

●研究简报●

钢板轧后控冷模拟及残余应力反演研究^{*}

COOLING SIMULATION AND INVERSION OF RESIDUAL STRESSES OF STEEL PLATE

李建军^{**} 陈少华^{***}

(中国科学院力学研究所 非线性力学国家重点实验室, 北京 100190)

LI JianJun CHEN ShaoHua

(State Key Laboratory of Nonlinear Mechanics, Institute of Mechanics, Chinese Academy
of Sciences, Beijing 100190, China)

摘要 采用有限元软件 Ansys 中的实体单元、壳单元及子模型技术模拟钢板的轧后控冷过程, 得到钢板冷却后的三维温度场。结果表明, 子模型技术是一种可以方便获得最佳网格密度的方法; 在同样的网格密度下, 壳单元可以获得较实体单元更精确的结果, 因而可以使用壳单元对钢板的轧后控冷过程进行高效率的模拟。进一步推广 Prime 提出的残余应力测量方法, 将其应用于钢板残余应力的反演, 实现单次切割反演, 获得单个切割面处的残余应力分布; 提出单向多次切割和正交多次切割方法, 以获得钢板内多个截面处的残余应力分布, 应用数值模拟验证残余应力反演方法的可行性。该工作为工程中获得钢板内三维残余应力场及预测钢板切割变形提供一种可行的方法。

关键词 轧后控冷模拟 残余应力反演 有限元法 切割 叠加原理

中图分类号 O343.6 TH123.4

Abstract The cooling process of the steel plate after hot rolling was simulated using the sub-modeling technique and the shell elements as well as the solid elements in Ansys finite element method software, producing the three dimensional temperature fields. The results show that the sub modeling is a great approach to obtain the best finite element density and that the shell element produces more accurate results than the solid element under the same mesh density, which suggests that the cooling process can be modeled with more efficiency by the shell element. Moreover, the recently proposed method by Prime to measure residual stresses was expanded to the inversion of the residual stresses in steel plate. The residual stresses of a single cut plane were obtained through single slit method, which then was expanded to multi-cuts method including unidirectional and orthogonal slit method so as to get the residual stresses of multi-cuts planes, which was verified by the numerical simulation. This work has made possible getting the three-dimensional residual stresses and predicting the deformation of the steel plate after slitting.

Key words Runout table cooling; Inversion of residual stresses; Finite element method; Slitting; Superposition principle

Corresponding author: CHEN ShaoHua, E-mail: shchen@lnm.imech.ac.cn, Tel: + 86-10-82543960

Manuscript received 20090603, in revised form 20090713.

引言

现代钢厂中, 控轧与控冷技术已经成为具有高强度、高韧性及良好焊接性能优质钢板生产的主导工艺。钢板轧后控冷过程能通过控制和调节冷却路径, 使钢板在冷却时具有不同的热历史, 从而使其具有预定的力学性能^{[1] 150-156}; 因而钢板的轧后控冷是一个十分重要的生产过程。轧后控冷模拟的关键在于热流边界条件的确定, 即冷却水与钢板表面之间对流换热系数的确定。很多学者研究了水柱与钢板表面之间的换热机理, 以确定热流边界条件, 并考虑各种冷却处理参数对热流边界条件的影响, 包括终轧温度、卷曲温度、钢

板温度、运行速度、冷却水温度、集管布置、喷管直径、射流高度、水流量及钢板厚度等等^{[2] 65-68 [3] 11-12 [4] [5] 13-19 [6-8]}。研究发现冷却水与钢板表面作用有如下换热机制, 冲击区的单相强迫对流换热、核沸腾及过渡沸腾, 平流区的薄膜沸腾、辐射, 空冷区的辐射和自然对流, 并确定了冲击区和平流区的长度^{[2] 67 [4] 9-16 [7-10]}。提出确定换热系数的三种方法, 经验公式^{[5] 14-142 [11]}、热动力学理论^{[9] 17-18 [12]}及反演方法^[13]。本文在这些研究的基础上, 建立一个冷却模拟系统, 采用连续冷却方式, 根据已确定的换热系数对钢板的轧后控冷进行模拟。

