

文章编号: 1000-4882 (2013) 03-0105-09

高强度桩腿齿条厚板切割数值仿真研究

周 宏^{1,2}, 罗 宇¹, 蒋志勇², 李旭东²

(1. 上海交通大学船舶海洋与建筑工程学院, 上海 200030;

2. 江苏科技大学船舶与海洋工程学院, 江苏 镇江 212003)

摘 要

建立了适用于高强度海洋平台桩腿齿条厚板氧乙炔切割的预热热源与燃烧热源叠加的新型复合热源模型。确定了热源模型中各类参数, 应用 Jmatpro 计算 NV E690 的热物理性能参数, 并根据金属学的知识, 对计算结果进行修正。利用大型弹塑性有限元分析软件 ANSYS 数值模拟桩腿齿条厚板的切割过程, 并与实际加工实测数据对比, 验证了材料的热物理性能及热源模型的可靠性。

关 键 词: 切割仿真; 海洋平台桩腿; 氧乙炔切割

中图分类号: TG481

文献标识码: A

0 引 言

世界各国经济在快速发展, 对能源的需求越来越大, 海底油田的开发已从浅海向深海、冰海区域拓展, 因而对海洋平台制造的材料和技术的要求也越来越高^[1]。例如海洋钻井平台桩腿已采用屈服强度 690MPa 以上的 Z 向钢制造, 最大厚度达到 210mm^[2]。对于这种高强度、大厚度板材的切割是一个复杂热加工过程, 涉及传热学、材料冶金学、固体力学和流体力学等众多学科, 还涉及到材料和切割气体之间的复杂作用。

目前, 厚度大于 100mm 的高强钢板主要还是靠氧乙炔气体来切割。然而切割后的边随着钢板的自然冷却会产生收缩应力, 严重时会产生较复杂的变形。另一方面, 作为焊接生产的第一道加工工序, 引起的残余应力和应变将直接影响下一道工序——焊接装配的质量。因此对切割热力学性能的研究对于提高海洋平台的安全可靠性和装配精度具有重要的现实意义。

目前国内外切割数值模拟研究主要以激光切割或薄板的氧气切割研究为主^[3-13], 高强度、大厚度板材氧气切割的数值计算和模拟尚属空白。而高强度、大厚度海洋平台桩腿板材的切割只有氧气切割才能胜任。相对于其他切割方法, 如等离子弧切割 (以高温高速的等离子弧为热源将被切金属局部熔化并蒸发, 由高速气流将已熔化的金属吹离母材而形成狭窄切口的一种切割方法, 是利用物理过程的熔割法), 氧气切割具有良好的切割效率和低切割成本。氧气切割的实质是被切割的材料加热到燃点以后在纯氧气中燃烧的过程, 不是融化或者蒸发过程, 切割过程形成不均匀温度场, 伴随着热应变和局部塑性变形, 切割过程中热影响区宽, 残余应力和变形明显。海洋平台桩腿板材的火焰切割在我国尚处于起步阶段, 需要更多的实验研究和理论分析。我国建造的海洋平台桩腿齿条大多从国外进口, 在国

收稿日期: 2013-04-08; 修改稿收稿日期: 2013-08-01

基金项目: 江苏高校优势学科建设工程资助项目 (PAPD)

内进行焊接组装；为国外组装的海洋平台的升降齿条也多来自于海外。因此对海洋平台高强度大厚度板材的切割变形和残余应力产生的机理等需要开展深入研究，为施工工艺的改进提供理论基础和技术支持。

1 氧乙炔切割热源模型

热源模型的研究主要从三方面入手：形状参数、热流分布参数和热输入参数。具体地说，在研究用于氧乙炔切割个热源模型时，首先要分析在切割过程中共有哪几种热输入形式。氧乙炔切割的过程中主要涉及两种热的产生机制，一是在切割钢板的初始阶段，对钢板进行预热，预热的热量是由氧乙炔燃烧产生；二是在切割过程中，由于切割钢板的割缝燃烧产生热量。本文基于以上切割原理，建立双热源模型。

