

文章编号: 1000-4750(2013)07-0235-07

冷轧带钢板形分段接触式检测过程的力学建模与仿真

张清东, 文 杰

(北京科技大学机械工程学院, 北京 100083)

摘 要: 建立了冷轧带钢板形应力分段接触式检测过程的 ANSYS 有限元模型, 引入欧式距离方法表征检测误差, 分析了在不同板形缺陷模式下, 板形辊弯曲变形、板形辊分段区域宽度、板形辊直径、带钢包角、带钢厚度、卷取张力、带钢张力横向分布不对称度等因素对板形检测精度的影响。仿真结果表明: 随着板形辊弯曲变形程度的增大, 板形应力检测精度大幅度降低。随着板形辊分段区域宽度的增大, 板形检测精度大幅度降低; 而随着板形辊分段区域宽度的减小, 板形检测精度提高, 但提高的幅度随着分段区域宽度的减小而越来越小。卷取工艺张力越低, 板形检测精度越低; 且当卷取张力增大到某一值时, 再继续增大卷取张力对板形检测精度影响甚小。随着卷取张力横向分布不对称度的增大, 板形检测精度降低。板形检测辊直径大小、带钢包角的变化以及带钢厚度的变化对板形检测精度没有影响。

关键词: 板形缺陷; 板形检测; 板形辊; 分段接触式; 有限元法

中图分类号: TH823 文献标志码: A doi: 10.6052/j.issn.1000-4750.2012.03.0201

MECHANICS MODELING AND SIMULATION OF PIECEWISE CONTACT FLATNESS STRESS MEASUREMENT PROCESS IN COLD ROLLING

ZHANG Qing-dong, WEN Jie

(School of Mechanical Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: A finite element model of a piecewise contact flatness stress measurement process in cold rolling is established. Euclidean distance method is introduced to characterize the measurement error. The influences of relevant factors on measurement accuracy are analyzed in different flatness defect patterns, such as the bending of a flatness measuring roll, piecewise roll width, diameter of the roll, strip wrap angle, strip thickness, coiling tension, lateral distribution of coiling tension, and so on. Simulation results show that as the bending deformation of the strip flatness measuring roll increase, the flatness measurement accuracy is significantly reduced. A significant reduction of flatness measurement accuracy appear while the piecewise roll width increase; when the piecewise roll width decrease, the accuracy is improved more and more slowly. The greater the coiling tension, the higher the measurement accuracy. But when the coiling tension reaches a certain value, the accuracy no longer increase. As the asymmetry degree of coiling tension lateral distribution increase, the flatness measurement accuracy is reduced. The changes of the roll diameter, strip wrap angle, and the strip thickness do not affect the measurement accuracy.

Key words: flatness defects; flatness measurement; flatness roll; piecewise contact; finite element method

板形是板带钢产品的重要质量指标, 研制板形检测装置, 实现板形自动检测和自动控制, 是不断

提高轧制工序实物板形质量、生产出高档宽幅薄钢板的关键之一。目前板带生产中使用的在线板形(平

收稿日期: 2012-03-27; 修改日期: 2012-08-09

基金项目: 国家科技支撑计划项目(2011BAE13B05); 国家自然科学基金项目(50675021, 51075031)

通讯作者: 文 杰(1984—), 男, 湖南常德人, 博士生, 从事板带轧制工艺研究(E-mail: me818@me.ustb.edu.cn).

作者简介: 张清东(1965—), 男, 内蒙古林河人, 教授, 博士, 博导, 从事板带轧制工艺和塑性成型研究(E-mail: zhang_qd@me.ustb.edu.cn).

平坦度)测量装置,从测量原理上可分为以瓢曲波浪的特征尺寸参数为检测对象的几何测量方法和以带钢张力分布为检测对象的应力测量方法。冷轧工序,以生产优质薄钢板为目的,采取大张力轧制工艺,使板形平坦度缺陷大部分被张力“隐藏”转化为“暗板形”,因此主要采用分段接触式应力测量方法类板形仪,即以带钢张力横向分布为板形检测和控制的对象。其中,瑞典 ABB 公司的辊环叠片传感式分段辊板形仪、德国钢铁工艺研究所(BFI)的深孔柱塞传感式板形仪以及英国 Davy 公司的维地蒙(Vidimon)空气轴承式板形仪^[1-2]是目前冷轧用板形仪的绝对主流选择。此类分段接触式板形检测装置以带钢在线张应力横向分布表征带钢的板形平坦度缺陷,其中可能涉及带钢的瓢曲、弯曲及拉伸展平等力学变形行为,因而难以建立该过程的解析形式的精确数学表达式。

