

DOI: 10.7512/j.issn.1001-2303.2026.05.07

基于690镍基合金多层多道焊脆性温区模拟数据的裂纹判据研究

胡广旭¹, 钟永瑞¹, 郭 泉²

1. 哈尔滨商业大学 轻工学院, 黑龙江 哈尔滨 150028

2. 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 150023

摘要: 高温镍基合金多层多道焊过程中, 由于多重热循环作用, 易于在焊缝内部产生高温失塑裂纹, 在应用中存在安全隐患, 在核电结构应用中尤其重要。针对该问题, 本研究基于多重热循环中的温度因素, 开展高温镍基合金多层多道焊实验与数值模拟研究, 基于开裂区域多重热循环仿真温度数据结果, 探索多层多道焊焊缝开裂区多重热循环在高温镍基合金脆性温度停留与裂纹开裂情况的关系, 从而确定基于仿真热循环数据的开裂判据。首先, 基于单道焊实验与数值模拟, 验证仿真模型; 其次, 开展多层多道焊实验与模拟, 通过实验开裂位置点确定仿真数据提取点, 获取开裂处温度特性。基于以上研究, 最终获取在实验构件边缘位置附近, 脆性温区停留71.7~88.1 s, 是高温镍基合金开裂敏感区。本研究提供一种基于仿真温度判定高温镍基合金裂纹的技术手段。

关键词: 多层多道焊; 数值模拟; 多重热循环; 温度场; 裂纹判据

中图分类号: TG402 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-2303(2026)05-0061-10

Research on Crack Criterion based on Simulation Data of Brittle Temperature Zone of 690 Nickel-based Alloy Multilayer Multi-Pass Weld

HU Guangxu¹, ZHONG Yongrui¹, GUO Xiao²

1. College of Light Industry, Harbin University of Commerce, Harbin 150028, China

2. Harbin Welding Institute Limited Company, Harbin 150023, China

Abstract: During the multi-layer multi-pass welding process of high-temperature nickel-based alloys, the action of multiple thermal cycles readily induces ductility-dip cracking (DDC) within the weld metal. This poses potential safety hazards during service, and is of particular importance in applications for nuclear power structures. To address this issue, this study, focusing on the temperature factor within these multiple thermal cycles, conducted experimental and numerical simulation research on multi-layer multi-pass welding of high-temperature nickel-based alloys. Based on simulated thermal cycle temperature data for the cracking region, the relationship between the dwell time within the brittle temperature range (BTR) of the alloy and crack initiation in the multi-layer multi-pass weld cracking zone was investigated, thereby establishing a cracking criterion derived from the simulated thermal cycle data. Firstly, single-pass welding experiments and numerical simulations were performed to validate the simulation model. Secondly, multi-layer multi-pass welding experiments and simulations were conducted; simulation data extraction points were determined based on experimentally identified crack locations, enabling the acquisition of temperature characteristics associated with cracking. Based on this research, it was ultimately determined that a dwell time between 71.7 s and 88.1 s within the brittle temperature range, occurring near the edge region of the test component, constitutes a susceptibility zone for cracking in high-temperature nickel-based alloys. This study provides a technique for crack susceptibility assessment in high-temperature nickel-based alloys based on simulated temperature data.

收稿日期: 2025-06-05 修回日期: 2025-07-01

作者简介: 胡广旭(1983—), 男, 博士, 讲师, 主要从事焊接模拟研究。E-mail: hgxu_2020@126.com。

通讯作者: 钟永瑞(2000—), 男, 硕士研究生, E-mail: 2230479928@qq.com。

Keywords: multi-layer multi-pass welding; numerical simulation; multiple thermal cycles; temperature field; crack criterion

引用格式:胡广旭,钟永瑞,郭泉. 基于690镍基合金多层多道焊脆性温区模拟数据的裂纹判据研究[J]. 电焊机, 2026, 56(5): 61-70.

Citation: HU Guangxu, ZHONG Yongrui, GUO Xiao. Research on Crack Criterion based on Simulation Data of Brittle Temperature Zone of 690 Nickel-based Alloy Multilayer Multi-Pass Weld[J]. Electric Welding Machine, 2026, 56(5): 61-70.

0 引言

镍基合金因具有优异的耐腐蚀和抗氧化性能,常用于服役条件苛刻、安全性能要求高的核电设备上^[1]。核电装备多采用厚板多层多道焊结构,由于低熔点合金元素的存在,在多道焊接热循环作用下,易产生高温失塑裂纹(DDC)。在核电装备实际结构焊接制造过程中,现场难以对真实结构进行精细检测,容易疏漏,存在安全隐患。随着计算机技术的迅猛发展,有限元模拟可以获取大型结构内部热力变化,进而分析其内部裂纹产生的原因,这对材料科学研究和工程应用具有重要意义。

一般对焊接裂纹敏感性评价的试验有热塑性试验^[2]、可调拘束试验^[3]、STF应变断裂试验^[4]、裂纹控制试验(PVR试验)^[5]等,这些试验及理论主要模拟裂纹的开裂特征或机制,并大多是基于小尺寸试样,由于实际工程核电装备多层多道焊焊接过程复杂,上述试验方法与实际焊接在应变、应变速率、应力、热循环以及显微组织等方面存在显著差异,难以满足实际工程的需求,其试验结果难以指导实际工程焊接。

姚文选等^[6]对STF试验中传统等截面试样进行优化设计改为变截面试样,并通过高温拉伸试验观察试样表面裂纹形成情况,结合有限元分析,获得裂纹形成的临界应变和临界应力,从力学角度对DDC敏感性进行评价,分析其产生机制。崔巍等^[7]利用ABAQUS有限元软件模拟核电设备压力容器安全端焊接接头的性能,比较焊缝及热影响区在轴向、环向和厚度方向的塑性应变分布,找出失塑温度区间内主塑性应变累计量最大的区域,用于预测DDC裂纹的敏感性,并指出由于焊接接头两端存在强拘束,且对接焊缝经历了多次热循环,因此最易在该区域发生裂纹。McCracken等^[8]提出了一种基于有限元的高拘束窄间隙焊缝试验方法,模拟了窄间隙多层多道焊的温度场和应力场,结果表明DDC

