DOI: 10.3901/JME.2020.03.207

基于元胞自动机的冷轧工作辊表面形貌演变过程仿真与试验研究*

李洪波¹ 夏春雨^{1,2} 张杰¹ 孔宁¹

(1. 北京科技大学机械工程学院 北京 100083;

2. 公安部第一研究所 北京 100048)

摘要: 为掌握冷轧过程中毛化工作辊三维表面形貌的变化规律,建立了基于元胞自动机理论的冷轧工作辊三维表面形貌动态演变过程仿真分析模型,模型中工作辊表面黏着磨损量和磨粒磨损量分别采用 Archard 磨损理论和脆性断裂机制进行计算,磨粒的粒径由 Monte Carlo 方法随机选取,位置通过“打靶法”随机生成。以工业生产现场实际生产数据和表面形貌测试结果为依据,完成了轧制过程工作辊表面形貌变化过程的磨损试验,并利用试验数据验证了仿真模型的有效性和准确性。利用仿真模型对冷轧过程中工作辊三维表面形貌的幅度特性、空间特性、综合特性和功能特性进行了研究,清晰地揭示了轧制过程中工作辊三维表面形貌的演变过程,为进一步研究和控制工作辊表面形貌的磨损,以在轧制过程中更好地进行带钢表面形貌的控制提供了理论基础。

关键词: 冷轧; 毛化工作辊; 表面形貌; 磨损; 元胞自动机

中图分类号: TB335

Simulated and Experimental Study on Attenuation Process of the Surface Topography of Cold Rolling Work Rolls with Cellular Automaton

LI Hongbo¹ XIA Chunyu^{1,2} ZHANG Jie¹ KONG Ning¹

(1. School of Mechanical Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083;

2. First Research Institute of the Ministry of Public Security of PRC, Beijing 100048)

Abstract: In order to understand the attenuation characteristics of the surface topography of textured cold rolling work rolls, a simulation model for the attenuation process is built with the cellular automaton theory. In the model, the amount of adhesive wear for work roll surface is calculated with Archard wear theory, while the amount of abrasive wear is calculated with brittle fracture mechanism, then the shape and location of the random abrasive particle are decided by the Monte Carlo method and shooting method. According to the real industrial rolling process parameters and the work roll surface topography testing data, a friction wear experiment is also carried out to simulate the wear process of work roll surface topography in cold rolling, which helped to verify the simulation model's effectiveness. With the cellular automaton model, the amplitude characteristics, spatial characteristics, comprehensive characteristics, and the functional characteristics are studied, which showed the attenuation process of the surface topography of cold rolling work rolls clearly, and offered the assistance for the research and control of the work roll surface wear, and further for the strip surface topography control during cold rolling.

Key words: cold rolling; textured work rolls; surface topography; wear; cellular automaton

0 前言

随着高档汽车面板和家电面板等带钢产品的质量要求日益提高,冷轧带钢的表面形貌已成为产品

表面质量的重要影响因素,其对冷轧产品的冲压性能和鲜映性能等均有重要影响。冷轧带钢表面形貌的生成主要取决于两个方面,一是毛化工作辊在服役期内的表面形貌,二是工作辊与带钢之间的表面形貌复印机理。其中工作辊的表面形貌是一个动态变化的过程,在轧制压力的作用下,工作辊表面与带钢接触,并不断发生摩擦和磨损,导致工作辊表面形貌参数不断变化,并在复印机理的作用下,持

* 国家十二五科技支撑计划(2015BAF30B01)和国家自然科学基金(51404023, 51604024)资助项目。20190411 收到初稿,20190824 收到修改稿

