



高强钢薄板切割变形的机理研究及预控分析

王江超 杜仕忠 陈相飞 牛业兴 杨洋 赵宏权 吴磊

Mechanism analysis of cutting distortion of thin plate with high tensile strength steel for its prediction and control

WANG Jiangchao, DU Shizhong, CHEN Xiangfei, NIU Yexing, YANG Yang, ZHAO Hongquan, WU Lei

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.19693/j.issn.1673-3185.03497>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

外部拘束分布对薄板对接接头焊接失稳变形的影响

Influence of external restraint distribution on welding buckling of thin plate butt joint

中国舰船研究. 2023, 18(2): 168-175 <https://doi.org/10.19693/j.issn.1673-3185.02531>

船体曲率板感应加热成形工艺研究

An investigation of the induction heating forming process of hull curved plate

中国舰船研究. 2021, 16(2): 141-150 <https://doi.org/10.19693/j.issn.1673-3185.01814>

拆解平台分段的焊接面外变形预测与控制

Prediction and reduction of out-of-plane welding distortion of typical block in fabrication of semi-submersible lifting and disassembly platform

中国舰船研究. 2021, 16(6): 166-175 <https://doi.org/10.19693/j.issn.1673-3185.02041>

等效刚度法计算波纹夹层板弯曲变形与应力

Calculation bending deflection and stress for corrugated core sandwich panels employing equivalent stiffness method

中国舰船研究. 2021, 16(2): 90-98, 107 <https://doi.org/10.19693/j.issn.1673-3185.01873>

Q690厚板对接焊残余应力评估及其对焊接接头断裂性能的影响

Evaluation of residual stress and its influence on fracture performance of Q690 thick plate butt welded joint

中国舰船研究. 2024, 19(4): 271-281 <https://doi.org/10.19693/j.issn.1673-3185.03308>

基于人工蜂群算法和有限元强度计算的集装箱船剖面结构优化

Optimization of the section structure of container ship based on artificial bee colony algorithm and finite element strength calculation

中国舰船研究. 2023, 18(2): 160-167, 217 <https://doi.org/10.19693/j.issn.1673-3185.02520>



扫码关注微信公众号，获得更多资讯信息

引用格式: 王江超, 杜仕忠, 陈相飞, 等. 高强钢薄板切割变形的机理研究及预控分析[J]. 中国舰船研究, 2025, 20(2): 299-307.

WANG J C, DU S Z, CHEN X F, et al. Mechanism analysis of cutting distortion of thin plate with high tensile strength steel for its prediction and control[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2025, 20(2): 299-307 (in Chinese).

高强钢薄板切割变形的 机理研究及预控分析



扫码阅读全文

王江超^{*1,2}, 杜仕忠³, 陈相飞³, 牛业兴³, 杨洋¹, 赵宏权⁴, 吴磊⁵

1 华中科技大学 船舶与海洋工程学院, 湖北 武汉 430074

2 高新船舶与深海开发装备协同创新中心, 上海 200240

3 上海振华重工启东海洋工程股份有限公司, 江苏 南通 226200

4 江苏海事职业技术学院 船舶与海洋工程学院, 江苏 南京 211199

5 华中科技大学 机械科学与工程学院, 湖北 武汉 430074

摘要: [目的] 为有效控制高强钢薄板的火焰切割精度, 研究切割面外失稳变形及面内弯曲变形的产生机理, 提出动态辅助加热减小火焰切割变形的工艺方法。 [方法] 以 3 mm 厚的 Q550 板材为研究对象, 通过火焰切割试验和三坐标测量等方法, 观测到高强钢薄板切割件的面外失稳变形和面内弯曲变形; 应用大变形理论的热-弹-塑性有限元计算, 分析高强钢薄板切割的热力学响应, 以及辅助加热对高强钢薄板切割变形的影响。 [结果] 预测的切割变形趋势和数值, 都与实际测量结果高度吻合; 在远离割缝区域辅助加热, 切割面外失稳变形可降低 90%, 且面内弯曲变形降低 40% 以上。 [结论] 基于切割变形产生的力学机理, 可采用不同的辅助加热工艺, 提高薄板火焰切割的精度; 同时, 应用高通量的热-弹-塑性有限元计算, 可以得到减小火焰切割变形的优化工艺, 指导高强钢薄板的高精度建造。

关键词: 薄板切割变形; 热-弹-塑性有限元计算; 辅助加热工艺; 反向弯曲力矩; 纵向收缩力; 有限元法

中图分类号: U671.2; U661.43

文献标志码: A

DOI: 10.19693/j.issn.1673-3185.03497

0 引言

为应对船舶运营挑战并满足船舶行业节能减排需求, 船舶轻量化设计及建造是一种有效解决方案。高强钢薄板的应用可在实现结构轻量化的同时满足船舶和海洋结构物的强度要求, 其应用范围较广^[1]。切割下料是船舶及其他大型钢结构建造过程中的重要加工工艺, 其加工精度与内应力情况直接影响后续板材弯曲、焊接装配工艺的精度和进度。

火焰切割, 即化学切割, 因设备简单、操作便捷且成本较低, 仍是当前钢板切割的主要方式。其原理是金属钢材在达到燃点后于纯氧中燃烧^[2]。然而, 在火焰切割过程中, 碳钢板材在受到不均匀高温加热作用时, 会在未加热钢板的拘束下产生塑性应变, 进而导致切割变形, 影响板材切割

精度。Bae 等^[3]建立氧-乙炔火焰切割的热源模型, 并基于该热源模型使用有限元方法对钢板切割进行数值模拟, 将热影响区的预测尺寸与试验结果对比, 通过递归分析得到热影响区尺寸与火焰切割参数之间的幂函数关系。Thiébaud 等^[4]利用数值模拟方法预测火焰切割热循环曲线及热影响区尺寸, 结果与实际测量基本一致, 同时提出在稳定状态下, 火焰切割热效率仅为 0.26。Arenas 等^[5]通过体单元网格模型的有限元计算, 研究了火焰切割过程中钢板的热量分布、固态相变以及固-液相变等现象。

宋韬惠^[6]针对薄板切割易产生热变形的问题, 提出从钢板内部进行穿孔切割, 以保证钢板外框的封闭性。卜寅年^[7]对乙炔和液化石油气作为切割气体的火焰切割进行分析, 发现液化石油气化学性质更稳定, 作为火焰加工气体更为安

