

不同焊接速度的建筑钢结构T形接头性能模拟

吴小成¹, 徐强林¹, 张玲²

1. 中国科学技术大学附属第一医院 (安徽省立医院) 安徽合肥 230001

2. 南昌交通学院 江西南昌 330011

摘要: 选取Q355级钢材作为研究对象, 探究不同焊接速度下建筑装配式钢结构T形接头性能。通过Hypermesh软件进行建模, 系统分析了60mm/min、80mm/min和100mm/min共3种焊接速度对T形焊接接头残余应变及整体性能的影响。结果显示: 60mm/min的焊接速度导致焊缝区温度过高, 增加了接头受损的风险; 而100mm/min的焊接速度则因热输入不足, 加大了操作难度并可能影响焊接质量。相比之下, 80mm/min的焊接速度被证实为最优选择, 其不仅能有效控制残余应变 (低于0.025), 减少径向位移, 增强结构稳定性, 还能保持优异的显微硬度, 从而全面提升焊接接头的综合性能。因此, 建议在建筑装配式钢结构T形焊接接头中, 优先采用80mm/min的焊接速度, 以最大化接头性能并最小化残余应变。

关键词: 焊接速度; 装配式钢结构; T形焊接接头; 残余应变

Performance simulation of T-shaped joints in building steel structures with different welding speeds

WU Xiaocheng¹, XU Qianglin¹, ZHANG Ling²

1. The First Affiliated Hospital of University of Science and Technology of China (Anhui Provincial Hospital), Hefei 230001, Anhui, China

2. Nanchang Jiaotong Institute, Nanchang 330011, Jiangxi, China

Abstract: Selecting Q355 grade steel as the research object, this study explores the performance of T-shaped joints in building prefabricated steel structures under different welding speeds. Using Hypermesh software for modeling, the system analyzed the effects of three welding speeds, 60mm/min, 80mm/min, and 100mm/min, on the residual strain and overall performance of T-shaped welded joints. The results showed that a welding speed of 60mm/min caused excessive temperature in the weld area, increasing the risk of joint damage. The welding speed of 100mm/min increases the difficulty of operation and may affect the welding quality due to insufficient heat input. In contrast, a welding speed of 80mm/min has been proven to be the optimal choice, which not only effectively controls residual strain (below 0.025), reduces radial displacement, enhances structural stability, but also maintains excellent microhardness, thereby comprehensively improving the comprehensive performance of the welded joint. Therefore, this study suggests prioritizing the use of a welding speed of 80mm/min in T-shaped welded joints of prefabricated steel structures in order to maximize joint performance and minimize residual strain.

Keywords: welding speed; prefabricated steel structure; T-shaped welded joint; residual strain

基金项目: 江西省教育厅科技项目 (GJJ181496)。

第一作者: 吴小成, 本科, 工程师, 主要研究方向为建筑工程管理与施工技术, E-mail: wwe0915@163.com。

通信作者: 徐强林, 本科, 工程师, 主要研究方向为建筑工程管理与施工技术, E-mail: mxm197512@163.com。

1 序言

在建筑装配式钢结构（以下简称“钢结构”）中，T形焊接接头是一种至关重要的连接形式，它特别适用于梁柱的连接。这种接头通过梁构件与柱构件以T形相交的方式，利用焊接技术实现刚性连接^[1, 2]。在制造T形焊接接头时，为了确保连接的强度与耐久性，通常会选择与相连构件相同的材料进行焊接，常见的材料有碳素结构钢和低合金高强度结构钢等^[3]。由于焊接接头的强度直接受到焊缝质量和焊接材料的影响，因此在焊接过程中严格控制焊接质量，确保焊缝充分焊透并形成良好的连接，是确保接头性能的关键。然而，在焊接过程中，由于材料的热膨胀和收缩，会产生残余应变^[4]。这种残余应变不仅可能导致焊接接头产生变形，还可能引起应力集中^[5]，从而影响接头的结构安全。因此，对焊接接头性能的分析显得尤为重要。

