周期等特点<sup>[3]</sup>。但是,由于我国对这方面的研究起步较晚、不够深入,以往研究大都是对振动时效以及试验结果的初步研究,并未全面探讨振动对微观组织的作用机理,因此工艺推广较为困难。本研究以核用低合金高强度钢焊缝金属为对象,采用机械振动以均化埋弧焊接(SAW)过程中焊接接头的应力集中,并采用轮廓法首次研究常规焊接与振动辅助埋弧焊(Vibration-assisted SAW)随焊随振后残余应力的变化趋势,为振动辅助焊接技术在RPV中的应用提供指导。

## 1 试验过程与方法

### 1.1 振动焊接试验

试验母材采用核电用钢16MND5(法国牌号),匹配伯乐公司生产的Mn-Mo-Ni系埋弧焊丝S3NiMo1(直径4 mm,主要化学成分(质量分数,%)为:C 0.01, Mn 1.72, Si 0.24, Cr 0.01, Ni 0.97, Cu 0.02, Mo 0.54, S 0.002, P 0.009, Fe余量)与焊剂UV 420TTR。试板尺寸为450 mm×200 mm×20 mm,沿板长方向开一角度为60°的V形坡口,间隙4 mm,底部放置8 mm厚垫板,由夹具固定在振动平台上。焊接过程中采用华云毫克能HK2005 K3型多功能机械振动时效设备对试样与振动平台施振,振动频率参照平台自身的固有频率与JB/T 11085—2011的具体要求,选用98~100 Hz的亚共振频率进行试验。通过拾振器获得测定点加速度值,代入振动正弦规律公式可求得试板不同位置的实际振幅,计算后最高达10 μm。埋弧焊接工艺参数为:极性直流反接,电流500 A,电压29 V,焊接速率42 cm/min,试验过程如图1所示。

### 1.2 性能测试与组织表征

焊后采用PDA-5000直读光谱仪对有无振动下的焊缝金属进行成分测定。分别对两种状态下的焊缝进行力学性能测试:采用INSTRON MPX-450摆锤冲击试验机进行低温冲击试验,标准试样尺寸为10 mm×10 mm×55 mm,V形缺口位置以及试验规程遵循ASTM E1820-05a;采用INSTRON3360万能材料试验系统进行室温拉伸试验;采用Willson Tukon-2500 Vickers硬度计进行Vickers硬度测试,载荷10 kg。试验取样原则与拉伸试样尺寸示意图2所示。

对截取的焊接接头样品,经砂纸逐级磨制至3000号后进行机械抛光,采用浓度为5%的硝酸酒精浸蚀10 s,用于光学显微镜(OM)观测,对比有、无振动下的微观组织构成与晶粒尺寸等情况,高倍观察则利用JSM-7800F场发射扫描电镜(SEM)与



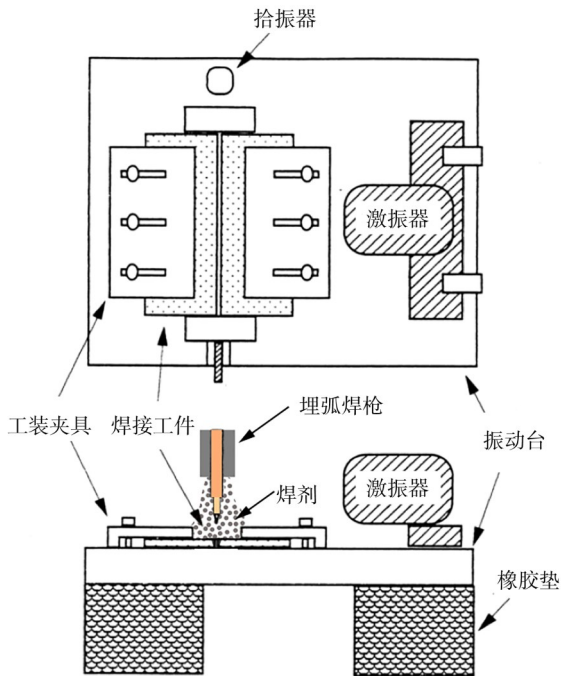
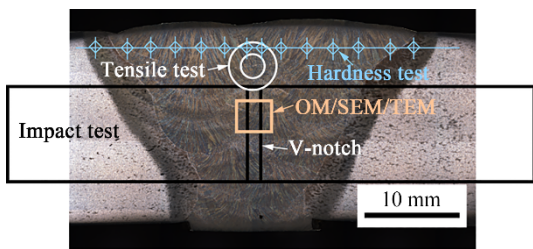
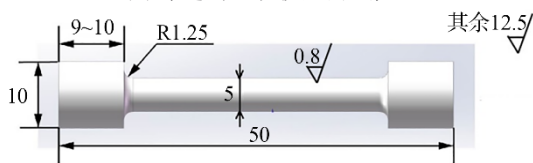