收稿日期: 2023-08-05 修回日期: 2024-01-04 网络首发时间: 2024-03-14 13:01

基金项目: 工信部高技术船舶资助项目(工信部装函[2019]331号)

作者简介: 王江超, 男, 1983年生, 博士, 副教授。研究方向: 船舶海洋结构物建造工艺力学及力学性能评估。

E-mail: WJcnc@hust.edu.cn

*通信作者: 王江超

全,切割质量更好。同时,使用液化石油气作为切割气体可显著降低成本,能取得更好的经济效益。冯焕公等^[8]以天然气这种清洁、成本低、性质稳定且运输方便的能源为目标对象,研究其作为火焰切割气体的应用,阐述天然气应用的实施条件和改造方案,并修订了氧-天然气火焰切割工艺守则。贾晓丹等^[9]研究氧-乙炔火焰在船舶制造中的应用,解释了火焰加热矫正焊接变形的原理,即通过对变形工件局部加热产生塑性变形,使受热金属冷却后收缩,从而矫正变形。杜富强等^[10]对数控火焰切割过程中钢板自身的变形与热变形进行分析,并从切割工艺参数设置、工件切割程序控制及切割时支承面修整等方面提出控制钢板变形的办法。

上述研究主要集中在火焰切割精度预测等方面,而对薄板火焰切割的变形控制方法及精度切割工艺的研究较少。本文拟以屈服强度为 550 MPa、厚度为 3 mm 的高强钢薄板为研究对象,采用火焰切割试验与热-弹-塑性有限元分析相结合的方法,研究高强钢薄板火焰切割的力学响应及变形;阐明切割变形产生的力学机理,并研究辅助加热工艺参数对面外失稳变形、面内弯曲变形的影响,以及控制薄板火焰切割变形的措施。

1 基本理论和方法

高强钢在氧气中会发生剧烈的化学反应并燃烧。使用丙烷、乙炔等可燃气体火焰将高强钢板材加热到燃点以上,并利用火焰切割喷嘴喷射出高纯度、高流速的氧气,使钢材发生剧烈氧化燃烧,形成氧化物熔渣。同时,燃烧过程中释放的热量会持续加热钢材下层和割缝前缘,使其达到燃点并继续氧化燃烧,直至完成钢材的切割分离。在薄板火焰切割过程中,金属燃烧产生的反应热占总输入热量的 70%,而预热火焰提供的热量仅占 30%^[11]。高强钢化学切割过程中产生的热量主要由丙烷、乙炔等可燃气体燃烧热量和高强钢割缝燃烧热量组成,据此可以建立火焰切割热源模型。

在对高强钢薄板火焰切割进行热-弹-塑性有限元分析时,主要包括热传递和力学响应分析。通常情况下,热分析的温度场对力学分析起决定性作用,而力学分析的应力及应变对热分析的影响可以忽略不计^[12]。使用非耦合的热-弹-塑性有限元方法来分析高强钢薄板火焰切割过程中热-力学行为,即仅考虑瞬态温度场对应力及应变的影响。具体而言,考虑材料的热物理性能,基于

热传递理论(热传导、热对流和热辐射)分析和计算整个瞬态温度场。然后,将热分析得到的瞬态温度场作为载荷(随时间步长变化的热载荷增量),加载到后续的应力-应变分析过程中,通过弹-塑性力学计算得到切割板材的残留塑性应变、应力和面外变形等。

在薄板火焰切割过程中,板材的割缝区域温度会急剧升高,整个板材的温度梯度差异显著;为确保有限元计算的正确性,在薄板火焰切割的热分析和力学分析中,均需考虑材料物理性能参数随温度的变化,即材料的非线性特性。

2 高强钢薄板切割试验及变形测试

天然气(甲烷)作为一种新型清洁能源,已逐步应用于高强钢板材火焰切割的预热及燃烧。试验所用高强钢薄板的屈服强度为 550 MPa,宽度和厚度分别为 400, 500, 3 mm。在火焰切割过程中,天然气流量为 0.496 m³/h,氧气流量为 1.573 m³/h,切割速度为 4.5 mm/s,热效率为 0.377;同时,天然气和钢板割缝燃烧产生的单位热量分别为 84 kJ/L 和 19.97 kJ/g^[13]。通过数控火焰切割设备,将试验板材切割成 2 块,宽度分别为 250 和 150 mm,如图 1 所示。在火焰切割过程中,高强钢薄板火焰切割的面外失稳变形明显。

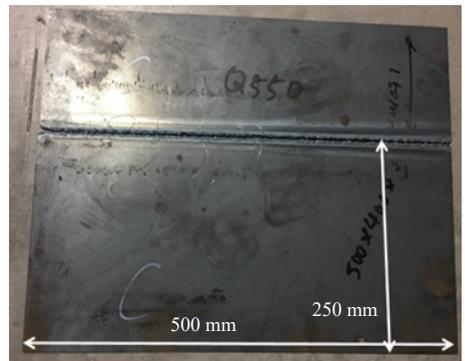
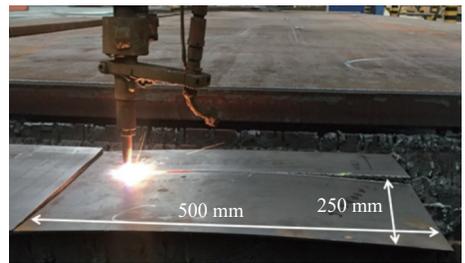


图 1 Q550 薄板的火焰切割

Fig. 1 Flame cutting of Q550 thin plate

火焰切割完成后,宽度为 250 mm 的高强钢薄板切割件的面外变形明显。使用接触式三坐标测量仪(测量精度 0.1 μm)测量其面外形状及尺寸,结果如图 2 所示。同时,对 250 mm 宽的高强

钢薄板切割件的割缝侧纵向长度和宽度进行多次测量, 测量记录如表 1 所示。可得割缝纵向收缩变形为 1.1 mm, 宽度为 8.6 mm。

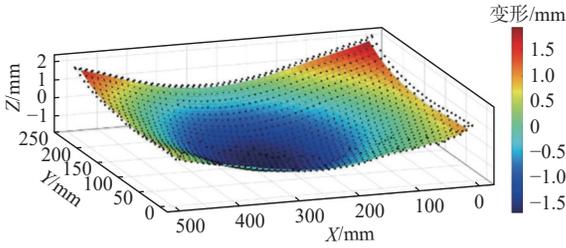


图 2 高强钢薄板切割件(250 mm)的面外变形测量云图
Fig. 2 Measured out-of-plane distortion contour plotting of Q550 thin plate cutting specimen with width of 250 mm

