

DOI: 10.19479/j.2095-719x.2402095

桥梁钢对接焊缝接头残余应力分布影响因素研究

程 喜

(中铁十九局集团广州工程有限公司, 广州 511458)

摘要: 为了研究不同因素对桥梁钢对接焊缝接头残余应力分布的影响, 建立了 Q345qDNH 桥梁钢对接焊缝有限元模型, 分析了在材料属性和焊缝余高 2 个因素影响下的残余应力分布规律。结果表明: 未考虑应变随温度变化的钢板试件, 其焊接残余应力最大值分布区域比考虑应变随温度变化情况下的残余应力分布区域大, 焊接热影响范围较广, 而考虑应变变化的试件, 其残余应力数值相对较大; 焊缝余高的存在会使焊接接头焊趾处出现明显的应力集中现象。

关键词: 桥梁钢; 对接焊缝; 数值模拟; 残余应力; 影响因素

中图分类号: U441.5

文献标志码: A

文章编号: 2095-719X(2024)02-0095-07

Research on Factors Influencing Residual Stress Distribution of Butt Weld Joints of Bridge Steel

CHENG Xi

(China Railway 19th Bureau Group Guangzhou Engineering Co., Ltd, Guangzhou 511458, China)

Abstract: In order to study the influence of different factors on the residual stress distribution of butt weld joints of bridge steel, this project established a finite element model reflecting the butt welding process of Q345qDNH bridge steel to analyze the rule the residual of stress distribution. Two influence factors, including material properties and weld reinforcement, were considered in the model. The results show that the maximum distribution area of welding residual stress is larger than that of the steel plate specimen without considering the change of strain with temperature, and the range of welding heat influence is wider, while the residual stress value of the specimen considering the strain change is relatively larger. The existence of residual height will cause obvious stress concentration at the welding toe of the welded joint.

Key words: bridge steel; butt weld; numerical simulation; residual stress; influence factor

钢结构强度高、质量轻、构造简单的特点使其大量运用于桥梁工程建设中, 而焊接是钢桥建设中不可或缺的连接方式, 焊接性能的好坏直接关系着钢桥的使用寿命和安全。然而焊接过程会在钢构件内部引入残余应力, 导致焊接节点区域优先失效破坏, 进而使钢桥性能发挥受限; 同时焊接构件在服役过程中, 焊接残余应力会与工作载荷应力相互叠加, 出现残余应力重分布以及二次变形, 以至于影响整个工程构件的服役周期。为了确保焊接钢结构的耐久性, 需要特别关注残余应力对焊接节点的影响。

Ba^[1]通过对焊接接头进行有限元分析, 发现焊接结构中残余拉应力与压应力的分布规律, 处于焊缝处的残余拉应力与压应力的最大值均比未焊接时试件材料的屈服应力大。Yilbas 等^[2]通过有限元分析研究了

焊接试件焊接区域的残余应力值分布, 并将其与 XRD 试验进行对比, 发现冷却过程中, Mises 残余应力值较高, 并且有限元分析所得焊接残余应力与试验结果吻合度非常高。邓德安等^[3-4]用 ABAQUS 分析软件开发了用于模拟焊接温度场、残余应力场和焊接变形的热-弹-塑性有限元计算方法, 结果表明, 有限元模拟得到的数值与试验结果十分相近。沈利民等^[5]采用 ABAQUS 有限元分析软件, 研究了 Q345 钢材焊接接头进行补焊后的残余应力分布规律。蒋文春等^[6]采用了数值分析方法对 Q345R 钢进行了研究, 得到了其焊后残余应力的分布特征, 以及进行焊后热处理之后的焊接残余应力变化规律。Lee 等^[7]对焊接接头的热影响区域进行了研究, 结果表明, 焊接热影响区域的残余应力分布与焊接工艺有着直接的关系。Wang 等^[8]通过采用热弹

收稿日期: 2023-09-18; 修订日期: 2023-10-10

作者简介: 程 喜(1977—), 男, 辽宁朝阳人, 高级工程师。

塑性方法对焊接板材进行了有限元分析,得到了焊接板材的变形与残余应力分布的关系。毛志涛等^[9]基于 ABAQUS 软件平台,分别采用椭球热源、高斯分布锥形热源模拟气体保护焊(GMAW)和激光焊(LBW)的热源输入,通过模拟与试验对比,结果表明,对于 Q345 钢的对接焊接接头,激光焊试件的焊接变形明显小于气体保护焊试件;关于焊缝周围的拉伸应力区域,激光焊影响的范围明显小于气体保护焊,且不同热源焊接构件的各方向残余应力云图差异较大。