一直以来,国内外许多学者对分段接触式板形检测装置进行了研究。比如,文献[3]分析认为带钢包角和卷取张力的变化并不影响板形检测辊的测量结果,但该结论并未考虑不同带钢板形、载荷形式以及带钢变形对测量结果的影响。文献[4]采用经典力学理论进行近似分析,对不同张力下检测辊的倾斜、挠曲、磨损等问题进行了综合补偿,提高了板形检测辊的测量精度,但没有考虑带钢变形的影响。文献[5]采用有限元软件分析了分段辊宽度对板形检测结果的影响,分析认为分段宽度越大,板形检测结果越不精确,在同一板形辊分段宽度下,带钢板形曲线复杂程度对板形检测结果也有较大影响,但仅以带钢张力差分布形式模拟不同的带钢板形情况。文献[6]分析深孔柱塞传感式板形仪带钢包角变化对板形检测结果的影响,推导出了实时变包角情况下板形测量值的表达式。文献[7]利用试验设备对分段接触式板形应力检测的检测精度进行了研究,并研究了带钢温度对检测结果的影响,认为检测过程中需要进行带钢温度补偿。文献[8]采用影响函数法分析了板形检测辊挠曲对板形检测精度的影响。文献[9]分析了检测元件承载能力及精度、测量区分段宽度、系统刚度等对板形检测精度的影响。文献[10-15]介绍了各种分段接触式板形检测仪的工作原理及其在生产现场的应用。

上述研究仅对部分或单一的板形检测影响因素进行了分析,并没将带钢变形以及板形缺陷引入到分析中去。本文拟采用 ANSYS 有限元软件对分段接触式板形检测装置的检测过程进行力学建模和数值仿真,研究此种板形平坦度缺陷检测方法的

力学机理、精度影响因素及其影响机制与规律。

1 分段接触测张力式板形仪的板形检测原理

根据板形仪生产厂家的文献资料^[3],分段接触式板形检测方法假设带钢的瓢曲浪形在张力作用下完全被线性弹性地拉伸平直,并近似认为:1)带钢沿横向处处与测量辊表面以包角 2θ 接触绕过;2)带钢绕过测量辊时无张力损耗,即测量辊前后带钢张力大小分布完全相同;3)带材横截面为矩形,厚度均为 h ;4)前张应力在与其测量区域相对应的带材横截面内均匀分布。然后,根据图 1 的力学模型,建立板形检测数学模型。

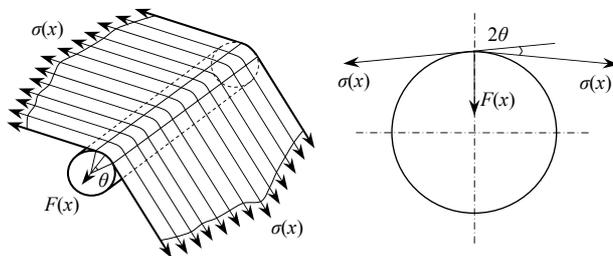


图 1 分段接触式板形辊检测原理图

Fig.1 Principle of piecewise contact flatness measurement

设出口带钢经分段辊后转折的角度为 2θ ,如果带钢宽度 B 内刚好有 m 个测量段,就可测得 m 个径向压力值 $F(x)$,每段对应的带钢宽度为 $B(x)$ 。那么对于第 x 个测量段的带钢 $B(x)$,该区域板形辊受到的来自带钢的径向压力为:

$$F(x) = 2\sigma(x) \cdot h \cdot B(x) \cdot \sin\theta \quad (1)$$

式中: $\sigma(x)$ 为第 x 个测量段的带钢张应力; h 为带钢厚度。

指定 $\Delta\sigma(x)$ 为第 x 个测量段的带钢张应力 $\sigma(x)$ 与整个带钢的平均张应力 $\bar{\sigma}$ 的差值,并定义 $\Delta\sigma(x)$ 为板形应力,用以表征带钢的板形平坦度缺陷。

根据前述假设,运用胡克定律可以近似计算出带钢塑性变形后的沿宽度方向上的残余延伸差 $\Delta\varepsilon(x)$,也被称为带钢各条纵向纤维的相对长度差。此类板形仪的检测对象是带钢张力横向分布,输出结果可以是板形应力 $\Delta\sigma(x)$,也可以是延伸差 $\Delta\varepsilon(x)$,并且它们的物理意义都是带钢各条纵向纤维的相对长度差,即带钢的板形平坦度。

2 板形检测过程力学建模

采用 ANSYS11.0 有限元软件建模,取板形检

测辊和与其接触的一段带钢为分析对象，带钢以一定包角和一定张力作用在板形辊上；假设带钢在张力作用下仅发生弹性变形；不考虑板形辊与带钢之间摩擦力的影响；在带钢上叠加各种形式的板形缺陷，且认为带有板形缺陷的带钢在张力的作用下仍平直。整个板形检测过程的仿真模型包括：1) 包含带钢与检测辊的实体模型；2) 带钢各种板形缺陷模型。

2.1 实体模型建立

以某冷轧厂使用的辊环叠片传感式分段辊板形仪为建模对象。每个分段的钢环标准宽度为 52mm，称为一个测量段。为保证各测量段单独进行，各环间留有 0.01mm 间隙，环厚 10mm。由于钢质圆环足够硬，带钢作用在单个圆环上的径向力并不足以使圆环产生足够大的弹性变形，为方便建模与减少计算时间，将板形检测辊看作近似刚性体，用厚度较薄的圆环表示，通过提高板形检测辊的弹性模量给其赋予足够高的刚度。

