

一种新型双金属复合板弯曲矫直模型

李乐毅¹, 郑义征^{1,*}, 王效岗²

(1. 四川建筑职业技术学院 机械工程系, 德阳 618000;

2. 太原科技大学 冶金设备设计理论与技术省部级重点实验室培育基地, 太原 030024)

摘 要: 因为传统的连续弯曲辊式矫直理论建立在单一金属反复连续弯曲变形的基础上, 所以将该理论应用于双金属复合板连续弯曲矫直时, 精度不高且无法保证双金属复合板的矫后平直度。为完善板材矫直力论, 分析了双金属复合板矫直弯曲变形时的特点, 提出了分层算法, 并将模型计算数据与矫直实验数据进行了对比。结果表明: 提出的方法可以在不同金属变形层上采用不同的计算方法和材料模型, 比较适应于求解双金属复合板的辊式矫直问题; 模型计算矫直力误差不大于 5.73%。所得结论表明基于分层算法的数学模型在计算双金属复合板时具有良好的效果。

关键词: 双金属复合板; 矫直模型; 中性层; 分层算法; 数学模型; 实验

中图分类号: TB331.0 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3851(2016)11-2551-09

双金属复合板是综合考虑板材性能和经济效益的一种新型板材。这种新型板材通常采用物理和化学复合方法将 2 种材质不同的板材结合在一起, 从而生产出综合 2 种材质板材性能的新型复合板^[1-3]。该复合板同时具备 2 种板材的性能, 既在很大程度上减少了稀有金属的投入, 又能赋予传统单金属板材所不具备的性能。所以, 双金属复合板是一种高性价比的板材, 具有很好的市场前景。

在双金属复合板的生产过程中, 矫直质量的高低直接决定板材性能的优劣。但目前针对双金属复合板连续弯曲辊式矫直的研究较少, 急需创建一种新型高效的双金属复合板连续弯曲辊式矫直模型。

1 双金属复合板弯曲矫直的原理

1.1 弯曲矫直特点

在传统连续弯曲辊式矫直理论中, 通常假设板材为单一材质, 把板材的矫直弯曲视为简单弯曲, 同时将板材弯曲变形的实质中性层与板材的几何中心层视为重合, 且板材弯曲截面上每一个点的相对移动距离与其中性层垂面的距离成正比^[4-6]。

但在双金属复合板连续弯曲辊式矫直变形过程

中, 由于板材的材质不一样, 板材弯曲变形的实质中性层会相对于其几何中心层发生偏移^[7-9], 但无论什么时候, 在板材厚度方向变形中性层满足

$$\sigma dh = 0 \quad (1)$$

$$\int \sigma h B dh = M \quad (2)$$

式中: σ 为弯曲应力; h 为板材的厚度; B 为板材的宽度; M 为板材的内弯矩。

双金属复合材料弯曲变形和弯曲单元的分层如图 1 所示。板材的内弯矩会使板材发生弯曲变形时中性层与几何中心层产生一定的偏移量, 如图 1(a) 所示。这个偏移量几乎会使整个矫直力参数理论演算的基础发生变化^[10-12]。同时, 当板材弹塑性弯曲变形程度发生变化时, 其中性层位置也会随时发生动态改变^[13-14]。

1.2 不同双金属板的弯曲模型

如果双金属板的复合状态不同, 对其进行弯曲变形时, 内部的应力-应变情况也会有所不同^[15-16], 需要根据不同的情况对中性层位置进行逐一讨论。复合板在模型中的应力-应变规律如图 2 所示, 复合板弯曲时中性层的偏移如图 3 所示。

收稿日期: 2015-10-23; 录用日期: 2016-01-22; 网络出版时间: 2016-03-04 11:10

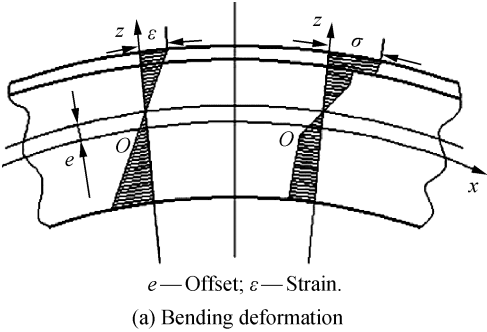
网络出版地址: www.cnki.net/kcms/detail/11.1801.TB.20160304.1110.002.html

基金项目: 山西省回国留学人员科研资助项目(2013-099)

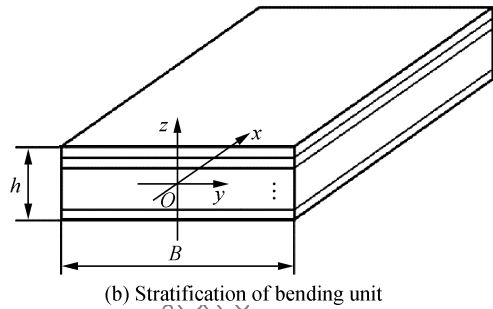
通讯作者: 郑义征, 博士, 副教授, 研究方向为新型材料组织与性能。 E-mail: yzjia@alum.imr.ac.cn

引用格式: 李乐毅, 郑义征, 王效岗. 一种新型双金属复合板弯曲矫直模型[J]. 复合材料学报, 2016, 33(11): 2551-2559.