目前已有研究没有充分考虑焊接过程中各种因素对残余应力分布的影响^[3-4],而实际钢桥焊接过程中的一些因素却不容忽视。本文以 Q345qDNH 桥梁钢对接焊接试件为研究对象,采用数值分析方法对焊接过程及试件分离过程进行模拟,研究在材料属性、焊缝余高、试件分离等因素的影响下焊接残余应力的分布规律,以降低焊接残余应力作用下钢材使用寿命缩短给国民经济带来的重大损失。

1 桥梁钢对接焊缝有限元模型建立

钢结构对接焊缝有限元分析过程一般包括几何模型建立、材料属性定义、模型装配、建立与分析相匹配的分析步、相互作用、设定边界条件,最后进行模型网格划分、单元类型选择、模型计算分析等。为了简化有限元分析模型,在进行焊接分析时仅考虑温度场对应力与变形场的影响。基于热弹塑性理论通过 ABAQUS 有限元软件计算焊接残余应力场,焊接模型

热源采用双椭球热源模型,焊接分析采用顺序法,并采用生死单元法模拟焊缝形成和焊接热源移动。其中,生死单元法可以利用 ABAQUS 有限元软件 Interaction 模块中 Model Change 功能块实现。在装配模块中,为了后续引用 DFLUX 子程序更加方便,原始坐标系设定在试件焊接起始点, x 轴为试件模型焊缝方向, y 轴为模型垂直焊缝方向, z 轴为模型板厚方向。

有限元模拟中需对复杂焊接过程中的一些条件进行简化处理,主要假设如下:①设定焊接初始温度为环境温度,忽略焊缝与母材材料属性的不同,采用统一的材料参数;②忽略焊缝熔池内部的化学反应和对流传热等;③焊接无引弧板且以恒定速度进行,焊接过程无间隙;④只考虑焊接构件外边界与环境的对流换热;⑤在多层多道焊中,后焊与先焊两者之间存在相互熔合,在进行建模时无法精准地进行模拟,因此针对熔池形状进行近似规则形状处理。

按照天津金桥焊材集团有限公司针对 Q345qDNH 桥梁钢采用的焊接工艺参数,建立对接焊接试件模型,模型尺寸为:500 mm × 200 mm × 12 mm。焊接采用惰性气体(CO₂)保护焊,焊材为直径 1.2 mm 的 JQ.YJ501NiCrCu-1。对钢板试件开 V 形坡口以保证焊透,焊接坡口细节如图 1 所示,坡口角度 $\alpha = 60^\circ$,两板间隙为 2 mm,焊接后的余高控制在 0~3 mm 之内。考虑到钢板厚度为 12 mm,采用多道焊方式进行 4 层 4 道焊接,分为打底层(1-1)、填充层(2-1,3-1)及盖面层(4-1),每层焊道之间温度控制在 250 ℃左右,在每两层焊道之间设置冷却时间。焊接工艺参数见表 1。