图1 振动焊接试验装置

Fig. 1 Experimental setup for vibration welding tests



(a) 焊缝宏观形貌及测试位置



(b) 拉伸试样尺寸(单位:mm)

图2 焊缝宏观形貌及测试位置与拉伸试样尺寸示意

Fig. 2 Schematic diagram of the macroscopic morphology and testing location of the weld seam and the size of the tensile specimen

JEM-2100F 透射电子显微镜(TEM)来完成。

### 1.3 残余应力测试

采用轮廓法首次对有、无振动下核电用钢埋弧焊焊缝进行残余应力测试。首先采用高精度慢走丝线切割设备(MAKINO DUO 43)对焊后试板中部进行切割,加工精度 $\pm 2 \mu\text{m}$ ,切割面粗糙度 $0.1 \mu\text{m}$ ;为了得到焊接接头纵向残余应力值,切割方式如图3所示。然后采用高精度的HEXAGON 三坐标测试

仪进行切割变形轮廓测量,误差为 $2 \mu\text{m}/\text{m}$ 。测量时,探针沿被测试件表面上的一条线移动,结合高精度光栅尺通过软件处理,可以在显示器上实时描绘探针经过位置的轮廓曲线并给出其数值。与传统坐标测量采用的三坐标测量仪相比,轮廓仪的测量结果为一条连续曲线,更为直观且便于分析,同时也具有更高的测试效率,适合用于轮廓法这种需要观察起伏变形并且采集轮廓坐标的数据点较多的情况。为了避免因走丝带来的测试误差,采用如下步骤进行后续阶段的数据处理:(1)切割面数据校准;(2)删除轮廓中误差较大的点;(3)平均两个切割面轮廓数据;(4)将平均后的数据进行拟合。最后通过对轮廓变形的反向施加对切割面上纵向残余应力的二维分布进行重构,建立切割后一半试件的有限元模型。此时只进行变形与应力之间的弹性求解,材料参数方面只需定义弹性模量(206 GPa)和泊松比(0.3)。以切割前的试件尺寸建立有限元模型,将切割面处理后的三坐标轮廓数据作为边界条件加载到模型的界面上,然后进行弹性计算,得到垂直于两个切割面的应力分布全貌。在有限元软件Abaqus中,将轮廓作为边界条件加载到模型以得出最终的残余应力分布。

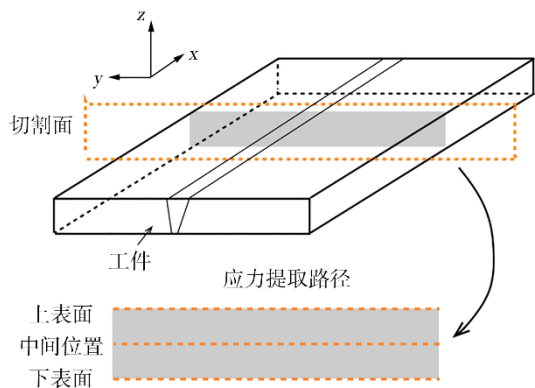


图3 焊后工件慢走丝切割位置示意

Fig. 3 Diagram for low-velocity cutting position in welded specimen

## 2 试验结果

### 2.1 焊接接头宏观形貌及焊缝金属化学成分

图2为典型的核电用钢多层多道埋弧焊接头的宏观形貌。断面组织观察及超声探伤检测未发现裂纹、气孔和夹渣等宏观缺陷,焊缝表面成形良好。

有、无振动状态下焊缝的实测化学成分如表1所示,观察可知二者不存在明显差异,都符合RPV主环焊缝的验收标准。

表1 焊缝金属化学成分(质量分数,%)