张迪等^[6]研究不同焊接方式下接头热处理前后的残余应力及拉伸性能。申超男等^[7]研究了固定热源长度对T形接头焊接变形及残余应力精确预测的影响。孙志鹏等^[8]对于T形接头位置容易出现应力集中现象，采用有限元分析软件对T形接头焊接过程进行数值模拟，分析焊接过程中的温度场和应力场变化，为T形接头的焊接提出合理化的建议。TAO等^[9]研究了通过外加磁场来改善AZ31B镁合金与DP590双相钢激光焊接接头性能。

基于上述性能研究方法，本文主要研究不同焊接速度下钢结构T形焊接接头性能。

2 钢结构T形焊接接头有限元模拟

通常情况下，钢结构厚板在焊接时往往会产生一定的残余应变，若应变过大，则会导致焊接产生裂缝，从而降低焊接质量^[10, 11]。为减少钢结构T形焊接接头中的残余应变，本文采用有限元模拟方法，探究不同焊接速度对该接头性能的具体影响。

2.1 T形焊接接头模型建立

设置试件长度为600mm、底板宽为200mm、厚度为28mm。设计的V形坡口尺寸如图1所示。焊接工艺采用单层单道焊接，焊接顺序为先焊一侧，再焊另一侧，焊接方式为焊条电弧焊，焊条直径为3mm，焊接电流为75~150A，电弧电压为22~26V，焊接速度分别为60mm/min、80mm/min、

100mm/min。

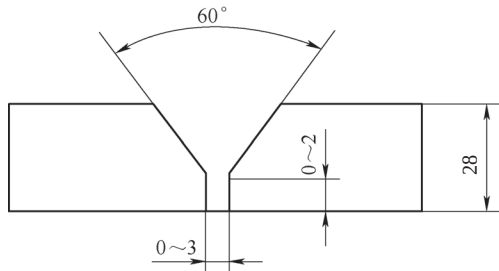
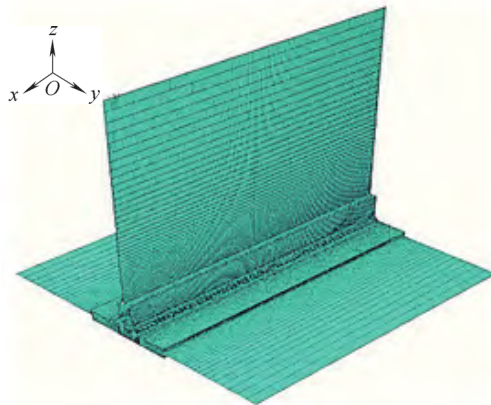
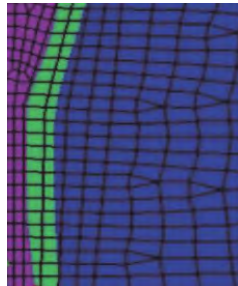


图1 V形坡口尺寸设计

通过Hypermesh软件构建了T形焊接接头的模型。采用了六面体网格单元进行设计。针对焊缝和热影响区进行网格加密处理，为后续的应变分析提供了坚实的基础^[12-14]。同时，距离焊缝较远的区域，逐渐减少网格的密度^[15]。对于过渡网格的划分，严格控制比例为1:2，以确保整个模型的连续性和准确性。整个T形焊接接头模型由121124个单元组成，不仅满足了分析需求，也体现了建模过程中的精细化和科学化，焊缝区域的网格大小设定为0.5mm，热影响区的网格大小设定为1mm。T形焊接接头模型与焊缝的局部放大如图2所示。



a) T形焊接接头模型



b) 焊缝的局部放大

图2 T形焊接接头模型与焊缝的局部放大

2.2 材料热物性参数与边界体条件设计

母材选用Q355低合金高强度结构钢，这一材料

被广泛应用于钢结构，其热物理性能参数见表1。

气换热，设置环境温度为20℃。

当进行温度场研究时，设置对流换热条件为空

设计应力场边界条件如图3所示。起焊点为P

表1 母材热物理性能参数

温度/℃	密度 / (kg/m ³)	导热系数 /[W/ (m·K)]	比热容 /[J/ (kg·K)]	线性膨胀系数 / (10 ⁻⁶ /K)	屈服强度 /MPa	抗拉强度 /MPa	弹性模量 /GPa
20	7800	50	450	11	345	490~630	200~210
250	7710	48	470	12.1	320~330	470~610	195~205
500	7600	42	520	13.8	290~300	440~580	185~195
750	7500	28	680	15	250~260	400~540	170~180
1000	7460	30	670	13.3	200~220	360~500	150~160