LIL Y, JIA Y Z, WANG X G. A new type of bending straightening model for double metal composite plate[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2016, 33(11): 2551-2559 (in Chinese).



(a) Bending deformation



(b) Stratification of bending unit

图 1 双金属复合材料弯曲变形和弯曲单元的分层

Fig. 1 Bending deformation and stratification of bending unit for double metal composite

对复合板力学参数进行规定:如果普通板材分布在特殊板材的上方,则 $\sigma_{i_2} > \sigma_{i_1}$, $\sigma_{b_2} > \sigma_{b_1}$;其弯曲单元遵循式(1)的规律。图 4 为复合板中性层上部分只含普通板材的示意图。

情况 1:图 4(a)为普通板材仅位于弹性应力区的示意图。可见,应力线和应变线的交点正好位于中性层处,上方只有 1 种材质的板材,而下方含有 2 种材质的板材;上方的应力曲线为连续的,而下方的应力曲线是不连续的;下方的普通板材只存在弹性应力区,而特殊板材既存在弹性应力区又存在塑性应力区,上下应力区的区域面积之差为 0。根据材料力学的基本理论,可得

$$\int_0^h \sigma dh = \int_0^{\frac{h}{2}} \sigma_{\text{down}} dh + \int_{\frac{h}{2}}^h \sigma_{\text{up}} dh = 0 \quad (3)$$

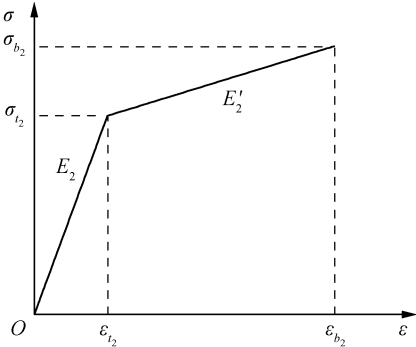
因为中性层发生了偏移,所以

$$\int_0^{\frac{h}{2}-e} \sigma_{\text{down}} dh + \int_{\frac{h}{2}+e}^h \sigma_{\text{up}} dh = 0 \quad (4)$$

$$\sigma_{\text{down}} = -E_2 \epsilon_{i_2} + \int_{-\epsilon_h}^{-\epsilon_{i_2}} E'_2 d\epsilon + \int_{-\epsilon_{i_2}}^{-\epsilon_y} E_2 d\epsilon + \int_{-\epsilon_y}^0 E_1 d\epsilon \quad (5)$$

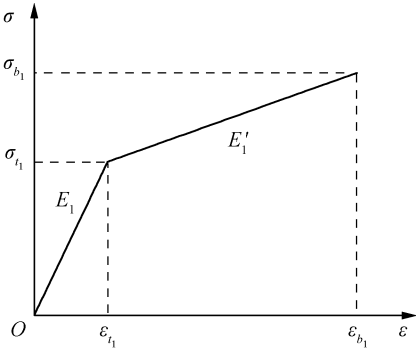
式中: ϵ_h 为板材外表面厚度方向上的最大应变; ϵ_y 为双金属板结合面宽度方向上的应变。

$$\sigma_{\text{up}} = \int_0^{\epsilon_{i_1}} E_1 d\epsilon + E_1 \epsilon_{i_1} + \int_{\epsilon_{i_1}}^{\epsilon_h} E'_1 d\epsilon \quad (6)$$



σ_{i_2} —Yield stress of special plate; σ_{b_2} —Ultimate stress of special plate;
 ϵ_{i_2} —Yield strain of special plate; ϵ_{b_2} —Ultimate strain of special plate;
 E_2 —Elastic modulus of special plate;
 E'_2 —Strengthening modulus of special plate.

(a) Special plate



σ_{i_1} —Yield stress of special plate; σ_{b_1} —Ultimate stress of special plate;
 ϵ_{i_1} —Yield strain of special plate; ϵ_{b_1} —Ultimate strain of special plate;
 E_1 —Elastic modulus of special plate;
 E'_1 —Strengthening modulus of special plate.

(b) Ordinary plate

图 2 复合板在模型中的应力-应变规律

Fig. 2 Stress-strain laws of composite plates in model

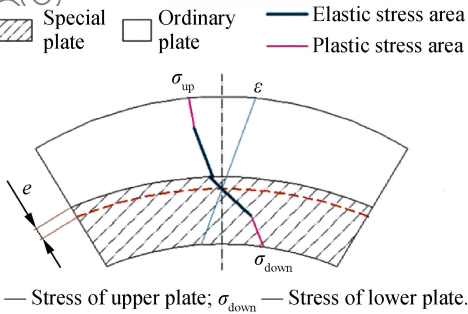


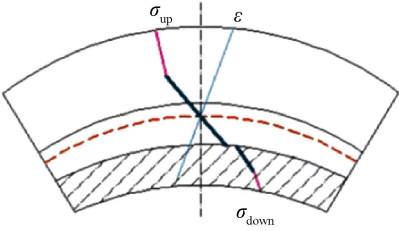
图 3 复合板弯曲时中性层的偏移

Fig. 3 Neutral layer offset of composite plate when bending

将式(5)和式(6)代入式(4)中,可得

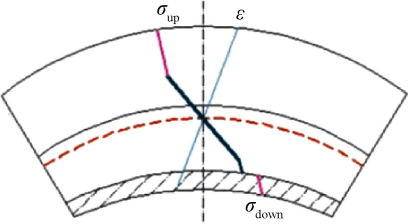
$$\int_0^{\frac{h}{2}-e} \left(\int_{-\epsilon_h}^{-\epsilon_{i_2}} E'_2 d\epsilon - E_2 \epsilon_{i_2} + \right.$$