表 1 切割后试样割缝长度测量记录

Table 1 Measured length of cutting specimen

试样规格	割缝长度/mm				平均值/mm
	第1处	第2处	第3处	第4处	
250 mm	498.8	498.7	499.2	499.1	498.9

3 高强钢薄板切割的热-弹-塑性有限元分析

以上述宽度为 250 mm 的 Q550 高强钢薄板切割件为研究对象, 建立实体单元有限元模型, 如图 3 所示, 模型单元数和节点数分别为 7 800 和 10 812。在网格划分时, 割缝区域采用细化加密网格; 割缝附近区域采用相对稀疏的网格; 远离割缝的区域, 后续会考虑辅助加热, 消除切割变形, 提升薄板火焰切割精度, 因此该区域网格也进行细化加密处理。

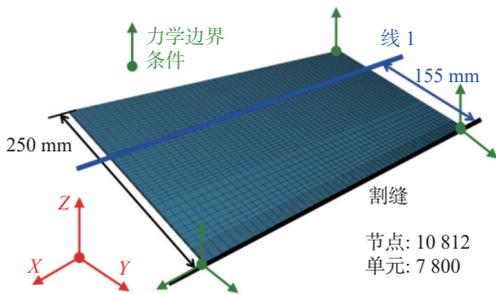
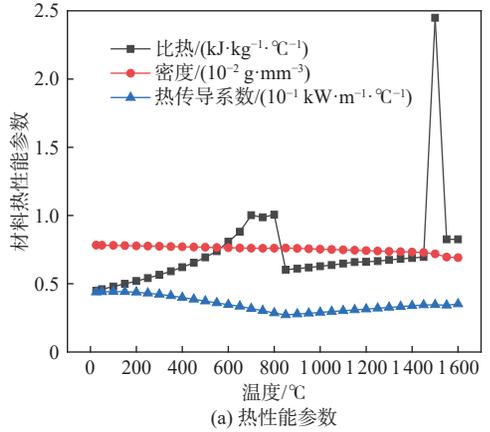


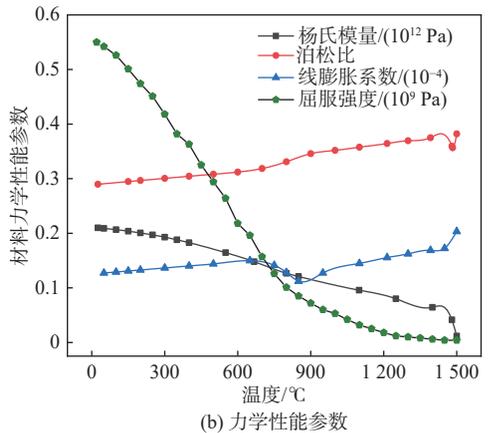
图 3 高强钢薄板切割件(250 mm)的有限元模型
Fig. 3 FE model of cutting specimen (250 mm)

在研究中, 火焰切割(割缝)方向定义为 X 轴方向, 板材宽度方向为 Y 轴方向, 板材厚度方向为 Z 轴方向。以天然气与钢板燃烧产生的热量作为热源输入, 采用双椭球热源模型对火焰切割温度场进行分析; 约束高强钢板材的刚体位移, 作为力学边界条件, 如图 3 所示。同时, 选择距离割缝 155 mm 的线 1 上的点, 用于对比验证火焰切

割热-弹-塑性有限元分析结果。图 4 展示了 Q550 高强钢的热物理性能参数随温度的变化; 其中, 考虑了固态相变及固-液相变的潜热影响。在板材切割的塑性变形分析中, 基于 Mises 屈服准则及随动强化准则。



(a) 热性能参数



(b) 力学性能参数

图 4 Q550 高强钢的热物理性能参数

Fig. 4 Temperature dependent material properties of Q550

利用自主开发的热-弹-塑性有限元分析软件, 进行薄板火焰切割的瞬态温度场计算, 如图 5 所示。以温度场计算结果作为热载荷输入, 并考虑材料的高温力学性能及约束刚体运动的力学边界条件, 完成火焰切割的力学响应分析。如图 6 所示, 基于小变形理论的热-弹-塑性有限元分析得到的面外变形和试验测量结果存在明显差异, 未能准确预测薄板火焰切割的面外变形; 而基于大变形理论的热-弹-塑性有限元分析获得的面外变形和试验测量结果基本一致。切割面外失稳变形属于典型的几何非线性响应, 因此在有限元计算中需要考虑位移-应变关系中的高阶非线性项的影响。

结合图 3 中距离火焰切割割缝 155 mm(线 1) 的点的面外变形进行分析, 如图 7 所示。由图可以看出, 基于大变形理论的热-弹-塑性有限元计算结果, 无论是面外变形模态还是数值, 都与试验测量结果高度吻合。

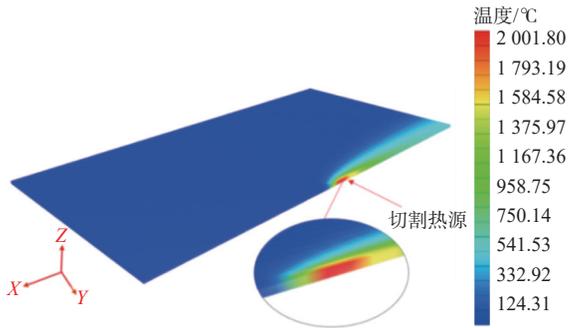


图5 薄板火焰切割的瞬态温度场分布

Fig. 5 Transient temperature distribution of Q550 plate with flame cutting

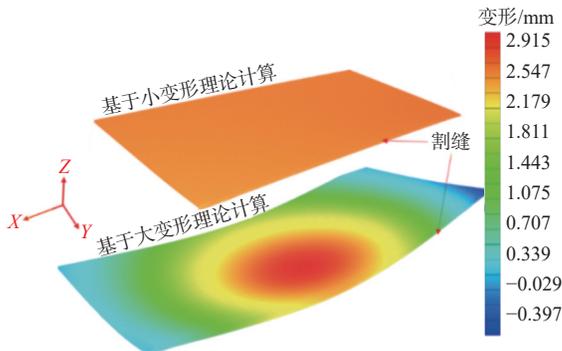


图6 常规火焰切割面外变形云图

Fig. 6 Contour plotting of out-of-plane distortion of Q550 plate with flame cutting