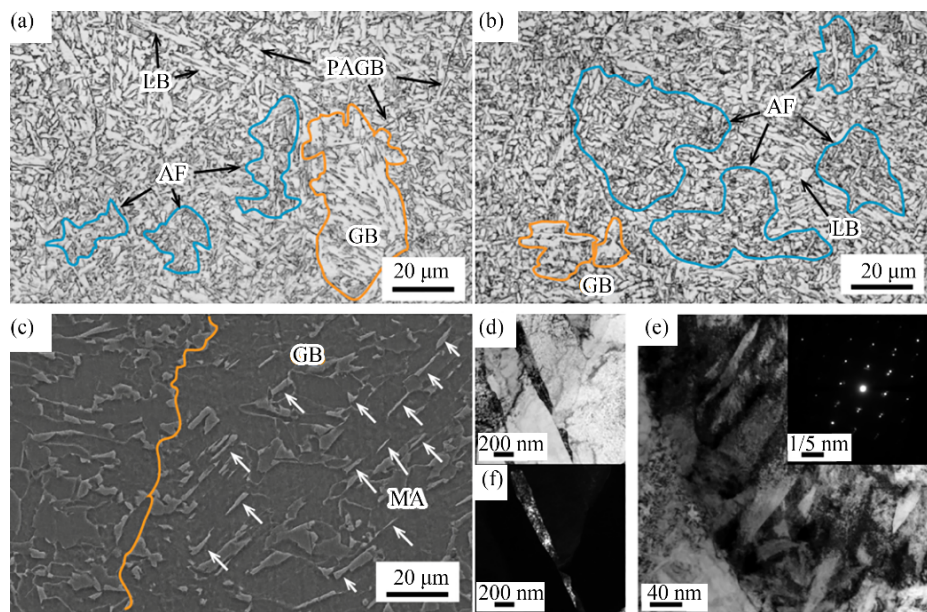
Table 1 Chemical composition of weld metal (wt. %)

工艺	C	Si	Mn	Mo	Ni	Cu	Fe
SAW	0.10	0.32	1.77	0.54	0.92	0.02	Bal.
Vibration-assisted SAW	0.10	0.32	1.81	0.53	0.93	0.02	Bal.

## 2.2 焊缝金属的微观组织

图4a、4b分别为无振动与振动频率为100 Hz时的焊缝组织。可见针状铁素体(AF),大量板条贝氏体(LB)以及大面积的粒状贝氏体(GB),从被初生奥氏体晶界(PAGB)分割的贝氏体铁素体基体内析出,构成了常规埋弧焊缝的主要组织结构。其中GB基体内分布有马奥(MA)小岛,放大后可观察到该微米尺度的MA形态不一,多呈现长条状与块状形貌(图4c白色箭头所示)。TEM结果表明,该长条状MA组元由90%以上的高碳孪晶马氏体构成,块状

MA则由马氏体与残余奥氏体叠加组成(图4d~4f)。研究表明,长条状MA对韧性的危害要远大于块状形态,因此无论是从改进工艺还是改进合金成分的角度出发,GB都应该是避免析出的有害组织<sup>[4]</sup>。除了采取优化调控合金成分外,工艺改进也可有效控制GB。根据过冷奥氏体连续冷却转变的规律可知,适当增大冷却速率会使组织的实际冷却曲线远离高温贝氏体(即GB)的析出区间或减少其孕育期,从而抑制GB的形成,促进下贝氏体以及AF的大量析出。大量研究表明振动辅助焊接从理论上具备提升熔池冷却速率的能力,并已经在镍基合金与镁铝合金的自熔焊中得到了证明<sup>[5-6]</sup>。本研究中施加振动后的微观组织似乎在该有益作用下得到了改善:AF含量增加,大块GB的数量有一定的降低趋势,因此整体有效晶粒尺寸得到了一定程度的细化(见图4b),杂乱AF自带的连锁结构与细小贝氏体铁素体组织在发生解理断裂时可有效增加焊缝金属的止裂性<sup>[4]</sup>。