续影响带钢的表面质量。因此,精确预测冷轧过程中工作辊表面形貌的演变过程对带钢表面形貌的精确控制至关重要^[1]。

受工业生产的连续稳定性要求,以及测量手段的限制,工作辊表面形貌的动态磨损过程无法在线获取。因此,现代仿真技术成为深入探究工作辊表面形貌动态磨损过程的主要手段。吴越等^[2]基于现场工作辊上机前和下机后的粗糙度实测数据,建立了工作辊表面粗糙度衰减规律模型。XU 等^[3-4]将轧辊表面形貌磨损的实验室模拟试验与现场测试数据相结合,建立了工作辊表面形貌演变的仿真模型。De MELLO 等^[5]研究了轧辊表面形貌和化学涂层对冷轧辊磨损特性的影响。KANG 等^[6]采用数理统计和试验研究相结合的方法,研究了板带轧制过程中三维表面形貌参数的变化。目前,工作辊表面形貌磨损模型多为基于工业现场实际工作辊表面形貌测试数据的数理统计而建立的半理论半经验模型,基于仿真分析对表面形貌参数演变过程的研究,特别是演变规律的研究还有待深入。

元胞自动机的建模方法自 20 世纪被国外学者提出以来,已被广泛地应用于自然科学、经济和军事等诸多领域,近年来在摩擦和磨损领域的应用也越来越多,并取得了丰硕成果。黄德武等^[7]基于移动元胞自动机方法,建立了描述细观非均匀材料破坏的动力学模型。GONG 等^[8]针对密封环的摩擦行为,提出了基于有限元与移动元胞自动机模型的多尺度数值仿真分析方法。MARINACK 等^[9]建立了基于格的元胞自动机模型,并研究了颗粒库艾特流的摩擦行为。POPOV 等^[10-11]基于移动元胞自动机方法,分别仿真研究了宏观和微观接触界面的动态磨损过程。DMITRIEV 等^[12-13]利用二维移动元胞自动机模型,在宏观和微观尺度研究了两个固体表面在接触过程中的摩擦和磨损行为。WAHLSTRÖM 等^[14-15]分别利用元胞自动机模型,研究了盘式制动器和刹车系统的接触界面状态和三维磨损问题。燕松山等^[16]结合摩擦学实验,采用元胞自动机方法建立了高温发汗自润滑材料的摩擦过程动态预测模型,并仿真分析了摩擦因数等因素的影响。ZHENG 等^[17]将元胞自动机模型应用于热轧研究领域,建立了介观尺度的元胞自动机模型,研究了带钢的奥氏体再结晶过程。张雍等^[18]将元胞自动机模型引入冷轧工作辊表面微观形貌的磨损仿真分析和研究,仿真结果兼具直观和形象的双重优势,但研究对象仍为以粗糙度为代表的二维表面轮廓,不能较好地再现工作辊表面形貌的三维空间特征。

因此,本文建立了基于元胞自动机的工作辊三

维表面形貌演变过程仿真分析模型,综合实际磨损现象和物理机制来模拟工作辊表面形貌的磨损过程,并基于工业现场工作辊三维表面形貌实测结果和实验室摩擦磨损实验对模型进行验证,研究成果为工业冷轧生产现场的工作辊表面形貌预测,以及带钢表面形貌的精准控制提供了良好基础。

1 毛化工作辊表面形貌的现场测试

为获得试验和仿真分析的初始数据,以及用以验证试验和仿真分析结果的参照数据,需要在实际板带冷轧工业生产现场,获取工作辊上机前和下机后的表面形貌原始数据。一方面由于工作辊质量较大,无法搬运到实验室进行三维表面形貌的测量;另一方面由于工作辊形状为圆柱形,难以在工业生产现场稳定放置三维表面形貌测量设备进行测量,因此一般利用便携式粗糙度仪对轧辊上机前和下机后的二维形貌进行测量。

测量工作在某钢厂五机架冷连轧机的备辊区进行,测量对象为 S5 机架经电火花毛化的高铬钢工作辊,轧辊长度 2 180 mm。采用 MarSurf M300C 接触式粗糙度仪分别对工作辊上机前后的表面二维形貌进行测量,测量过程中设置截止波长 $\lambda_c=2.5$ mm,扫描长度 $l_s=17.5$ mm,取样长度 $l_r=12.5$ mm。

由于测量过程中存在不可避免的异常波动产生的噪声干扰,首先对测量数据进行滤波处理,得到某工作辊上机前和下机后的表面形貌二维原始轮廓(P 轮廓)的高度数据 $z(x_k)$ 如图 1 所示,可以看出,工作辊表面轮廓存在着高度上的随机波动,并非光滑表面。

