

船体高强度钢焊接残余应力分布数值模拟与调控方法探究

王超碧

中国船级社实业有限公司南京分公司, 江苏 南京 211801

DOI:10.61369/ERA.2026100005

摘要： 船体高强度钢焊接接头在分段装配中同时承受热循环、胎架拘束和冷却收缩作用，残余拉应力容易集中在焊趾、熔合线和夹持边界附近，影响后续合拢精度与疲劳安全。本文分析船体板架对接接头有限元建模方法，梳理热输入、焊接顺序和约束释放量对应力分布的影响，提出以中等热输入、对称分段退焊和两级夹具释放组合控制残余应力的调控方法。计算情景显示，组合工况可将纵向拉应力峰值控制在约 285MPa，焊趾外侧横向拉应力降至 139MPa，板面最大挠度保持在 1.90mm，适用于 EH36 船体高强度钢长焊缝的工艺参数比选。

关键词： 船体高强度钢；焊接残余应力；数值模拟；热输入；调控方法

Research on Numerical Simulation and Regulation Method of Welding Residual Stress Distribution of High-Strength Steel for Hull

Wang Chaobi

China Classification Society Industrial Corporation Nanjing Branch, Nanjing, Jiangsu 211801

Abstract： The welded joints of hull high-strength steel are subjected to thermal cycle, jig restraint and cooling shrinkage simultaneously during block assembly. Residual tensile stress tends to concentrate near the weld toe, fusion line and clamping boundary, which affects subsequent closing accuracy and fatigue safety. This paper analyzes the finite element modeling method for hull plate butt joints, sorts out the influences of heat input, welding sequence and constraint release amount on stress distribution, and proposes a regulation method combining moderate heat input, symmetric block backstep welding and two-stage fixture release to control residual stress. Calculation scenarios show that the combined working condition can limit the peak longitudinal tensile stress to approximately 285 MPa, reduce the transverse tensile stress outside the weld toe to 139 MPa, and keep the maximum deflection of plate surface at 1.90 mm. This method is suitable for the comparison and selection of process parameters of long welds of EH36 hull high-strength steel.

Keywords： hull high-strength steel; welding residual stress; numerical simulation; heat input; regulation method

引言

船体高强度钢用于大型船舶分段、甲板纵骨和舷侧板架后，板厚减薄与强度提高使焊接热循环对局部组织和残余应力的影响更加突出。长焊缝在胎架上连续施焊时，熔池附近先发生受热膨胀和压缩塑性变形，冷却阶段又受到周边冷板、临时夹具和相邻构件限制，焊趾外侧容易形成接近屈服强度的纵向拉应力。单纯依靠焊后矫形难以解释应力峰值位置和释放路径，数值模拟应把材料温度对应性能、移动热源、焊接顺序和约束释放过程共同纳入同一模型，才能为工艺调控提供可比较的参数依据。

一、船体高强度钢焊接残余应力有限元模型建立

（一）船体板架对接接头几何模型建立

船体高强度钢板架焊接残余应力模拟以典型纵骨对接接头为对象，几何模型采用 600mm × 320mm × 12mm 母材板承接 8mm 腹板的局部板架单元，焊缝沿纵向贯通板面，双面 V 形坡口折算

为具有实际熔敷厚度的等效焊缝体。板端约束区、腹板根部过渡区及焊趾尖角附近保留刚度突变，微小倒角和装配间隙剔除后，热源移动路径、熔池体积和残余拉应力高值区能够稳定落入实体网格^[1]。焊缝中心线两侧 40mm 范围设置局部加密区，板端远离焊缝的区域保持较粗单元，横向应力梯度和计算时间步都能保持稳定，边界响应清楚。

(二) EH36高强度钢热物性参数选择

EH36船体高强度钢在焊接升温、相变和冷却阶段的热物性参数随温度变化明显，材料模型采用温度对应的导热系数、比热容、密度、弹性模量、屈服强度和热膨胀系数。20℃时弹性模量取206GPa，屈服强度取355MPa，线膨胀系数取 $1.18 \times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$ ；温度升至600℃后屈服强度折减到常温值的约0.42，900℃以上只保留低刚度承载能力^[2]。温度相关参数组合使热膨胀受阻、塑性压缩和冷却收缩能够在同一热-力耦合路径中连续传递，避免用常温参数把焊趾附近的拉应力峰值压低。焊材熔敷区采用与母材相近的热物性曲线，熔点附近通过等效潜热扩大比热容，冷却后按弹塑性随动硬化处理，以反映多道焊中前一道焊缝被后续热循环局部回火的状态。