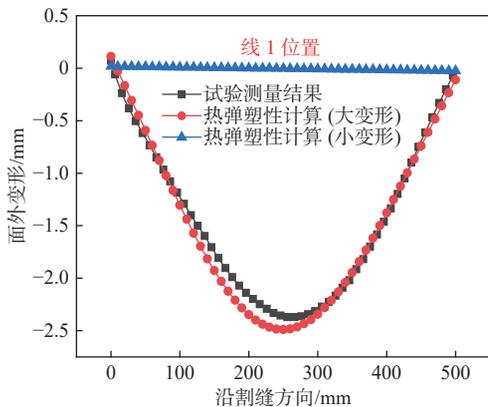
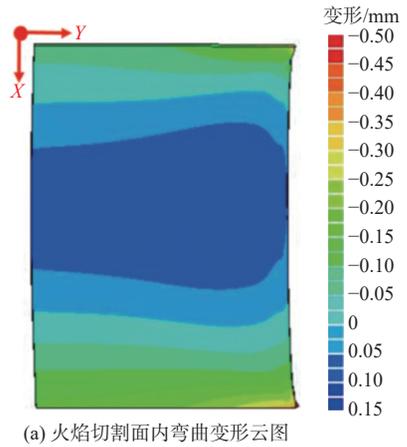


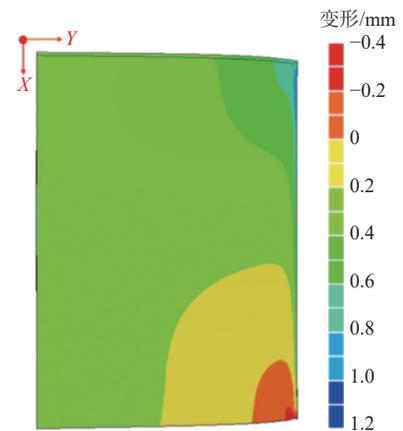
图7 试验测量和火焰切割数值计算面外变形对比

Fig. 7 Comparison of out-of-plane welding distortion with measurement and computation

薄板火焰切割过程中,会产生面外失稳变形、纵向收缩变形以及面内弯曲变形,如图8所示。有限元分析预测的面内变形与测量得到的纵向收缩和面内弯曲数值基本一致。上述3类变形的产生原因可归纳为:在火焰加热作用下,板材割缝处金属发生热胀冷缩,而远离割缝的冷却金属对割缝处金属的力学行为形成拘束。当火焰切割完成后冷却至室温时,割缝处金属会产生残留的纵向塑性应变及纵向收缩力。在纵向收缩力的作用下,板材会发生纵向收缩、面外失稳变形以及面内弯曲变形等。



(a) 火焰切割面内弯曲变形云图



(b) 火焰切割面内纵向收缩变形云图

图8 热-弹-塑性有限元预测高强钢薄板切割的面内变形

Fig. 8 Computed in-plane distortion of Q550 plate with flame cutting by TEP FE analysis

4 薄板切割变形的控制研究

通过薄板火焰切割的测量试验及热-弹-塑性有限元分析,表明切割精度受到多种类型变形的影响。基于感应加热的辅助加热技术^[13]能够实现动态热拉伸,有效减轻母材金属对割缝区域的力学拘束,从而降低纵向收缩应变及纵向收缩力,进而减小面外失稳变形。此外,若辅助加热区域产生纵向收缩应变,则会形成反向弯曲力矩,能够有效抵消由割缝处纵向收缩力引起的面内弯曲变形。在应用辅助加热时,需确保不改变割缝处的热传导行为,并保障火焰切割的正常进行。

4.1 薄板切割面内弯曲变形的控制研究

在火焰切割过程中,割缝处的残留塑性应变及纵向收缩力会产生弯曲力矩,导致板材发生面内弯曲。在距离割缝 230 mm 的区域施加辅助热源(加热温度为 555 °C),通过热-弹-塑性有限元分析,研究其瞬态热-力学响应。考虑辅助加热后的高强钢薄板火焰切割的瞬态温度场分布如图9所示。辅助加热的应用未影响切割温度场的

分布及数值。随后,以辅助热源和火焰切割热源产生的瞬态温度场作为热载荷,计算得到面内弯曲变形。

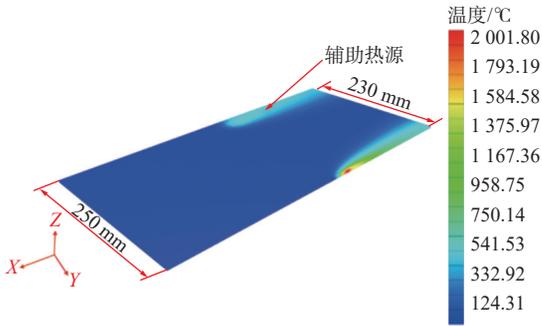


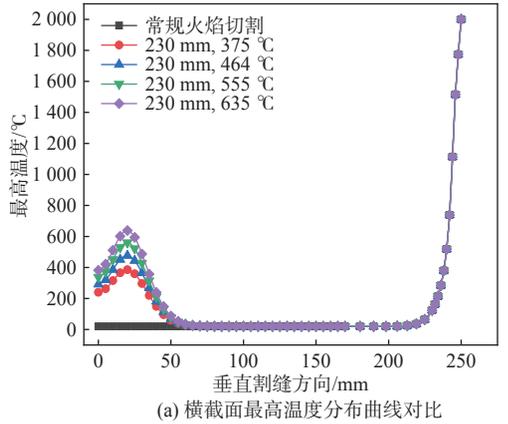
图 9 考虑辅助加热(距离: 230 mm; 温度: 555 ℃)后瞬态温度场分布

Fig. 9 Transient temperature distribution with additional heating (distance: 230 mm; temperature: 555 ℃)