图 1 工作辊表面形貌 P 轮廓

2 工作辊表面形貌演变过程试验研究

2.1 试样仿制与轧辊试样三维表面形貌测量

为对本文拟建立的三维元胞自动机仿真模型进

行验证，并考虑到工业生产用轧辊三维表面形貌测量的限制，采用实验室摩擦磨损试验的方法获取工作辊三维形貌变化的验证数据。为此，首先需要制备试验中的轧辊和带钢试样。

根据现场工作辊的材质，工作辊试样选用相同的 9Cr2Mo 轧辊钢，由于采购的轧辊钢原料未经淬火处理，硬度明显偏低，故首先采用双液淬火的方式对其进行热处理^[4]。在试样仿制时，首先根据实验仪器对试样的尺寸要求，经过机加工获得工作辊的环形试样，然后基于图 1 中现场实测的工作辊上机前表面形貌参数，通过控制电火花机床毛化过程的电加工参数(通电时间、放电电流等)，对环形试样的外表面进行毛化处理，仿制出具有相似表面形貌的试样如图 2a 所示。通过便携式显微镜观察工作辊试样和现场实际工作辊的表面形貌，分别如图 2b 和图 2c 所示。可以看出，仿制试样与工作辊具有相似的表面，进一步利用接触式粗糙度仪对工作辊试样表面的二维形貌进行了测量(图 3)，可以看出，图 3 与图 1a 真实工作辊的二维表面 P 轮廓相似，具体测得的二维表面形貌参数如轮廓算数平均偏差 R_a 、轮廓均方根偏差 R_q 和轮廓微观不平度的平均间距 R_{sm} 如表 1 所示，偏差在 6% 以内。

(a) 工作辊环形试样 (b) 工作辊试样表面形貌 (c) 工作辊表面形貌
图 2 工作辊仿制试样及表面形貌

图 3 工作辊试样表面形貌 P 轮廓

表 1 毛化工作辊及试样表面形貌二维参数

参数	工作辊表面参数/μm	试样表面参数/μm	误差(%)
R_a	3.142	3.096	1.46
R_q	3.389	3.316	2.15
R_{sm}	88	83	5.68

为了后续试验和仿真过程中对轧辊表面三维形貌变化过程的分析研究，必须对工作辊试样的三维表面形貌进行测量与表征，因此在实验室利用白光干涉仪(UP-WLI)对试样的三维表面形貌进行精确测量作为仿真过程中工作辊上机前的表面形貌。

为了保证磨损前、后测量数据的对应性，沿环形试样表面周向均匀选取四个点并采用刻线的方式进行标记，如图 4a 中右侧环形试样所示，并利用白光干涉仪对四个点的三维表面形貌进行定点检测(图 4b)，测量得到的某点三维表面形貌如图 5 所示。

(a) 工作辊试样与带钢试样 (b) 工作辊试样三维表面形貌测量

图 4 仿制试样及表面形貌测量

图 5 工作辊仿制试样的三维表面形貌

除工作辊环形试样外，还需要加工带钢块形试样。选择冷轧现场典型轧制钢种 Q345 热轧中厚板作为带钢试样的材料，并对材料进行酸洗，可以一方面保证实验材料与现场实际所轧带钢的性能接近，另一方也可满足试验设备对试样的厚度要求。加工完成的块形试样如图 4a 中左侧所示。

2.2 工作辊表面形貌演变过程的试验研究

利用 MRH-3 高速环块磨损试验机进行摩擦磨损试验。为了保证试验过程中轧制界面的摩擦磨损状态尽可能反映工业生产现场的轧制过程，试验中的试验力、试验转速和试验转数等参数，均以现场实际轧制工艺参数进行计算，并且在试验中加注冷轧乳化液作为试验润滑剂。在生产现场获得工作辊轧制过程中的主要参数如表 2 所示。