实际生产中, 不均匀冷却使钢板产生热变形及热残余应力, 另外校直、卷曲等加工过程也会产生残余应

* 20090603 收到初稿, 20090713 收到修改稿。宝钢《BS600、700 钢板应力分析及分切翘曲变形研究》项目资助。

** 李建军, 男, 1984 年 3 月生, 湖南湘潭湘乡人, 汉族。中国科学院力学研究所在读硕士研究生, 研究方向为残余应力分析。

*** 陈少华, 男, 1972 年 5 月生, 江苏人, 汉族。中国科学院力学研究所研究员, 研究方向为微纳米尺度力学、仿生力学、断裂力学等。

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

力,使生产出的钢板在分切后,由于切割面处残余应力的释放而出现翘曲,有时会严重影响用户使用。鉴于钢板残余应力产生及钢板轧后控冷和卷曲模拟的复杂性,难以通过直接模拟获得钢板内的残余应力场,因此本文考虑从分切后钢板的翘曲位移出发,反演钢板内的残余应力场。目前有很多测量残余应力的方法,包括损伤性的方法和非损伤性的方法。非损伤性的方法包括 X 射线衍射方法、中子衍射方法、磁场法等;损伤性的方法包括切割法、除层法、钻孔法、深钻孔法等。这些方法仍存在一些缺点,如分辨率不高、只能测量一维的应力或表面的残余应力、应用程序复杂及工作量很大等等^[14]。针对这些问题,Prime 提出一个新的残余应力测量方法——轮廓法^[15],该方法能测得整个切割面处一个方向的法向残余应力。*Pagliaro* 及 Prime 等拓展了该方法,获得其他方向的法向残余应力^[16]。本文提出正交切割方法和单向多次切割法,并进行数值模拟验证,为获得钢板内的三维残余应力场提供理论方法。

1 轧后控冷模拟

钢板的轧后控冷是一个较为复杂的过程。本文设计一个较为简单的冷却装置,长 10 m,共设计 10 组集管。钢板运行速度是 1 m/s,冷却方式为连续冷却^{[17]~[19]}。

1.1 参数选取

利用有限元方法进行三维分析,模型尺寸为 4 m × 3.5 m × 25 mm。考虑宽度方向的对称性,沿宽度方向取一半进行分析。冷却过程包括水冷和空冷。为提高计算效率,仅计算到钢板尾部移出冷却装置为止,总的冷却时间为 14 s。本文假设钢板上、下表面的热流边界条件相同,分为三个区域,射流冲击区、膜沸腾区及辐射和空气对流区^{[3]~[9]}。根据工程实际和文献确定冷却介质的温度和各区的对流换热系数(射流冲击区^{[18]~[19]}、平流区^{[5]~[14]}^[20]、空冷区^{[5]~[14]}^[21]^[22]^[36]) (见表 1)。由于钢板是运动的,热流边界条件随时间不断变化,因此假设钢板静止,让热流边界条件相对钢板运动,使用 Ansys 中的二维表格式数组参数(table type array parameters)施加动态热流边界条件。材料参数皆取为常值(见表 2)。

1.2 子模型技术和单元选取

子模型技术(sub-modeling)是一种用于局部区域,

表 1 钢板各区换热系数及冷却介质的温度

Tab. 1 The heat transfer coefficients and corresponding temperatures of cooling medium in different regions of steel plate

对流参数 Convection parameters	钢板 侧面 Lateral surface	钢板上、下表面 Upper and low surface					
		射流冲击区 Impinging zone		膜沸腾区 Film boiling zone	辐射和空气对流区 Radiation and air convection zone		
		换热系数 Heat transfer coefficient	W·(m ² ·℃) ⁻¹	250	10 000	250	25
冷却介质温度 Temperature of cooling medium		10	T / ℃	10	10	10	20