1.1 形状参数的确定

双热源模型的形状参数由氧气切割工艺决定。氧气切割首先由预热火焰将割件表面加热到燃点，这一过程属于高斯热源对半无限体加热的范畴，因此将氧气切割的初始形状定义为高斯热源；当割件表面达到燃点后，开始加热下层金属，使下层金属开始燃烧产生热。这一过程属于点热源加热半无限体的范畴，因此在此阶段热源形状定义为点热源。最后当切割火焰稳定后，切割匀速进行，逐步切开构件，此过程属于无限板上移动线热源和高斯热源共同作用的范畴。

1.2 热流分布参数的确定

氧气切割时，铁氧燃烧反应提供了大量能量，燃烧形成的熔渣因被吹落而带走大量能量，在温度场的计算中将两者之差作为净能量，并假设能量沿厚度方向均匀分布。

$$\begin{aligned} P_r' &= P_r + P_h + P_f = \eta_{\text{Fe}} v w h \rho H_{\text{FeO}} - v w h \rho c (T_{m1} - T_0) - v w h \rho L_f \\ &= v w h \rho [\eta_{\text{Fe}} H_{\text{FeO}} - c (T_{m1} - T_0) - L_f] \end{aligned} \quad (1)$$

式中 P_r' 是净能量； P_r 是燃烧反应放出能量； P_h 是将工件加热到熔点所需能量； P_f 是使工件熔化所需能量； η_{Fe} 为铁燃烧率； H_{FeO} 为铁氧反应热； v 为切割速度； w 为切缝宽度； h 为板材厚度； ρ 为材料密度； c 为板材比热容； T_0 为板材初始温度； L_f 为材料熔化潜热； T_{m1} 为氧化铁的熔点温度。

由作用于无限板的移动线热源的温度场分布式可知铁-氧燃烧反应作用下形成的温度场可以表示为

$$\begin{aligned} T - T_0 &= \frac{P_r'}{2\pi k h} \exp\left(-\frac{vx}{2a}\right) K_0\left(r\sqrt{\frac{v^2}{4a^2} + \frac{b}{a}}\right) \\ &= \frac{v w \rho}{2\pi k} [\eta_{\text{Fe}} H_{\text{FeO}} - c (T_{m1} - T_0) - L_f] \exp\left(-\frac{vx}{2a}\right) K_0\left(r\sqrt{\frac{v^2}{4a^2} + \frac{b}{a}}\right) \end{aligned} \quad (2)$$

1.3 高斯热源及燃烧反应双热源作用下的准稳态温度场

根据温度场的叠加原理，氧气切割厚板时温度场应为高斯分布热源作用下温度场与铁-氧燃烧反应放热作用下温度场之和，如式（3）表示。

$$T_i = T_1 + T_r = \frac{2Q}{vc\rho} \cdot \frac{\exp\left(-\frac{z^2}{4at}\right)}{4\pi a t^{3/2}} \cdot \frac{\exp\left[-\frac{r^2}{4a(t+t_0)}\right]}{[4\pi a(t+t_0)]^{3/2}} + \frac{v w \rho}{2\pi k} [\eta_{\text{Fe}} H_{\text{FeO}} - c (T_{m1} - T_0) - L_f] \exp\left(-\frac{vx}{2a}\right) K_0\left(r\sqrt{\frac{v^2}{4a^2} + \frac{b}{a}}\right) \quad (3)$$

火焰作用下温度场是根据半无限体推导而出，而燃烧作用下的温度场则是采用无限板的假设。实际的热切割过程中，有必要对式（3）进行修正。分别引入厚大工件修正系数 m_1 及薄板厚度修正系数 m_2 。这样最终双热源作用下准稳态温度场公式可以写成：

$$T_i = T_1 + T_r = m_1 \frac{2Q}{vc\rho} \cdot \frac{\exp(-\frac{z^2}{4at})}{4\pi a t^{1/2}} \cdot \frac{\exp[-\frac{r^2}{4a(t+t_0)}]}{[4\pi a(t+t_0)]^{1/2}} + m_2 \frac{vw\rho}{2\pi k} [\eta_{Fe} H_{FeO} - c(T_{m1} - T_0) - L_f] \exp(-\frac{vx}{2a}) K_0(r\sqrt{\frac{v^2}{4a^2} + \frac{b}{a}}) \quad (4)$$