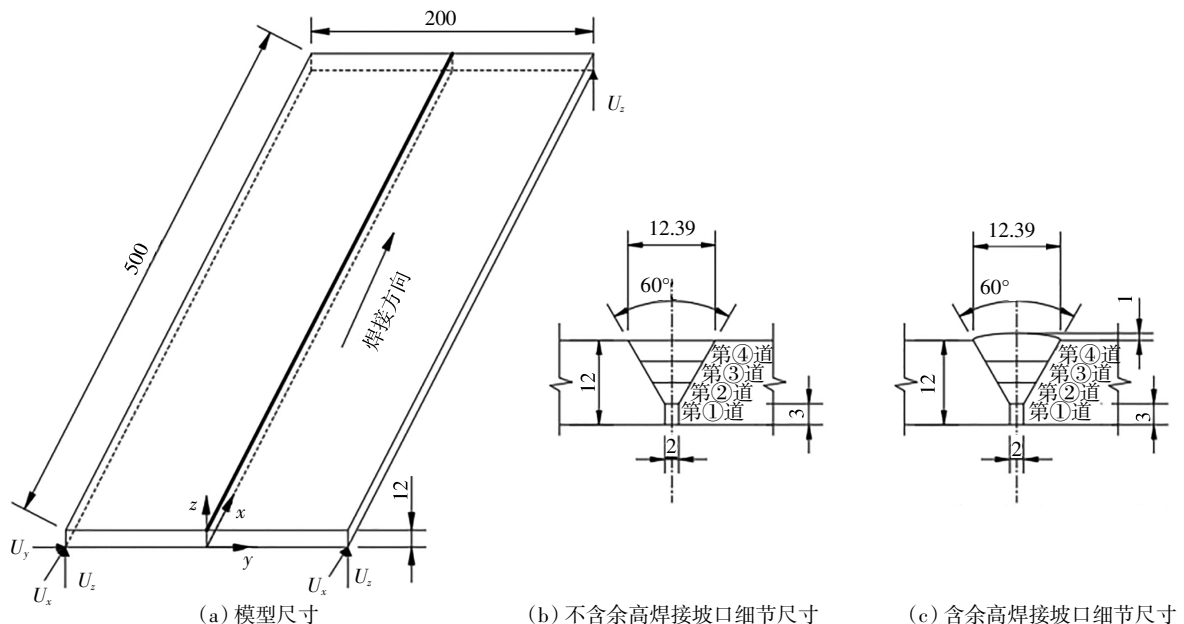


图 1 钢板试件模型及焊接坡口尺寸(单位:mm)

表1 焊接工艺参数

焊道	焊丝直径/ mm	电流 I/A	电压 U/V	焊接速度 $v/$ ($\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$)	层间温度/ $^{\circ}\text{C}$
1-1	1.2	180	26	3	250
2-1	1.2	240	28	5	250
3-1	1.2	240	28	5	250
4-1	1.2	240	28	5	250

为了保证计算结果的准确连续性,在进行应力场计算时,不改变网格划分方式,不改变分析步时间,将 Step 类型改为 Static, General, 网格单元类型转换为 C3D8R。在应力场分析时,需将 Load 模块的预定义温度场更改为从结果文件中获取,即温度场分析所得的 odb 文件。模型边界条件如图 1 所示,左上角约束 x 、 y 、 z 3 个方向($U_x = 0, U_y = 0, U_z = 0$),左下角约束 x 、 z 两个方向($U_x = 0, U_z = 0$),右下角约束 z 方向($U_z = 0$),使得模型在各个分析步中不发生刚体位移。为保证计算收敛性应控制网格质量,对焊缝位置和拉伸试件平行段网格做加密处理,网格划分结果如图 2 所示。

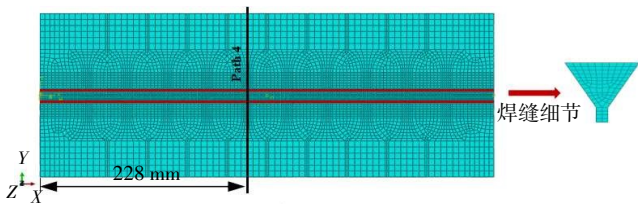


图2 模型网格划分

双椭球形热源模型包含众多参数,需根据实际钢板焊接时的焊接工艺参数和有限元分析方法进行确定。结合焊接工程师手册^[10]中表 2-2-2, CO_2 气体保护焊接方法的热效率取值范围为 0.75~0.90, 此处取焊接热效率 $\eta = 0.90$ 。通过预设形状参数取值,同时观察有限元模拟中的熔池形状进行调整,通过形状参数同比增大减小,参数固定变量等方法进行调节,以达到有限元模拟中移动热源产生的熔池形状与假设焊缝尺寸边缘相近的效果。双椭球热源前后半轴能量参数分配系数一般满足 $f_l + f_r = 2$, 经过大量研究发现 $f_l = 0.67, f_r = 1.43$ 时可以满足有限元分析的精确度^[11-12],并且与实际的焊接熔池形状情况拟合较好。

采用顺序法进行温度场与应力场计算,采用生死单元方法模拟焊接焊缝填充过程。表 2 为各焊道双椭球形热源模型参数取值。焊接工艺中涉及层间温度,需要在相邻焊道之间建立冷却分析步,冷却时间设定为 60 s。每层焊道的焊接时间由表 2 的速度决定,打底(1-1)分析步时间为 167 s,填充(2-1, 3-1)及盖面(4-1)的分析步时间都为 100 s,分别建立相应的分析步。在焊接结束后,设置相应冷却时间使模型冷却至室温(25°C)。温度场分析中, Step 类型采用 Heat-Transfer, 网格单元类型采用 DC3D8, 分析步设定完成后,在 Interaction 模块定义模型中的表面热交换系数,之后在 Load 模块定义荷载即添加体热通量,利用 DFLUX 子程序加载双椭球热源,此过程模拟了焊接热源的移动过程。