以获得更精确结果的有限元技术。本文使用从实体到实体(solid solid)的子模型技术获得最优的网格密度。从粗糙模型中取长 2 m、宽 0.1 m 的子模型,沿厚度方向取一半进行分析。由于钢板的横向和纵向尺寸远大于厚度方向的尺寸,主要考虑厚度方向的网格加密。用四种网格密度,即 submesh0 至 submesh3(见表 3)。考虑到钢板表面附近的温度梯度较大,将粗糙模型(coarse)的单元划分为表面密而中心疏,相应单元尺寸分别为 2.5 mm 和 5 mm,单元个数为 9 个,其网格密度与 submesh0 相当,但中心稍疏。考虑到计算效率,文献中一般将冷却模型简化为一维^[23] 或二维模型^{[1]~[10]}。Cox 等^[22]^{[36]~[36]} 使用 Abaqus 中的壳单元建立三维冷却模型,王宝同等^[24] 使用 Ansys 中的实体单元建立三维冷却模型。本文比较了实体单元和壳单元模拟的结果。对于壳单元,由于沿厚度方向只有一层节点,为便于与实体粗糙模型比较,每个节点设置为 9 个温度自由度,这样两者的总自由度数目相同。

1.3 结果分析

通过冷却模拟获得钢板的三维温度场,得到钢板端部、中部和尾部表面节点的冷却曲线图。由图 1 可知,冷却曲线成锯齿形,与工程实际相符^{[17]~[19]}。波浪线部分是钢板在冷却水的冲击作用下降温的过程,每一个温度的骤降对应一组集管的冷却,共 10 组。由于端部最先进入冷却装置,故而最先有较大幅度的降温,中

表 2 材料参数

Tab. 2 Material constants

弹性模量 E/GPa	泊松比 ν	比热 c/(J·(kg·℃) ⁻¹)	密度 ρ/(kg·m ⁻³)	热传导率 κ/(W·(m·℃) ⁻¹)	热膨胀系数 α/℃ ⁻¹
200	0.3	200	7 850	26	9×10 ⁻⁶

表3 粗糙模型及子模型沿厚度方向的单元尺寸及数目

网格特征 Mesh feature	粗糙 网格 Coarse	子模型 Sub model			
		子网格 0 Submesh 0	子网格 1 Submesh 1	子网格 2 Submesh 2	子网格 3 Submesh 3
单元尺寸 Mesh size mm	2.5 or 5	2.5	1.25	0.625	0.3125
单元数目 Number of elements		9	10	20	40
					80

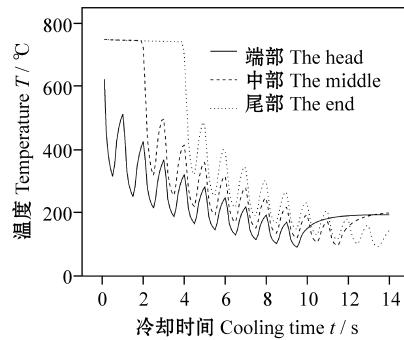


图1 钢板上表面端部、中部、尾部冷却曲线

Fig. 1 The cooling curve at the head, middle and end parts of the upper surface of steel plate

部和尾部相继进入冷却装置, 冷却曲线延后。在冷却 10 s 之后, 端部移出冷却装置, 开始返温, 中部和尾部相继移出冷却装置, 返温相应延后。此外, 由图 1 可以看出, 冷却结束后钢板端部温度高于尾部, 反映连续冷却方式沿钢板长度方向冷却的不均匀性^{[17] + 2}。

壳单元与实体单元模拟的结果十分接近, 但在同样的网格密度下模拟温度场, 壳单元的结果较实体单元要高(约 5 °C)。四个密度的子模型结果如图 2 所示, 可以看出 Submesh 1、Submesh 2 及 Submesh 3 的结果收敛, 且 Submesh 2 与 Submesh 3 的结果几乎一致。切割边界处温度出现温度骤降是因为切割边界的影响。考虑到计算效率及精度, Submesh 1 网格是比较合理的一种选择。图 3 给出子模型与实体单元粗糙模型及壳单元粗糙模型的比较结果, 可以看出壳单元粗糙模型与子模型结果吻合得很好, 因此采用壳单元模拟钢板的轧后控冷过程能够得到更精确的结果。