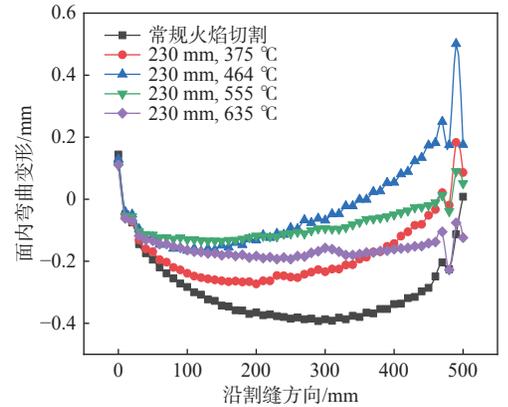
为研究辅助热源的位置和强度等工艺参数对面内弯曲变形的控制效果,采用热-弹-塑性有限元方法,预测辅助加热位置(距割缝 230 mm)以及加热最高温度(375, 464, 555, 635 ℃)情况下的高强钢薄板面内弯曲变形。具体而言,当辅助热源施加位置距离割缝 230 mm 时,加热区域的最高温度分别为 375, 464, 555, 635 ℃, 板材横断面的最高温度分布和割缝处面内弯曲变形曲线如图 10 所示。从图中可以看出,辅助加热仅影响局部温度场,对割缝处温度场无影响;不同强度的辅助热源均能有效控制火焰切割产生的面内弯曲变形。

同时,当辅助热源加热温度为 555 ℃,辅助热源距离割缝分别为 220, 230, 240, 250 mm 时,采用热-弹-塑性有限元方法研究辅助热源位置对火焰切割面内弯曲变形的控制效果。如图 11 所示,不同位置的辅助热源均能有效控制高强钢薄板的火焰切割面内弯曲变形。

综上所述,辅助热源的强度和位置等参数直接影响高强钢薄板火焰切割面内弯曲变形的控制效果。以割缝处的弯曲变形即横向偏差的绝对值之和作为火焰切割面内精度指标,在不同位置施加不同强度的辅助热源后,火焰切割的面内精度如图 12 所示。其中,未考虑辅助热源的常规火焰切割面内精度为图中的虚线,其值为 15.32 mm;考虑辅助热源后,火焰切割的面内精度均低于虚线数值,表明火焰切割产生的面内弯曲变形得到了较好控制。火焰切割面内精度的数值越小,辅助热源的控制效果越好。整体而言,相同热源强度下,距离割缝越远,对面内弯曲变形的控制效果越好。



(a) 横截面最高温度分布曲线对比



(b) 面内弯曲变形曲线对比

图 10 距割缝 230 mm 处不同强度辅助热源的热力学响应

Fig. 10 Thermal and mechanical responses of flame cutting with different added heating temperatures (distance: 230 mm)

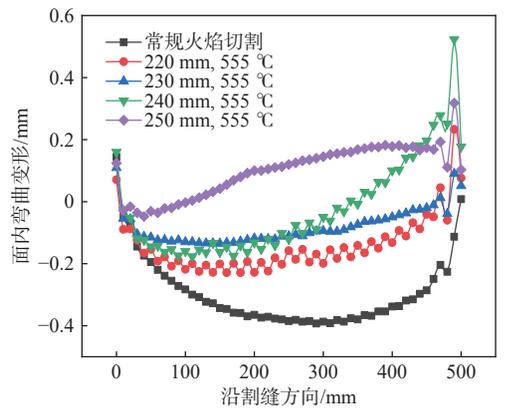


图 11 辅助热源(555 ℃)在距割缝不同位置处面内弯曲变形曲线对比

Fig. 11 Comparison of in-plane bending distortion with different distances (temperature: 555 ℃)

4.2 薄板切割面外失稳变形的控制研究

优化辅助热源的工艺参数,在加热区域不产生残留塑性应变且不影响割缝区域的热传导行为,则合理的动态热拉升能减轻割缝区域的拘束,从而得到较小的纵向收缩力,避免产生高强钢薄板面外失稳变形。

具体地,通过热-弹-塑性有限元计算,研究在距离割缝 100 mm 处施加最高加热温度为 180 ℃

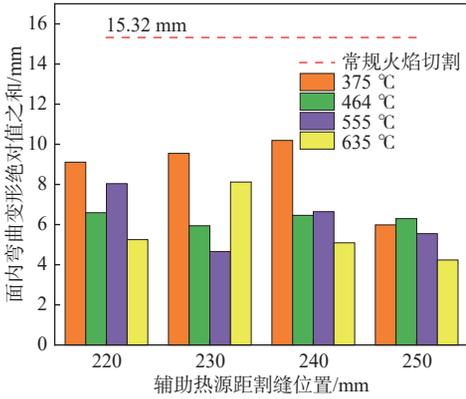


图 12 在不同位置施加不同热源强度的辅助热源后面内弯曲变形对比

Fig. 12 Comparison of in-plane bending distortion with different heating distances and temperatures

的辅助热源情况下的热-力学响应。计算得到的瞬态温度场分布如图 13 所示,可见辅助加热未对火焰切割的温度场产生影响。同时,对面外变形的控制效果非常明显,如图 14 所示。随火焰切割同步移动的辅助热源(距离割缝 100 mm, 加热区域温度最高为 180 °C),能够有效控制火焰切割产生的面外失稳变形。

基于上述热-弹-塑性有限元分析,研究不同辅助热源位置及强度对高强钢薄板面外失稳变形的影响。具体而言,辅助热源施加在距离割缝 100 mm 的位置,加热区域的最高温度分别设置为 75, 180, 280, 375, 464 °C。添加不同强度辅助热源后,板材横截面最高温度分布曲线如图 15(a) 所示。可见辅助热源的热作用未对割缝处的温度场产生影响。同时,辅助热源对切割板材的塑性应变以及面外失稳变形影响显著,线 1(距离割缝 155 mm)上点的面外失稳变形对比如图 15(b) 所示。

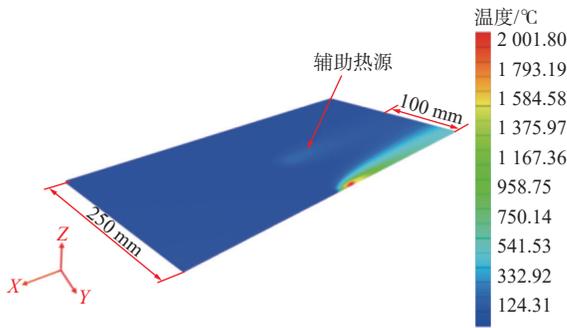


图 13 添加辅助热源(距离: 100 mm; 温度: 180 °C)后瞬态温度场分布

Fig. 13 Transient temperature distribution with additional heating (distance: 100 mm; temperature: 180 °C)