最容易出现多重热循环和高应变累积的焊缝区域,尤其是前道焊缝在经历后续焊接的热循环后发生塑性应变累积,最终引发开裂。郭泉等^[9]提出基于大厚度堆焊热裂纹试验方法,通过有限元模型分析多层多道焊过程中典型焊缝部位的温度影响、传热机制及应力应变演化特征,揭示了典型部位的高温停留时间及应变损耗特点。

用于评估镍基合金热裂纹的判据已有多种形式,包括临界应变速率、失塑温度区间变化、最大裂纹距离、凝固裂纹温度范围、基于微观组织的热裂纹判据、临界应变 $\varepsilon_{\min}$ 以及与化学成分相关的判据等^[10-15]。然而,目前仍缺乏基于焊接仿真热循环数据的开裂判据。

本文通过实际多层多道焊试验确定裂纹产生位置,进行开裂区域局部多层多道焊建模,进行温度场有限元仿真分析,提取多重热循环温度场结果数据,找到高温镍基合金开裂与不开裂区域在脆性温度区间焊接热循环变化规律,得到基于模拟热循环停留的热裂纹判据,本研究旨在推动实际构件有限元建模方法的发展并得到判据,为解决实际工程焊接裂纹问题的发展提供新思路。

1 热源校核试验

为探究有限元仿真对实际焊接温度场的精确模拟能力及熔池形貌的吻合度验证,本文开展了热源校核的试验与仿真分析,同时后续多层多道焊利用单道焊模拟的热源模型以及边界条件进行仿真模拟,单道次焊接模拟与多道次焊接模拟采用相同热源模型参数与边界条件。

1.1 单道焊焊接

首先进行单道焊堆焊试验,其中焊接工艺参数为:焊接电流为直流正接220 A,焊接电压12 V,焊接速度为120 mm/min,送丝速度1 200 mm/min,保护气体为99.99% Ar,流量为14~18 L/min,采用自动

填丝 TIG 焊接工艺焊接, 厚板提前预热至室温 25℃。

试验材料是尺寸 256 mm×150 mm×40 mm 的 A508-3 厚钢板, 在钢板上堆焊单道焊缝, 焊丝材料选用 690 镍基合金, 化学成分如表 1、表 2 所示。

表 1 母材 A508-3 的化学成分(质量分数, %)

Table 1 Chemical composition of base metal A508-3 (wt. %)									
Fe	Mn	Ni	Mo	Cr	C	Si	Cu	P	S
余量	1.41	0.76	0.51	0.44	0.19	0.15	0.023	0.0031	0.0019

表 2 焊缝 690-7A 的化学成分(质量分数, %)

Table 2 Chemical Composition of Weld 690-7A (wt %)							
Ni	Cr	Fe	Nb	Ti	Al	Mn	Si
余量	29.3~30.3	9.7~10.3	0.7~1.0	0.4~0.7	0.2~0.7	0.2~0.5	0.1~0.2

焊后冷却完成后, 采用砂纸对焊缝表面残渣进行打磨清除, 并使用酒精擦拭以去除表面污物, 随后将试样置于通风环境中。待处理完成后, 通过线切割获取焊缝横截面并利用光学显微镜测量其熔深、熔宽及余高。

1.2 熔池验证模拟

1.2.1 网格划分

如图 1 所示, 模型通过 Solidworks 建模, 并利用 Hypermesh 进行网格划分, 焊缝及热影响区附近网格划分密集; 远离焊缝网格划分稀疏, 并将网格模型长度减少一半, 减少网格数量, 以便计算时提高计算效率, 按 1 mm/格等分 128 mm。模型单元总数为 75 256, 节点总数为 80 179。