2 残余应力反演

2.1 叠加原理及反演方法

本文应力反演的理论依据是应力状态叠加原理^[25], 如图 4 所示, A 是切割前内含残余应力的钢板, T^* 为切割面处的残余应力。由于切割过程是一个应

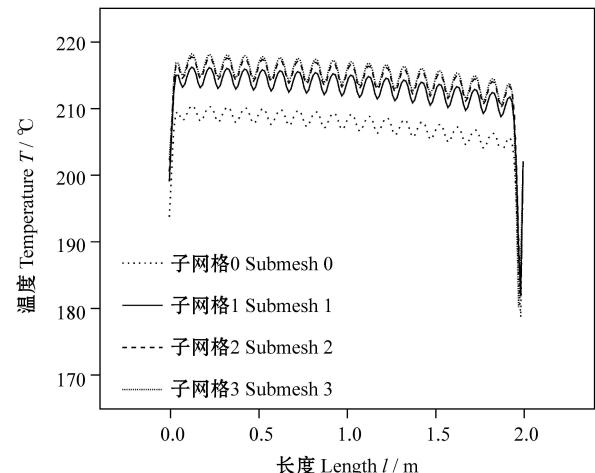


图2 子模型沿上表面路径终冷温度分布曲线

Fig. 2 The temperature distribution curve along the upper surface path of the sub-models after cooling

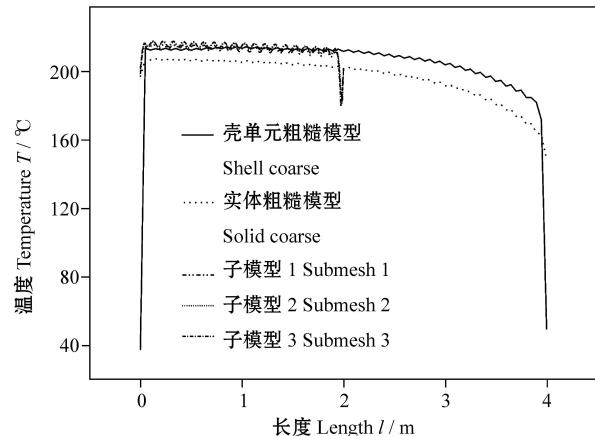


图3 粗糙模型与子模型沿上表面路径终冷温度分布曲线

Fig. 3 The temperature distribution curve along the upper surface path of the sub-models as well as the coarse models after cooling

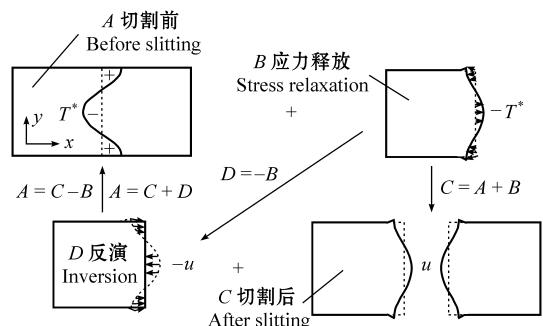


图4 应力状态叠加原理示意图

Fig. 4 The schematic diagram of stress superposition principle

力释放过程, 也是一个卸载过程, 符合卸载定律, 属于一种弹性行为, 因此切割前的应力状态 A 与应力释放产生的应力状态 B 叠加得到切割后的应力状态 C, 即 $C = A + B$ 。反之, 由于该过程是弹性叠加过程, 那么切割后的应力状态 C 与应力释放的反状态 B 叠加, 即得到切割前的应力状态 A, 即 $A = C - B$ 。此外, 根据弹性力学解的唯一性定理^[26], 释放应力 $-T^*$ 和位移 u 对应, 即 u 和 T^* 一一对应, 应力释放产生的应

力状态 B 等效于位移反加所获得的应力状态 D , 因此 $A = C + D$ (式(1))。由于切割后的切割面为自由面, 即零应力状态, 切割面处 $A = D$ (包括正应力和剪切应力, 式(1))。于是通过反加应力释放引起的位移即可以得到切割面切割前的应力。

$$\begin{cases} \sigma^{(A)} = \sigma^{(C)} + \sigma^{(D)} \\ \sigma_x^{(A)} = \sigma_x^{(D)} \\ \tau_{xy}^{(A)} = \tau_{xy}^{(D)} \end{cases} \quad (1)$$