表 2 材料特性及轧制工艺参数

对象	参数	数值	参数	数值
带钢	弹性模量/GPa	201	泊松比	0.28
	入口厚度/mm	0.7	宽度/mm	1000
工作辊	弹性模量/GPa	205	泊松比	0.29
	轧制总里程/km	315	轧制时间/h	8.5
润滑剂	密度/(kg/m ³)	880	动力粘度/Pa·s	0.042
工艺参数	前张应力/MPa	27.9	后张应力/MPa	141.5
	压下量/mm	0.007	轧制速度/(m/s)	23.6

为获得试验过程中的试验力, 参考文献[4]中的方法, 计算轧制界面弹性区的平均单位压力 p_0 , 采用赫兹接触公式计算磨损试验中接触区的单位接触压力, 进而可以得到实验过程中应设置的试验力 F 如式(1), 基于现场实测数据计算得到所需的试验力为 156 N。

$$F = \frac{\pi p_0^2 r_h b}{E^*} \quad (1)$$

式中, r_h 为环试件的半径; b 为环块摩擦副的接触宽度; E^* 为等效弹性模量, 由式(2)计算得到。

$$E^* = \left(\frac{1 - \nu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \nu_2^2}{E_2} \right)^{-1} \quad (2)$$

式中, E_1 , ν_1 和 E_2 , ν_2 分别为轧辊和带钢的弹性模量和泊松比。

再根据式(3)计算轧制过程中的相对滑动速度 v_s 。

$$v_s = v_x \sqrt{1 + \frac{1}{4} T_h'(x)^2} - v_r \quad (3)$$

式中, v_x 为轧件的纵向流动速度, 根据秒流量相等原理由式(4)获得; $T_h(x)$ 为式(5)所示变形区内轧件厚度分布函数 $T_h(x)$ 的导数; v_r 为轧制速度。

$$v_x = \frac{v_1 T_{h1}}{T_h(x)} \quad (4)$$

式中, $v_1 = (1 + S_h)$; S_h 为前滑系数, 由式(6)计算得到; T_{h1} 为轧件出口厚度。

$$T_h(x) = T_{h1} + (T_{h0} - T_{h1}) \left(\frac{x}{l} - 1 \right)^2 \quad (5)$$

式中, T_{h0} 为轧件入口厚度; l 为轧制变形区长度; x 为沿轧制方向距轧件出口的距离, 由式(7)计算得到。

$$S_h = \left(1 - \frac{T_{h1}}{2R'} \right) \frac{T_{h0} - T_{h1}}{T_{h0}} \left[1 - \frac{1}{2\mu} \left(\frac{\sqrt{T_{h0} - T_{h1}}}{R'} - \frac{Q_1 - Q_0}{P} \right) \right]^2 \quad (6)$$

式中, R' 为工作辊压扁半径, 可利用式(8)所示的 Hitchcock 公式计算; μ 为摩擦因数; Q_1 、 Q_0 分别为前、后张力; P 为总轧制力。

$$x = l + R \sin \left(\omega t - \arcsin \left(\frac{l}{R} \right) \right) \quad (7)$$

式中, ω 为工作辊的角速度; t 为时间。

$$R' = R \left[1 + \frac{16(1 - \nu_1^2)P}{\pi E_1 B (T_{h0} - T_{h1})} \right] \quad (8)$$

式中, R 为工作辊的半径; B 为带钢宽度。

代入工业现场的实际参数, 由式(3)~(8)计算可以得到 $v_s = 1.18$ m/s, 进一步由式(9)可以计算并设定

试验机的转速 n 为 458 r/min。

$$n = 60v_s / 2\pi r_h \quad (9)$$

最后对速度进行积分得到相对滑动位移为:

$$l_x = \int_0^{\arcsin \left(\frac{l}{R'} \right)} \frac{1}{w} v_s(t) dt \quad (10)$$