实体模型包括弹性的带钢和近似刚性的测量辊，如图 2 所示，板形检测辊直径为 313mm，单个辊环宽度为 52mm，带钢长度为 2019mm，带钢宽度为 1000mm。带钢和板形检测辊均采用 ANSYS 单元库的 SHELL63 单元。在带钢对称中心施加沿带钢宽度方向位移约束 $UX=0$ ，长度方向的位移约束 $UZ=0$ ；在板形检测辊上下对称位置施加位移约束 $UX=0, UY=0, UZ=0$ ；在带钢两端施加张力，并将施加张力的节点进行位移耦合。表 1 为所选带钢和板形检测辊的材料参数。

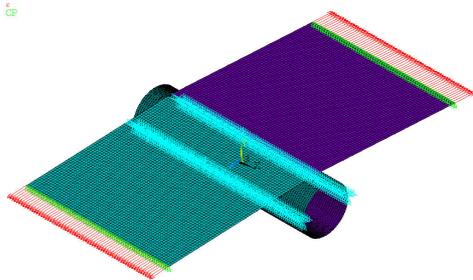


图 2 施加约束及载荷后的有限元模型
Fig.2 Finite element model applied constraints and loads

表 1 材料参数

Table 1 Material parameters

参数	数值	
带钢	弹性模量/MPa	2.1×10^5
	泊松比	0.3
检测辊	弹性模量/MPa	2.1×10^8
	泊松比	0.3

2.2 板形缺陷模式选取及加载

板形缺陷模式的选取要能反映冷轧带钢实际生产过程中较为常见的板形缺陷形式，轧后带钢的板形缺陷即纵向纤维的相对延伸差所引起的板形应力满足自相平衡条件，即沿板宽的积分值为零。根据文献[16—20]，选择 4 种常见的板形缺陷模式作为分析对象，分别为中浪、双边浪、边中复合浪以及 1/4 浪。勒让德正交多项式满足上述自相平衡条件，且能较好表示这 4 种常见板形缺陷，因此采用勒让德正交多项式来描述上述常见的板形缺陷形式。

为模拟不同的在线板形，在前文的板形检测假设下，以不同的温度分布引起的纵向延伸不均模拟带钢不同的板形缺陷对应的残余应变分布，即纵向纤维的相对长度差。同时，施加在带钢上的温度分布引起的残余应变分布在工艺张力的作用下不发生屈曲，即具有纵向纤维相对长度差的带钢在张力的作用下被完全拉伸平直，满足带钢平直的和板形辊接触的条件。

采用课题组开发的带钢屈曲分析的非线性样条元软件对不同给定初应变条件下的带钢进行分析计算，得出其各自的屈曲临界初应变，如表 2 所示。图 3 为带钢屈曲分析的非线性样条元软件界面及计算例。从表 2 可以看出，在有限元模型中的带钢上给定 40IU 初应变就不会超过其屈曲临界初应变，加载后带钢不会出现屈曲，满足带钢平直的和板形辊接触的条件。图 4 为勒让德多项式表示的各种板形缺陷模式下带钢横向温度分布。带钢长度方

表 2 典型浪形的屈曲临界初应变

Table 2 Critical initial strain of typical flatness buckling

浪形	张力/MPa	临界初应变/IU
中浪	39	44.58
边浪	39	41.97
1/4 浪	39	48.58
边中复合浪	39	41.97

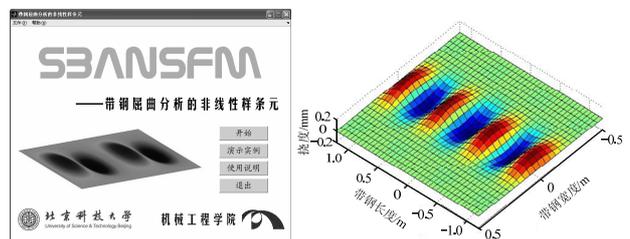


图 3 带钢屈曲分析的非线性样条元软件界面及计算例
Fig.3 Software interface of nonlinear spline element on strip buckling analysis and its calculation case

向上热膨胀系数取为 1×10^{-5} , 则当给定边浪温度场幅值为 40°C 时, 带钢将具有 40IU 的边浪板形缺陷。图 5 为施加了中浪板形缺陷的有限元模型。

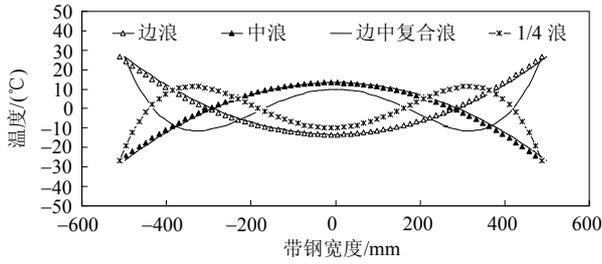


图 4 勒让德多项式表示的带钢温度场
Fig.4 Strip temperature field expressed by Legendre polynomials