1.4 热源模型中参数的确定

热源模型中的参数主要由切割工艺参数决定。切割工艺参数主要包括割火炬型号、割嘴号码、切割氧压力、气割速度、预热火焰能率、割嘴与工件间的倾斜角及割嘴离工件表面的距离等。这些参数直接决定了热源模型当中的热能输入 Q 、能量吸收效率系数 k 。

在给定乙炔流量的情况下, 热流密度 $q(r)$ 取决于热效率 η_{Fe} 和高斯热源有效半径 r_0 。在实际切割的过程中, 有很多的因素会影响到 η_{Fe} 和 r_0 。但是起主导作用的主要是乙炔量的供给, 其他因素对 η_{Fe} 和 r_0 的影响都可以忽略不计。本文中通过查阅文献资料来确定氧气切割时高斯热源的有效半径 r_0 , 然后通过数值仿真不断地调整 η_{Fe} 的值, 将仿真的结果与文献[13]中的结果进行对比, 从而确定较为合理的 η_{Fe} 。本研究中高斯热源的有效半径 $r_0=35\text{mm}$, 热效率 $\eta_{Fe}=0.3$ 。

2 平板氧乙炔切割的数值计算

平板切割较为简单, 且仿真结果也较容易通过试验数据进行验证。通过平板切割的数值模拟来验证选取的试验材料的高温性能以及验证仿真方法的可行性。

2.1 材料的温度性能参数

金属材料的物理性能参数如比热容、导热系数、弹性模量、屈服应力等都随温度的变化而变化^[14]。

在切割过程中, 构件局部加热到很高的温度, 整个焊件温度变化十分剧烈。为此在切割过程温度场和应力场的数值计算中须确定材料的各项物理性能参数随温度的变化规律。

材料的热物理性能参数数据不足是目前有限元模拟技术遇到的困扰之一。由于测试方法和手段的限制, 材料的热物理性能(比热容、导热系数、密度等)数据在高温、特别在接近于熔化温度及熔化态时的参数还是空白, 这给非线性计算带来困难。一般是通过试验和线性插值的方法获得高温时的一些数据, 而试验测试(高温拉伸试验等)往往工作量大、对设备要求高, 通常只可能获得少数点的数据, 在此基础上插值就会导致结果不准确。

选用自升式海洋平台桩腿板材 NV E690 为研究对象, 其高温物理性能参数采用 Jmatpro 软件^[15-16]进行计算, 并根据金属学理论知识和材料的特性进行必要的修正, 相比 ANSYS 的插值法计算出来的结果更为精确。如表 1 所示。

表 1 NV E690 的热物理性能参数

温度/°C	20	100	500	800	1200	1500	2000
导热系数/(w/(m K))	50.17	47.36	36.32	29.96	31.77	37.60	41.14
密度/(kg/m ³)	7.86	7.84	7.70	7.65	7.47	6.76	6.76
弹性模量/MPa	2.09	2.14	1.78	1.45	0.99	0	0
切变模量/MPa	81.20	78.95	68.08	54.68	17.72	0	0
泊松比	0.29	0.31	0.33	0.36	0.37	0.5	0.5
热膨胀系数/(1/°C)	12.56	13.09	15.72	20.72	24.42	24.42	24.42
摩尔体积/mol	7.09	7.11	7.23	7.30	7.45	8.23	8.23
线膨胀系数/(1/K)	0.006	0.096	0.66	0.97	1.70	1.70	1.70
体积模量/Pa	165.56	164.07	155.28	142.03	120.82	118.45	118.45
焓/J	763.69	1 176.71	14 277.8	29 216	44 164	59 194	59 194
比热容/(J/(kg K))	25.58	27.15	39.15	58.18	37.58	91.58	91.58

2.2 平板切割的温度场计算

(1) 几何模型

选取某海洋平台桩腿中长度为 9400mm 的齿条板材, 取实际齿条板的约 1/19 长度建立模型, 其几何尺寸为 500mm×224mm×127mm, 如图 1 所示。