利用式(1)~(8)和式(10)可计算得到 $l_x = 0.279$ mm, 根据表 2 中的轧制总里程 L , 可进一步由式(11)计算并设定试验过程总转数 $N = 583\ 144$ 。

$$N = \frac{L l_x}{2\pi r_h R' \arcsin \left(\frac{l}{R'} \right)} \quad (11)$$

式中, L 为轧制总里程。

利用白光干涉仪对完成摩擦磨损试验的环形样件进行三维表面形貌的测量, 测得的表面形貌如图 6 所示。

图 6 工作辊试样磨损后的三维表面形貌

对工作辊试样的二维磨损形貌进行测量, 如图 7 所示, 与图 1b 真实工作辊磨损后的二维表面 P 轮廓相似, 两个表面的二维粗糙度参数如表 3 所示。由表 1 和表 3 可知, 试验中的工作辊试样在磨损前后的二维表面形貌与工业现场实际工作辊上机前和下机后的二维表面形貌相关参数误差均在 7% 以下, 证明了磨损试验结果的有效性和可靠性。

图 7 试样磨损表面形貌 P 轮廓

表 3 毛化工作辊及试样磨损后表面粗糙度参数

参数	工作辊表面参数/ μm	试样表面参数/ μm	误差(%)
R_a	2.378	2.312	2.78
R_q	2.733	2.787	1.98
R_{sm}	65	61	6.15

3 工作辊三维表面形貌演变的元胞自动机模型

3.1 元胞自动机模型的建立

3.1.1 工作辊表面形貌的几何模型。

利用 Matlab 软件, 对测量得到的工作辊试样三维表面形貌点云数据进行数字化处理, 按照图 8 所示流程逆向构建工作辊的初始三维表面形貌模型。

图 8 工作辊初始形貌几何模型的构建流程

3.1.2 工作辊表面形貌模型的离散化。

研究对象为冷连轧 S5 机架工作辊表面形貌的演变规律, 根据现场实测的电火花毛化工作辊表面形貌, 认为其具有随机性和均一性的分布特征, 根据轧制过程中的磨损机理, 可假设其磨损表面具有相似的磨损规律, 因此在磨损仿真过程中选取一小部分接触面进行建模, 并以此反映整个工作辊的表面形貌情况。

由于工作辊的粗糙度相对较大, 带钢的粗糙度相对较小, 仿真中假设带钢表面光滑, 从而将两个粗糙表面的接触行为简化为等效粗糙表面与理想光滑表面的接触。

为了表征试样表面形貌高度在磨损过程中的变化过程, 在传统二维元胞模型的基础上对每一个元胞引入一个高度变量, 将第(1)步构建的三维表面形貌模型直接输入后续元胞自动机计算模型即可进行计算。将图 5 测量得到的表面形貌结果输入元胞自动机模型, 建立了包含 640×512 个元胞的元胞网格, 并得到每一个元胞的高度变量。

结合轧制过程中变形区的轧辊和带钢所处的工作状态, 在仿真模型中定义了基体元胞、磨粒元胞和润滑剂元胞三种元胞类型, 如图 9 所示。其中黑色、

图 9 工作辊表面形貌的离散模型

灰色和白色部分分别为基体元胞、磨粒元胞和润滑剂元胞, 基体元胞和磨粒元胞之间可以部分转化。

3.1.3 工作辊表面形貌磨损的计算

在轧制过程中, 微凸体之间的相互接触会产生黏着磨损, 并进而引发磨粒磨损, 在两种磨损类型的共同作用下, 形成工作辊表面形貌磨损量, 因此分别对黏着磨损和磨粒磨损进行计算。

(1) 黏着磨损演化规则。

板带冷轧的轧制界面处于混合润滑状态, 轧制压力由微凸体接触和动力润滑油膜共同承担。在元胞自动机模型中, 元胞相当于轧制界面的微凸体, 任意元胞 i 在 t 时间步的接触压力 $P_{i,t}$ 和接触面积 $A_{i,t}$ 可根据弹塑性接触理论^[19]分别计算得到。