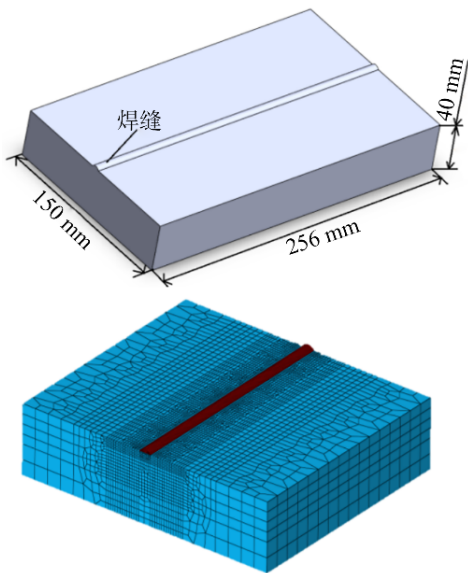


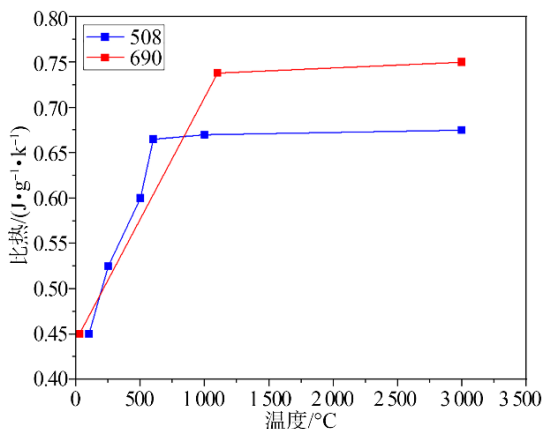
图 1 网格模型示意

Fig. 1 Schematic diagram of the mesh model

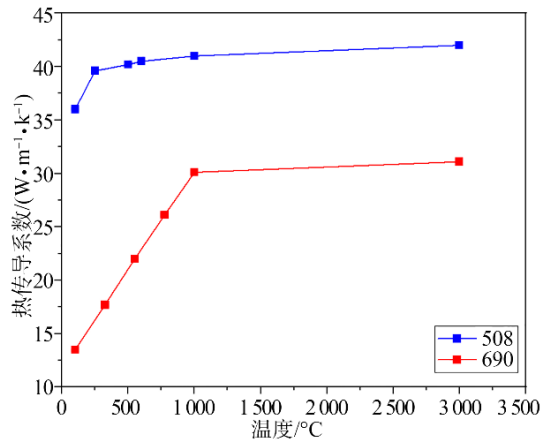
1.2.2 材料特性及边界条件

模拟中使用的 508 厚钢和 690 镍基合金性能参数经过测量以及数值方法拟合推演, 如图 2 所示。

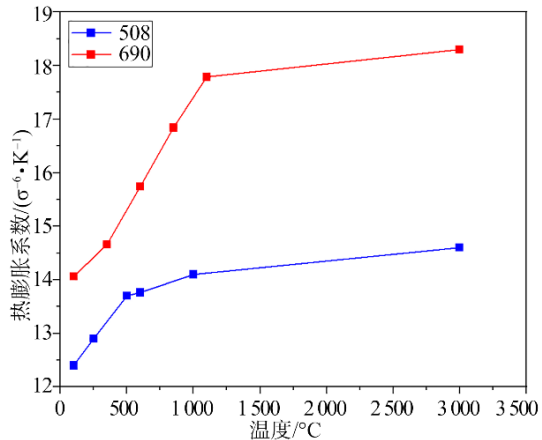
建模采用填料焊缝方式, 设置边界条件热对流和热源模型, 其中热对流设置为环境温度 25°, 空气



(a) 比热容



(b) 热传导系数



(c) 热膨胀系数

图 2 508 钢及 690 镍基合金材料参数曲线

Fig. 2 Parameter curves of 508 steel and 690 nickel-based alloys

冷却的对流换热系数为 0.03, 加载在模型的所有存在的表面上, 表达式如下:

$$Q = hA(T - T_0) \quad (1)$$

式中 Q 为导热速率; h 为对流换热系数; A 为对流换热面积; T, T_0 为工件加热时温度和初始温度。

为保证仿真结果与试验一致, 必须采用合适的焊接热源模拟焊接过程, 传统电弧焊接方法焊接热源常用双椭球热流分布的热源模型, 基于高斯分布能极大反映热源在熔深方向上的能量分布^[16], 并且该热源模型能够更准确地模拟焊接过程中的温度场和熔池形状。其中, 前、后半椭球内热源分布表达式如式(2)、式(3)所示:

$$q(x, y, z) = \frac{6\sqrt{3}f_1Q}{\pi a_1 bc \sqrt{\pi}} \exp(-3\frac{x^2}{a_1^2}) \exp(-3\frac{y^2}{b^2}) \exp(-3\frac{z^2}{c^2}) \quad (2)$$

$$q(x, y, z) = \frac{6\sqrt{3}f_2Q}{\pi a_2 bc \sqrt{\pi}} \exp(-3\frac{x^2}{a_2^2}) \exp(-3\frac{y^2}{b^2}) \exp(-3\frac{z^2}{c^2}) \quad (3)$$

$$Q = \eta UI \quad (4)$$

式中 q 为热流密度函数(单位: J/mm^3); η 为热源效率; U 为电弧电压(单位: V); I 为焊接电流(单位: A); a, b, c 为椭球参数; f_1, f_2 为前后半椭球的能量比, $f_1 + f_2 = 2$ 。

由实际焊接工艺参数调试以及根据双椭球热源模型参数知识, 确定双椭球热源模型的参数^[17], 要保证焊接温度场计算的准确性, 双椭球热源模型的参数如下: 加载能量功率为 $3.6e6 W$, 能量效率为 0.6, 其热源模型参数分别为前端长度 $a_1 = 3 mm$ 、后端长度 $a_2 = 5 mm$ 、熔宽 $b = 12 mm$ 、熔深 $c = 5 mm$, 后续内容热源模型及参数都采用此双椭球热源模型。

将热源移动速度设置为与实际焊接速度一致, 即 $2 mm/s$, 其次添加焊接路径和焊缝填料, 将该热源加热条件施加在焊缝及其周边所有区域。

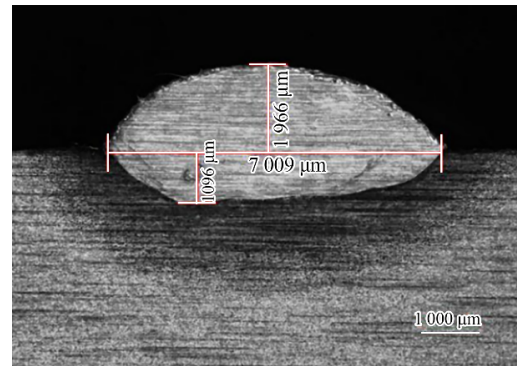
图3为焊缝熔池中心截面温度场云图与实际焊缝熔池对比, 云图采用后处理技术保证 $1350^\circ C$ 以上温度位置为灰色区域, 可以看出, 模拟熔池截面形貌面积达到焊缝填料金属面积, 与真实熔池形貌对比可以看出, 模拟熔池与真实熔池形貌吻合, 表3

误差在 0.01% 以下, 说明有限元可以有效模拟实际焊接熔池形貌, 并可以看到结构内部温度的动态变化。进而可以建立多层多道焊仿真模型主要参数, 最终建立有效的焊接热弹性有限元模型。

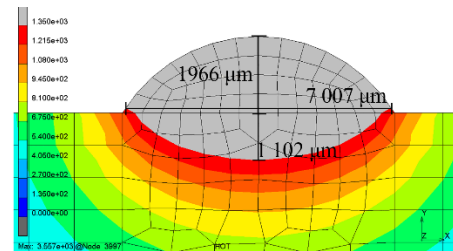
表3 熔池参数对比

Table 3 Comparison of melt pool parameters

熔池参数	焊缝熔深/mm	焊缝熔宽/mm
实际	1.096	7.009
模拟	1.102	7.007



(a) 实际焊缝熔池示意



(b) 有限元焊接熔池示意

图3 实际与模拟熔池对比示意

Fig. 3 Schematic diagram of the actual and simulated melt pools

2 多层多道焊试验及模拟

2.1 试验及截面裂纹结果

实际多层多道焊试验基材为 $300 mm \times 300 mm \times 60 mm$, 在基材上堆焊 30 层 30 道焊缝, 尺寸 $300 mm \times 160 mm \times 40 mm$, 试验材料与焊接工艺同热源校核试验相同。