表2 各焊道双椭球形热源模型参数取值

焊道编号	f_l	f_r	I/A	U/V	$v/(\text{mm}\cdot\text{s}^{-1})$	η	a_f	a_r	b	c
1-1	0.67	1.33	180	26	3	0.9	15	45	1	3.0
2-1	0.67	1.33	240	28	5	0.9	6.0	18	2.8	3.0
3-1	0.67	1.33	240	28	5	0.9	5.0	15.0	4.4	3.0
4-1	0.67	1.33	240	28	5	0.9	6.3	18.9	6.1	3.0

2 残余应力影响因素分析

2.1 材料属性

不同温度情况下材料属性的定义对仿真模拟准确性起决定作用。关于 Q345qDNH 桥梁钢,在高于试验温度范围的情况下,通过采用插值法与外推法确定了未知温度的参数取值,建立了 Q345qDNH 的高温本构关系,见表 3。表 3 中只给出了不同温度下屈服应力值,应变一般在材料属性定义中设定为 0。而在实际情况中,钢板材料的热物理性能参数和力学性能参数等

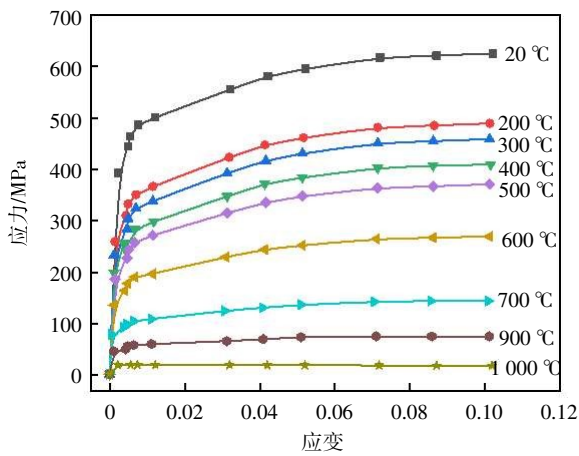
都会随温度发生变化,焊接过程存在着不同温度阶段,不同温度下对应着钢板材料的不同应力-应变曲线,如图 3 所示。

两种材料属性情况下(即应变 ε 设为 0 和应变 ε 随温度变化)桥梁钢焊接残余应力场以及沿垂直于焊接方向的中截面上残余应力分布情况分别如图 4 和 5 所示。由图 4 中可见,两种材料属性情况下的残余应力云图存在一定差异,未考虑应变随温度变化的钢板试件,其焊接残余应力最大值分布区域比考虑应变随温度变化情况下的残余应力分布区域大,焊接热影响范围较广;而考虑应变变化的试件,其残余应力数值

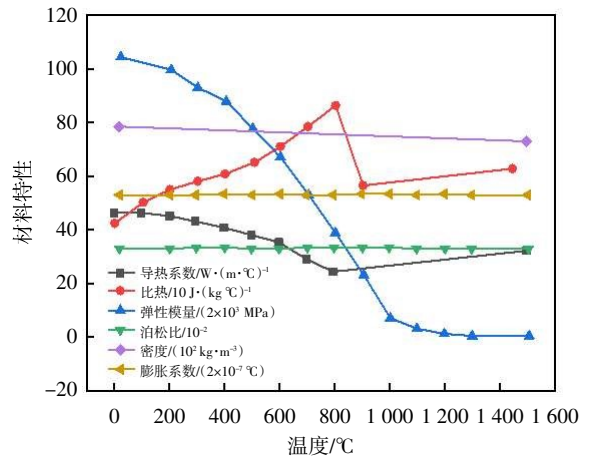
表 3 Q345qDNH 热物理性能参数^[13]