Special plate Ordinary plate Elastic stress area Plastic stress area



(a) Ordinary plate is only in elastic stress area

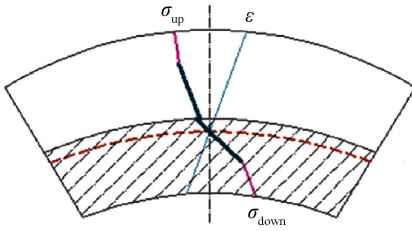
Special plate Ordinary plate Elastic stress area Plastic stress area



(b) Special plate is only in plastic stress area

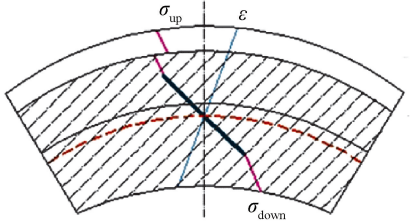
图4 复合板中性层上部分只含普通板材的示意图
Fig.4 Schematic for upper part of composite plate neutral layer containing ordinary plate only

Special plate Ordinary plate Elastic stress area Plastic stress area



(a) Special plate is only in elastic stress area

Special plate Ordinary plate Elastic stress area Plastic stress area



(b) Ordinary plate is only in plastic stress area

图5 复合板中性层上部分含普通和特殊板材的示意图
Fig.5 Schematic for upper part of composite plate neutral layer containing ordinary and special plates

$$\int_{-\epsilon_{t_2}}^{-\epsilon_y} E_2 d\epsilon + \int_{-\epsilon_y}^0 E_1 d\epsilon \Big) dh + \int_{\frac{h}{2}+e}^h \left(\int_0^{\epsilon_{t_1}} E_1 d\epsilon + E_1 \epsilon_{t_1} + \int_{\epsilon_{t_1}}^{\epsilon_h} E'_1 d\epsilon \right) dh = 0 \quad (7)$$

情况 2: 图 4(b) 为特殊板材仅位于塑性应力区的示意图。可见，应力线和应变线的交点正好位于中性层处，上方只有 1 种材质的板材，而下方含有 2 种材质的板材；上方的应力曲线是连续的，而下方的应力曲线是不连续的；下方的特殊板材只存在塑性应力区，而普通板材既存在弹性应力区又存在塑性应力区，上下应力区的区域面积之差为 0。根据材料力学的基本理论，可得

$$\int_0^{\frac{h}{2}-e} \left(\int_{-\epsilon_h}^{-\epsilon_y} E'_2 d\epsilon - E_2 \epsilon_{t_2} + \int_{-\epsilon_{t_1}}^{-\epsilon_y} E'_1 d\epsilon + E_1 \epsilon_{t_1} + \int_{-\epsilon_{t_1}}^0 E_1 d\epsilon \right) dh + \int_{\frac{h}{2}+e}^h \left(\int_0^{\epsilon_{t_1}} E_1 d\epsilon + E_1 \epsilon_{t_1} + \int_{\epsilon_{t_1}}^{\epsilon_h} E'_1 d\epsilon \right) dh = 0 \quad (8)$$

图 5 为复合板中性层上部分含普通和特殊板材的示意图。

情况 3: 图 5(a) 为特殊板材仅位于弹性应力区

的示意图。可见，应力线和应变线的交点正好位于中性层处，上方含有 2 种材质的板材，而下方只含有 1 种材质的板材；上方的应力曲线为不连续的，而下方的应力曲线是连续的；上方的特殊板材只存在弹性应力区，而普通板材既存在弹性应力区又存在塑性应力区，上下应力区的区域面积之差为 0。根据材料力学的基本理论，可得

$$\int_0^{\frac{h}{2}-e} \left(\int_{-\epsilon_{t_2}}^{-\epsilon_h} E'_2 d\epsilon - E_2 \epsilon_{t_2} + \int_{-\epsilon_{t_2}}^0 E_2 d\epsilon \right) dh + \int_{\frac{h}{2}+e}^h \left(\int_0^{\epsilon_y} E_2 d\epsilon + \int_{\epsilon_y}^{\epsilon_{t_1}} E_1 d\epsilon + E_1 \epsilon_{t_1} + \int_{\epsilon_{t_1}}^{\epsilon_h} E'_1 d\epsilon \right) dh = 0 \quad (9)$$

情况 4: 如图 5(b) 为普通板材仅位于塑性应力区的示意图。可见，应力线和应变线的交点正好位于中性层处，上方含有 2 种材质的板材，而下方只含有 1 种材质的板材；上方的应力曲线为不连续的，而下方的应力曲线是连续的；上方的特殊板材既存在弹性应力区又存在塑性应力区，而普通板材只存在塑性应力区，上下应力区的区域面积之差为 0。根据材料力学的基本理论，可得

$$\int_0^{\frac{h}{2}-e} \left(\int_{-\epsilon_h}^{-\epsilon_{t_2}} E'_2 d\epsilon - E_2 \epsilon_{t_2} + \int_{-\epsilon_{t_2}}^0 E_2 d\epsilon \right) dh +$$
$$\int_{\frac{h}{2}+e}^h \left(\int_0^{\epsilon_{t_2}} E_2 d\epsilon + \int_{\epsilon_{t_2}}^{\epsilon_y} E'_2 d\epsilon + E_2 \epsilon_{t_2} + \right.$$
$$\left. E_1 \epsilon_{t_1} + \int_{\epsilon_y}^{\epsilon_h} E'_1 d\epsilon \right) dh = 0 \tag{10}$$