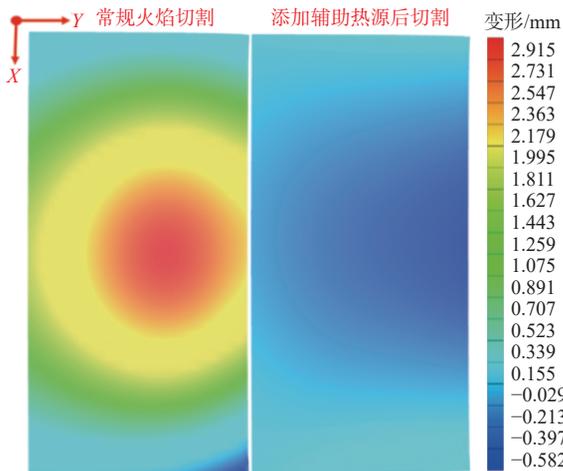
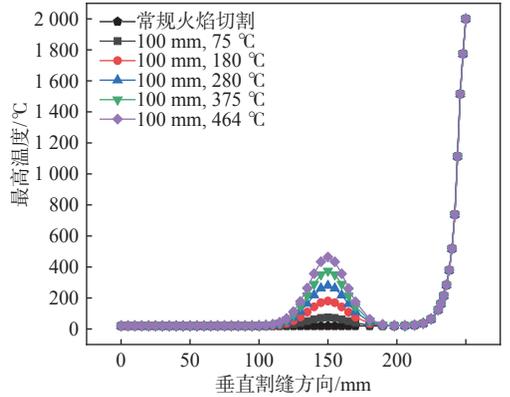
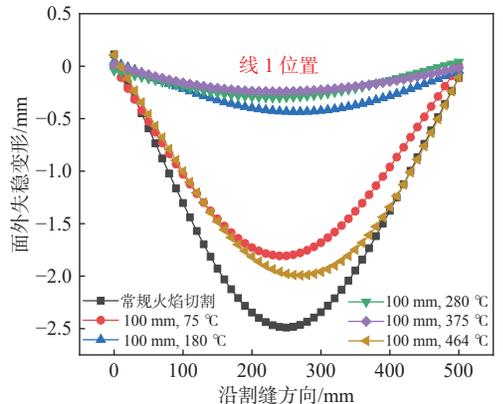


图 14 加辅助热源前后面外变形对比

Fig. 14 Comparison of out-of-plane distortion without and with additional heating



(a) 横截面最高温度分布曲线对比



(b) 面外失稳变形曲线对比

图 15 距割缝 100 mm 处不同强度辅助热源的热力学响应

Fig. 15 Thermal and mechanical responses of flame cutting with different added heating temperatures (distance: 100 mm)

考虑切割板材最大相对面外变形以及所有节点面外变形的绝对值之和,如图 16 所示。从图中可以看出,尽管辅助热源对火焰切割区域的温度场没有影响,且加热区域没有产生残留塑性应变;但其产生的最高温度,会显著地影响母材对割缝区域的拘束强度。当辅助热源的最高温度高于 464 °C 或者低于 75 °C 时,基本无法消除高强钢薄板的面外失稳变形;当辅助热源的最高温度介于 180 °C 到 375 °C 时,可有效避免火焰切割失稳的发生,面外变形最大值可减小 90% 以上。

由于割缝处的纵向塑性应变及其收缩力是产生薄板火焰切割的主要因素,在不同辅助加热最

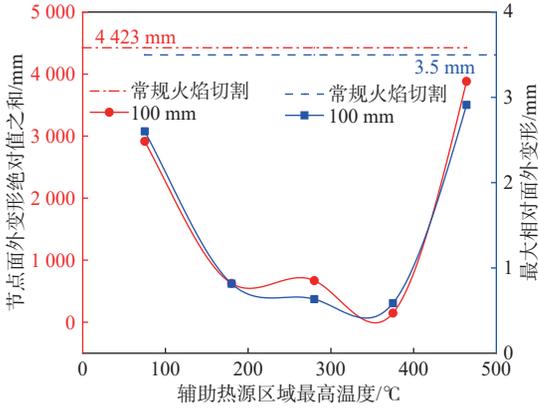
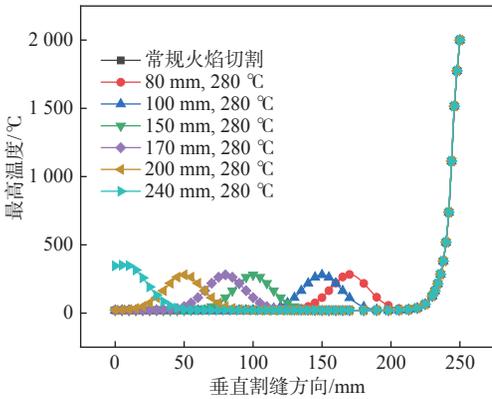


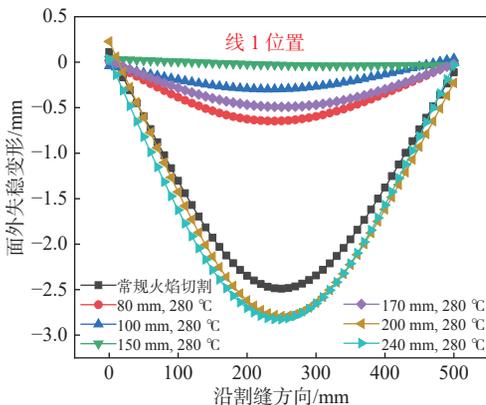
图 16 距割缝 100 mm 处不同强度辅助热源面外变形对比

Fig. 16 Comparison of out-of-plane distortion with different added heating temperatures (Distance: 100 mm)

高温作用下,合适的辅助加热温度能够有效地减小高强钢薄板切割板材的纵向收缩力,避免火焰切割失稳变形的产生。当辅助热源加热区域的最高温度为 280 ℃ 时,通过热-弹-塑性有限元计算,研究辅助热源位置(距离割缝 80, 100, 150, 170, 200, 240 mm),对割缝处温度场、火焰切割薄板残留塑性应变以及纵向收缩力的影响,如图 17 所示。