温度 $T / ^\circ\text{C}$	温度场计算材料热物理性能参数			应力场计算材料热物理性能			
	密度 $\rho / (\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	比热容 $C / (\text{J}\cdot(\text{kg}\cdot^\circ\text{C})^{-1})$	导热系数 $K / (\text{W}\cdot(\text{m}\cdot^\circ\text{C})^{-1})$	泊松比 ν	屈服应力 σ_s	弹性模量 $E / (10^{10} \text{ Pa})$	热膨胀系数 $\alpha / (10^{-5} \text{ }^\circ\text{C})$
20	7 900	470	54.4	0.29	399	21.2	1.20
100	7 880	443	52.4	0.29	379	20.7	1.21
200	7 230	480	50.4	0.30	349	20.3	1.22
300	7 790	516	48.8	0.31	335	19.9	1.25
400	7 750	549	46.8	0.32	327	19.0	1.28
500	7 660	670	42.7	0.32	295	17.0	1.29
600	7 660	780	38.2	0.33	200	13.3	1.32
700	7 660	897	31.8	0.33	124	9.20	1.34
800	7 560	845	26.5	0.33	67	7.80	—
900	7 510	836	26.9	—	46	—	1.37
1 000	7 450	816	28.1	—	28	—	1.39
1 100	7 410	800	27.7	—	—	—	—
1 200	7 370	784	26.9	0.34	—	0.30	1.43
1 500	7 320	1 000	10.0	0.39	—	0.10	1.49
2 000	7 320	1 000	10.0	—	—	—	—

注：“—”代表试验中未测定到相关温度下的材料参数。



(a) 不同温度下的应力-应变曲线



(b) 物理、力学性能随温度的变化

图 3 温度条件下材料属性^[13]

相对较大。由图 5 中各方向焊接残余应力分布曲线可知,两种材料属性下残余应力分布曲线变化趋势大体相同,由于两种材料属性定义不同,使得焊缝区域各方向残余应力大小存在明显差异,而其余区域残余应力大小及趋势基本保持一致。为了更加真实反映实际焊接过程中钢材材料性能变化,建议 Q345qDNH 桥梁钢的材料属性选用图 3 中不同温度下的应力-应变曲线。

此外,Q345qDNH 属于低碳钢,一般情况下,在加热与冷却过程中,其相变温度均高于塑性温度,此时

材料比热容的变化将不会影响材料的内应力,因此在热弹塑性分析中可以忽略相变对 Q345qDNH 钢板构件焊接残余应力的影响^[14],则有限元模型材料属性中无需定义固相线温度和液相线温度。温度场的计算除了需要定义表 3 中的材料密度 ρ ,比热容 C ,导热系数 K 等与温度相关的参数,还需要定义焊接过程中试件与外界空气之间的对流换热系数,采用牛顿冷却公式计算

$$\alpha = \begin{cases} 0.006 8T_s & 0 \leq T_s \leq 500 \text{ }^\circ\text{C} \\ 0.231T_s - 82.1 & T_s > 500 \text{ }^\circ\text{C} \end{cases} \quad (1)$$