多层多道焊过程中, 为避免焊接时上层焊缝对下层焊缝的热循环增加焊缝热裂纹敏感性, 需要严格控制每层焊接间隔时间, 并且焊接时层间温度应控制在 $150^\circ C$ 以下, 同时要保证每道焊缝焊完要打磨表面。随后, 采用电火花线切割切取截面, 提取

横向截面与纵向截面各2个试样,每个试样4 mm厚,并对试样表面进行着色显示裂纹,标记着色后的裂纹,如图4所示。

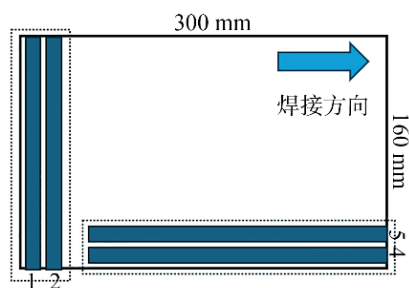


图4 切片截面

Fig. 4 Schematic view of the slice section

图5、图6为着色后的切片截面,由图5横向切片可见,DDC裂纹主要分布在宽度方向两侧边缘(水平方向10 mm处),厚度方向在中上部(20~40 mm),裂纹沿厚度方向延伸,最上层焊缝几乎无裂纹,切片位置对裂纹分布影响较小;图6纵向切片中发现的裂纹,横向覆盖整个宽度,随着切片位置由外向内,裂纹呈减少趋势,裂纹同样集中于厚度中上部,裂纹走向沿厚度方向或者与厚度成45°方向。

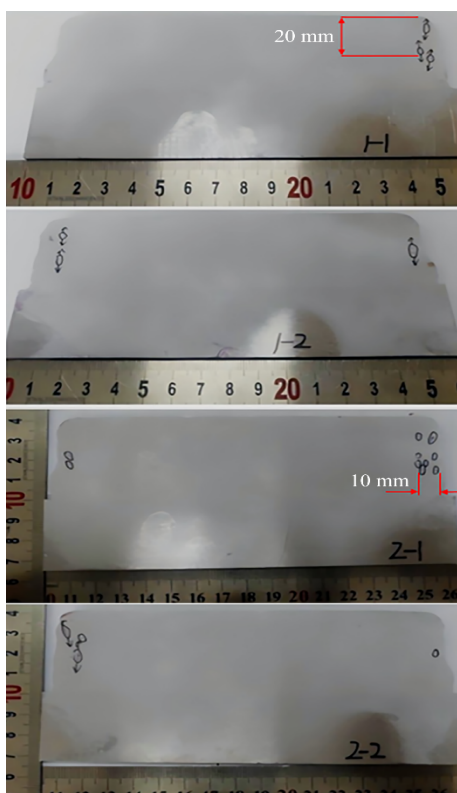


图5 横向切片截面

Fig. 5 Cross-sectional slices

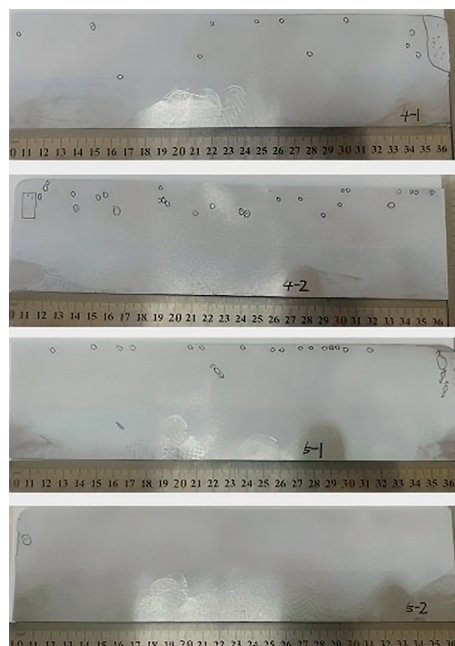


图6 纵向切片截面

Fig. 6 Longitudinal slice section

2.2 多层多道焊有限元模型

进行实际多层多道焊模拟仿真,其中多层多道焊模型的材料构建、边界条件建模和热源模型及其参数都与验证模型一致。

在30层30道实际构件焊接中,对一道焊缝具有脆性温区影响的区域仅限于该道焊缝的周围,因此,仅建立局部多层多道焊模型即可,建立的边缘区域(实验中裂纹产生的集中区域)4层11道焊缝多层多道焊数值模型如图7所示。其中焊缝1、焊缝2分别距离边缘10 mm和5 mm。从上述切片结果看出,DDC主要集中于距边缘约10 mm处且厚度方向中上部(20~40 mm),因此本文提取同层焊缝距离边缘不同位置节点热循环曲线,用于分析实验裂纹开裂位置与焊接热循环的关系,并根据实际裂纹产生位置进行判断,提取节点如图8所示。

其次,从实验结果可知,开裂位置主要集中在堆焊厚度超过20 mm区域,因此本研究分别对不同堆焊厚度模型进行温度场数值模拟,分别建立了不同厚度模型:1/3模型、2/3模型,以及总高为40 mm的不同数值模型,提取距离边缘相同距离且不同厚度的数值模型,如图9所示。通过不同厚度模型,分析厚度对多层多道焊温度影响,进而确定裂纹随堆焊厚度变化的温度因素。