(a) 横截面最高温度分布曲线对比



(b) 面外失稳变形曲线对比

图 17 辅助热源 (280 ℃) 在距割缝不同位置的热力学响应

Fig. 17 Thermal and mechanical responses of flame cutting with different added heating distance (temperature: 280 ℃)

图 18 给出了辅助加热最高温度为 280 ℃ 时,加热位置变化时,切割板材的最大面外变形以及

所有节点面外变形绝对值之和的对比。从图中可以看出,当辅助加热距离割缝在 150 mm 到 170 mm 时,火焰切割板材的最大相对面外变形和所有节点面外变形的绝对值之和均为最优;基本可以消除火焰切割引起的面外失稳变形。

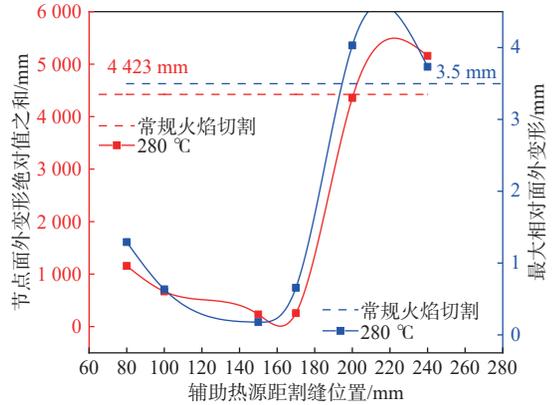


图 18 辅助热源(280 ℃)在距割缝不同位置处面外变形对比

Fig. 18 Comparison of out-of-plane distortion with different added heating distance (temperature: 280 ℃)

图 19 展示了不同强度辅助热源施加在不同位置的面外变形对比。其中,未考虑辅助热源的常规火焰切割面外变形绝对值之和为图中的虚线,值为 4 423 mm。由图可见,辅助热源的应用使得面外变形绝对值之和低于虚线,说明辅助热源可以控制薄板火焰切割的面外失稳变形,且数值越小,辅助热源的控制效果越好。

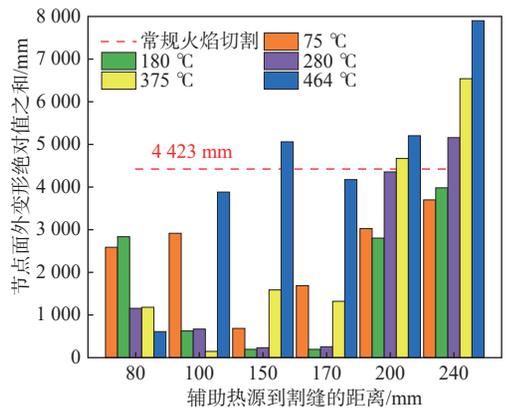


图 19 不同强度辅助热源施加在不同位置的面外变形对比

Fig. 19 Comparison of out-of-plane distortion with different heating distances and temperatures

对于 Q550 高强钢薄板,当辅助加热的最高温度(180 ℃ 到 280 ℃)和位置(距离割缝 150 mm 到 170 mm)确定时,可以较好地消除火焰切割产生的面外失稳变形。若辅助热源的工艺参数不在上述范围内,则减小火焰切割面外失稳变形的效果不明显,甚至会加剧面外变形,降低火焰切割精度。同时,为更好地消除薄板火焰切割面外失稳变形,不同位置施加的附加热源,其优化的最高

加热温度也有所不同。

4.3 薄板切割精度的综合控制研究

薄板火焰切割引起的残留塑性应变和纵向收缩力,不仅会导致面外失稳变形,还会引起面内弯曲变形。辅助热源的热拉伸作用在消除失稳变形的同时,也会减小面内弯曲变形。如上所述,当辅助加热的位置(距离割缝 150 mm 到 170 mm)及最高温度(180 °C 到 280 °C)确定时,薄板火焰切割的面外失稳变形可减小 90% 以上,控制效果最佳;此时,沿割缝方向的面内弯曲变形及火焰切割面内精度如图 20 所示。

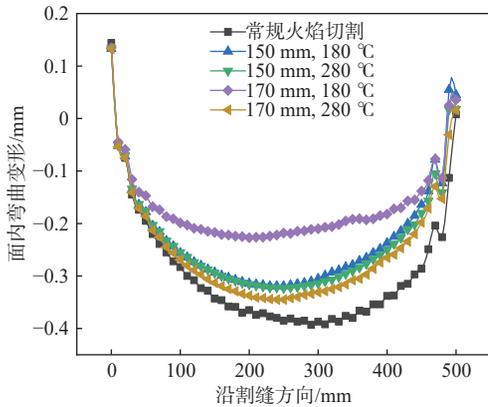


图 20 沿割缝方向的面内弯曲变形及火焰切割面内精度

Fig. 20 In-plane bending distortion and flame cutting accuracy along cutting direction

由图 20 可以看出,优化后的辅助热源工艺参数在显著抑制火焰切割面外失稳变形的同时,也对火焰切割面内的弯曲变形表现出一定的控制能力。通过辅助热源提供的热拉伸作用,面内收缩力得以有效减小,进而使火焰切割面内的弯曲变形量降低超过 40%。然而,该工艺在控制面内弯曲变形方面的表现并非最为理想。结合前文分析可知,采用特定工艺参数的辅助加热过程能够产生残留塑性应变,其产生的纵向收缩力与反向弯曲力矩协同作用,可使面内弯曲变形量减少 70% 以上,展现出更为优越的控制效果。

5 结论

针对屈服强度为 550 MPa 的高强钢薄板切割变形,结合试验测量和热-弹-塑性有限元分析进行了研究;通过辅助热源的参数优化分析,可以较好地消除火焰切割产生的面内弯曲及面外失稳变形。主要结论如下:

1) 通过三坐标测量和大变形热-弹-塑性有限元计算,再现了薄板火焰切割的面外失稳变形和面内弯曲变形,且预测的变形趋势和数值与测

量结果高度吻合。

2) 阐明了面外失稳变形和面内弯曲变形产生的力学机理,并提出 2 种不同的辅助热源工艺,分别对面外失稳变形和面内弯曲变形进行控制和消除。

3) 在板材切割边缘的对侧区域,施加辅助热源并产生残留塑性应变,可显著消除板材的面内弯曲变形,其变形量减少超过 70%。

4) 在远离切割边缘的区域,施加辅助热源且不产生残留塑性应变,能够有效减弱母材对割缝区域的拘束作用。在此条件下,纵向收缩力显著降低,面外失稳变形可减少 90% 以上,从而有效抑制薄板面外失稳变形的产生。此外,该工艺还可部分消除面内弯曲变形,使其变形量减少 40% 以上。