由于 4 种情况的解析计算均非常复杂，所以改用分层迭代法进行求解，其计算流程如图 6 所示。首先，调整辊式矫直机辊系入/出口处的辊缝，按照矫直机的相关参数计算每个矫直弯曲单元的反弯曲曲率；同时，将材料的原始曲率视为 0；然后，通过编程计算出每个矫直弯曲单元内力矩的大小，在这个过程中需先对双金属板进行分层，并且对所划分的每层进行相应的应力和应变计算，再按照在整个截面上应力之和为 0 这一准则迭代计算出偏移量，从而确定中性层的具体位置；接着，将上次计算结果视作下一个矫直弯曲单元的初始值。通过这一方法，可以计算出所有矫直弯曲单元，最后将得出的数据输出。

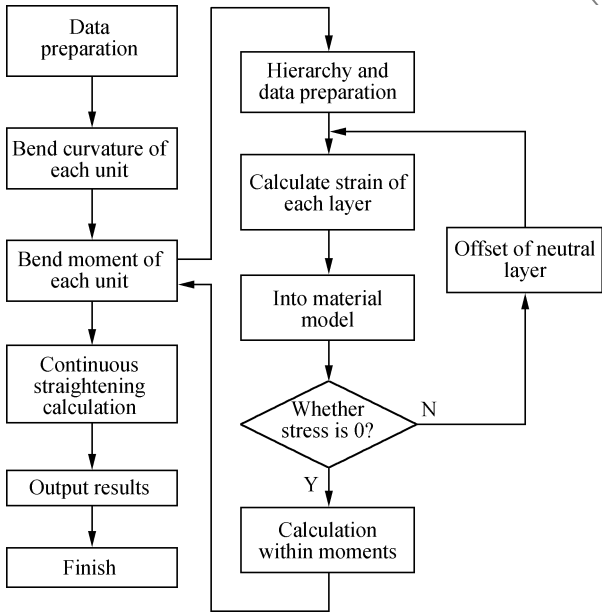


图 6 分层算法矫直模型的计算流程
Fig. 6 Calculation process for hierarchical algorithm straightening model

2 双金属复合板弯曲矫直模型的建立

2.1 模型初始条件

通过数据查询可得双金属板的 σ_{t_1} 、 σ_{t_2} 、 σ_{b_1} 、

σ_{b_2} 、 ϵ_{b_1} 和 ϵ_{b_2} ，进而计算出 $E'_1 = \frac{\sigma_{b_1} - \sigma_{t_1}}{\epsilon_{b_1} - \sigma_{t_1}/E}$ ， $E'_2 = \frac{\sigma_{b_2} - \sigma_{t_2}}{\epsilon_{b_2} - \sigma_{t_2}/E}$ 。可测得双金属板的弯曲曲率为 A_0 ，根据相关理论计算出 $\epsilon_h = \frac{h}{2}A_0$ 。复合板弯曲分层计算时应变线的偏移如图 7 所示。已知板厚、板长和板宽，将双金属复合板划分为 n 层，双金属中的普通板材与特殊板材厚度之比为 X ， $\tan \theta = \frac{\epsilon_h}{h/2}$ ，假设双金属板相互结合的面为平面，且在计算过程中板材中性层每向下偏移 1 层，与之相对应的横移 $x_0 = \frac{h}{n} \tan \theta$ ，则

$$\epsilon_y = \epsilon_h h \left| \frac{\frac{X}{X+1} - \frac{1}{2}}{h/2} \right| = \epsilon_h \left| \frac{X-1}{X+1} \right| \tag{11}$$

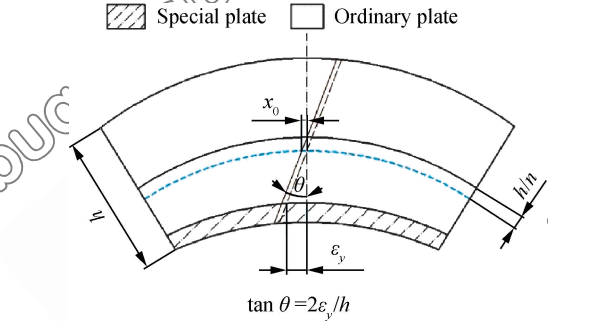


图 7 复合板弯曲分层计算时应变线的偏移
Fig. 7 Strain line offset in composite plate bending delamination calculation

2.2 核心数学模型

将双金属板沿板厚方向分为 n 层，假设每层厚度为 h/n ，根据 2.1 节中的初始条件，设普通板材为材料 1，特殊板材为材料 2。如果根据式 (7)、式 (8)、式 (9) 和式 (10) 直接计算中性层的偏移量，则计算难度太大。因此采用迭代编程的方法进行计算，从而大幅降低计算难度、节约计算时间。迭代编程的主要思路如下。