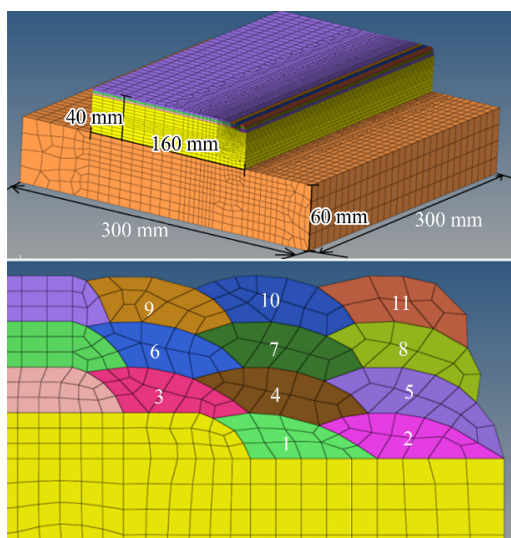


图7 整体边缘焊缝示意

Fig. 7 Schematic diagram of the overall edge weld

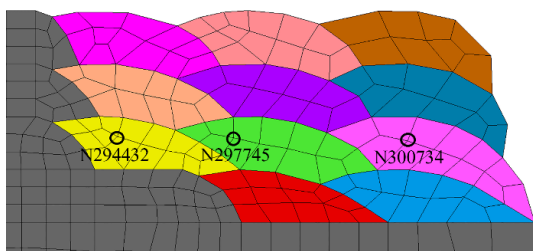


图8 提取节点示意

Fig. 8 Schematic diagram of the extraction node

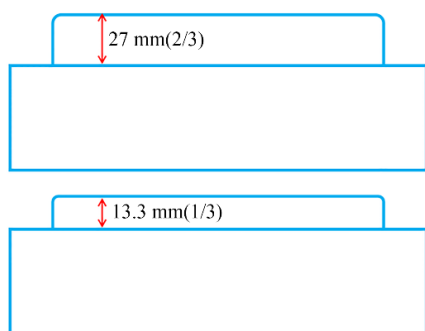


图9 2/3模型、1/3模型示意

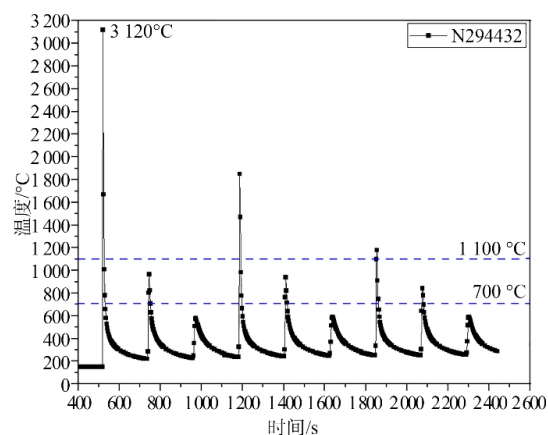
Fig. 9 Schematic diagram of 2/3 model and 1/3 model

3 模拟结果分析

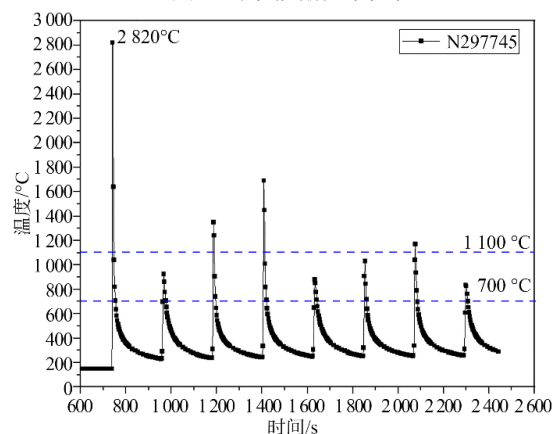
3.1 同层横向节点提取

实际切片截面中可知裂纹主要集中在距边缘 10 mm 处,厚度方向在中上部 20~40 mm 处,结合实际切片中裂纹分布,确定在焊缝 3、4、5 上提取热循环数据的节点位置,节点距离边缘 15 mm、10 mm、

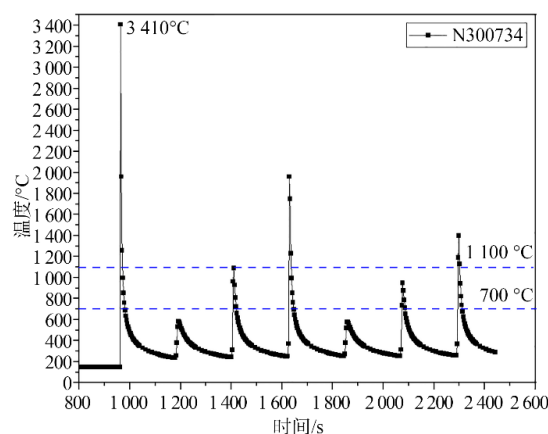
4.5 mm。提取同层 3 个焊缝节点多层多道焊热循环曲线。并根据镍基合金脆性温度区间 700~1 100 °C,获取其在脆性温度区间停留总时间。焊缝 3、4、5 多重热循环曲线如图 10 所示。其中焊缝 1、焊缝 2 已



(a) N1 节点热循环曲线



(b) N2 节点热循环曲线



(c) N3 节点热循环曲线

图10 同层焊缝横向节点热循环曲线

Fig. 10 Thermal cycling curves of transverse joints of welds of the same layer

完成焊接,焊缝3的峰值温度达3 120℃,共经历9次热循环,其中有6次循环温度处于失塑温度区间;焊缝4、5峰值温度是2 820℃、3 410℃,焊缝4共经历8次热循环。通过分析可获得各次循环中升温 and 降温阶段在失塑区间的停留时间。