(2) 材料属性

假设切割过程中材料属各向同性; 板材边界仅与空气发生对流换热, 在对流换热中考虑辐射换热的影响, 并忽略切割过程中可能发生的割缝内部的化学反应和搅拌、对流等现象。

(3) 确定单元类型及划分网格

选用 SOLID70、SOLID87 以及 SURF152 三种单元模型。除了过渡区的部分选用单元 SOLID87 外, 其他的部分均使用 SOLID70。在模拟平板的表面与空气的换热过程中, 选用表面效应单元 SURF152。

划分网格的过程中既要考虑到计算机硬件的限制, 也要兼顾计算的准确性。因此在割缝处及热影响区需要把网格划分得密一些, 而在远离热源的区域则可适当加大划分网格的尺寸。本文采用非均匀网格划分, 在割缝及割缝附近的网格划分较密, 在热影响区使用过渡单元, 而边缘区的单元则划分得较疏。网格划分如图 2 所示。

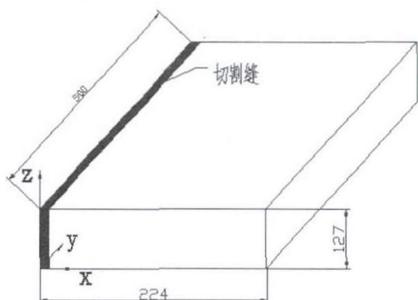


图 1 海洋平台桩腿齿条板几何尺寸

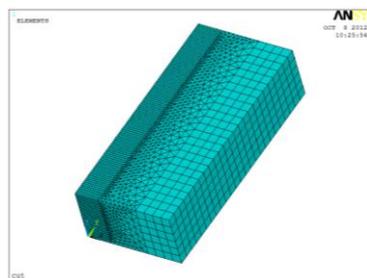


图 2 平板有限元模型

(4) 切割温度场计算结果分析

为了研究切割模型表面各点温度值随时间变化的情况, 在其切割模型上取一系列温度测点。在切割方向布置 6 个等分点, 在垂直方向上布置 4 个点, 宽度方向布置 5 个等分点 (如图 3 所示), 通过分析这些温度测点的热循环来研究温度场的变化规律。