点，在进行接头残余应变研究时，A点是一个固定的支撑点，需要保持稳定，限制了x、y、z这3个方向的自由度，确保了从A点出发的任何结构部分都不会因焊接过程中的热应力或机械应力而发生不必要的移动。B点是一个弹性支撑点，位于一个只允许垂直变形的区域，从而限制了x、y两个方向的自由度，确保B点可以在z方向上自由移动，但在水平面上（x-y平面）上是固定的。C点位于一个需要承受特定方向上的力，但不需要在其他方向上保持稳定性的区域，限制了y方向的自由度，确保C点可以在x、z方向上自由移动，但只能在y方向上保持稳定。通过这一边界条件，可避免在应变分析过程中出现刚性移动。

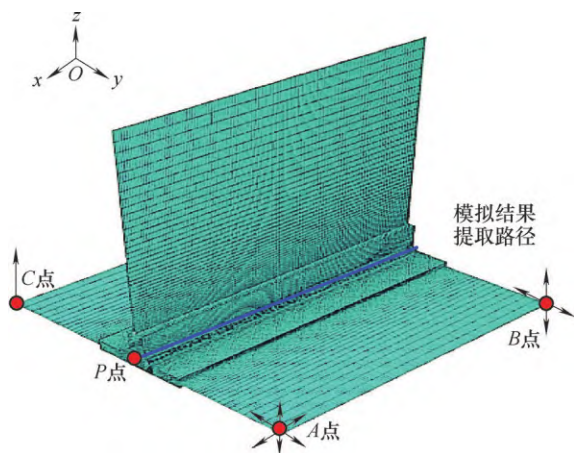


图3 应力场边界条件

2.3 焊接热源设计

为了确保T形焊接接头在焊接模拟过程中的高

度准确性，采用生死单元技术模拟焊接过程，通过这一方式，更真实地模拟焊接过程中的温度变化与应变行为，从而提高模拟结果的精度。焊接热源模型的合理性对于模拟结果的精确度至关重要。其中，高斯热源模型作为一种分布热源模型，其特点在于，热源覆盖区域内热流密度Q的分布遵循高斯正态分布函数，即