当中性层上方只含有材料 1 时如图 4(a) 和图 4(b) 所示，可得

$$\sigma_{n'} = \begin{cases} \epsilon_{n'} E'_1 + \epsilon_{t_1} E & \epsilon_{n'} > \epsilon_{t_1} \\ \epsilon_{n'} E & \epsilon_{n'} \leq \epsilon_{t_1}, \epsilon_{n'} > 0 \end{cases} \tag{12}$$

式中： $\sigma_{n'}$ 为第 n' 层的应力， $n'=1, 2, \dots, x'$ ， $x' < n$ ； $\epsilon_{n'}$ 为第 n' 层的应变， $n'=1, 2, \dots, x'$ ， $x' < n$ ； E 为平均弹性模量。

当中性层上方同时含有材料 1 和 2 时如图 5(a)和图 5(b)所示, 可得

$$\sigma_{n'} = \begin{cases} \epsilon_n' E_1' + \epsilon_{t_1} E & \epsilon_n' > \epsilon_{t_1}, \epsilon_n' > \epsilon_y \\ \epsilon_n' E & \epsilon_n' \leq \epsilon_{t_1}, \epsilon_n' > \epsilon_y \text{ or } \\ & \epsilon_n' \leq \epsilon_{t_2}, \epsilon_n' \leq \epsilon_y, \epsilon_n' > 0 \\ \epsilon_n' E_2' + \epsilon_{t_2} E & \epsilon_n' > \epsilon_{t_2}, \epsilon_n' \leq \epsilon_y \end{cases} \quad (13)$$

当中性层下方同时含有材料 1 和 2 时如图 4(a)和图 4(b)所示, 可得

$$\sigma_{n'} = \begin{cases} \epsilon_n' E_2' + \epsilon_{t_2} E & \epsilon_n' > \epsilon_{t_2}, \epsilon_n' > \epsilon_y \\ \epsilon_n' E & \epsilon_n' < \epsilon_{t_2}, \epsilon_n' > \epsilon_y \text{ or } \\ & \epsilon_n' \leq \epsilon_{t_1}, \epsilon_n' < \epsilon_y, \epsilon_n' > 0 \\ \epsilon_n' E_1' + \epsilon_{t_1} E & \epsilon_n' > \epsilon_{t_1}, \epsilon_n' \leq \epsilon_y \end{cases} \quad (14)$$

当中性层下方的部分只包含材料 2 时如图 5(a)和图 5(b)所示, 可得

$$\sigma_{n'} = \begin{cases} \epsilon_n' E_2' + \epsilon_{t_1} E & \epsilon_n' > \epsilon_{t_1} \\ \epsilon_n' E & \epsilon_n' \leq \epsilon_{t_1}, \epsilon_n' > 0 \end{cases} \quad (15)$$

当 $i=1$ 时, 假设实际中性层与几何中心层重合, 计算方向为由表层至中性层。

中性层上方的计算过程为: $\epsilon_1 = \epsilon_h$, 由 ϵ_1 通过式(12)和式(13)求得 σ_1 , $\sum_{j=1}^1 \sigma_j = \sigma_1$, 其中 $\sum_1$ 表示对中性层上方的各层进行加和运算, 此时 $\epsilon_1 > 0$, 计算下一层; $\epsilon_2 = \epsilon_1 - x$, 其中 x 为板材中性层每向下偏移 1 层导致的横移造成的应变, 由 ϵ_2 通过式(12)和式(13)求得 σ_2 , $\sum_{j=1}^2 \sigma_j = \sigma_1 + \sigma_2$, 此时 $\epsilon_2 > 0$, 计算下一层; $\dots$; $\epsilon_k = \epsilon_1 - (k-1)x$, 由 ϵ_k 通过式(12)和式(13)求得 σ_k , $\sum_{j=1}^k \sigma_j = \sigma_1 + \sigma_2 + \dots + \sigma_k$, 此时 $\epsilon_k = \epsilon_1 - (k-1)x \leq 0$, 结束运算。

同理, 中性层下方的计算过程为: $\epsilon_1 = \epsilon_h$, 由 ϵ_1 通过式(14)和式(15)求得 σ_1 , $\sum_{j=1}^1 \sigma_j = \sigma_1$, 其中 $\sum_2$ 表示对中性层下方的各层进行加和运算, 此时 $\epsilon_1 > 0$, 计算下一层; $\epsilon_2 = \epsilon_1 - x$, 由 ϵ_2 通过式(14)和式(15)求得 σ_2 , $\sum_{j=1}^2 \sigma_j = \sigma_1 + \sigma_2$, 此时 $\epsilon_2 > 0$, 计算下一层; $\dots$; $\epsilon_k = \epsilon_1 - (k-1)x$, 由 ϵ_k 通过式(14)和式(15)求得 σ_k , $\sum_{j=1}^k \sigma_j = \sigma_1 + \sigma_2 + \dots + \sigma_k$, 此时

$\epsilon_k = \epsilon_1 - (k-1)x \leq 0$, 结束运算。

接着, 比较上下 2 部分的总应力, 并把 ϵ_h 和 ϵ_y 代入 $i=2$ 的循环过程中。此时 $\sum_{j=1}^k \sigma_j - \sum_{j=1}^k \sigma_j > 0$, $i=i+1$, 即中性层向下偏移 1 层, 距离为 h/n 。当 $i=2$ 时, 中性层向下偏移 1 层, 偏移值为 h/n , 参照 $i=1$ 时的情况计算 $\sum_{j=1}^k \sigma_j$ 和 $\sum_{j=1}^k \sigma_j$, 比较上下 2 部分的总应力, 并把 ϵ_h 和 ϵ_y 代入 $i=3$ 的循环中。此时 $\sum_{j=1}^k \sigma_j - \sum_{j=1}^k \sigma_j > 0$, $i=i+1$, 中性层向下偏移 1 层, 距离为 h/n 。