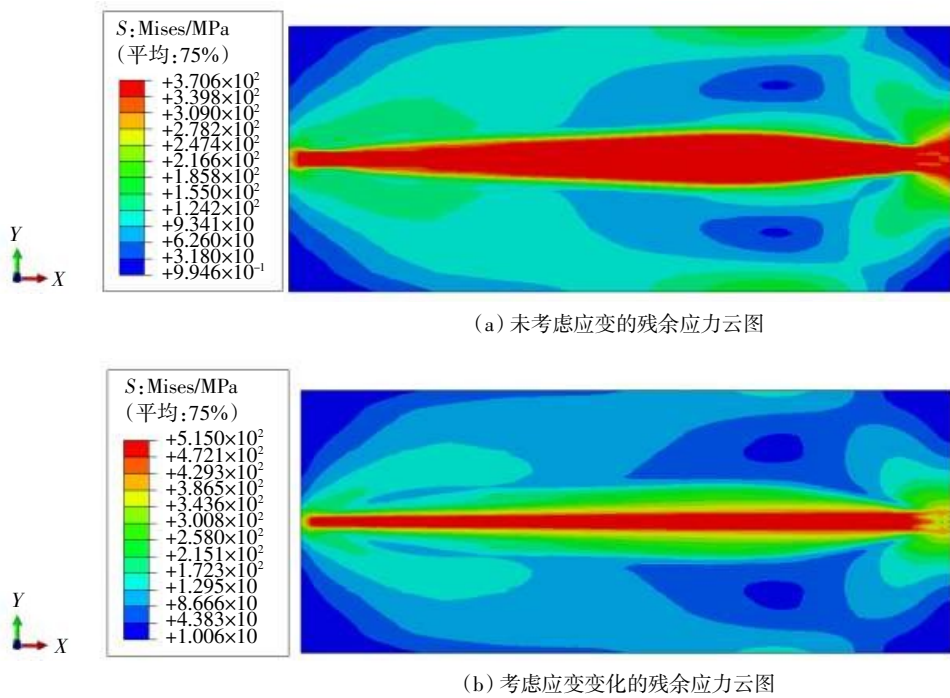


图 4 两种材料属性下的焊接残余应力云图

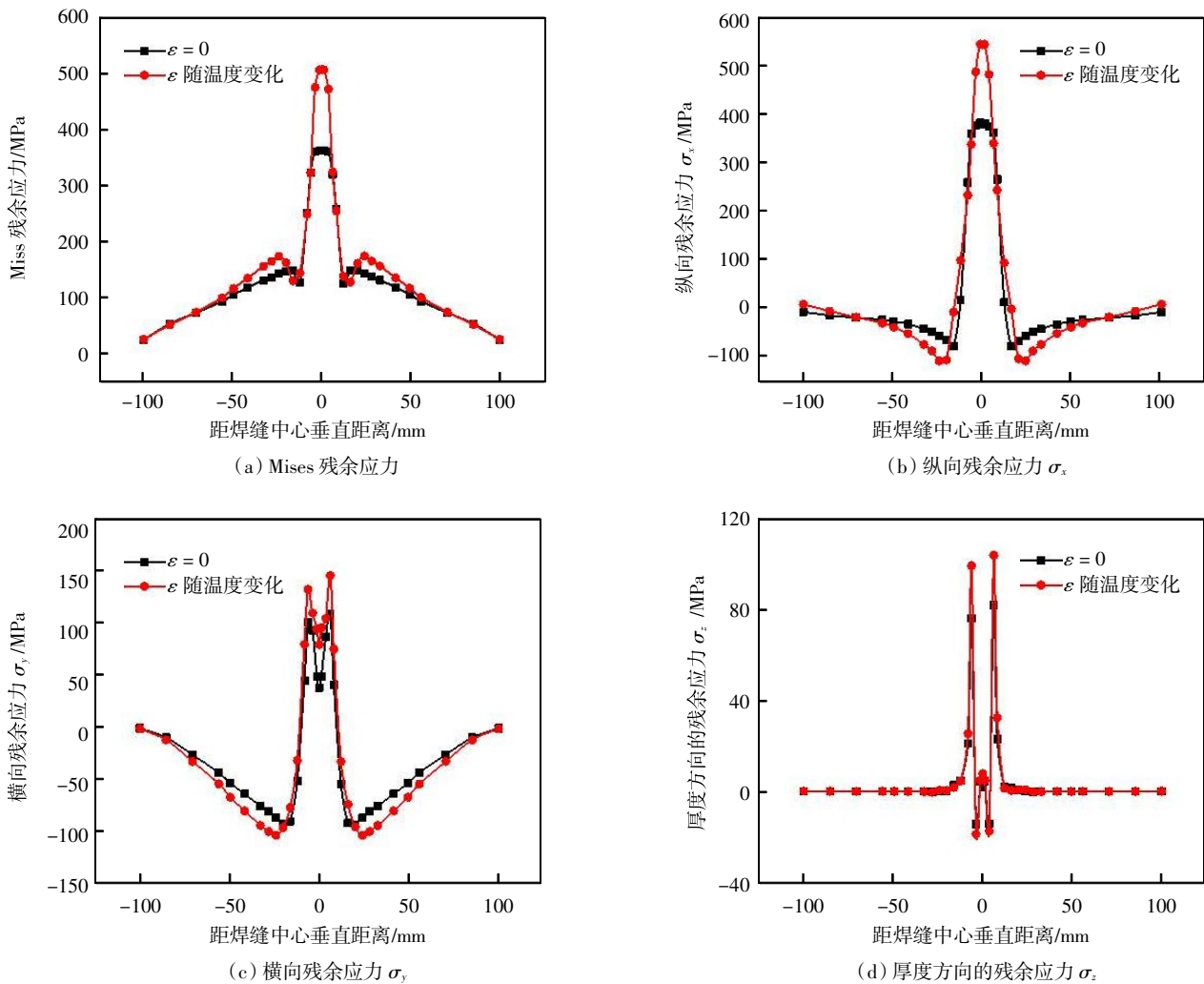


图 5 两种属性下的残余应力对比

2.2 焊缝余高

建立未设余高和含有 1 mm 余高的焊接有限元模型。沿轴方向取距离钢板边缘 228 mm,且垂直于焊缝的路径记为 Path4(见图 2)。焊接完成冷却至室温后,分别提取两种钢板试件模型沿路径 Path4 上的焊接残余应力,其分布如图 6 所示。由图 6 可知,两种模型的焊接残余应力最大值均处于焊缝区域,从整体上看,两种模型的焊接残余应力分布规律基本一致,且关于焊缝中心对称。焊缝中心处两者横向残余应力存在较小差别,含余高模型与无余高模型相差 5 MPa;距焊缝中心 8.7 mm 的焊趾位置处,含余高模型的横向残余应力比无余高模型高出 57 MPa,这是由于余高的存在,焊趾几何不连续,此处焊接残余应力存在明显的应力

集中现象;此外,由于余高的影响,两种模型焊接区域沿厚度方向的残余应力存在一定差异;在热影响区和母材区,两种模型各个方向残余应力数值差别均较小。综上可知,焊接接头焊趾处因余高的存在而出现明显应力集中现象,故为避免此种情况,在实际工程中选择在焊接完成后对钢板试件焊缝处进行去除余高处理。此外,Q345qDNH 为一种耐候桥梁钢,《公路耐候钢混凝土组合桥梁技术规程》(T/CECS G-D60-31—2020)指出,耐候钢构件焊接后,焊缝在没打磨的情况下表面会存在凹陷处,为积聚污染物提供了便利从而导致焊缝处更容易发生腐蚀;同时焊缝表面的凹凸不平会导致应力集中,从而降低焊缝的疲劳寿命,因此耐候钢构件焊接后,应对焊缝处进行打磨。