式中, σ 表示板的应力状态, σ_x 、 τ_{xy} 分别表示切割面处的法向应力和切向应力, 上标 A、C、D 分别表示切割前、切割后及反演状态。

2.2 反演方法验证

首先建立有限元模型, 由冷却模拟或加、卸载产生一个残余应力场; 然后模拟切割过程, 获得由应力释放所引起的位移; 最后新建弹性有限元模型, 在切割面处施加反向位移, 获得切割面处的法向应力; 并将其与切割之前切割面处的应力进行比较。本文建立 $20 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ 左端固支悬臂梁模型。弹性模量 $E = 200 \text{ GPa}$, 屈服极限 $\sigma_s = 100 \text{ MPa}$, 采用双线性强化模型。首先在梁的上端施加均布载荷, 然后卸载, 产生一个残余应力场。利用 Ansys 中的单元生死功能模拟切割过程, 取含悬臂端的一半进行分析。由残余应力释放引起的位移等于切割后切割面处的位移减去卸载前切割面处的位移(包括法向位移和切向位移)。将这两个位移同时施加在新建立的 $10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ 的弹性悬臂梁模型上。最后将反演求得的应力与切割前切割线处的应力比较。反演得到的切割线处的法向应力和剪切应力与切割前的应力十分吻合, 验证反演方法的可行性。

2.3 一次切割

本文进一步采用反演方法分析钢板的一次切割过程。由于钢板冷却时厚度方向温度梯度较大, 需要划分很细的网格。本文建立较小尺寸的钢板模型 $40 \text{ mm} \times 40 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$ 。考虑宽度方向的对称性, 宽度方向仅取一半进行分析(如图 5)。弹性模量 $E = 200 \text{ GPa}$, 屈服极限 $\sigma_s = 100 \text{ MPa}$, 采用双线性强化模型。首先利用冷却模拟产生一个热残余应力场, 钢板初始温度为 750°C , 上、下表面换热冷却, 冷却时间 1 s 。由于冷却模拟不产生剪切应力, 因此仅需考虑法向应力的反演。以 $x = 10 \text{ mm}$ 为一次切割面(图 5)。将切割后应力释放产生的法向位移反加在新建立的弹性模型上(如图 6), 该弹性模型的弹性模量与原模型相同。反加位移求解时约束切割面的两个角节点, 防止刚体位移, 从而获得切割面处的法向应力, 并与切割前切割面处的法向应力比较, 得到切割

面处路径(如图 5 中虚线)的法向应力比较图(如图 7), 两者结果较为吻合。图 6 是位移反加变形图, 从变形图可以看出钢板是表面受拉、中心受压。

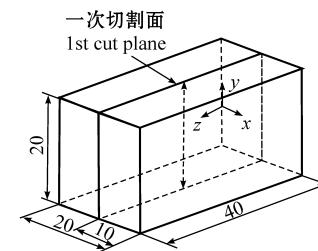


图 5 一次切割几何模型: $40 \text{ mm} \times 10 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$

Fig. 5 The geometrical model of single cut:
 $40 \text{ mm} \times 10 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$

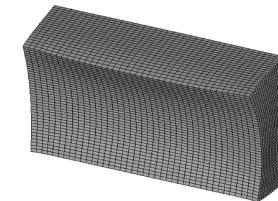


图 6 一次切割反加位移变形图

Fig. 6 The inversion deformation of single cut

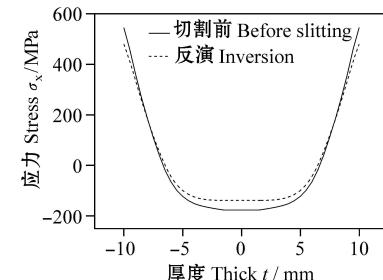


图 7 一次切割面路径法向应力

Fig. 7 The normal stress along the path of the first cut plane

2.4 多次切割

要获得钢板内的三维残余应力场, 可以通过多次切割获得多个切割面处的残余应力, 然后通过适当的拟合方式获得三维残余应力场。将上述反演方法推广到多次切割, 获得两种切割方式, 单向多次切割和正交多次切割。

2.4.1 单向多次切割

所谓单向切割是指沿一个方向切割, 得到一个方向的法向应力, 如图 8 所示, 在一次切割的基础上进行

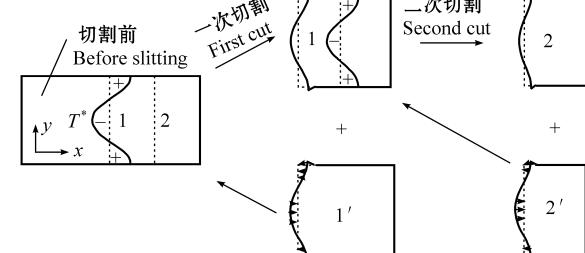


图 8 单向切割示意图

Fig. 8 The schematic diagram of unidirectional cut
© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