$\vdots$
当 $i=l$ 时, $\sum_{j=1}^k \sigma_j - \sum_{j=1}^k \sigma_j \leq 0$, 输出 i 。
所以, 实际上中性层总共从几何中心层偏移的距离 $e' = (l-1)h/n$ 。

因此, 可以运用 Matlab 等软件编写程序。通常情况下, 双金属复合板的普通板材层都要比特殊板材层厚, 即 $X > 1$ 。所以一般情况下只发生第 1 种和第 4 种弯曲情况, 即通常采用式(12)和式(14)求解。由于特殊板材的弹性模量与普通板材的弹性模量相差不大, 在实际计算过程中认为 $E_1 = E_2$ 。

每个矫正弯曲单元处的弯矩 $M_m = \int \sigma h B dh$ 。通常辊式矫正机采用整体倾斜压下辊系, 若已知到进出口处的压弯量, 就能算出中间每个矫正弯曲单元的压弯量 δ_m ($m=1, 2, \dots, 9$), 从而计算出每一处的矫正弯曲曲率。矫正弯曲单元的压弯量为

$$\delta_m = \frac{(\delta_{\text{front}} - \delta_{\text{back}})(9-m)}{8} + \delta_{\text{back}} \quad (16)$$

式中: δ_{front} 和 δ_{back} 分别为第 1 矫正单元和最末矫正单元的压弯量; m 为由前往后矫正单元的序号。

复合板整体倾斜式压下量示意图如图 8 所示。结合式(12)~式(15)就可以算出每个矫正弯曲单元的弯矩。通过该方法既解决了传统矫正模型无法计

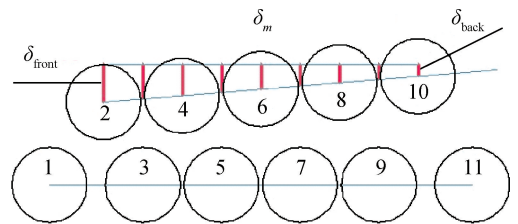


图 8 复合板整体倾斜式压下量示意图

Fig. 8 Schematic for integral inclined reduction amount of composite plate

算每个矫直弯曲单元弯矩的难题，又比传统的有限元计算方法省时高效。总矫直力为

$$P = \frac{8}{t}(M_2 + M_3 + M_4 + M_5 + M_6 + M_7 + M_8 + M_9)$$

(17)

式中： t 为矫直辊之间的辊距。

把按式(16)计算出的每个矫直弯曲单元的弯矩代入式(17)，即可算出总矫直力。

3 实验验证

3.1 实验设备

实验设备采用全液压十一辊式矫直机，如图 9 所示，具有调节辊间张力、入出口处压下量和弯辊

的功能，图 10 为其装配示意图。

3.2 实验方案

采用的板材为爆炸复合后再经过机械加工的双金属复合板(Q245R+06Cr13)，实验用复合板力学性能的测试结果如表 1 所示。

表 1 实验用复合板力学性能的测试结果

Table 1 Test results for mechanical properties of composite plates used in experiment

Composite plate	Q245R	06Cr13
Yield strength/MPa	255	362
Ultimate strength/MPa	463	491
Elastic modulus/GPa	21	21
Elongation at break/%	25	24



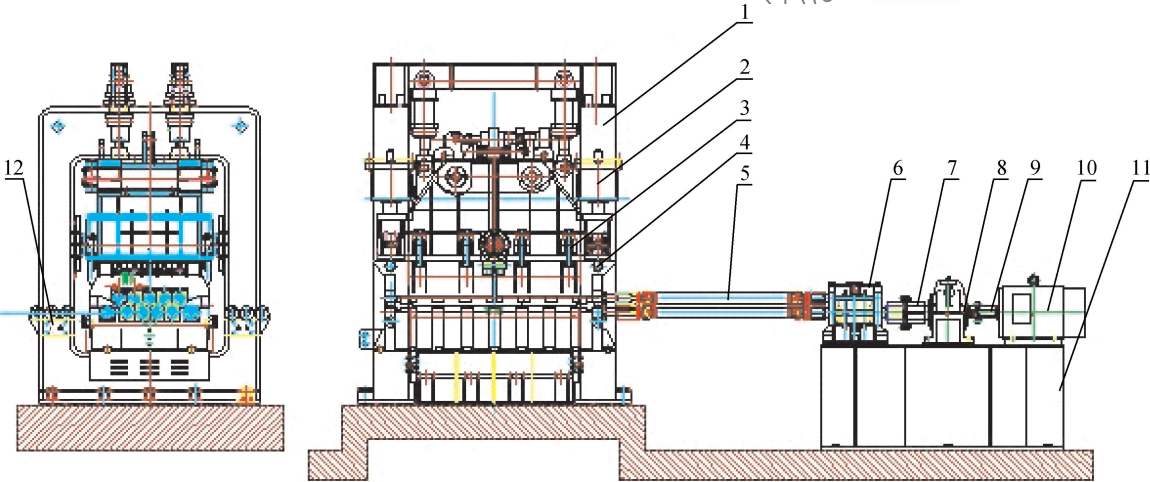
(a) Side view



(b) Front view

图 9 全液压十一辊式矫直机

Fig. 9 All-hydraulic eleven roller straightening machine



1 — Rack assembly; 2 — Reduction assembly; 3 — Off beam assembly; 4 — Roller assembly; 5 — Universal joint shaft assembly; 6 — Distribution gear box assembly; 7 — First coupling; 8 — Reducer; 9 — Second coupling; 10 — Variable frequency motor; 11 — Transmission base; 12 — Rack roll assembly.