$$Q = \frac{kqe^{kr^2}}{\pi} \quad (1)$$

式中 q ——热源的总热功率（W）；

k ——热源集中系数；

r ——热源覆盖区域内某一点到热源中心的距离（mm）。

通过热源笼罩范围 f 确定热源集中系数 k ，即

$$k = \left(\frac{2\sqrt{3}}{f} \right)^2 \quad (2)$$

T形钢结构气体保护焊火焰笼罩范围一般为[55, 85]mm，取中间值70mm进行计算。

而焊接时的生热率 $HGEN$ 可通过式（3）计算，

即

$$HGEN = UI\eta / AVdt \quad (3)$$

式中 dt ——每个载荷步的时间步长（s）；

A ——热源作用区域的焊缝截面积（m²）；

V ——热源作用区域的体积（m³）；

U ——电弧电压（V）；

I ——焊接电流（A）；

H ——焊接热效率，本文选择为0.7。

在有限元模拟中采用高斯分布的带状热源进行热源的计算，如图4所示。

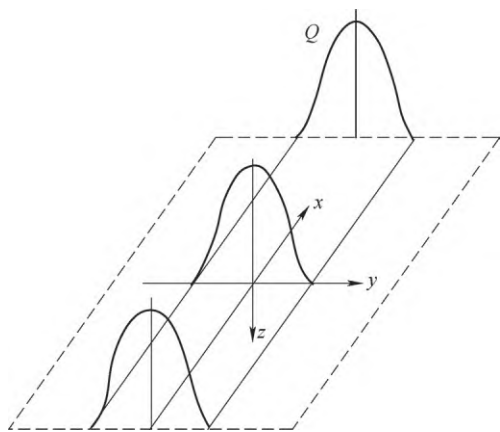


图4 带状热源模型

3 性能测试

3.1 T形焊接接头温度场分析

模拟分析不同焊接速度对T形焊接接头温度场的影响,分析结果如图5所示。

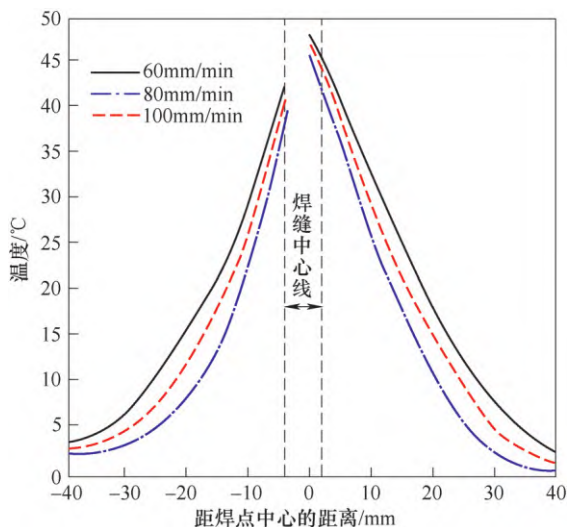


图5 不同焊接速度对温度场的影响

由图5可知,焊接速度作为焊接过程中的关键参数,对热输入及温度场分布具有显著影响。随着焊接速度的提升,单位时间内热源沿焊缝的移动距离会逐渐增加,这直接改变了热量在焊缝及其邻近区域的分配方式。同时,焊接速度对焊缝中心等距线上各点的温度变化规律产生明显作用。当焊接速度过慢时,焊缝温度容易过高。在3种焊接速度中,60mm/min的焊接速度会增强焊缝处温度,对焊缝带来损伤风险;而100mm/min的焊接速度会导致焊接热输入减少,使得热量无法充分传递到焊缝中,从而增加了焊接难度。

3.2 焊接过程中T形焊接接头应力场分析

1) 分析不同焊接速度对纵向焊接过程中残余应力的影响,结果如图6所示。其中,距焊点中心的距离为0mm时,该点位于焊缝中心线,其他点距熔合线距离范围为[0, 40] mm。

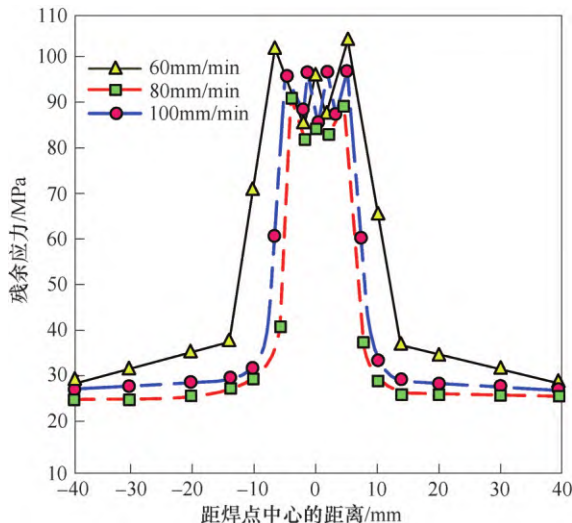


图6 不同焊接速度下纵向残余应力分析

由图6可知,在不同焊接位置处,距离焊点中心-10mm与10mm处的残余应力最大,当距离焊点中心较远时,残余应力相对较小。对比3种焊接速度,当焊接速度为60mm/min时,整体的焊接残余应力处于较大水平,过大的残余应力会显著降低结构的承载能力,因此焊接残余变形对结构安装精度有很大影响;且过大的残余应力还可能导致焊缝或母材产生裂纹,尤其是在应力集中的地方,从而引发开裂问题。当焊接速度为100mm/min时,其残余应力仍然明显高于80mm/min的焊接速度,因此在纵向上,80mm/min的焊接速度可以更好地保证焊接质量。