(三) 双椭球热源网格模型建立

移动热源采用Goldak双椭球模型描述电弧能量在熔池前后半区的不对称分布，前半椭球长度取4mm，后半椭球长度取10mm，横向半宽取5mm，深度取4mm，热效率按0.75输入。热流密度随焊接速度沿焊缝中心线移动，单个时间步控制在热源前进距离不超过最小单元边长的二分之一，使温度峰值不会被时间积分平均掉。热输入沿焊缝移动后，热应变、塑性应变和相变收缩共同决定冷却末期的残余应力水平。网格收敛采用焊趾外侧20mm处纵向应力作为监测量，局部单元边长由2mm缩小到1mm后，应力峰值变化小于8MPa，继续缩小到0.80mm时计算时间明显增加而峰值变化不足3MPa，最终选取1mm局部网格作为精度和效率的折中。残余应力耦合关系按式(1)表达。

$$\sigma = E \times \sqrt{aT - ep)^2 + \frac{(bcec + bses)^2}{(1+l)^2}} \tag{1}$$

式(1)中，σ为冷却后残余应力幅值，单位为MPa；E为冷却终态弹性模量，单位为MPa；a为线膨胀系数，单位为1/℃；T为位置温度降幅，单位为℃；ep为等效塑性应变，单位为无量纲；bc和ec分别为夹具拘束收缩权重和释放应变分量，bs和es分别为相变收缩权重和收缩应变分量，l为约束衰减系数，五者单位均为无量纲。平方根项把热收缩、塑性保留和拘束释放分量合成为残余应力幅值。

(四) 焊缝表面接触边界条件设定

焊缝表面与母材之间不设置人工间隙，熔敷金属在激活时间步内由静默单元转为实体单元，接触面热导接完全结合处理。对接坡口两侧的法向约束只在装配定位阶段施加，热源经过后逐步释放，以免把夹具刚度误算为焊缝本体约束。空气对流系数取20W/(m²·℃)，辐射发射率取0.80，板底与工装接触区引入等效换热系数，板面自由区只保留自然冷却边界。接触换热边界组合能够区分焊趾、板底和夹持边缘的散热差异，温度场在厚度方向形成由表层向板底衰减的梯度，残余应力高值区随冷却收缩被锁定在焊缝中心线及热影响区外缘。

(五) 船体板架焊接约束与热载荷设定

船体板架在实际装配中受到胎架支承、临时压码限位及相邻构件牵制，仿真约束不采用全边固定，而是把端部防刚体位移、

焊缝邻近夹持和冷却阶段释放写成逐步变化的边界。板端三个方向设置最小刚体约束，焊缝两侧80mm处布置临时夹持线，热源离开对应区段并冷却到200℃以下后解除夹持。热载荷按电流280A、电压28V、焊接速度5mm/s输入，单位长度热输入约1.18kJ/mm，层间温度控制在150℃以下，热源起弧和收弧段各保留20mm过渡距离，防止端部瞬时加载造成非真实峰值。约束热载荷设定使船体分段焊接的装配拘束进入力学计算，热输入、冷却速率和释放时点仍保持可单独改变的工艺变量。

二、焊接工艺参数对残余应力调控方法选择

(一) 焊接热输入温度场模拟精度校验

焊接工艺参数调控先校验温度场，因为残余应力的形成取决于峰值温度、冷却时间和塑性区宽度。以焊缝中心、焊趾外10mm和热影响区外30mm为三个计算测点，热输入从0.95kJ/mm提高到1.35kJ/mm时，中心测点峰值温度由1420℃升至1585℃，800~500℃冷却时间由8.60s延长到13.40s，焊趾外10mm处峰值温度由760℃升至910℃^[3]。熔合线宽度计算值与目标宽度差值不超过0.80mm时，后续应力比较才具备可比性。热输入偏低会造成熔深不足和局部未熔合，偏高则扩大热影响区并降低冷却收缩的局部化程度，模型中以1.15~1.25kJ/mm作为后续应力调控的主要区间。

(二) 工艺参数下残余拉应力分布判定

工艺参数改变后，纵向残余拉应力沿焊缝中心线呈中段高、端部缓释的分布形态，横向拉应力主要集中在焊趾外侧15~35mm范围。低热输入组虽然热影响区窄，但焊缝中心纵向拉应力达到338MPa，接近EH36常温屈服强度；中等热输入组的峰值降至304MPa，压缩塑性区与冷却收缩区宽度匹配较好；高热输入组峰值回升到326MPa，宽热影响区在冷却末期受到两侧冷板限制，横向收缩重新转化为拉应力。热输入梯度对应的应力结果见表1。