图 10 全液压十一辊式矫直机的装配示意图

Fig. 10 Assembly schematic of all-hydraulic eleven roller straightening machine

普通板材(Q245R)与特殊板材(06Cr13)的厚度比分别为3:1和1:1, 板材宽度为150 mm, 板材厚度为6 mm;由于实验设备为十一辊式矫直机, 所以只有9个弯曲单元, 矫直辊辊距 $L=100$ mm; 矫直压下量设定为3组, 入口压下量分别为0.50、0.85、1.20 mm, 出口压下量均为0.30 mm。

3.3 实验结果与分析

以进出口压下量为0.85~0.30 mm、厚度比为3:1时为例, 通过模型计算可得双金属板于各矫直单元的中性层偏移量曲线, 如图11所示。可知, 随着压下量逐渐减小, 中性层的偏移量也逐渐减小, 从第7矫直弯曲单元开始, 中性层位置不再发生明显变化, 即从第7到第9单元处中性层没有发生偏移。

根据实验条件计算出各个矫直单元的弯矩, 最后得出总矫直力, 再将其与实验设备上压力传感器测得的矫直力数据进行对比。不同厚度比双金属板的矫直力实验数据与模型计算数据如表2所示。可

知, 采用模型计算得出的矫直力数据与实验矫直力数据只有细微的差别, 误差均不高于5.73%。由此可知, 基于弯曲迭代分层算法的数学模型在计算双金属复合板时具有较好的效果。

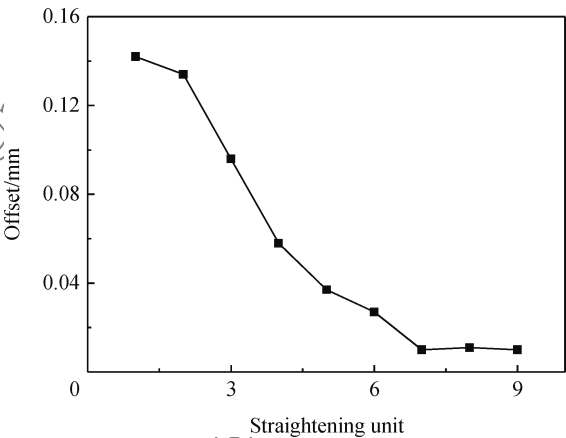


图11 双金属板于各矫直单元的中性层偏移量曲线

Fig. 11 Neutral layer offset curve of double metal plate on each straightening unit

表2 不同厚度比双金属板的矫直力实验数据与模型计算数据
Table 2 Experiment data and model calculated data for straightening force of double metal plates with different thickness ratios

Thickness/mm		Straightening reduction/mm		Straightening force/kg		Deviation of straightening force/%
Q245R	06Cr13	Front	Back	Experiment	Model calculated	
4.5	1.5	0.50	0.30	11 030	11 700	5.73
3.0	3.0	0.50	0.30	13 020	13 740	5.28
4.5	1.5	0.85	0.30	16 220	16 870	3.85
3.0	3.0	0.85	0.30	18 560	18 920	1.94
4.5	1.5	1.20	0.30	19 510	20 690	5.71
3.0	3.0	1.20	0.30	11 980	23 000	4.43

4 结 论

(1) 双金属复合板与单一板材相比构成不同, 所以矫直模型也应有所区别。

(2) 针对矫直模型的差别, 在计算时应充分考虑中性层的偏移并采用分层算法进行区别计算。

(3) 选用不同厚度比的双金属复合板(Q245R+06Cr13)进行矫直实验, 并将双金属复合板矫直模型的计算数据与实验数据进行对比, 结果显示矫直力误差在5.73%以内, 证明了采用所建立的矫直模型计算双金属复合板矫直具有良好的效果。

参考文献:

[1] 于田春. 金属基复合材料[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1995: 32-35.

[2] 孙德勤, 谢建新, 吴春京. 复合板的成形技术与发展趋势[J]. 金属成形工艺, 2003, 21(2): 19.

[3] 鲁云, 朱世杰, 马敏图. 先进复合材料[M]. 北京: 机械工业出版社, 2003: 51-53.

[4] 日比野文雄. 矯正技術の題点[J]. 機械の研究, 1979, 31(8): 13-18.

[5] PHILIPPAUS V, MAILLLARD S. Modern levelers for ad-

YU T C. Metal matrix composites[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1995: 32-35 (in Chinese).

SUN D Q, XIE J X, WU C J. Forming technology and the development trend of composite board[J]. Metal Forming Technology, 2003, 21(2): 19 (in Chinese).

LU Y, ZHU S J, MA M T. Advanced composite materials [M]. Beijing: China Machine Press, 2003: 51-53 (in Chinese).