2) 分析不同焊接速度对横向上进行焊接时的残余应变,结果如图7所示。

由图7可知,当焊接距离焊点中心位置逐渐增大,所导致的残余应变有所增加,但当距离>40mm后,残余应变则开始有所减小。在3种焊接速度中,60mm/min始终保持最高的残余应变,说明较小的焊接速度会明显影响焊接可靠性;而当焊接速度达到100mm/min时,接头残余应变虽然有所下降,但仍然高于80mm/min时的残余应变。由此可见,在80mm/min的焊接速度下,接头稳定性最佳。

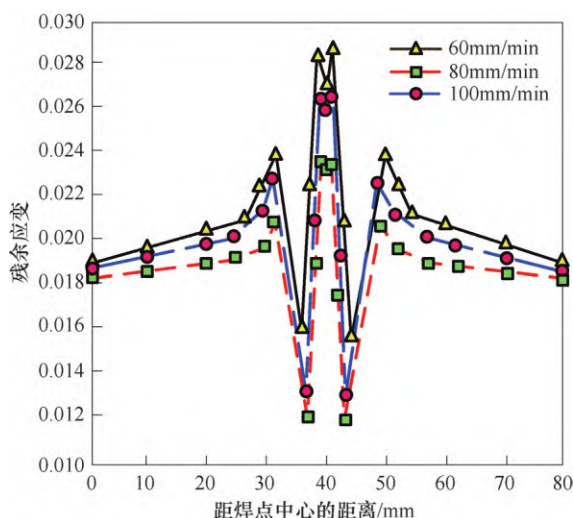


图7 不同焊接速度下横向残余应变分析

3) 基于上述设置的焊接热源模型、材料属性和边界条件进行焊接模拟，包括加热、冷却和应力释放等过程。在模拟完成后，从有限元分析软件中提取焊缝中心区域的应力-应变数据，将提取的数据绘制成应力-应变曲线。模拟不同焊接速度进行焊接时焊缝中心区域在焊接过程中的应力-应变曲线（见图8），从而直观地展示焊接接头在受到焊接热应力时的应力-应变响应，分析不同焊接速度对焊接接头力学性能的影响。

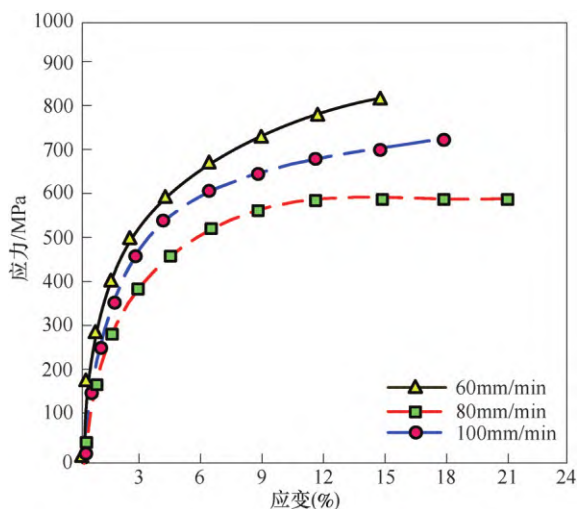
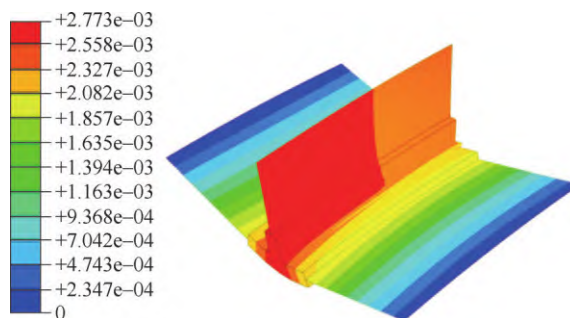