(a)无振动;(b)有振动(频率:100 Hz);(c)无振动下GB内部形貌;(d)长条状MA TEM明场像;

(e)块状MA TEM明场像与衍射斑点;(f)长条状MA TEM暗场像

图4 Mn-Mo-Ni系焊缝金属微观组织:

Fig. 4 Microstructure of Mn-Mo-Ni weld metal

## 2.3 焊缝金属的力学性能

有、无振动状态下焊缝金属拉伸性能测试结果如表2所示。由表可知,随着机械振动的施加,焊缝金属的屈服强度 $R_{p0.2}$ 与硬度均呈现一定程度的下降

趋势。振动状态下焊缝金属的 $R_{p0.2}$ 由常规SAW的578 MPa下降至537 MPa,延伸率总体有轻微的增加(见图5),且抗拉强度 $R_m$ 相比无振动下有轻微提升(约20 MPa),二者都满足RPV主环焊缝验收标



准。对比有、无振动下焊缝金属的硬度(见图6),施加振动后的维氏硬度相较于无振动降低了约20 HV,说明焊接过程中施加机械振动在一定程度上会对焊缝金属造成“软化”的效果。热影响区因焊接热循环的自身属性具有较高含量的硬脆组织,其硬度最高达到约350 HV,在机械振动下虽无明显改善,也满足RPV主环焊缝验收标准。

表2 焊缝金属拉伸性能

Table 2 Tensile properties of the weld metal with and without vibration

工艺	$R_{p0.2}/\text{MPa}$	$R_m/\text{MPa}$	$Z/\%$
SAW	578	752	25
Vibration-assisted SAW	537 (-7%)	771 (+2%)	26 (+4%)