需要注意的是,在热循环曲线中首次热循环升

温过程超过其熔点,不应计入失塑区间分析,因此需排除该次升温阶段。相关数据见表4(其中,将提取三个节点从左到右定义为节点N1、N2、N3)。

图11为焊缝3上节点N1多重热循环曲线的局部放大图,其余焊缝多重热循环曲线的局部放大图与N1类似,下面不再赘述。

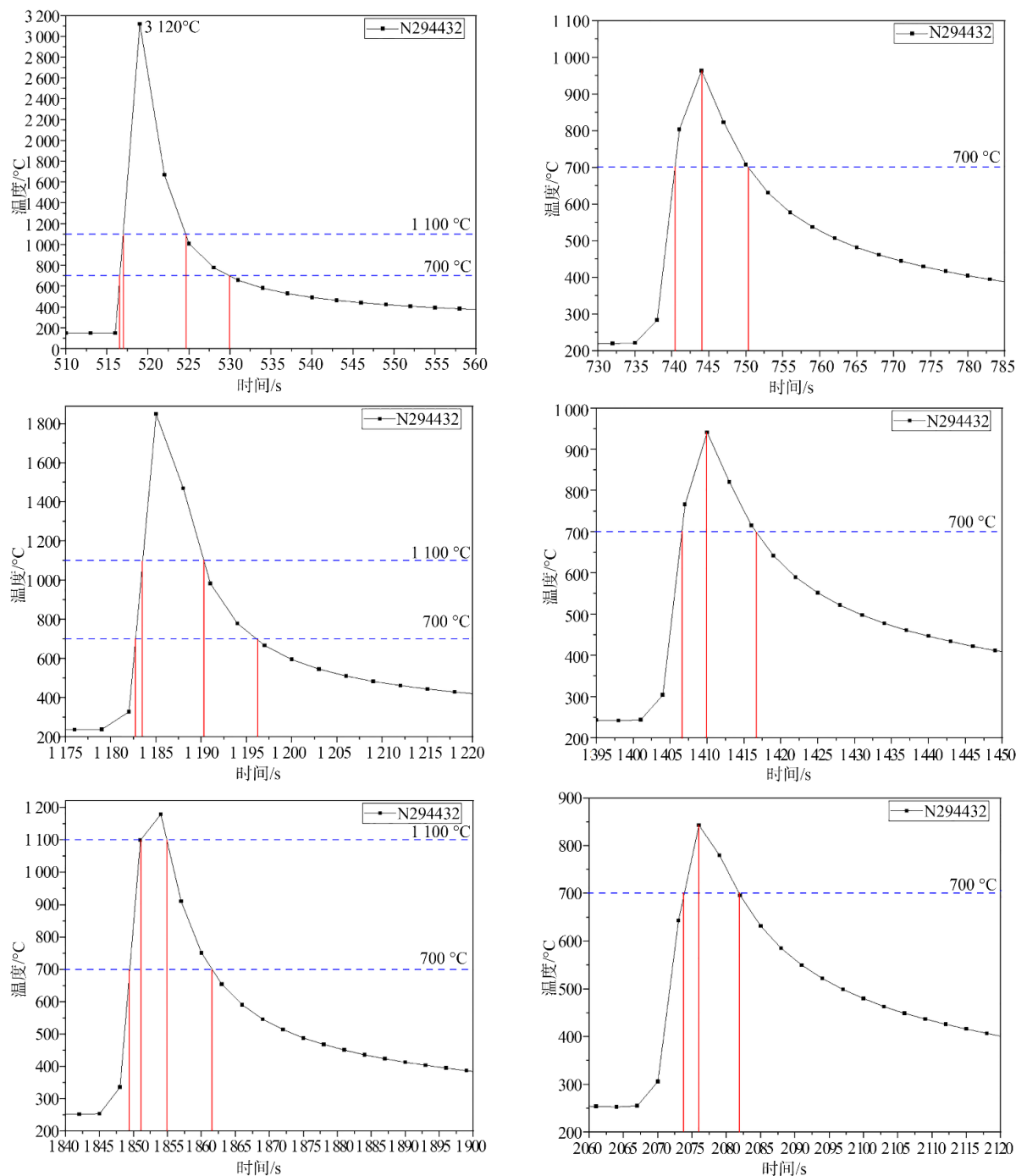


图11 节点N1在失塑温区局部放大曲线示意

Fig. 11 Schematic of the locally magnified curve at node N1 in the plastic instability temperature range

表4 同层不同焊缝节点 700~1 100 °C失塑温区停留时间
Table 4 The residence time of different weld joints on the same layer is 700~1 100 °C in the loss temperature zone

升温时长/s			降温时长/s			总时长/s		
N1	N2	N3	N1	N2	N3	N1	N2	N3
0	0	0	5.2	6.7	9.6	5.2	6.7	9.6
3.6	3	4.2	6.2	9.5	10.1	9.8	12.5	14.3
0.7	1.2	0.8	5.9	6.1	9.8	6.6	7.3	10.6
3.4	0.9	3.2	6.7	7.2	9.5	10.1	8.1	12.7
1.6	2.3	1.5	5.7	9.9	10.4	7.3	12.2	11.9
1.2	4.1		5.8	6.8		7	10.9	
	2.9			7.9			10.8	
	1.8			9.2			11	
合计						46	79.5	59.1

在焊缝 3、4、5 的热循环曲线中,焊缝 5 峰值温度最高,说明边缘位置上其热量向一侧和深度方向传导,在焊缝深度方向容易形成热量集中,边缘位置不同焊缝的热循环曲线中,随着距离边缘位置距离减小,热循环温度整体升高。

根据对焊缝 3、4、5 节点热循环数据的分析结果显示,在失塑温度区间内,焊缝 4 经历了最显著的多重热循环作用,其累计停留时间达 79.5 s,显著高于其他焊缝,热作用持续性更强,焊缝 4 中提取节点距边缘 10 mm,与图 5 中实际裂纹产生位置一致,表明该区域为裂纹发生的危险区。

进一步提取该节点 N297745 两侧的相邻节点(见图 12),以确定焊缝 4 在失塑温区内多重热循环停留时间的范围(其中,将提取 N297745 两侧节点从左到右定义 N4 和 N5),结果如表 5 所示。