图8 不同焊接速度下应力-应变曲线分析

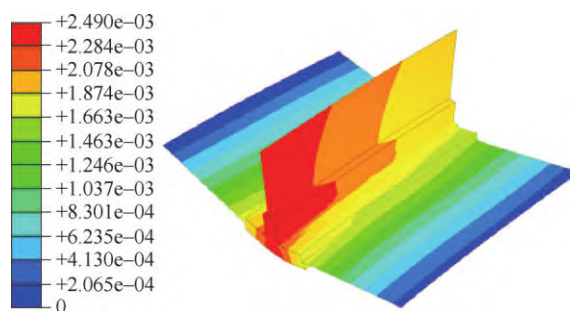
由图8可知，在不同焊接速度下，当应变逐渐增大时，焊接过程所产生的应力也同时一并增大。其中，当焊接速度为60mm/min时，焊接应力值相对较高，最高达到800MPa以上，而其他两种焊接速度应力值相对较小，且80mm/min焊接速度所产生的应力值最高未超过600MPa，因此，采用80mm/min的焊

接速度进行焊接，能够更好地保证T形接头的可靠性。

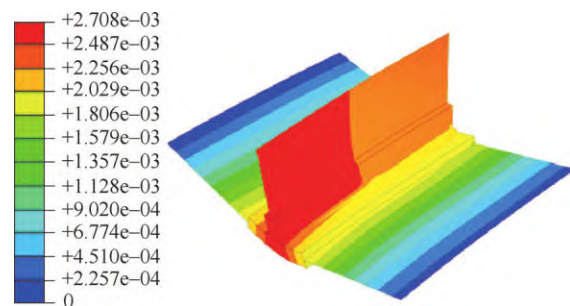
4) 分析在不同焊接速度下的T形接头变形情况，并通过位移云图表示，结果如图9所示。



a) 焊接速度为60mm/min时的位移云图



b) 焊接速度为80mm/min时的位移云图



c) 焊接速度为100mm/min时的位移云图

图9 焊接速度对变形的影响

由图9可知，对比不同焊接速度焊接时所产生的位移云图，可以看出当焊接速度为60mm/min时，所产生的位移相对较大，说明较小的焊接速度会导致焊缝出现收缩不均匀现象，从而产生较大的位移；而焊接速度为100mm/min时，所产生的位移要略高于80mm/min焊接速度下的位移。由此可见，当焊接速度过大时，同样会引起变形问题。

5) 分析不同焊接速度对T形焊接接头所产生的径向位移情况，结果如图10所示。

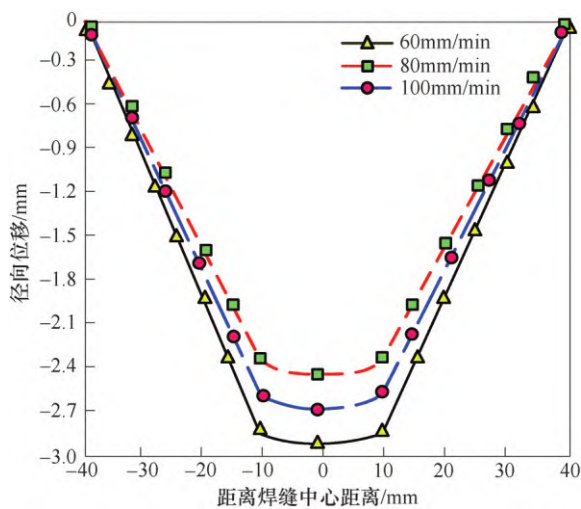


图10 不同焊接速度焊接产生的径向位移分析

由图10可知,距焊缝中心越近,焊接时接头所产生的径向位移就越大。当焊接速度较小时,焊接所产生的径向位移相对较大;但当焊接速度过大时,同样会导致径向位移较大。为此,使用80mm/min的焊接速度,可有效改善焊接接头径向位移问题。

3.3 不同焊接速度对T形焊接接头力学性能影响分析

通过分析不同焊接速度对T形焊接接头力学性能的影响,可有效评估焊接接头在应力作用下的变形情况。为此,本文分析不同焊接速度下接头的显微硬度,使用显微硬度计,在焊接接头的不同位置(如焊缝中心、热影响区、母材等)进行显微硬度检测。每个位置至少检测3次,取平均值以减少误差。以焊接速度80mm/min为实例,进行了实际试验,对比模拟与试验结果的差异,如图11所示。