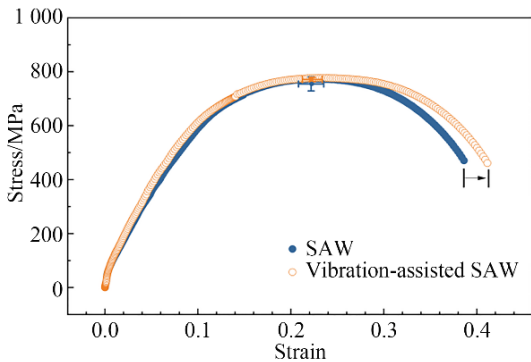


图5 焊缝金属的应力应变曲线

Fig. 5 Strain-stress curves for weld metals with and without vibration

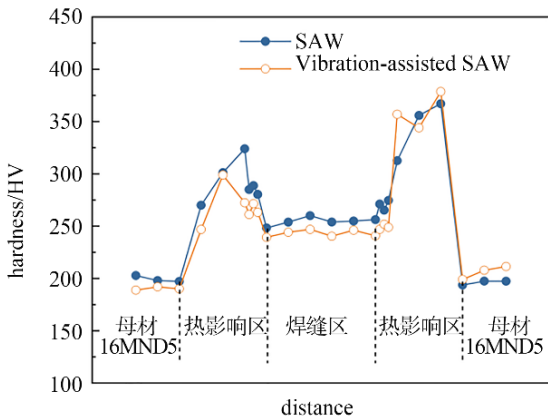


图6 焊接接头的硬度分布

Fig. 6 Hardness distribution of welded joints with and without vibration

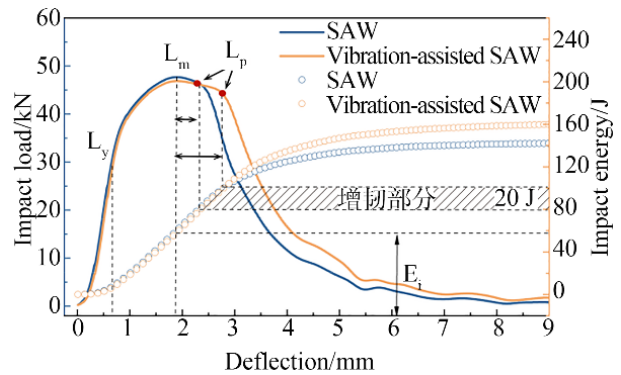
有、无振动状态下焊缝金属在 $-20\text{ }^\circ\text{C}$ 下的冲击功数据如表3所示。从工程应用角度考虑,冲击功的单个最小值代表最低冲击韧性,并更能体现焊接接头的韧性等级。由表中平均值可知,焊接过程中有、无振动施加都未显著影响冲击韧性,二者皆处于较高的韧性水平,最低值高达136 J,均能满足

RPV主环焊缝验收标准。分析焊态焊缝的低温冲击功与焊缝金属微观组织的关系可知,虽然从理论与组织观察的角度出发,AF含量的增加与GB的降低会显著影响韧性,但可能因焊缝组织不均匀或组织比例改善程度较小等造成实际总体韧性改善幅度微弱。尽管如此,从振动状态相较于无振动状态下焊缝金属韧性提升的单个样本中的冲击载荷-挠度示波曲线(见图7)可以看出,二者裂纹萌生功( $E_i$ )几乎一致,随着塑性变形的进一步增加,当裂纹萌生并开始稳定扩展时,施加振动的试样塑性变形更大(图7中黑色水平箭头所示),体现在微观尺度上的微孔聚集形貌<sup>[7]</sup>。从能量曲线可知增加的塑性变形部分(即增韧部分)对应的能量可达约20 J。该微孔聚集区增大导致的韧性提升主要归因于基体的软化与AF含量的增加。

表3  $-20\text{ }^\circ\text{C}$ 焊缝金属夏比冲击韧性

Table 3 Charpy impact toughness of the weld metal at  $-20\text{ }^\circ\text{C}$  with and without vibration

工艺	单个值/J	平均值/J	冲击缺口位置
SAW	154, 136, 147	145	焊缝中心
Vibration-assisted SAW	140, 153, 136	143	焊缝中心



$L_y$ —屈服载荷; $L_m$ —最大载荷/裂纹萌生时载荷; $L_p$ —裂纹失稳扩展前载荷

图7 焊缝金属的冲击载荷-挠度与能量示波曲线

Fig. 7 Impact load-deflection and energy curves for weld metals with and without vibration

## 2.4 焊缝金属的残余应力

根据1.3节所述的测试流程,提取、拟合并计算的有、无振动状态下焊接接头纵向残余应力分布,如图8所示。由图可知,无振动时SAW焊接接头残余应力峰值约为530 MPa(见图8a),应力分布较为集中;当施加振动后,其残余应力下降到约455 MPa

(见图 8b), 应力得到了明显的分散与均化。因此判断, 在埋弧焊接过程中进行随焊随振的改进工艺对降低并均化 Mn-Mo-Ni 系核用钢焊接接头的残余应力有一定效果。