表1 不同热输入条件下残余应力计算结果					
热输入 工况	电弧功 率(kW)	焊缝中心峰 值温度(℃)	纵向拉应力 峰值(MPa)	横向拉应力 峰值(MPa)	高应力区 宽度(mm)
偏低热 输入	6.76	1410	338	156	32
较低热 输入	7.28	1475	319	149	35
中等热 输入	7.84	1530	304	142	39
略高热 输入	8.40	1560	311	151	44
偏高热 输入	8.96	1605	326	168	54
过高热 输入	9.60	1640	342	181	63

表1中，中等热输入工况的纵向拉应力峰值最低，高应力区宽度仍控制在39mm；偏高热输入虽然有利于熔深稳定，却把高应力区宽度扩大到54mm，过高热输入进一步把横向拉应力峰值推至181MPa，应力峰值和影响区尺度应同时纳入船体高强度钢焊接调控判据。

三、焊接顺序对残余应力调控方法选择

(一) 分段焊接顺序熔合线精度校验

焊接顺序调控用于改变热循环叠加方式, 模型比较直通焊、对称分段退焊和跳焊三种路径。熔合线精度校验不只看焊缝外形, 还要检查每一段起弧、收弧位置的温度重叠区; 当分段长度取120mm、退焊搭接长度取15mm时, 熔合线最大偏差约1.60mm, 端部未熔透风险低于直通焊, 跳焊路径在相邻段二次加热处出现更宽的等温带^[4]。搭接长度短于10mm时, 收弧端温度衰减过快, 熔合线外侧会出现断续低温带; 搭接长度超过25mm后, 重复加热又会扩大局部软化区。对称分段退焊使热源在结构中部形成相向收缩, 板端自由收缩量被削弱, 焊缝中段的纵向应力峰值不再集中到单一连续区段。

(二) 不同焊接顺序应力峰值比较

三种焊接顺序的残余应力差异主要来自热源停留位置和冷却收缩先后关系, 长焊缝中段是否连续受热决定了拉应力峰值是沿一条带状区域累积, 还是被分段切开后在多个短区间内释放。直通焊条件下, 焊缝终端附近产生326MPa纵向拉应力峰值, 峰值区沿末端约70mm延伸; 对称分段退焊把峰值降到291MPa, 高应力区被分散为两个短区段; 跳焊虽然能够降低板端角变形, 但相邻段重复升温使中部横向拉应力增加到186MPa, 且局部高温区在焊道交界处形成较陡的温度梯度。对船体高强度钢板架而言, 对称分段退焊更适合长焊缝残余应力调控, 跳焊只适用于端部变形控制要求高且允许增加局部打磨或后热处理的构件。不同焊接顺序的峰值响应见图2。

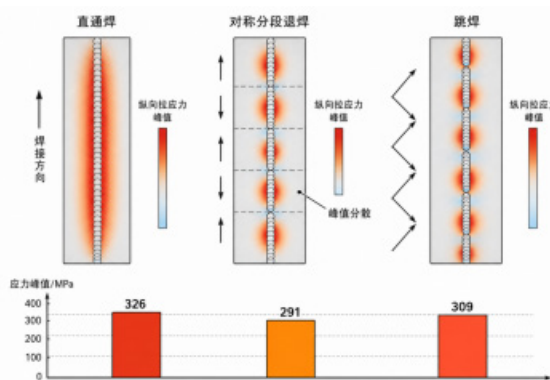


图1 不同焊接顺序下应力峰值响应

图1中, 直通焊条带的红色高应力区连续贯通, 对称分段退焊把红色峰值拆分成多个短区段, 下方柱形轴中291MPa低于直通焊326MPa和跳焊309MPa; 黑色方向箭头显示退焊路径把收缩方向分散到相邻区段, 减少了单端终止处的应力累积。

四、约束释放量对残余应力调控方法选择

(一) 夹具释放时点残余应力精度校验

约束释放量调控关注夹具刚度在焊后冷却阶段的保留时间。模型把释放时点设置为焊缝金属冷却到400℃、250℃和150℃三

种状态, 并对板面挠度与焊趾应力的变化。400℃释放时板面角变形较大, 焊趾外侧拉应力峰值为276MPa; 250℃释放时角变形控制在1.80mm以内, 拉应力峰值为294MPa; 150℃释放时变形最小, 但焊缝中心纵向拉应力升至321MPa^[6]。三组结果之间的差异表明, 释放时点并非越晚越稳, 冷却末期保留过高夹持刚度会把纵向收缩锁入焊缝中心。释放时点精度校验说明, 夹具保留过久会把热收缩限制转化为残余拉应力, 过早释放又会扩大板架面外变形。