1) 当只发生弹性变形时, 有

$$P_{i,t} = \frac{4E^*}{3\pi} \left(\frac{\delta_{i,t}}{r} \right)^{1/2} \quad (12)$$

$$A_{i,t} = \pi \delta_{i,t} r \quad (13)$$

式中, $\delta_{i,t}$ 为元胞 i 在 t 时刻的变形量; r 为元胞的等效曲率半径。

2) 当发生弹塑性变形时, 有

$$P_{i,t} = H \left(1 - 0.6 \frac{\ln \delta_2 - \ln \delta_{i,t}}{\ln \delta_2 - \ln \delta_1} \right) \quad (14)$$

$$A_{i,t} = \pi \delta_{i,t} r \left[1 - 2 \left(\frac{\delta_{i,t} - \delta_1}{\delta_2 - \delta_1} \right)^3 + 3 \left(\frac{\delta_{i,t} - \delta_1}{\delta_2 - \delta_1} \right)^2 \right] \quad (15)$$

$$\delta_1 = (0.92H / E^*)^2 r \quad (16)$$

$$\delta_2 = 54\delta_1 \quad (17)$$

式中, H 为带钢材料的硬度; δ_1 和 δ_2 分别为微凸体开始发生塑性变形和完全塑性变形时的变形量。

3) 当完全塑性变形时, 有

$$P_{i,t} = H \quad (18)$$

$$A_{i,t} = 2\pi \delta_{i,t} r \quad (19)$$

设定式(12)中的变形量 $\delta_{i,t}$ 并进行迭代计算, 直至发生接触的 n 个微凸体上法向载荷之和等于外加载荷 P_f

$$P_f = \sum_{i=1}^n A_{i,t} P_{i,t} \quad (20)$$

计算过程如图 10 所示。

参照宏观磨损的分析方法, 对微凸体的磨损计算采用 Archard 磨损理论, 则可由式(21)得到微凸体磨损高度 Δh_1

$$\Delta h_1 = \frac{k P_{i,t} l_x}{H_r} \quad (21)$$

式中, k 为磨损系数; l_x 为相对位移; H_r 为工作辊的硬度。

图10 接触压力计算流程图

元胞高度减去磨损高度即可得到新的元胞高度。

(2) 磨粒磨损演化规则。

磨粒磨损主要包括二体磨损和三体磨损，其中二体磨损发生在接触间隙大于或等于磨粒直径的元胞上，磨粒受到的外载荷为润滑液的动压力；三体磨损发生在接触间隙小于磨粒直径的元胞上，磨粒的数量为接触面积的函数。而对于已经发生接触的微凸体，磨粒以一定的概率被压入基体，此种情况下，微凸体的高度不发生变化。

由于工作辊表面的磨粒磨损过程具有不确定性和随机性的特点，所以无法通过确定性模型来描述磨粒磨损过程，本模型采用统计学上的 Monte Carlo 方法随机选取磨粒的粒径，通过式(22)的反函数法，将伪随机数转换为正态分布的随机变量。

$$\varphi = \sqrt{2}\sigma_N (\ln \alpha)^{1/2} \cos 2\pi\beta - \mu_N \quad (22)$$

式中， φ 为服从正态分布 $N(\mu_N, \sigma_N^2)$ 的随机变量； α 、 β 为(0,1)之间均匀分布的随机数。

在接触面上的磨粒位置采用“打靶法”随机生成，随机磨粒只对其正下方的基体产生磨损，磨粒磨损的磨损量计算应用脆性断裂机制^[20]，这主要是考虑电火花毛化工作辊的表面具有硬度高和韧性低的特点，因此微观脆性断裂是造成磨损的主要原因。单位滑动距离的线磨损量 $\dot{w}_{l/s}$ 为

$$\dot{w}_{l/s} = K_1 p_i^5 d_i^{-1} K_c^{-3} H_r^{-1} \quad (23)$$

式中， K_1 为磨粒的磨损系数； p_i 为磨粒所受应力； d_i 为磨粒的粒径， K_c 为材料的断裂韧性。

进而可以得到滑动距离 l_x 下的磨粒磨损高度 Δh_2

$$\Delta h_2 = \frac{\dot{w}_{l/s} l_x}{A_{si}} \quad (24)$$

式中， A_{si} 为元胞的面积。

3.1.4 边界条件的设定

理论上，领域空间的边界是无限延伸的，但在

该模型的实际求解过程中，受到几何含义和计算能力的双重限制，需要对边界条件进行设定。

考虑到电火花毛化工作辊表面形貌所具有的随机性和均一性特征，将建模过程中所选取的一小部分接触面进行复制拓展，即可得到整个工作辊的表面形貌，因此该元胞自动机模型的边界条件设定为周期性边界。