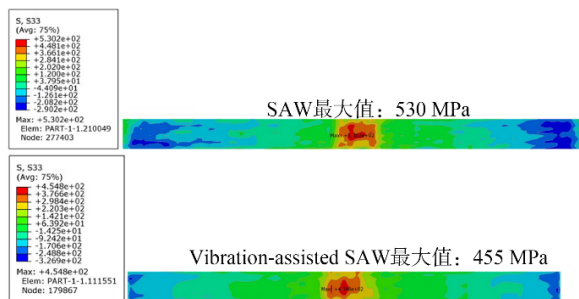


图 8 焊接接头的纵向残余应力分布云图

Fig. 8 Contours for longitudinal residual stress of weld joints

### 3 分析与讨论

#### 3.1 振动与微观组织及冲击韧性的关系

由 Kou 等人<sup>[5-6]</sup>采用具有无固态相变特征的镍基合金以及镁铝合金振动自熔焊的研究可知, 在施加机械振动时, 实际的总焊接速度  $w$  等于焊枪运动速度  $u$  与振动速度  $v$  的矢量和 (见图 9)。说明相比于无振动条件, 振动焊接的实际焊接速度有所提升。结合 Rosenthal 焊接传热公式 (见式 1) 与过冷奥氏体连续冷却规律可知<sup>[8]</sup>, 焊接速度的提升会在一定程度上降低热输入并提升冷却速率, 因此理论上施加振动可能会令焊缝金属内实际冷却曲线更容易地“躲过”GB 等高温贝氏体的析出区间并“切过”AF 的析出区间, 使过冷奥氏体组织在 AF 孕育期停留时间更长, 缩短甚至消除在 GB 孕育期的停留时间, 从而增大 AF 的含量, 减少粗大的 GB 和 LB 等有害组织 (图 4)。

$$\frac{2\pi(T - T_0)kR}{Q} = \exp\left[\frac{-V(R-x)}{2\alpha}\right] \quad (1)$$

式中  $T$  为温度;  $T_0$  为焊前母材温度;  $k$  为母材热导率;  $Q$  热源向工件传递的热量;  $V$  为焊接速度;  $R$  为距离热源的径向距离;  $x$  为沿  $x$  轴方向距离热源的距离;  $\alpha$  为母材的热扩散系数。

因此, 上述结果会通过细化焊缝组织的有效晶粒尺寸以增大临界断裂应力实现韧性的提升。况且, 数量庞大且杂乱分布的 AF 自带连锁结构, 与细

小贝氏体铁素体配合的组织结构在材料发生解理断裂时会有效偏转裂纹, 增大其扩展所需的能量, 从而进一步提升韧性 (如图 10 所示), 实现在随焊随振的过程中对焊缝组织与性能的原位调控。在后续的工艺改良与优化焊缝关键合金元素设计中, 提高 AF 含量并调控有害脆性相数量、尺寸以及分布方式始终是冶金工艺设计的重要准则。

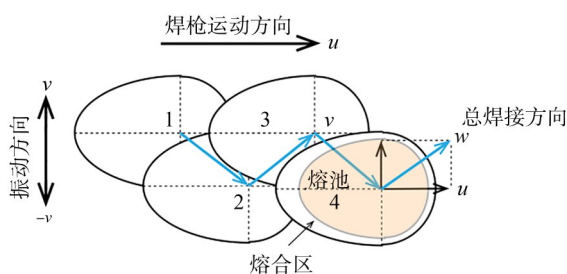


图 9 振动状态下焊缝金属与熔池的总焊接速度示意

Fig. 9 Schematic diagram for overall welding direction and velocity of weld metal and weld pool under the vibrating condition

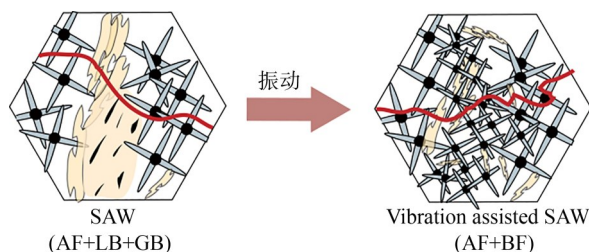


图 10 振动前、后焊缝金属微观组织演变示意

Fig. 10 Schematic diagram for microstructure evolution of weld metal before and after introducing vibration

#### 3.2 振动对残余应力的影响分析

从力学性能测试结果来看, 虽然施加振动对冲击韧性的实际提升效果不显著, 但其对基体带来的屈服强度、硬度下降等“软化”作用以及残余应力的降低与均化效果是显而易见的。很多学者通过位错密度、晶格滑移等金属学理论来解释振动时效机理<sup>[9-12]</sup>, 理论虽过于传统, 但用来解释振动焊接过程中残余应力的均化机理仍然适用。在振动过程中, 振动能量实际上是通过在工件处于共振或亚共振状态时对其每一晶格进行逐步叠加, 当施加的能量与微观组织本征的晶格畸变能之和超出原子周围的势阱时 (即类似柯氏气团带来的拘束能), 则此处会产生塑性变形, 使畸变的晶格恢复到平衡状态。结果是位错由缠结变为可动态。残余应力集中处的晶格畸变越严重, 因此位错摆脱钉扎后带来