二次切割。利用图4的叠加原理, 通过多次叠加可以获得切割前各个切割面处的法向应力。式(2)给出一次、二次及 n 次切割时 x 方向法向应力叠加公式, 剪切应力有同样形式的表达式, 由该公式可知第 n 个切割面处的应力可以通过叠加 n 次应力反演得到应力状态来求得。理论上而言, 可以通过无限次的切割, 获得钢板任何截面的残余应力。

$$\left\{ \begin{array}{ll} \sigma_x^1 = \sigma_x^{i_1} & \text{切割面 1} \\ \sigma_x^2 = \sigma_x^{i_2} + \sigma_x^{j_2} & \text{切割面 2} \\ \sigma_x^n = \sum_{i=1}^n \sigma_x^{i_n} & \text{切割面 } n \end{array} \right. \quad (2)$$

式中, 上标 n 表示第 n 个切割面, i' 表示第 i 次位移反加。 σ_x^n 表示第 n 个切割面处的法向应力, 而 $\sigma_x^{i_n}$ 表示第 i 次应力反演所获得的第 n 个切割面处的法向应力。

通过反演得到单向二次切割面路径(如图9虚线)的法向应力比较图, 如图10所示, 可以看出应力反演的结果与切割前的应力十分吻合, 从而验证了反演方法可以用于单向二次切割。依此推广, 单向多次切割同样可以实现。

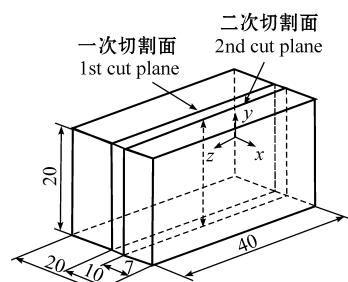


图9 单向二次切割几何模型: 40 mm × 7 mm × 20 mm

Fig. 9 The geometrical model of the unidirectional second cut:
40 mm × 7 mm × 20 mm

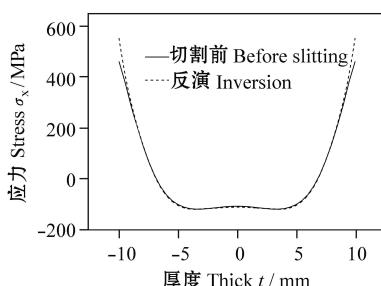


图10 单向二次切割面路径法向应力

Fig. 10 The normal stress along the path of the unidirectional second cut plane

2.4.2 正交多次切割

通过正交切割方法反演钢板的残余应力, 可以同时得到两个方向的法向应力, 如图11所示, 前后两次切割的切割面是垂直的。利用图4的叠加原理, 得到正交多次切割应力反演式(3), 由该式可知奇数次切割获得 x 方向的法向应力, 偶数次切割获得 y 方向的法向