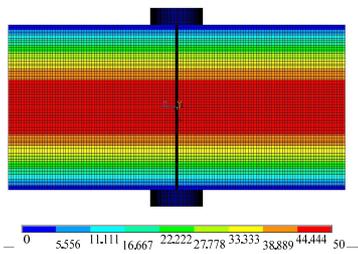


图 5 加载了中浪缺陷的有限元模型
Fig.5 The finite element model with center wave

3 仿真检测精度的评价方法

分段接触式板形检测仪的测量结果是一组离散的板形应力信号 $\Delta\sigma(i)$, 此板形应力信号与模型中给定的板形缺陷引起的张应力横向分布越接近, 则表示测量结果越精确。引入欧式距离^[19]方法来表征检测误差, 评价各种工况下板形检测结果与给定的板形模式的接近程度。下式即为欧式距离计算公式:

$$D(k) = \|F_k - y_k\| = [(\sigma_i - y_i)^2]^{1/2} \quad (2)$$

式中: k 为仿真工况数, $k=1, 2, 3, \dots$; $F_k = (\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3, \dots, \sigma_n)$ 为第 k 种工况下的板形测量结果; $y_k = (y_1, y_2, y_3, \dots, y_n)$ 为与第 k 种工况对应的初始板形缺陷模式, n 为带钢覆盖的板形测量辊的段数。

可见, 欧式距离计算结果 D 越小, 则板形检测结果越接近初始给定的板形缺陷模式, 即测量结果越精确。

4 仿真计算及结果分析

利用所建立的有限元模型, 对板形辊弯曲变形、分段区域宽度、板形辊直径、带钢包角、带钢厚度、卷取工艺张力、卷取张力横向分布的不对称度等因素对板形测量精度的影响。仿真工况如表 3 所示。图 6 为利用所建立的模型对 4 种常规浪形进

行仿真计算后板形辊的应力云图, 图 7 为各种浪形理论值与测量值的对比, 结果表明所建立的模型能较为准确的检测出带钢中的板形缺陷。

表 3 仿真工况

影响因素	最小值	中间值	最大值
板形辊中点挠曲值/mm	0	0.5	1
分段宽度/mm	26	52	78
板形辊直径/mm	213	313	413
带钢包角/ $^\circ$	2	3	4
带钢厚度/mm	0.5	1.5	1.75
卷取张力/MPa	13	39	78
带钢两侧张力偏差/MPa	0	3	5.69

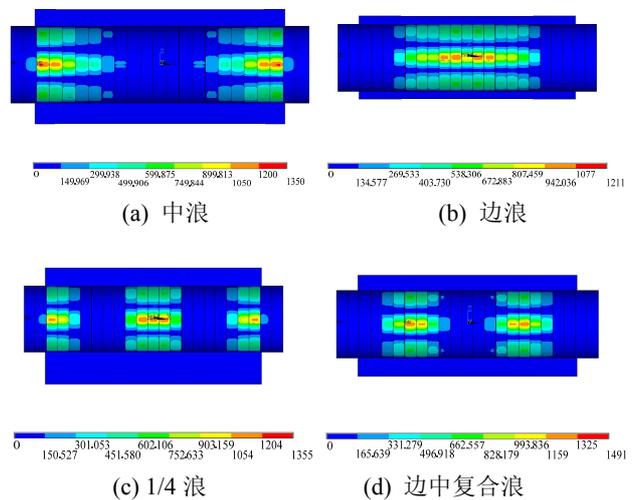
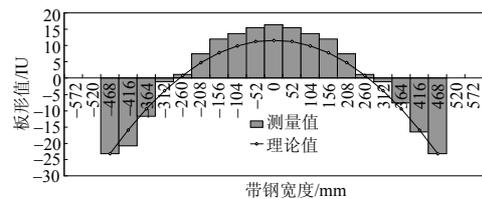
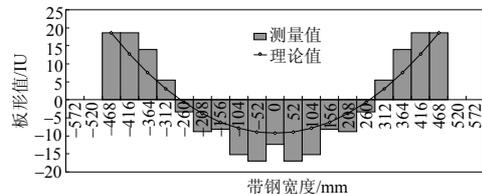


图 6 4 种常见板形缺陷仿真结果

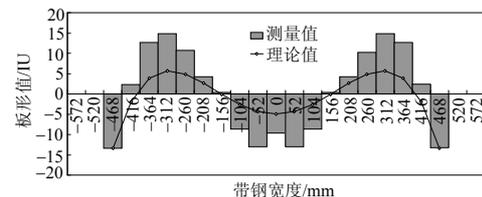
Fig.6 Simulation results of the four common flatness defects



(a) 中浪



(b) 边浪



(c) 1/4 浪

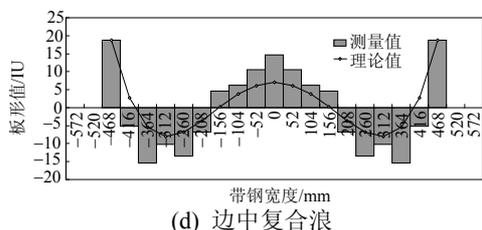


图 7 4 种常见板形缺陷理论值与测量值的对比

Fig.7 Contrast of the theoretical and measured values of the four common flatness defects

4.1 板形辊弯曲变形对检测精度的影响

轧制过程中，板形检测辊受到其自重以及带钢施加的径向压力作用，会产生向下的弯曲变形。另外，当轧后带钢具有正凸度时，卷取后钢卷也会带有凸度并随卷径的增大而增大，钢卷凸度最大值位于带钢中部区域，并将使带钢中部张力由于钢卷凸度的存在而增大，这也会增大板形辊向下的弯曲变形。本节针对板形辊存在向下的弯曲变形的情况，分析板形辊弯曲变形对检测结果的影响。