后续将在邮轮薄板的切割精度控制中,对辅助热源的施加工艺参数进行应用和验证。

参考文献:

- 王江超. 薄板船体结构焊接失稳变形的数值分析进展 [J]. *造船技术*, 2017(2): 73-78,83.
WANG J C. Progress of numerical analysis on welding buckling of thin plate ship structures[J]. *Marine Technology*, 2017(2): 73-78,83 (in Chinese).
- 刘玉君, 汪骥. 船舶建造工艺学 [M]. 大连: 大连理工大学出版社, 2011.
LIU Y J, WANG J. Technology of ship production[M]. Dalian: Dalian University of Technology Press, 2011 (in Chinese).
- BAE K Y, YANG Y S, YI M S, et al. Numerical analysis of heat flow in oxy-ethylene flame cutting of steel plate[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 2018, 232(4): 742-751.
- THIÉBAUD R, DREZET J M, LEBET J P. Experimental and numerical characterisation of heat flow during flame cutting of thick steel plates[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2014, 214(2): 304-310.
- ARENAS M J, HÖMBERG D, LASARZIK R, et al. Modelling and simulation of flame cutting for steel plates with solid phases and melting[J]. *Journal of Mathematics in Industry*, 2020, 10(1): 18.
- 宋韬惠. 火焰切割质量的影响因素及优化方法研究 [J]. *金属加工 (热加工)*, 2019(4): 39-41.
SONG T H. Study on influencing factors and optimization methods of flame cutting quality[J]. *MW Metal Forming*, 2019(4): 39-41 (in Chinese).
- 卜寅年. 氧-液化石油气与氧-乙炔火焰切割比较 [J]. *煤气与热力*, 2003, 23(4): 220-222.
BU Y N. Comparison of flame cutting technology between

- oxygen-LPG and oxygen-acetylene[J]. *Gas & Heat*, 2003, 23(4): 220–222 (in Chinese).
- [8] 冯焕公, 王磊, 高海涛. 氧-天然气火焰切割试验及应用[J]. 金属加工(热加工), 2013(10): 71–72.
FENG H G, WANG L, GAO H T. Oxy-gas flame cutting test and application[J]. *MW Metal Forming*, 2013(10): 71–72 (in Chinese).
- [9] 贾晓丹, 王波, 谌祖刚. 氧乙炔火焰在船舶制造中的应用研究[J]. 科技与管理(武汉), 2012(4): 21–23.
JIA X D, WANG B, SHEN Z G. Research on the application of oxyacetylene flame in shipbuilding[J]. *Technology and Management (Wuhan)*, 2012(4): 21–23 (in Chinese).
- [10] 杜富强, 陈东升. 数控火焰切割中钢板热变形控制的探讨[J]. 机械工人, 2006(4): 54–55.
DU F Q, CHEN D S. Discussion on the control of thermal deformation of steel plate in CNC flame cutting[J]. *Machinist Metal Forming*, 2006(4): 54–55 (in Chinese).
- [11] 张闪影, 汤小红, 赖明建, 等. 钢板气体火焰切割温度场的数值模拟分析[J]. 焊接技术, 2013, 42(2): 10–13.
ZHANG S Y, TANG X H, LAI M J, et al. Numerical simulation analysis of the temperature field of gas flame cutting of steel plate[J]. *Welding Technology*, 2013, 42(2): 10–13 (in Chinese).
- [12] 易斌, 史雄华, 殷咸青, 等. 轻量化造船中薄板对接焊失稳及其临界条件[J]. 造船技术, 2019(5): 6–13.
YI B, SHI X H, YIN X Q, et al. Welding buckling behavior and critical condition of thin plates butt welding in lightweight shipbuilding[J]. *Marine Technology*, 2019(5): 6–13 (in Chinese).
- [13] 王江超, 黄文嘉, 常利春, 等. 线加热实现枕型船体外板成形的弹性有限元分析[J]. 造船技术, 2017(4): 14–17, 23.
WANG J C, HUANG W J, CHANG L C, et al. Elastic FE analysis on plate forming of pillow shape by line heating[J]. *Marine Technology*, 2017(4): 14–17, 23 (in Chinese).

Mechanism analysis of cutting distortion of thin plate with high tensile strength steel for its prediction and control

WANG Jiangchao^{1,2}, DU Shizhong³, CHEN Xiangfei³, NIU Yexing³, YANG Yang¹, ZHAO Hongquan⁴, WU Lei⁵

1 School of Naval Architecture and Ocean Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China

2 Collaborative Innovation Center for Advanced Ship and Deep-Sea Exploration, Shanghai 200240, China

3 Shanghai Zhenhua Heavy Industries Qidong Ocean Engineering Co. Ltd., Nantong 226200, China

4 School of Naval Architecture and Ocean Engineering, Jiangsu Maritime Institute, Nanjing 211199, China

5 School of Mechanical Science & Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China

Abstract: [**Objective**] In order to effectively control flame cutting precision of thin plate with high tensile strength steel, Generation mechanism of out-of-plane buckling distortion and in-plane bending distortion were investigated, and processing with dynamic heating was proposed to reduce flame cutting distortion. [**Method**] Using Q550 plate with thickness of 3 mm as research object, out-of-plane buckling and in-plane bending distortion of examined cutting specimen were observed by means of flame cutting experiment and 3-dimensional measurement. By thermal elastic plastic FE computation with large deformation, thermomechanical response during flame cutting of Q550 thin plate was examined, and influence of additional heating on flame cutting distortion of thin plate with high tensile strength steel was also considered. [**Results**] Both distortion tendency and magnitude of predicted results are in excellent agreement with measured data. In addition, heating the region away from flame cutting can reduce buckling distortion about 90% and in-plane bending distortion by 40%. [**Conclusions**] Based on the generation mechanism of cutting distortion, assisted flame heating with different processing was proposed and applied to improve the cutting accuracy with flame; furthermore, with thermal elastic plastic FE computation, optimal processing to reduce flame cutting distortion was proposed for high-precision fabrication of thin plate with high tensile strength steel.

Key words: cutting distortion of thin plate; TEP FE computation; auxiliary heating process; inverse bending moment; longitudinal shrinkage force; finite element method