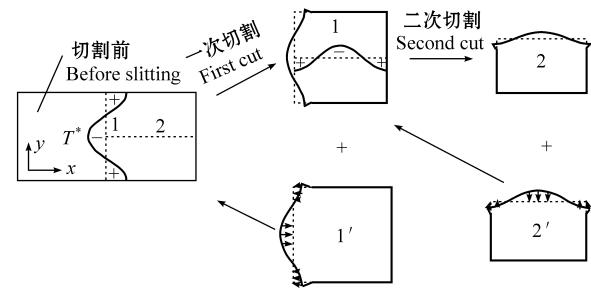


图11 正交切割示意图

Fig. 11 The schematic diagram of orthogonal cut

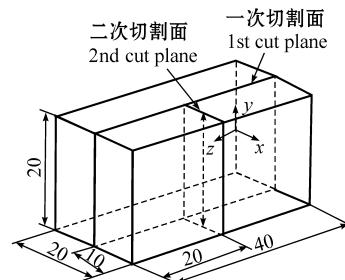


图12 正交二次切割几何模型: 20 mm × 10 mm × 20 mm

Fig. 12 The geometrical model of orthogonal second cut:
20 mm × 10 mm × 20 mm

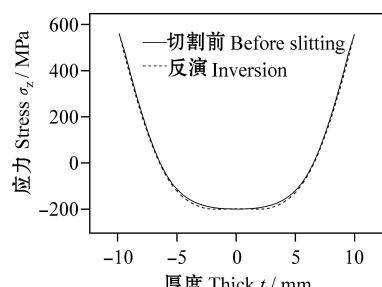


图13 正交二次切割面路径法向应力

Fig. 13 The normal stress along the path of the orthogonal second cut plane

应力。在一次切割的基础上, 沿 $z=20$ mm进行正交切割(如图12), 利用上述正交切割原理反求残余应力, 得到切割面路径(如图12虚线)的法向应力分布(如图13), 反演的结果与切割前的应力非常一致, 从而验证了正交切割方法的正确性。

$$\sigma^x = \sum_{i=1}^n \sigma_x^{i_n} = \begin{cases} \sigma_x^n & n = 2k - 1 \\ \sigma_y^n & n = 2k \end{cases} \quad k \geq 1 \quad (3)$$

式中, 上标 n 表示第 n 个切割面, i' 表示第 i 次位移反加。 σ^n 表示第 n 个切割面处的法向应力, 而 $\sigma_x^{i_n}$ 表示第 i 次应力反演所获得的第 n 个切割面处的法向应力, 下标 x 和 y 分别表示沿 x 方向和 y 方向的法向应力。

3 结论

本文首先模拟钢板的轧后控冷过程, 得到与工程实际相符的锯齿形冷却曲线, 并验证连续冷却方式沿钢板长度方向的冷却不均匀性。采用子模型技术及壳

单元研究钢板的轧后控冷模拟,发现子模型是一种能检测有限元网格密度是否合适,并能得到最优网格密度的有限元技术,而壳单元比实体单元更适合模拟钢板的轧后控冷过程。

基于叠加原理,从分切后钢板的翘曲位移出发,推广 Prime 的轮廓法,将其应用于钢板的残余应力反演。首先阐述应力反演的理论依据——应力状态叠加原理,提出相应的残余应力反演方法,采用悬臂梁模型验证该反演方法。然后实现单次切割反演,获得单个切割面切割前的法向应力。最后将该方法用于多次切割,提出单向切割法及正交切割法,采用单向切割法得到一个方向、多个切割面的法向应力及剪切应力,而正交切割法可以同时得到两个方向、多个切割面的法向应力及剪切应力。该工作可为求得钢板内的三维残余应力场提供理论方法。

参考文献(References)