图 8 是带钢宽度为 1000mm，带钢厚度为 1mm，带钢包角为 3°，卷取张力为 39MPa、带钢板形缺陷为边浪时，不同的板形辊弯曲变形挠度值对板形检测测量精度的影响。从图 8 可以看出，随着板形辊弯曲变形程度的增大，板形检测精度大幅度降低，当板形辊中点挠曲值为 1mm 时，板形检测精度下降了 27.44%。

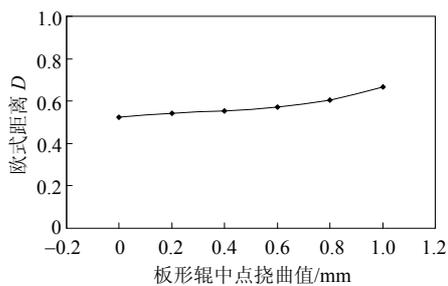


图 8 板形辊弯曲变形对检测结果的影响

Fig.8 The influence of flatness roll bending on measurement result

4.2 板形辊分段区域宽度对检测精度的影响

目前现场使用的分段接触式板形检测辊的分段区域宽度多为 52mm 或 50mm，其中带钢边部区域为了提高检测精度，分段区域宽度为 26mm 或 25mm。本节分析了板形辊分段区域宽度对检测精度的影响。

图 9 是带钢宽度为 1000mm，带钢厚度为 1mm，带钢包角为 3°，卷取张力为 39MPa，带钢板形缺陷

为 1/4 浪时，不同的板形辊分段区域宽度对板形检测精度的影响。从图 9 可以看出，随着板形辊分段区域宽度的增大，板形检测精度大幅度降低；而随着板形辊分段区域宽度的减小，板形检测精度提高，但提高的幅度随着分段区域宽度的减小越来越小。当板形辊分段区域宽度由 52mm 增大至 78mm 时，板形检测精度降低了 90.51%；当板形辊分段区域宽度由 52mm 减小至 26mm 时，板形检测精度提高了 17.44%。

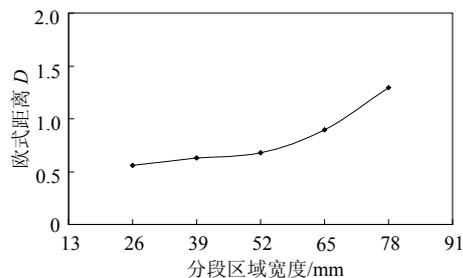


图 9 板形辊分段区域宽度对检测精度的影响

Fig.9 The influence of piecewise roll width on measurement result

4.3 板形辊直径对检测精度的影响

随着板形辊的使用，其直径会因磨损而减小。本节分析了板形辊直径变化对检测精度的影响。

图 10 是带钢宽度为 1000mm，带钢厚度为 1mm，带钢包角为 3°，卷取张力为 39MPa，带钢板形缺陷为边中复合浪时，不同的板形辊直径对板形检测精度的影响。从图 10 可以看出，板形检测辊直径大小对检测精度影响较小。

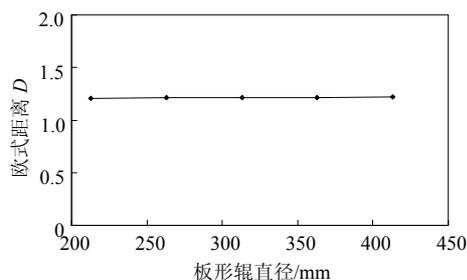


图 10 板形辊直径对检测精度的影响

Fig.10 The influence of the roll diameter on measurement result

4.4 带钢包角对检测精度的影响

由于现场条件的不同，有的机组在板形辊前后安装有夹送辊或导向辊，用来保证带钢与板形辊接触时的包角保持不变；而有的机组板形辊既充当板形检测装置也充当导向辊，在卷取过程中或者轧制线高度变化时，带钢与板形辊之间包角也随之变

化。本节就针对当板形仪前后无夹送辊或导向辊情况，分析包角变化对检测结果的影响。

图 11 是带钢宽度为 1000mm、带钢厚度为 1mm、卷取张力为 39MPa、带钢板形缺陷为中浪时，不同的带钢与板形辊包角对板形检测辊测量精度的影响。可以看出，带钢包角的变化对检测精度没有影响。

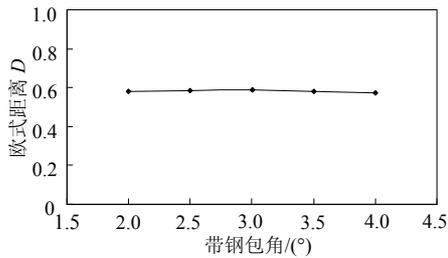


图 11 带钢包角对检测精度的影响

Fig.11 The influence of strip wrap angle on measurement result

4.5 带钢厚度对检测精度的影响

图 12 是带钢宽度为 1000mm，带钢包角为 3°，卷取张力为 39MPa，带钢板形缺陷为 1/4 浪时，不同带钢厚度对板形检测辊测量精度的影响。从图 12 可以看出，带钢厚度的变化对板形检测辊的测量精度没有影响。