的结果是残余应力的大幅下降,而残余应力较低处则下降幅度较小,最终导致的结果是残余应力的降低与均化。由于基体的位错密度降低,因此也可以解释硬度与屈服强度的下降。振动消应力过程的本质实际上是位错之间及溶质原子与位错之间的交互作用。

## 4 结论

本文以核用低合金高强钢 Mn-Mo-Ni 系焊缝金属为研究对象,采用轮廓法来研究振动埋弧焊随焊随振过程对焊接接头残余应力的改善作用,并对有、无振动下的焊缝微观组织与力学性能进行了测试与分析。结论如下:

(1)施加振动会轻微降低高温 GB 与 LB 的数量,促进 AF 的析出。施加振动后焊缝金属的  $R_{p0.2}$  由 578 MPa 下降至 537 MPa,维氏硬度由 270 HV 下降至 250 HV,延伸率与抗拉强度都有少量提升,冲击韧性基本未受影响。

(2)焊接过程中施加振动可以明显降低焊缝的残余应力峰值,埋弧焊接头的纵向残余应力峰值从 530 MPa 降低到了 455 MPa,下降了 14%,整体分布更加均匀。

(3)振动辅助焊接尽管在细化焊缝组织方面的稳定性和重复性不甚理想,但其在降低焊接结构残余应力的方面效果明显。建议在后续的焊接工艺改良与优化焊缝关键合金元素设计中,以提高 AF 含量并调控有害脆性相数量、尺寸以及分布方式作为核电材料冶金工艺设计的重要目标。在大壁厚重型构件的焊接中,以降低残余应力峰值为目标的应用是振动辅助焊接的主要方向。

### 参考文献:

[1] Hua C, Lu H, Yu C, et al. Reduction of ductility-dip

cracking susceptibility by ultrasonic-assisted GTAW [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2017, 239:240-250.

- [2] Jose M J, Kumar S S, Sharma A. Vibration assisted welding processes and their influence on quality of welds[J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2016, 21(4):243-258.
- [3] Pučko B, Gliha V. Charpy toughness and microstructure of vibrated weld metal[J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2006, 11(3):289-294.
- [4] Wang H T, Tian Y, Ye Q B, et al. Determining role of microstructure on crack arrest and propagation phenomenon in low-carbon microalloyed steel [J]. Materials Science and Engineering: A, 2019, 761:138009.
- [5] Kuo C W, Yang S M, Chen J H, et al. Study of vibration welding mechanism [J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2008, 13(4):357-362.
- [6] Yuan T, Luo Z, Kou S. Grain refining of magnesium welds by arc oscillation[J]. Acta Materialia, 2016, 116:166-176.
- [7] Chen J H, Cao R. Micromechanism of cleavage fracture of metals: A Comprehensive Microphysical Model for Cleavage Cracking in Metals[M]. Ist. Elsevier, 2015.
- [8] Kou S. Welding Metallurgy [M]. John Wiley & Sons, Inc., 2003.
- [9] August G. Hebel Jr. Subresonant Vibrations Relieve Residual Stress[J]. Metal Progress, 1985, 128(6):51-55.
- [10] Gao H, Dutta R K, Huizenga R M, et al. Stress relaxation due to ultrasonic impact treatment on multi-pass welds[J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2014, 19:505-513.
- [11] Aoki S, Kurita K, Koshimizu S, et al. Probabilistic Evaluation of a Method for Reduction of Residual Stress in Welded Structure Using Vibration[J]. Chemical Engineering Transactions, 2013, 33:1087-1092.
- [12] Yang Y P. Understanding of Vibration Stress Relief with Computation Modeling [J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2008, 18(7):856-862.

编辑部网址: <http://www.71dhj.com>