- [1] Liu Z D. Experiments and mathematical modeling of controlled runout table cooling in a hot rolling mill[D]. Canada: University of British Columbia, 2001: 1-317.
- [2] Ochi T, Nakanishi S, Kaji M, et al. Cooling of a hot plate with an impinging circular water jet[C]// Multi-Phase Flow and Heat Transfer 3, Proceedings of the 3rd Symposium-Workshop. Part B: Applications. Amsterdam, Neth: Elsevier Science Publ Co (Process Technology Proceedings, 1), 1984: 671-681.
- [3] Wolf D, Incropera F, Viskanta R. Jet impingement boiling[J]. Advances in Heat Transfer, Academic Press, Inc., Boston, 1993, 23: 1-132.
- [4] Zumbrunnen D A. Convective heat and mass transfer in the stagnation region of a laminar planar jet impinging on a moving surface[J]. Journal of Heat Transfer, Transactions ASME, 1991, 113(3): 563-570.
- [5] Jacobi H, Kaestle G, Wunnem K. Heat-transfer in cyclic secondary cooling during solidification of steel [J]. Ironmaking & Steelmaking, 1984, 11(3): 132-145.
- [6] Kokado J i, Hatta N, Takuda H, et al. Analysis of film boiling phenomena of subcooled water spreading radially on a hot steel plate[J]. Archiv fuer das Eisenhuettenwesen, 1984, 55(3): 113-118.
- [7] Hatta N, Kokado J i, Harada J, et al. Predictable modelling for cooling process of a hot steel plate by a laminar water bar[J]. Arch. Eisenhuettenwes, 1984, 55(4): 143-148.
- [8] Ishigai S, Nakanishi S, Ochi. Boiling heat transfer for a plane water jet impingement on a hot surface[C]// Proc. 6th Int. Heat Transfer Conference. Washington D C: Hemisphere Publishing Company, 1978: 445-450.
- [9] Filipovic J, Viskanta R, Incropera F P, et al. Thermal behavior of a moving steel strip cooled by an array of planar water jets[J]. American Society of Mechanical Engineers, Heat Transfer Division, (Publication) HTD, 1991, 162: 13-23.
- [10] Kastner W, Ripple R. Jet impingement forces on structures- Experiments and empirical calculation methods[J]. Nuclear Engineering and Design, 1988, 105(3): 269-284.
- [11] Guo R-M. Heat transfer of laminar flow cooling during strip acceleration on hot strip mill runout tables[J]. Iron & Steelmaker (ISM), 1993, 20(8): 49-59.
- [12] Zumbrunnen D A, Viskanta R, Incropera F P. Effect of surface motion on forced convection film boiling heat transfer[J]. Journal of Heat Transfer, Transactions ASME, 1987, 111(3): 760-766.
- [13] Gadala M S, Xu F C. An FE-based sequential inverse algorithm for heat flux calculation during impingement water cooling[J]. International Journal of Numerical Methods for Heat & Fluid Flow, 2006, 16(2-3): 356-385.
- [14] Withers P J, Turski M, Edwards L, et al. Recent advances in residual stress measurement[J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 2008, 85(3): 118-127.
- [15] Prime M B. Cross sectional mapping of residual stresses by measuring the surface contour after a cut[J]. Journal of Engineering Materials and Technology-Transactions of the Asme, 2001, 123(2): 162-168.
- [16] Pagliaro P, Prime M B, Zuccarello B. Multiple stress components from multiple cuts for the contour method[C]// Proceedings of the XXXV AIAS Conference. Ancona, Italy: Associazione Italiana per l'Analisi delle Sollecitazioni, 2006: 1-17.
- [17] 钱振声. 控制冷却过程中影响钢板均匀冷却的因素及其控制[J]. 宽厚板, 2000, 6(1): 1-6.
QIAN ZhenSheng. The control of factors affecting homogeneous cooling plate during controlled cooling[J]. Wide and Heavy Plate, 2000, 6(1): 1-6 (In Chinese).
- [18] Otomo A, Yasunaga S, Ishida R. Cooling characteristics of steel sheet by water film in hot strip mill[J]. Tetsu to Hagane-Journal of the Iron and Steel Institute of Japan, 1987, 73(8): 996-1003.
- [19] Ozisik M. Heat transfer: a basic approach[M]. New York: McGraw-Hill Companies, 1985: 315.
- [20] Hatta N, Tanaka Y, Takuda H, et al. A numerical study on cooling process of hot steel plates by a water curtain[J]. Isij International, 1989, 29(8): 673-679.
- [21] Chappidi P R, Gunnerson F S. Analysis of heat and momentum transport along a moving surface[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1989, 32(7): 1383-1386.
- [22] Cox S D, Hardy S J, Parker D J. Influence of runout table operation set-up on hot strip quality, subject to initial strip condition: heat transfer issues[J]. Ironmaking & Steelmaking, 2001, 28(5): 363-372.
- [23] Prieto M M, Ruiz L S, Menendez J A. Thermal performance of numerical model of hot strip mill runout table[J]. Ironmaking and Steelmaking, 2001, 26(6): 474-480.
- [24] 王宝同, 王邦文, 贾爱红, 等. 中厚板控冷过程三维温度场的数值模拟[J]. 冶金设备, 2005, 6: 10-13.
WANG BaoTong, WANG BangWen, JIA AiHong, et al. Numerical simulated to the three-dimension temperature field of medium steel plate during control cooling with water[J]. Metallurgical Equipment, 2005, 6: 10-13 (In Chinese).
- [25] Bueckner H F. The propagation of cracks and the energy of elastic deformation[J]. ASME, Transactions, 1958, 80(6): 1225-1230.
- [26] Timoshenko S P, Goodier J N. Theory of elasticity[M]. 3rd ed. New York: McGraw-Hill, 1970: 269-271.