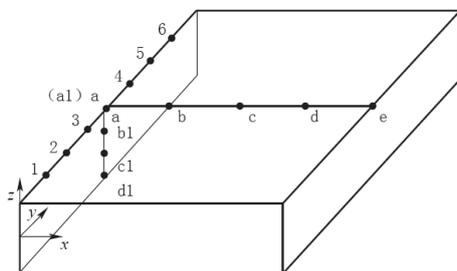


图 3 切割温度测点分布示意图

图 4~图 6 分别为沿切割方向、垂直方向以及远离热源处各参考点的温度场分布图。

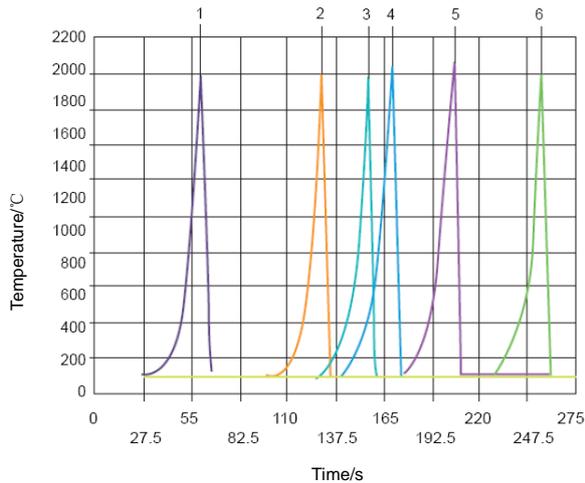


图 4 沿切割方向的温度场分布

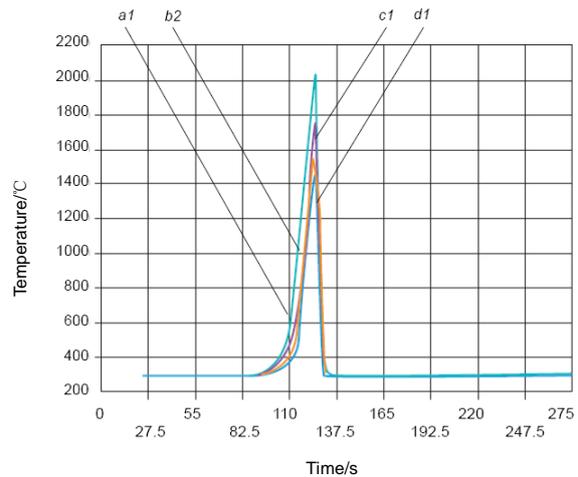


图 5 沿垂直方向的温度场分布

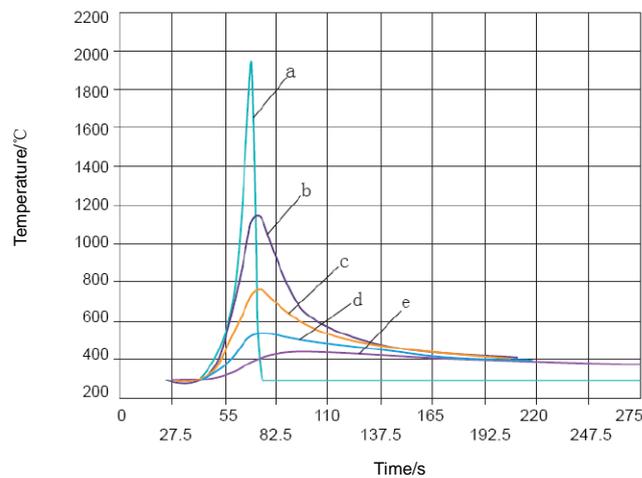


图 6 远离热源处的温度场分布

在图 4 中, 从 6 个观察点在切割过程中的温度变化可以看出: 随着时间推移, 各点的温度曲线基本一致, 只是与热源距离不同在时间上有迟滞, 换言之, 温度场可以近似认为是准稳态温度场。

如图 5 所示, 通过在垂直方向布置的 4 个测点在整个切割过程中温度的变化可以看出: 随着与割缝距离的增大, 同一时刻的各点温度依次下降, 其在热循环中所能达到的最高温度亦呈下降趋势。

图 6 所示为远离热源的 5 个测试点在 0~275s 内的温度循环。可以看出, 离热源越远的点, 其温度的最高值相应地减少, 但各测点温度的走向大致相同。

通过以上的分析可见, 随着高斯热源和铁氧反应生热热源的移动, 切割件上各节点的温度将随时间而变化, 开始温度场极不稳定, 且切割件升温较快, 一段时间后, 切割构件上形成准稳态温度场, 即切割件上各点的温度虽随时间而变化, 而热源周围的温度分布则为恒定, 各观察点以恒温随热源按切割速度沿切割方向前推。

当切割温度场为准稳态时, 则可认为载荷步和网格划分达到了一定的精度要求。如没有达到准稳态, 则需要重新划分网格及修改载荷步重新进行计算。

2.3 平板切割的应变场计算及试验验证

(1) 平板直线切割应变场的数值模拟计算

采用二分之一的几何模型建立直线切割模型, 根据对称性特点在对称面上施加对称约束。边界条

件根据钢板的实际情况而确定。因钢板放在加工平台上，割缝附近悬空，为防止模型产生为刚性位移在模型上与切割面对应面上的节点施加刚性约束，初始温度的设置同温度场计算中一致，取室温 20℃。