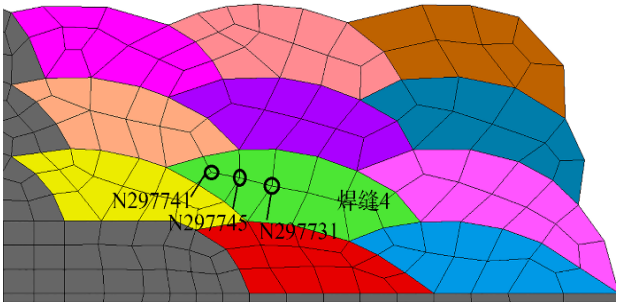


图 12 焊缝 4 提取节点
Fig. 12 Weld 4 extraction nodes

由焊缝 4 中相邻三个节点的热循环数据可知,其在失塑温度区间的累计停留时间介于 71.7~88.1 s。该区间内的多重热循环作用可能对应于 DDC 裂纹的危险区域,需进一步验证其合理性。

表5 同层相邻节点 700~1 100 °C失塑温区停留时间
Table 5 The residence time of the adjacent nodes on the same layer is 700~1 100 °C

升温时长(s)		降温时长(s)		总时长(s)	
N4	N5	N4	N5	N4	N5
0	0	6.5	6.7	6.5	6.7
1.6	3.6	8.2	10.6	9.8	14.2
0.9	4.4	5.8	6.6	6.7	11
1.1	0.9	7	7.3	8.1	8.2
4.2	3.4	5.5	11	9.7	14.5
3.6	3.4	7.1	5.9	10.7	9.3
3.5	3.1	8	8.2	11.5	11.3
3.9	2.7	4.8	10.2	8.7	12.9
合计				71.7	88.1

3.2 不同堆焊厚度热循环对比

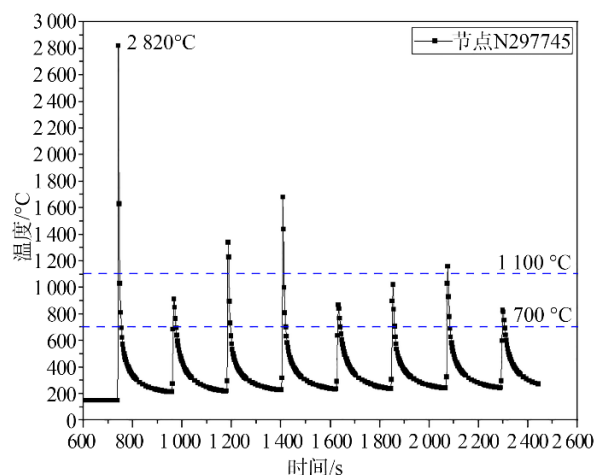
实际截面观察表明,多层多道焊层 20 mm 以下几乎未见裂纹,为此通过有限元模拟验证中部与下部焊缝的裂纹分布。分别提取堆焊层 2/3 厚度(约 27 mm)和 1/3 厚度(约 13.3 mm)处焊缝 4 上相应节点的热循环数据,判断其是否处在上述失塑温区停留时间范围内。其热循环曲线如图 13 所示,提取结果如表 6 所示(其中,将 2/3 厚度定义为 N6,1/3 厚度定义为 N7)。

表6 不同焊缝厚度相同节点 700~1 100 °C失塑温区停留时间(焊缝 4)

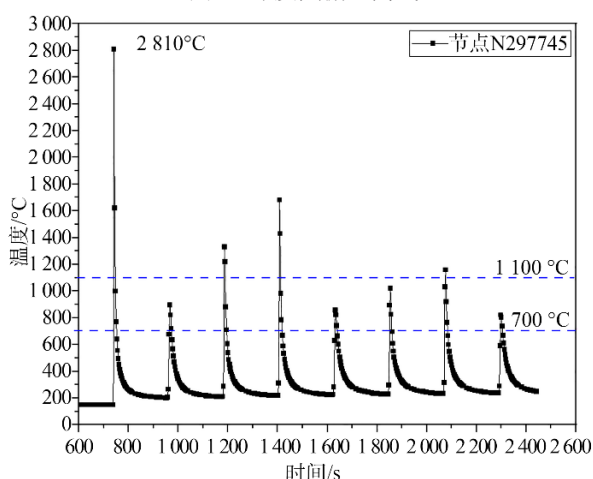
升温时长/s		降温时长/s		总时长/s	
N6	N7	N6	N7	N6	N7
0	0	6.2	5.2	6.2	5.2
2.8	2.6	8.8	6.8	11.6	9.4
1.3	1.2	5.8	5.2	7.1	6.4
0.9	0.9	6.8	5.9	7.7	6.8
2.1	2.1	9.2	7.6	11.3	9.7
4	3.9	6.5	5.9	10.5	9.8
3.2	3	8	7.2	11.2	10.2
1.6	1.5	8.6	7.5	10.2	9
合计				75.8	66.5

当焊缝高度为 27 mm 时,其热循环曲线与完整高度 40 mm 的多层多道焊缝差异不大,焊缝 4 上节点在失塑温区的累计停留时间为 75.8 s,处于前述 71.7~88.1 s 的危险范围内,且实际切片中裂纹主要出现在中上部 20~40 mm 处,验证结果与实际相符。

而焊缝高度为 13.3 mm(约为 1/3 高度)时,焊缝



(a) 2/3 厚度热循环曲线



(b) 1/3 厚度热循环曲线

图13 相邻节点热循环曲线

Fig. 13 Thermal cycling curves of adjacent nodes

4上节点在失塑温度区间的停留时间仅为66.5 s,明显低于40 mm和27 mm焊缝对应节点的停留时间。因为多层多道焊厚度较小时,镍基合金导热未起到主导作用,热循环主要受基体影响,多重热循环温度在镍基合金中没有形成热量集中,结合实际切片中焊缝层20 mm以下处未观察到裂纹的情况,说明该节点未处于裂纹危险区域,进一步验证了脆性温区多重热循环停留时间对DDC裂纹敏感性的合理性。

4 结论

(1)通过验证实际焊缝熔池形貌,并进行实际多层多道焊试验,切片找到裂纹开裂位置;进行多

层多道焊边缘处局部建模仿真分析,同层横向焊缝3、4、5上节点N1、N2、N3距边缘为15 mm、10 mm、4.5 mm,热循环峰值温度整体升高,焊缝5峰值温度最高,由于边缘位置一侧阻碍,热量只能向下传导,在焊缝深度方向形成热量集中。