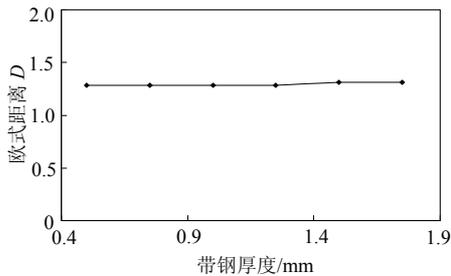


图 12 不同带钢厚度对检测精度的影响

Fig.12 The influence of strip thickness on measurement result

4.6 卷取工艺张力对检测精度的影响

图 13 分析了带钢宽度为 1000mm，带钢厚度为 1mm，带钢包角为 3°，带钢板形缺陷为边中复合浪时，不同卷取张力对板形检测辊测量精度的影响。从图 13 可以看出，卷取张力越低，板形辊的检测精度越低；当卷取张力增大到某一值时，再继续增大卷取张力对板形检测精度影响不大。当卷取张力由 39MPa 降低至 13MPa 时，板形检测精度降低了 229%；当卷取张力由 39MPa 增大至 78MPa 时，张力变化引起的板形检测精度的变化在 3%以内。

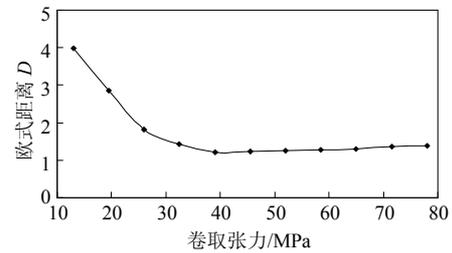


图 13 不同卷取张力对检测精度的影响

Fig.13 The influence of coiling tension on measurement result

4.7 卷取张力横向分布的不对称度对检测精度的影响

在带钢卷取过程中，卷取机施加给带钢的张力沿宽度方向的分布经常是不对称的。由分段接触式板形检测过程的原理可知，带钢张力沿宽度方向上分布的不对称度将影响板形辊的受力状态，进而对板形检测结果产生影响。

图 14 分析了带钢宽度为 1000mm，带钢厚度为 1mm，带钢包角为 3°，卷取张力为 39MPa、带钢板形缺陷为边浪时，卷取张力不对称度对板形检测辊测量精度的影响。从图 14 可以看出，随着卷取张力不对称度的增大，板形辊的检测精度逐渐降低。当卷取张力沿带钢宽度方向的偏差由 0MPa 增大至 3MPa 时，检测精度降低了 1.5%；当卷取张力沿带钢宽度方向的偏差由 0MPa 增大至 5.7MPa 时，检测精度降低了 10.95%。

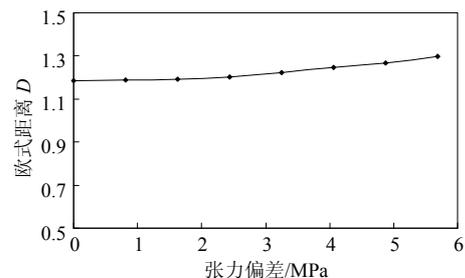


图 14 带钢张力横向分布的不对称度对检测精度的影响

Fig.14 The influence of lateral tension distribution on measurement result

5 结论

(1) 在对分段接触式板形检测辊的工作原理进行分析的基础上，利用 ANSYS 有限元软件建立了分段接触式板形检测过程的仿真模型。以不同的温度分布引起的纵向延伸不均模拟带钢不同的板形缺陷对应的残余应变和板形应力分布。

(2) 由于分段接触式板形检测仪的测量结果是一组离散的板形应力偏差信号, 引入了欧式距离方法, 对不同影响因素对板形检测精度的影响进行评价。

(3) 分析了在不同板形缺陷模式下, 板形辊弯曲变形、板形辊分段区域宽度、板形辊直径、带钢包角、带钢厚度、卷取张力、带钢两侧张力偏差等因素对板形检测辊测量精度的影响。

(4) 仿真结果表明: ① 随着板形辊弯曲变形程度的增大, 板形检测精度大幅度降低。② 随着板形辊分段区域宽度的增大, 板形检测精度大幅度降低; 而随着板形辊分段区域宽度的减小, 板形检测精度提高, 但提高的幅度随着分段区域宽度的减小越来越小。③ 板形检测辊直径对检测精度影响较小。④ 带钢包角的变化对检测精度没有影响。⑤ 带钢厚度的变化对板形检测辊的测量精度没有影响。⑥ 卷取张力越低, 板形辊的检测精度越低; 当卷取张力增大到某一值时, 再继续增大卷取张力对板形检测精度影响甚小。⑦ 随着卷取张力横向分布不对称度的增大, 板形辊的检测精度逐渐降低。

参考文献:

- [1] 徐乐江. 板带冷连轧机板形控制与机型选择[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2007: 100—113.
Xu Lejiang. Flatness control in cold strip rolling and mill type selection [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2007: 100—113. (in Chinese)
- [2] Carlstedt A G, Keijser O. Modern approach to flatness measurement and control in cold rolling [J]. Iron and Steel Engineer, 1991, 68(4): 34—37.
- [3] 张清东, 陈先霖, 何安瑞, 等. 冷轧宽带钢板形检测与自动控制[J]. 钢铁, 1999, 34(10): 69—72.
Zhang Qingdong, Chen Xianlin, He Anrui, et al. Automatic measurement and control of flatness of wide cold rolled steel strip [J]. Iron and Steel, 1999, 34(10): 69—72. (in Chinese)
- [4] 周莲莲, 郑志刚, 白振华. 板带轧机板形检测设备系统误差综合补偿技术的开发[J]. 燕山大学学报, 2009, 33(3): 220—223.
Zhou Lianlian, Zheng Zhigang, Bai Zhenhua. Development of general compensation technology about system error for strip mill shape detection equipment [J]. Journal of Yanshan University, 2009, 33(3): 220—223. (in Chinese)
- [5] 王向丽, 李谋谓, 张少军. 测张式板形仪分段辊区域宽度对板形检测精度的影响[J]. 冶金自动化, 2010, 34(2): 50—54.
Wang Xiangli, Li Mouwei, Zhang Shaojun. Analysis on effect of segmented roll width to shape detection precision in tension measuring type shapemeter [J]. Metallurgical Industry Automation, 2010, 34(2): 50—54. (in Chinese)
- [6] 王鹏飞, 张殿华, 刘佳伟, 王军生. 变包角板形测量值计算模型[J]. 钢铁研究学报, 2010, 21(1): 57—60.
Wang Pengfei, Zhang Dianhua, Liu Jiawei, Wang Junsheng. A varying wrap angle calculation model for flatness measurement [J]. Journal of Iron and Steel Research, 2010, 21(1): 57—60. (in Chinese)
- [7] Wolfgang B, Reinhard S, Willi W, Hermann Josef K. Flatness control of cold rolled strip by stress and temperature measurements [J]. Stahl Eisen, 1977, 97(4): 151—154.
- [8] Liu Jiawei, Zhang Dianhua, Wang Junsheng, Wang Pengfei. Defection compensation model for flatness measuring roll [J]. Journal of Iron and Steel Research, 2010, 17(12): 35—37.
- [9] 王向丽, 李谋谓, 张少军. 分段辊测张式板形仪性能及发展趋势研究[J]. 冶金自动化, 2008, 32(3): 39—42.
Wang Xiangli, Li Mouwei, Zhang Shaojun. Research on performance and perspective of tension measuring type shape meter with segmented rolls [J]. Metallurgical Industry Automation, 2008, 32(3): 39—42. (in Chinese)
- [10] 赵小燕, 张朝晖, 迟健男, 孙一康. 基于张力测量的板形检测技术[J]. 制造业自动化, 2007, 29(3): 90—92.
Zhao Xiaoyan, Zhang Zhaohui, Chi Jiannan, Sun Yikang. Application of tension meter device in the strip shape measurement [J]. Manufacturing Automation, 2007, 29(3): 90—92. (in Chinese)
- [11] 庞玉华, 钟春生, 王经涛, 罗子健. 轧钢板形检测仪研究动向[J]. 上海金属, 2001, 23(2): 10—13.
Pang Yuhua, Zhong Chunsheng, Wang Jingtao, Luo Zijian. The research tendency of strip flatness measuring apparatus used in steel rolling [J]. Shanghai Metals, 2001, 23(2): 10—13. (in Chinese)
- [12] 杨荃, 陈先霖, 欧阳金明. 冷轧机板形在线连续检测问题研究[J]. 钢铁研究, 1993, 23(2): 20—22.
Yang Quan, Chen Xianlin, Ouyang Jinming. On-line continuous measurement on profile of cold rolled strip [J]. Research on Iron and Steel, 1993, 23(2): 20—22. (in Chinese)
- [13] 杨景明, 王洪瑞, 方一鸣. 分段式板形检测仪[J]. 电子测量与仪器学报, 1996, 10(3): 60—63.
Yang Jingming, Wang Hongrui, Fang Yiming. The shape measuring meter of sectional type [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 1996, 10(3): 60—63. (in Chinese)
- [14] 周晓敏, 张清东, 王长松. 西门子平坦度检测系统在冷轧中的应用[J]. 上海金属, 2003, 25(2): 37—40.
Zhou Xiaomin, Zhang Qingdong, Wang Changsong. Application of SIMENS flatness measurement system to cold rolling mill [J]. Shanghai Metals, 2003, 25(2): 37—40. (in Chinese)
- [15] 刘浩. ABB板形测量系统在宝钢1800mm冷连轧机组的应用[J]. 冶金自动化, 2006, 30(1): 61—62.
Liu Hao. Application of ABB shape measurement system in Baosteel 1800mm cold rolling train [J]. Metallurgical Industry Automation, 2006, 30(1): 61—62. (in Chinese)

(参考文献[16]—[20]转第254页)