为研究平板直线切割应变场规律，特考察如图 7 所示各点的位移。

图 8 为切割起始与终止端垂直于切割方向的位移图。从图 8 可见，在切割的过程中，在切割起始端与终止端垂直于切割方向的变形都不是太大。

图 9 为切割起始与终止端沿切割方向的位移图。

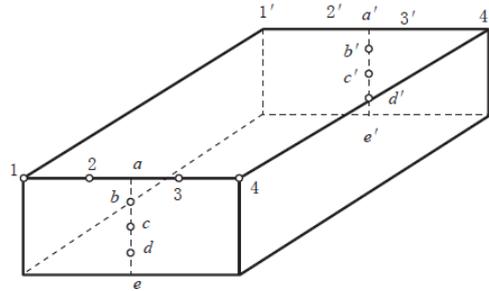
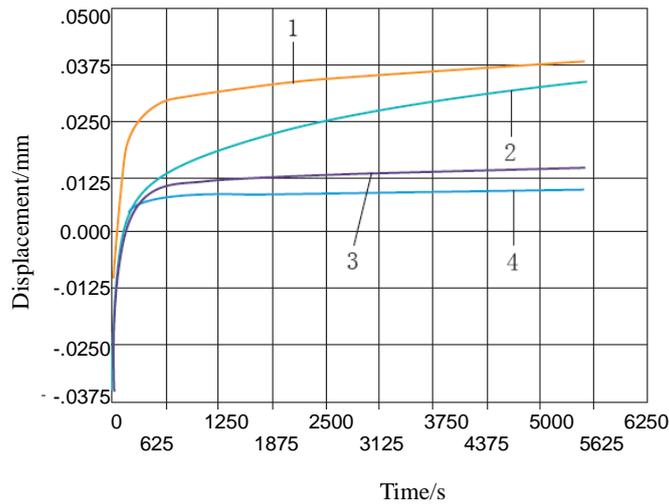
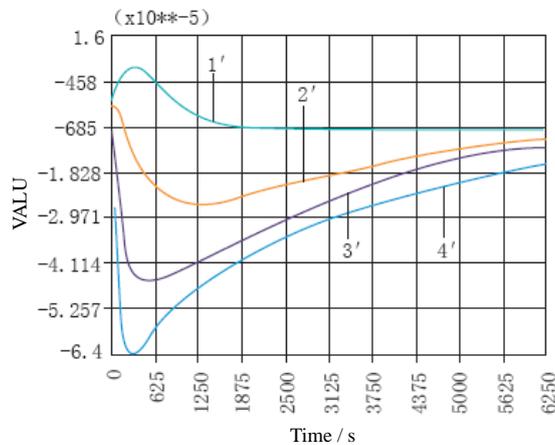