由图11可清晰地观察到,不论焊接速度如何变化,所得到的最高硬度值均超过了350HV。这一现象的产生,主要归因于较快的焊接速度所带来的较大冷却速率,从而在焊缝中心区和热影响区内诱发了马氏体组织的生成,进而提升了整体硬度。在焊接过程中,焊接接头的显微硬度不宜过大,否则可能影响接头的整体力学性能和加工性能,但显微硬度也不宜过小,否则会影响整体焊接质量,因此显微硬度保持适中即可。分析图11可知,在不同的焊接速度下,80mm/min的焊接速度可以提供良好的显微硬度,从而保障焊接质量。在相同的焊接速度下,模拟与实际试验得到的显微硬度值非常接近,

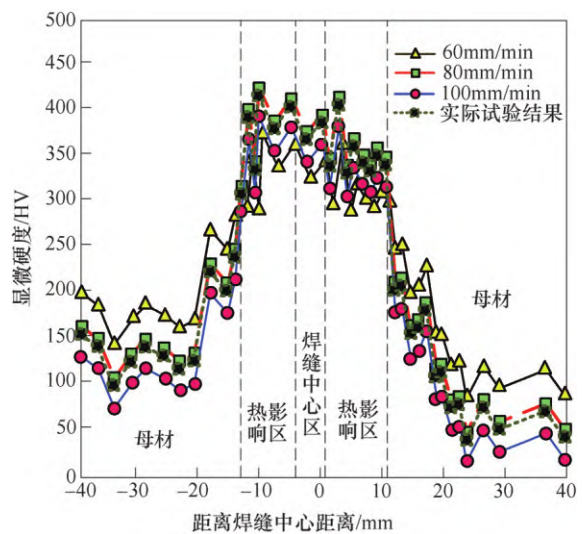


图11 显微硬度分析

最大误差仅为2.3HV,表明该模拟结果具有精准性。

4 结束语

通过采用Hypermesh仿真软件,本文构建了T形焊接接头模型,实现了对不同焊接速度下接头性能的研究。设置了多个焊接速度进行对比分析,系统地研究了焊接速度对T形焊接接头残余应变等性能的具体影响。通过仿真分析,本文不仅揭示了不同焊接速度下接头的残余应变情况,还提出了在80mm/min焊接速度下,接头残余应变最小且焊接质量最优的结论,为钢结构焊接工艺的改进提供了思路,具有显著的实用价值。

参考文献:

- [1] 汪子钊, 张俊, 孙高辉, 等. 超声冲击对厚板异种钢T型焊接接头组织与硬度的影响[J]. 机械工程材料, 2023, 47 (11): 6-11.
- [2] 赵卓, 贺玉伟, 王磊, 等. 应变速率对Q460钢及其埋弧焊接头拉伸行为的影响[J]. 机械工程材料, 2023, 47 (12): 12-18.
- [3] 秦丰, 张春波, 周军, 等. 5A06铝合金静止轴肩搅拌摩擦焊T形接头组织与性能[J]. 焊接学报, 2022, 43 (6): 56-60, 95, 116.
- [4] 姜毅, 陈素明, 王浩军, 等. 焊接顺序对双激光束双侧同步焊接TC4钛合金T型接头残余应力的影响[J]. 热加工工艺, 2022, 51 (9): 122-126, 129.
- [5] 张得扬, 杨静, 赵勇, 等. 船用钢T型焊接接头弯曲冲击性能试验研究[J]. 江苏科技大学学报(自然科学版), 2023, 47 (1): 1-5.

(下转第58页)