(2)焊缝4在失塑温区间经历多重热循环作用,其累计停留时间达79.5 s,明显高于其他焊缝,且实际切片中裂纹产生的位置距离边缘10 mm处,与焊缝4节点N2距离边缘相同,表明裂纹危险位置在节点N2附近。

(3)随后进一步提取焊缝4上节点N2左右节点N4、N5在失塑温区多重热循环曲线,确定时间判据范围;最后进行纵向2/3和1/3不同厚度相同节点的对比,与实际切片裂纹位置对照,得到基于多重热循环在失塑温度区间停留时间的判据,在71.7~88.1 s之间容易产生裂纹。

(4)对于实际工程结构应用,可在其局部区域建立多层多道焊接模型,模拟其温度场分布,并分析多重热循环下各温度区间的停留数据,若其满足相应的时间判据,即可判断该区域是否存在裂纹的风险;采用有限元方法能够发现裂纹产生的位置,这是因为实际结构中多层多道焊热力条件难以全面获取,温度测量通常仅限于表面,难以获得内部的热力变化信息,通过有限元模拟则能够全面揭示焊接过程中内部的热力响应,这是有限元模拟的显著优势。

参考文献:

- [1] 霍树斌,徐锴,王庆江,等.690镍基合金焊丝热裂纹测试与评价方法研究[J].焊接,2018(04):33-38.
HUO S B, XU K, WANG Q J, et al. Research on testing and evaluation methods for hot cracking of 690 nickel-based alloy welding wire[J]. Welding & Joining, 2018 (04):33-38.
- [2] Dave V R, Cola M J, Kumar M, et al. Grain boundary character in alloy 690 and ductility-dip cracking susceptibility[J]. Welding Journal, 2004, 83(1):1-5.
- [3] Savage W F, Lundin C D. The Vareststraint Test [J]. Welding Journal, 1965(10):433-442.
- [4] Nissley N E. Development of the strain-to-fracture test to study ductility-dip cracking in austenitic alloys[D]. Columbus: Ohio State University, 2002.

- [5] Yushchenko K A, Savchenko V S, Chervyakov N O, et al. Investigation of cracking susceptibility of austenitic material using PVR-test procedure [C]//Welding Consumables, 2014: 10-13.
- [6] 姚文选. 镍基合金焊缝失塑裂纹评价及力学机制的研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2016.
YAO W X. Evaluation of Ductility Dip Cracking and Mechanism Research of Ni-based Alloy Weld Seam [D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2016.
- [7] 崔巍. 镍基合金焊接接头高温失塑裂纹研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2013.
CUI W. Study on High Temperature Ductility-dip Cracking of Nickel-based Alloy Welded Joints [D]. Shanghai: Shanghai JiaoTong University, 2013.
- [8] McCracken S L, Tatman J K. Prediction of Ductility-Dip Cracking in Narrow Groove Welds Using Computer Simulation of Strain Accumulation [J]. Cracking Phenomena in Welds IV, 2016: 269-288.
- [9] 郭泉. 基于合金化的核电 Inconel 690 堆焊金属组织性能调控机理研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2022.
GUO X. Study on Regulation Mechanism for Micro-structure and Properties of Inconel 690 Deposited Metal for Nuclear Power Based on Alloying [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2022.
- [10] 陈佩寅, 郝乾宇, 徐锴, 等. 基于微观组织的镍基合金焊接热裂纹判据[J]. 焊接, 2023(10): 6-12.
CHEN P Y, HAO Q Y, XU K, et al. Criterion for weld hot cracking of nickel-based alloys based on micro-structure [J]. Welding & Joining, 2023(10): 6-12.
- [11] 郝乾宇. 基于大厚度裂纹试验的 690 镍基合金焊接热裂纹判据[D]. 北京: 机械科学研究总院, 2023.
HAO Q Y. Criterion for Weld Hot Cracking of 690 Nickel-Based Alloy Based on Thick-Section Crack Test [D]. Beijing: General Research Institute for Mechanical Science, 2023.
- [12] 刘坤, 王浩, 李洁, 等. 焊接凝固裂纹机理及敏感性测试的研究进展[J]. 焊接, 2023(03): 1-10.
LIU K, WANG H, LI J, et al. Research progress on mechanism and susceptibility testing of weld solidification cracking [J]. Welding & Joining, 2023(03): 1-10.
- [13] 张皓月. S、P 对 Inconel690 焊丝熔敷金属结晶裂纹敏感性影响的研究[D]. 北京: 机械科学研究总院, 2011.
ZHANG H Y. Study on The Influence of S and P on The Susceptibility to Solidification Cracking of Inconel 690 Weld Metal [D]. Beijing: General Research Institute for Mechanical Science, 2011.
- [14] 董祖珏, 潘永明, 王源泉, 等. 焊接结晶裂纹敏感性评定指标的研究[J]. 焊接学报, 1986(03): 39-49.
DONG Z J, PAN Y M, WANG Y Q, et al. Study on evaluation index of weld solidification cracking susceptibility [J]. Transactions of the China Welding Institution, 1986(03): 39-49.
- [15] 孔永红. Inconel 690 合金高温低塑性裂纹敏感性研究[J]. 电焊机, 2021, 51(01): 98-104.
KONG Y H. Study on high-temperature ductility-dip cracking susceptibility of Inconel 690 alloy [J]. Electric Welding Machine, 2021, 51(01): 98-104.
- [16] Goldak J, Chakravarti A, Bibby M. A new finite element model for welding heat sources [J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 1984, 15(2): 299-305.
- [17] 江孔亮. 双椭球热源形状参数对焊接熔池的影响[J]. 山西建筑, 2025, 51(10): 50-53.
JIANG K L. Effect of double-ellipsoidal heat source shape parameters on welding molten pool [J]. Shanxi Architecture, 2025, 51(10): 50-53.

编辑部网址: <http://www.71dhj.com>