图 7 位移参考点

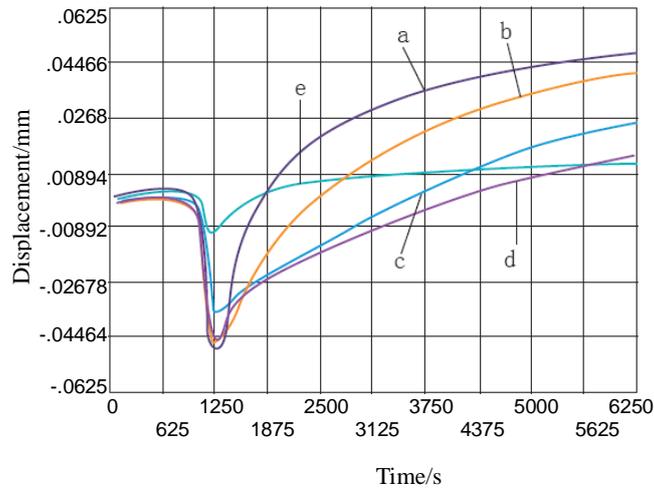


(a) 起始端垂直于切割方向的位移

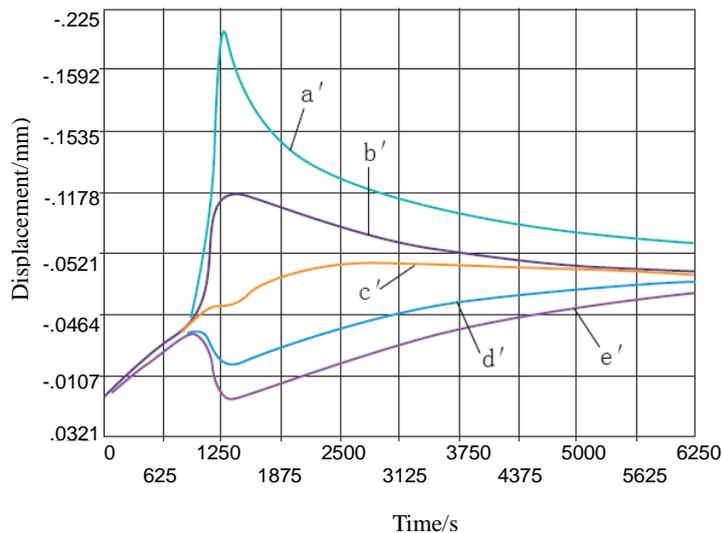


(b) 终止端垂直于切割方向的位移

图 8 切割起始与终止端垂直于切割方向的位移



(a) 起始端沿切割方向的位移图



(b) 终止端沿切割方向的位移图

图 9 切割起始与终止端沿切割方向的位移图

从图 8 和图 9 可见, 在切割的过程中, 割件的变形主要发生在切割方向上。由图 9(a)可见, 在起始端切割结束后参考点会伸长, 伸长的最大值为 0.045 78mm, 由图 9(b)可见, 在切割终止端参考点则有一定的收缩量, 收缩最大值为 0.085mm。

(2) 平板直线切割的试验验证

试验选用 DILLIMAX690 桩腿板材, 板材尺寸为 9 400mm×1 345mm×127mm, 利用数控火焰切割机进行直线切割实验, 如图 10 所示。割嘴直径为 1.75mm, 切割速度为 2.0mm/s, 割缝宽度为 5mm, 氧气压力为 0.7MPa, 乙炔压力为 0.035MPa。

经测量切割后冷却到常温在切割起始的那端长度增 4mm, 切割末端收缩 5mm, 且横向变形非常小, 约为 0.5mm。

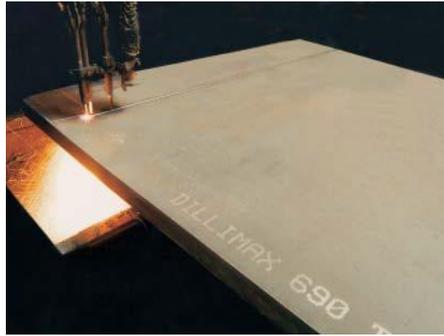


图 10 切割试验装置

数值模拟计算中因选取的模型在长度方向为试验尺寸的 $1/19$ ，通过简单的线性计算可得，在初始切割端在切割结束后最终将伸长 0.87mm ，而在终止端最终将会缩短 1.615mm 。对比实验实测数据，伸长量和收缩量的模拟结果都小于实测数据。数值模拟与实际测得的数据存在一定的差距，主要是因为桩腿板材的切割总体变形量额计算是通过简单的线性计算方法得到的，而切割的过程中板材的变形量并不是随长度方向呈线性变化的，同时参考点的选择也是存在误差的一个重要原因。虽模拟结果和实验实测数据有一定的差距，但变形收缩规律基本一致，说明数值模拟计算的热源模型及板材的高温物理性能参数基本可靠，计算结果具有一定的参考价值。

3 结 论

(1) 根据热弹塑性有限元理论，对高强度海洋平台桩腿齿条厚板氧乙炔切割过程提出将预热热源和燃烧热源叠加的新型复合热源，推导了该热源模型的准稳态温度场，确定模型的各项参数。

(2) 利用 Jmatpro（材料性能模拟软件）计算出了 NV E690 的相关热物理参数。根据金属材料的热物理参数随温度变化的趋势，对计算出的相关物理参数进行修正，为高强度海洋平台桩腿齿条厚板氧乙炔数值模拟提供了数据支持。

(3) 基于大型有限元分析软件 ANSYS 对高强度海洋平台桩腿齿条厚板的氧乙炔切割过程进行数值仿真。并与实测数据进行对比，验证了热源模型及材料高温物理性能参数的可靠性，为桩腿齿条切割的进一步研究提供了理论依据及数据支持。