- [D]. 济南: 山东大学, 2007.
- [20] ZHANG Z H, YANG Z, QU J W, et al. Magnetron sputtering preparation of Cu_6Sn_5 preferred-orientation coating and its influence on wettability of Sn-based lead-free solder[J]. Surface & Coatings Technology, 2023, 450: 129014.
- [21] KUMAR A, PATNAIK A, DANGAYACH S G. Parametric optimization corrosion erosive wear and XPS response of FeCrCoAlTiB and FeCrCoNiSiB coatings on Q235 steel substrate by HVOF spraying using taguchi method[J]. Engineering Research Express, 2024, 6 (1) : 015513.
- [22] DONG K X, HUANG S, WANG X H, et al. Insight into the suppression mechanism of bulk traps in Al_2O_3 gate dielectric and its effect on threshold voltage instability in $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{AlGaIn}/\text{GaIn}$ metal-oxide-semiconductor high electron mobility transistors[J]. Applied Surface Science, 2023, 638: 158000.
- [23] LIU S S, JIANG J H, JIANG C Z, et al. Enhanced photocatalytic activities of $\text{ZnO}/\text{Bi}_2\text{O}_3$ hollow composites via the Z-scheme mechanism through p-n heterojunctions[J]. Journal of Alloys & Compounds, 2023, 969: 172312.
- [24] WAN S B, YAO Y, WANG W J. Microstructure and size effect of interfacial intermetallic on fracture toughness of Sn3.0Ag0.5Cu solder interconnects[J]. Engineering Fracture Mechical, 2018, 202: 259-274.
- [25] EL-DALY A A, SWILEM Y, MAKLED M H, et al. Thermal and mechanical properties of Sn-Zn-Bi lead-free solder alloys[J]. Journal of Alloys & Compounds, 2009, 484: 134-142.
- [26] WAN Y Q, LI S, HU X W, et al. Shear strength and fracture surface analysis of $\text{Sn58Bi}/\text{Cu}$ solder joints under a wide range of strain rates[J]. Microelectronics Reliability, 2018, 86: 27-37.
- [27] YAZZIE K E, FEI H E, JIANG H, et al. Rate-dependent behavior of Sn alloy-Cu couples: Effects of microstructure and composition on mechanical shock resistance[J]. Acta Materialia, 2012, 60: 4336-4348.
- [28] KUNWAR A, GUO B F, SHANG S Y, et al. Roles of interfacial heat transfer and relative solder height on segregated growth behavior of intermetallic compounds in Sn/Cu joints during furnace cooling[J]. Intermetallics, 2018, 93: 186-196.

(收稿日期: 20241030)

(上接第48页)

- 学版), 2022, 36 (6) : 15-22.
- [6] 张迪, 王鑫, 马传平. 热处理对P355NL1钢不同焊接工艺接头残余应力及力学性能的影响[J]. 热加工工艺, 2023, 52 (3) : 22-24, 30.
- [7] 申超男, 陈相飞, 王江超. 固定热源长度对T型接头焊接变形及残余应力精确预测的影响[J]. 船舶工程, 2022, 44 (11) : 132-139.
- [8] 孙志鹏, 卢玉秀, 翟永军. T形接头焊接过程的数值模拟[J]. 金属加工 (热加工), 2024 (2) : 38-41.
- [9] TAO T, ZHOU D, LIU J, et al. Improvement of laser welded joint properties of AZ31B magnesium alloy to DP590 dual-phase steel produced by external magnetic field[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2022, 79: 270-283.
- [10] 文学, 汪宏辉, 范德华, 等. 基于回归分析的钛合金T型接头激光焊接焊缝成形尺寸预测[J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59 (19) : 272-279.
- [11] 刘艳梅, 史吉鹏, 张桐源, 等. Ti60钛合金T型接头双激光焊接组织与力学性能研究[J]. 应用激光, 2023, 43 (11) : 71-77.
- [12] 刘雪, 钟史放, 徐连勇, 等. 不同应力幅下X65管线钢焊接接头的腐蚀疲劳行为[J]. 焊接学报, 2023, 44 (7) : 24-31, 78, 130.
- [13] 门进杰, 高睿祥, 李然, 等. 不同焊接工况焊接效应对箱板装配式钢结构加劲墙板的影响[J]. 工业建筑, 2023, 53 (1) : 41-49, 134.
- [14] ABE T, ARAKAWA J, AKEBONO H, et al. Analysis of fatigue crack propagation behavior of structures with one-sided welding in fillet welded joint for load-carrying type[J]. Materials Transactions, 2022, 63 (7) : 1037-1045.
- [15] 隋远, 卜凡洋, 邵子龙, 等. 基于区域中心温度场预测的回流焊接优化仿真[J]. 计算机仿真, 2023, 40 (5) : 299-303, 340.

(收稿日期: 20241202)