(二) 约束释放后残余应力重分布判定

约束释放后的残余应力不是简单降低, 而是在焊缝中心、热影响区外缘和夹持线附近重新分配。夹具等效刚度从满刚度状态降至0.40kN/mm时, 焊缝中心纵向拉应力由312MPa降至294MPa, 夹持线附近横向拉应力由118MPa增至140MPa; 刚度继续降至0.10kN/mm后, 板端转角释放使焊趾外侧出现局部压应力带, 但板面挠度超过2.40mm^[6]。调控方法应把释放量分成两级, 先在250℃附近解除外侧夹具, 再在150℃以下解除靠近焊缝的定位约束, 使拉应力峰值、横向应力迁移和面外变形保持同向受控。调控变量对应力分布的作用见图1。

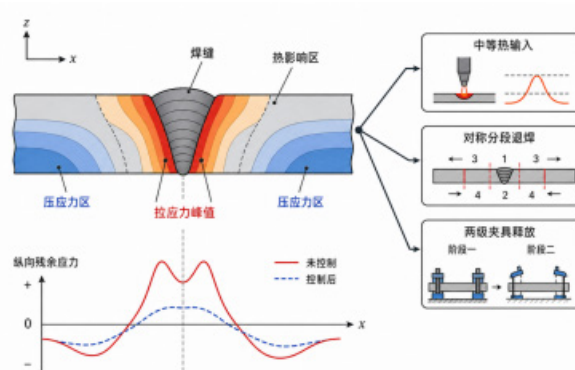


图2 船体高强度钢板焊接残余应力分布及调控示意

图2中, 红橙色拉应力峰值沿焊缝两侧集中, 蓝色压应力区分布在远离焊缝的板面区域; 控制后蓝色虚线曲线的峰值低于未控制红线, 右侧中等热输入、对称分段退焊和两级夹具释放分别对应温度峰值、收缩路径和夹持刚度三个可调变量。

(三) 船体板架焊后变形响应评估

焊后变形响应评估把残余应力调控结果转化为船体分段装配可接受的几何偏差。采用中等热输入、对称分段退焊和两级约束释放组合后, 焊缝中心纵向拉应力峰值约285MPa, 比直通焊固定夹持工况的338MPa低53MPa; 焊趾外侧30mm处横向拉应力由174MPa降至139MPa, 板面最大挠度控制在1.90mm。若单独追求更低峰值应力而提前释放夹具, 挠度会超过3mm并影响后续分段合拢; 若单独压低变形而延迟释放, 应力峰值又会接近屈服强度, 焊趾处疲劳裂纹萌生的驱动力会随拉应力保留而增大。组合调控还使焊趾拉应力带分散, 后续矫形可集中在短区段内完成。短区段处理还能减少二次热影响范围。调控方法的有效区间应以峰值应力低于0.85倍屈服强度、板面挠度不超过2mm和高应力区宽度小于45mm为共同判据。

五、结束语

船体高强度钢焊接残余应力分布的数值模拟应以真实板架接头、温度对应材料参数、移动热源和分步约束为共同基础，模型只有同时捕捉温度场峰值、冷却时间、塑性区宽度和夹持边界，才能解释焊趾及熔合线附近的拉应力集中。热输入、焊接顺序和

约束释放量对残余应力具有不同作用方向：中等热输入能够兼顾熔合质量和塑性区尺度，对称分段退焊可削弱连续终端收缩造成的峰值集中，两级夹具释放则在板面变形和应力释放之间保留可操作余量。以纵向拉应力峰值低于0.85倍屈服强度、横向高应力区宽度小于45mm和板面挠度不超过2mm为共同判据时，组合调控方法更适合EH36船体高强度钢长焊缝施工参数比选。

参考文献

- [1] 岳阳, 王树明. 高强异形厚板焊接残余应力分布及消除方法研究 [J]. 交通科技, 2025, (3): 33-35+50.
- [2] 石伟刚. Q690 高强度结构钢焊缝残余应力分布情况研究 [J]. 中国机械, 2026, (5): 67-70.
- [3] 苏永攀, 王树明, 岳阳. 不同厚度平板对接焊缝残余应力分布规律研究 [J]. 智能城市, 2025, 11(7): 144-148.DOI:10.19301/j.cnki.zncs.2025.07.034.
- [4] 冯莹莹, 周俊甫, 郭学浩, 等. 轧制碳钢 / 不锈钢复合板残余应力分布的数值模拟以及调控 [J]. 机械工程材料, 2025, 49(4): 86-91.
- [5] 廖文麒, 庄一舟, 郑祥隆, 等. 焊接顺序对组合梁加劲肋焊缝残余应力及疲劳强度的影响分析 [J]. 焊接技术, 2025, 54(11): 34-39+145.DOI:10.13846/j.cnki.cn12-1070/tg.2025.11.018.
- [6] 李冠楠, 毛峙淑, 王重阳, 等. 外部约束对 NM450TP 钢 T 字接头焊接残余应力的影响 [J]. 机械工程学报, 2025, 61(20): 91-102.