HIBINO F. Problem point of correction technology[J]. Study of Machinery, 1979, 31(8): 13-18 (in Japanese).

- vanced plate grades[J]. Iron & Steel Review, 2009, 52(10): 144-148.
- [6] 濱崎洋, 志垣征聡, 吉田総仁. 確率的最適化手法によるテンションレベルリンク工程の信頼性設計[J]. 鉄と鋼, 2009, 14(1): 740-746.
- HIROSHI H, SHIGAKI T, YOSHIDA S. Reliability design of the more tension leveling error by stochastic optimization technique[J]. Iron and Steel, 2009, 14(1): 740-746 (in Japanese).
- [7] 田雅琴, 秦建平, 李小红. 金属复合板的工艺研究现状与发展[J]. 材料开发与应用, 2006, 21(1): 40-45.
- TIAN Y Q, QIN J P, LI X H. Metal technology research status and development of the composite panels[J]. Development and Application of Materials, 2006, 21(1): 40-45 (in Chinese).
- [8] 阿高松男. 「矯正工程の高精度化、高機能化」研究会を省みて[J]. 鉄と鋼, 2009, 14(11): 731-737.
- ASIN T. Reflecting a study group "high-precision of the correction process." [J]. Iron and Steel, 2009, 14(11): 731-737 (in Japanese).
- [9] 祖国胤, 于九明, 温景林. 钎焊-热轧复合工艺制备不锈钢/碳钢复合板[J]. 焊接学报, 2007, 28(5): 25-28.
- ZU G Y, YU J M, WEN J L. Hot rolled stainless steel composite process preparation [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2007, 28(5): 25-28 (in Chinese).
- [10] 周存龙. 中厚板辊式热矫直过程数学模型与数值模拟[D]. 沈阳: 东北大学, 2006.
- ZHOU C L. In plate hot roller straightening process mathematical model and numerical simulation [D]. Shenyang: Northeastern University, 2006 (in Chinese).
- [11] 比護剛志, 松本纈美, 小川茂. ローラ矯正中の被矯正材の曲率に及ぼす力ひずみ関係の影響[J]. 塑性と加工, 2002, 43(496): 79-83.
- HIGO T, MATSUMOTO H, OGAWA S. Impact of force strain relationship on the curvature of the correction material in the roller straightening[J]. Plastic and Processing, 2002, 43(496): 79-83 (in Japanese).
- [12] 王效岗. 十五辊组合矫直机关键技术及理论模型研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2008.
- WANG X G. 15 roller straightening machine combination research key technology and theory model [D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2008 (in Chinese).
- [13] 周存龙, 徐静, 王国栋, 等. 中厚板在矫直后的残余应力分布分析[J]. 重型机械, 2005(2): 21-24.
- ZHOU C L, XU J, WANG G D, et al. The residual stress distribution of thick plate after straightening in analysis[J]. Heavy Machinery Magazine, 2005(2): 21-24 (in Chinese).
- [14] 崔甫, 施东成. 矫直机压弯量的计算方法探讨[J]. 冶金设备, 1999, 2(1): 1-6.
- CUI F, SHI D C. Calculating the amount of bending straightener[J]. Metallurgical Equipment, 1999, 2(1): 1-6 (in Chinese).
- [15] 丁海民, 范孝良, 王进峰, 等. 热轧复合不锈钢-碳钢复合板界面特征[J]. 材料热处理学报, 2011, 32(11): 18-22.
- DING H M, FAN X L, WANG J F, et al. Hot-rolled stainless steel sheet composite interface features[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2011, 32(11): 18-22 (in Chinese).
- [16] 万先松, 王式研, 殷璟, 等. 基于大变形理论的塑性变形量线性递减矫直理论研究[J]. 重型机械, 2013(1): 26-29.
- WAN X S, WANG S Y, YIN J, et al. Straightening theory of diminishing the amount of plastic deformation based on linear large deformation theory[J]. Heavy Machinery Magazine, 2013(1): 26-29 (in Chinese).

A new type of bending straightening model for double metal composite plate

LI Leyi¹, JIA Yizheng^{1,*}, WANG Xiaogang²

(1. Department of Mechanical Engineering, Sichuan College of Architectural Technology, Deyang 618000, China;

2. Shanxi Provincial Key Laboratory of Metallurgical Device Design Theory and Technology (State Key Laboratory Cultivation Base of Province-Ministry Co-Construct), Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan 030024, China)

Abstract: For the traditional continuous bending and roller leveling theory was created upon the repeated and continuous bending deformation of single metal, so when the theory was applied to the continuous bending and leveling of double metal composite plates, the precision is not high and the leveled flatness of double metal composite plates cannot be guaranteed. In order to perfect the theory of plate straightening force, the characteristics of double metal composite plate in leveling and bending deformation were analyzed, and hierarchical algorithm was proposed, and the model calculated data was compared with straightening experiment data. The results show that the method proposed can adopt different calculation methods and material models in different metal deformation layers, and is suitable to solve the roller leveling problems of double metal composite plates. The model calculated straightening force error is no more than 5.73%. The conclusions obtained show that using mathematical model based on hierarchical algorithm can achieve good results in the calculation of double metal composite plates.

Keywords: double metal composite plates; leveling model; neutral layer; hierarchical algorithm; mathematical model; experiment