4 结论

(1) 根据蜂窝材料力学理论提出的基于蜂窝材料宏观性能参数等效的结构相似有限元模型能够表征原结构模型的宏观压缩力学特性,但是,结构相似有限元模型的胞壁的局部变形模式与原模型存在差异。基于蜂窝材料结构相似模型构建的夹层结构的抗爆炸冲击特性与原结构模型亦具有较好的一致性,可用于夹层结构的优化设计分析。

(2) 蜂窝材料的结构相似有限元模型可显著地提高结构冲击动力学分析的单次计算效率,使蜂窝材料夹层结构的抗爆炸冲击特性优化设计得以实现。基于蜂窝材料的结构相似有限元模型,进行了蜂窝材料夹层结构抗爆炸冲击特性的优化设计,在保证抗冲击设计要求的条件下提高了结构的轻量化水平。

(3) 结构相似模型意在兼顾模型计算效率和计算精度,因此在确定相似模型的胞元尺寸时需考虑蜂窝材料力学特性对材料均匀性的要求。对于计算耗时可接受的蜂窝材料夹层结构抗爆炸冲击特性的单次计算分析可不必采用相似模型建模。

参考文献:

- [1] Karagiozova D, Nurick G, Langdon G. Behavior of sandwich panels subject to intense air blasts—Part 2: Numerical simulation [J]. *Composite Structures*, 2009, 91: 442—450.
- [2] Zhu F, Zhao L, Lu G, et al. A numerical simulation of the blast impact of square metallic sandwich panels [J].

- International Journal of Impact Engineering*, 2009, 36: 687—699.
- [3] Zhu F, Zhao L, Lu G, et al. Deformation and failure of blast-loaded metallic sandwich panels—experimental investigations [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2008, 35: 937—951.
- [4] Dharmasena K, Wadley H, Xue Z, et al. Mechanical response of metallic honeycomb sandwich panel structures to high-intensity dynamic loading [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2008, 35: 1063—1074.
- [5] Xue Z, Hutchinson J. A comparative study of impulse-resistant metal sandwich plates [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2004, 30: 1283—1305.
- [6] Lee D, O'Toole B. Energy absorbing sandwich structures under blast loading [C]. Detroit: 8th International LS-DYNA Users Conference, 2004, 8: 13—24.
- [7] Gibson L J, Ashby M F. 多孔固体结构与性能[M]. 第2版. 刘培生,译. 北京: 清华大学出版社, 2003: 128—148.
- Gibson L J, Ashby M F. *Cellular solids: Structure and properties* [M]. 2nd ed. Translated by Liu Peisheng. Beijing: Tsinghua University Press, 2003: 128—148. (in Chinese)
- [8] Wierzbicki T. Crushing analysis of metal honeycombs [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 1983, 1(2): 157—174.
- [9] Randers-Pehrson G, Bannister K. Airblast loading model for DYNA2D and DYNA3D [R]. Maryland: US Army Research Laboratory, 1997.
- [10] Onck P R, Andrews E W, Gibson L J. Size effects in ductile cellular solids. Part I: Modeling [J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2001, 43: 681—699.
- [11] Wang G, Dong Z, Aitchison P. Adaptive response surface method—A global optimization scheme for computation-intensive design problems [J]. *Engineering Optimization*, 2001, 33(6): 707—734.

(上接第 241 页)

- [16] 杨荃, 张清东, 陈先霖. 冷轧带钢翘曲形状分析与波形函数[J]. *钢铁*, 1993, 28(6): 41—45.
- Yang Quan, Zhang Qingdong, Chen Xianlin. Study on the buckled shape of cold rolled strip and the wave function [J]. *Iron and Steel*, 1993, 28(6): 41—45. (in Chinese)
- [17] 张清东, 陈先霖, 王长松, 杨荃. 冷轧宽带钢横向内应力分布的实测与计算[J]. *北京科技大学学报*, 1994, 16(增刊 2): 81—85.
- Zhang Qingdong, Chen Xianlin, Wang Changsong, Yang Quan. Measurement and calculation of transversal internal stress distribution in the off-line cold rolled strip [J]. *Journal of University of Science and Technology Beijing*, 1994, 16(Suppl 2): 81—85. (in Chinese)
- [18] 张清东, 陈先霖, 徐金梧. 板形缺陷模式识别方法的研究[J]. *钢铁*, 1996, 31(增刊 1): 57—60.

- Zhang Qingdong, Chen Xianlin, Xu Jinwu. Method of flatness defect pattern recognition [J]. *Iron and Steel*, 1996, 31(Suppl 1): 57—60. (in Chinese)
- [19] 张清东, 陈先霖, 徐金梧. 板形模式识别的模糊分类方法[J]. *北京科技大学学报*, 1995, 17(1): 68—71.
- Zhang Qingdong, Chen Xianlin, Xu Jinwu. Pattern recognition of flatness defect by fuzzy method [J]. *Journal of University of Science and Technology Beijing*, 1995, 17(1): 68—71. (in Chinese)
- [20] 戴杰涛, 张清东. 冷轧薄板中浪板形缺陷的屈曲及后屈曲理论与轧制试验研究[J]. *机械工程学报*, 2011, 47(2): 44—50.
- Dai Jietao, Zhang Qingdong. Analysis and experiment on central buckling and post buckling of thin cold-rolled sheet [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2011, 47(2): 44—50. (in Chinese)