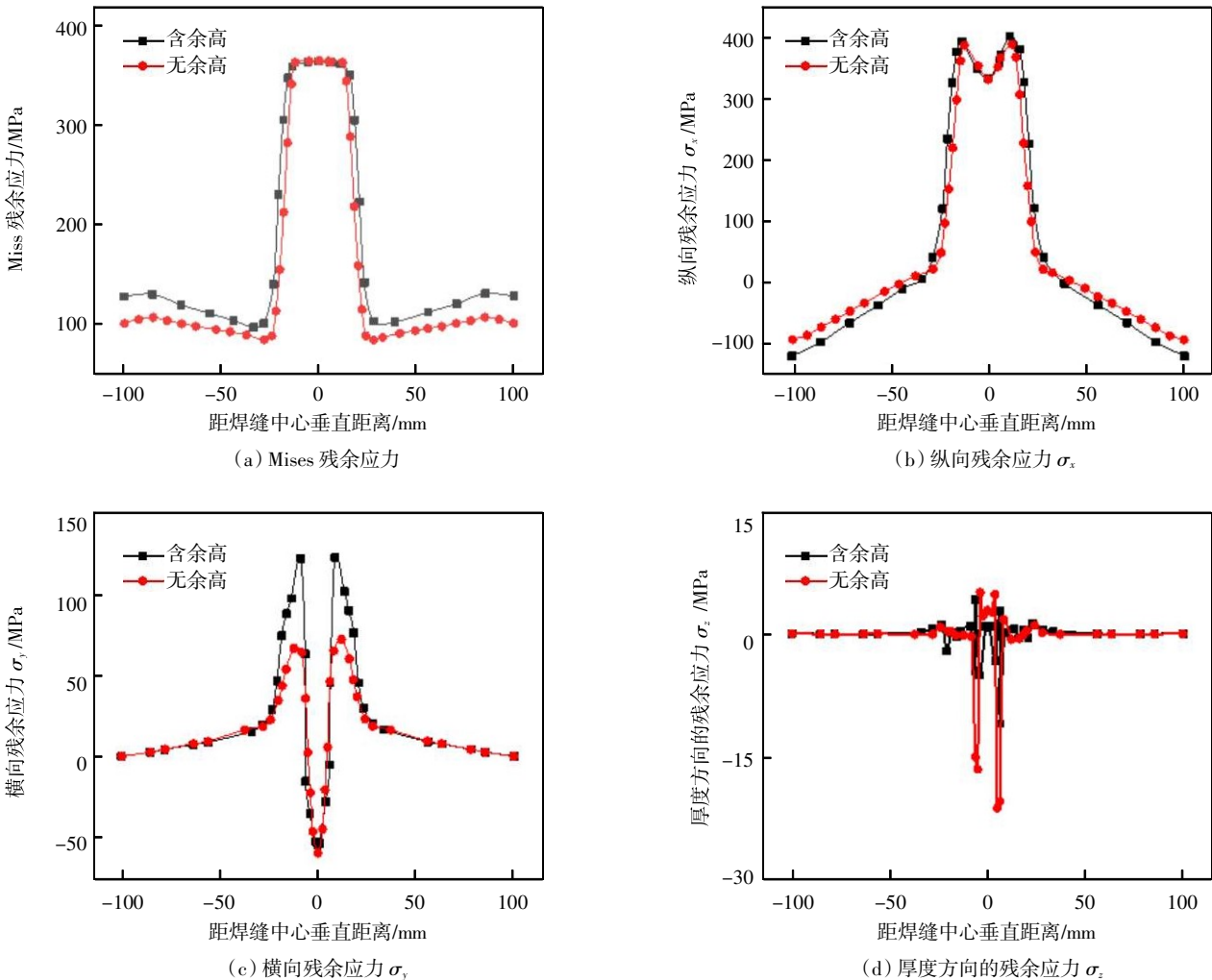


图 6 含余高与无余高模型沿路径 Path4 的残余应力分布

3 结论

本文对 Q345qDNH 桥梁钢对接接头焊接残余

应力分布影响因素进行了数值模拟研究,得到以下结论:

(1)未考虑应变随温度变化的钢板试件,其焊接残余应力最大值分布区域更大,焊接热影响范围较

广;而考虑应变变化的试件,其残余应力数值相对较大。因此在对 Q345qDNH 桥梁钢的数值模拟分析中,材料属性的定义建议选用不同温度下的应力-应变曲线。

(2)余高的存在会使焊接接头焊趾处出现明显的应力集中,同时焊缝表面的凹凸不平也会导致应力集中现象的出现,从而降低焊缝的疲劳寿命,因此耐候钢构件焊接后,应对焊缝处进行打磨处理。

参考文献:

- [1] BA H. Computer modeling of weld joint microstructure and residual stresses[D]. Othawa: Carleton University, 2005.
- [2] YILBAS B S, ARIF A F M, ALEEM B J A. Laser welding of low carbon steel and thermal stress analysis[J]. Optics & Laser Technology, 2010, 42(5): 760-768.
- [3] 邓德安,梁伟,罗宇,等.采用热弹塑性有限元方法预测低碳钢管焊接变形[J].焊接学报,2006(1):76-80.
- [4] 蔡建鹏,孙加民,夏林印,等. Q345 钢对接接头残余应力与变形的预测[J].焊接学报,2015,36(11):61-64.
- [5] 沈利民,巩建鸣,余正刚,等. Q345R 钢焊接接头不同部位补焊残余应力的有限元分析[J].焊接学报,2009,30(9): 57-60.
- [6] 蒋文春,王炳英,巩建鸣.焊接残余应力在热处理过程中的演变[J].焊接学报,2011,32(4):45-48.
- [7] LEE C H, CHANG K H. Temperature fields and residual stress distributions in dissimilar steel butt welds between carbon and stainless steels[J]. Applied Thermal Engineering, 2012(45/46):33-41.
- [8] WANG J, YIN X, MURAKAWA H. Experimental and computational analysis of residual buckling distortion of bead-on-plate welded joint[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2013, 213(8): 1447-1458.
- [9] 毛志涛,蒲晓薇,汪维登,等. Q345 钢激光焊与气体保护焊的焊接变形与残余应力对比[J].中国激光,2016,43(6): 125-134.
- [10] 陈祝年.焊接工程师手册[M].北京:机械工业出版社,2009.
- [11] 谭玉娜.考虑焊接残余应力影响的 X65 钢腐蚀疲劳性能研究[D].天津:天津大学,2019.
- [12] GOLDAK J A, AKHLAGHI M. Computational welding mechanics[M]. Berlin: Springer Science & Business Media, 2005.
- [13] GU Y, LI Y D, QIANG B, et al. Welding distortion prediction based on local displacement in the weld plastic zone[J]. Weld World, 2017, 61: 333-340.
- [14] 张彦华.焊接力学与结构完整性原理[M].北京:北京航空航天大学出版社,2007.