参 考 文 献

- [1] 姜大宁,李红涛.自升式海洋平台桩腿齿条相位差分析研究[J].中国造船,2010,51(S1):61-64.
- [2] 董新,王海峰.海洋工程中常见焊接缺陷的成因探讨及对策[J].中国造船,2011,52(S1):212-217.
- [3] ZATSEV A V,KOVALEV O B,MALIKOV A G.The effect of vortex gas flow on the surface quality for the oxygen-laser cutting of mild steel[J]. Doklady Physics, 2009,54(2):72-76.
- [4] MOHAMMAD M, RAZFAR M R.Numerical investigating the effect of machining parameters on residual stresses in orthogonal cutting[J]. Simulation Modelling Practice and Theory ,2010(19):378-389.
- [5] YILBAS B S, ARIF A F. Laser cutting of sharp edge: Thermal stress analysis[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2010,31(4):10-19.
- [6] MARANH C J,PAULO D.Finite element modelling of machining of AISI 316 steel: Numerical simulation and experimental validation[J].Simulation Modelling Practice and Theory,2010,53(4): 139-156.
- [7] 邓德圣.氧助散焦 CO₂ 激光切割厚板技术研究[D].华中科技大学,2002.4.
- [8] ZENG K J, XIE D W, XU C S.Numerical simulation for three-dimensional (3D) unsteady state temperature field in

- circumferential laser oxygen cutting of pipes [J]. Journal of Materials Science and Technology, 2003 (19):147-150.
- [9] 高飞, 黄浩. 船体钢板切割温度场的有限元数值模拟探究[J]. 船海工程, 2009, 38(4): 11-14.
- [10] ZHOU B, LIU Y J, JI Z S. Numerical and experimental investigations on temperature and stress distribution in oxygen cutting[J]. Journal of Ship Production, 2009, 25(1): 14-20.
- [11] 王续跃, 孟庆轩, 康仁科, 徐文骥, 郭东明, 王连吉. 气熔比法铝合金薄板激光切割试验研究[J]. 中国激光, 2010, 37(10): 2648-2652.
- [12] 闰鹏飞, 吴运新, 廖凯. 切割对铝合金厚板残余应力分布影响的仿真与分析[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2010, 41(6): 2213-2219.
- [13] PAVELIC V, TANBAKUCHI R, AUYEHARE O. Experimental and computed temperature histories in gas tungsten arc welding of thin plates[J]. Welding Journal Research Supplement, 1969, 48(7): 295-305.
- [14] 张学彪, 杨玉龙, 刘玉君, 纪卓尚, 邓燕萍. 钢板弯曲工艺中的高频感应加热过程数值分析[J]. 中国造船, 2011, 52(2): 108-116.
- [15] 沈治, 沈红卫, 孙锋, 单爱党, 丁丽锋. IN783 合金热处理工艺的热动力学评估及成分设计[J]. 动力工程学报[J], 2010, 30(4): 286-292.
- [16] 闵永安, 刘湘江, 毛远建. 应用 JMatPro 软件对比研究两种抽油杆钢的合金化特点[J]. 上海大学学报(自然科学版), 2008, 14(5): 503-509.

Numerical Cutting Simulation of High Strength Thick Plate for Offshore Jack-up Platform Leg Rack

ZHOU Hong^{1,2}, LUO Yu¹, JIANG Zhiyong², LI Xudong²

(1. School of Naval Architecture, Ocean and Civil Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China;

2. School of Naval Architecture and Ocean Engineering, Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang 212003, China)

Abstract

A new type of composite thermal source model is established which integrates pre-heating thermal source with burning thermal source and is applicable to the cutting of thick plate for Jack-up platform leg racks of ocean platforms. Various parameters of the thermal source model are determined. By the use of software Jmatpro the physical parameters for material NV E690 is calculated and appropriated modification of the calculation results is conducted according to related metallographic knowledge. Large finite element analysis software is applied to simulate the cutting process of thick plate for Jack-up platform leg racks. Results from the analysis are compared with measured results in actual machining process to verify the reliability of the thermal physical performance estimation and the suggested thermal source model.

Key words: cutting simulation; offshore jack-up platform leg; oxy-acetylene

作者简介

周 宏 男, 1974年生, 博士研究生, 副教授, 硕士生导师。主要从事船舶与海洋结构物设计制造方面的研究工作。

罗 宇 男, 1961年生, 博士, 教授, 博士生导师。主要从事焊接数值模拟诸方面的研究工作。

蒋志勇 男, 1956年生, 教授, 硕士生导师。主要从事船舶与海洋结构物设计制造方面的研究工作。

李旭东 男, 1986年生, 硕士研究生。主要从事焊接数值模拟方面的研究工作。