3.1.5 模型计算流程

在计算过程中，将工作辊整个服役期分为若干个时间步，单个时间步内的工作辊的表面形貌和润滑状态保持不变，每一个时间步完成一次计算和数据更新，直至计算到工作辊服役期结束为止。

根据上述演化规则建立计算模型流程如图 11 所示。

图11 元胞自动机计算流程图

3.2 元胞自动机模型的验证

由于难以在工业轧制生产现场测量轧辊三维形貌，所以以磨损试验所获得的轧辊磨损后三维表面形貌对元胞自动机模型的有效性进行验证。

利用建立的元胞自动机模型，以表 2 所示的实际生产现场工艺参数为基础进行了仿真计算分析，计算得到的磨损模拟三维表面形貌如图 12 所示，可以看出，图 12 与图 6 所示的轧制过程磨损试验所获得的环件表面形貌极为一致，从磨损形貌可以看出表面粗糙峰顶部分区域磨损严重，同时，出现了新的更深的凹谷。

图 12 工作辊三维表面形貌仿真分析结果

为了定量分析两个三维形貌之间的相似性, 分别对两个表面形貌的三维评价参数表面算数平均偏差 S_a 、表面均方根偏差 S_q 、表面偏斜度 S_{sk} 、表面峭度 S_{ku} 进行计算, 如表 4 所示。可以看出, 模拟和磨损试验所得的表面形貌参数基本一致, 其中偏斜度敏感程度较高, 对比结果证实了元胞自动机模型的有效性和准确性

表 4 三维表面形貌参数对比

参数	试验磨损表面 / μm	模拟磨损表面/ μm	相对误差绝对值(%)
S_a	2.318	2.225	4.01
S_q	2.823	2.735	3.11
S_{sk}	-0.335	-0.387	15.5
S_{ku}	4.056	4.278	5.47

4 基于元胞自动机模型的工作辊表面形貌演变过程研究

以冷轧工作辊为研究对象, 利用所建立的表面形貌演变模型, 对冷轧轧制全过程中的幅度特性参数、空间特性参数、综合特性参数和功能特性参数等工作辊表面形貌特征参数变化规律进行分析和讨论。

4.1 幅度参数

工作辊表面形貌在服役期间的幅度参数变化如图 13 所示, 幅度参数综合反映了表面形貌在竖直方向上发生的高度变化, 包括工作辊表面算数平均偏差 S_a 、表面均方根偏差 S_q 、表面偏斜度 S_{sk} 、表面峭度 S_{ku} 、表面最大峰高 S_p 、表面最低的谷深 S_v 。

图 13 工作辊磨损表面三维粗糙度幅度参数的变化

可以看出, 在轧制过程中, S_a 、 S_q 、 S_p 均呈现出指数型下降趋势, 即随着轧制过程的进行, 下降速率逐渐减小, 在轧制后期趋于稳定, 其中 S_a 和 S_q 两个参数尤为明显, 且变化规律基本一致, 这说明工作辊表面微凸体的高度在磨损过程中逐渐减小, 且越来越趋于一致。 S_{sk} 在变化过程中由正值下降为负值, 反应工作辊粗糙表面的凸台在磨损过程中逐渐被磨平, 且凹谷数相对增加, 表面基准面相对升高, 造成形貌高度分布低于基准面的情况越来越显著; 轧制中后期 S_{sk} 的变化明显趋缓, 说明表面凸台的磨损逐渐变慢。 S_{ku} 呈现出指数型上升趋势, 由小于 3 逐渐增大, 最终接近 4.5, 说明相对于正态分布, 表面形貌的分布呈现过度的峰度。在 S_p 逐渐降低的同时, S_v 的绝对值整体也在增大, 说明在磨损过程中, 工作辊的凹谷处虽然不与带钢的粗糙表面发生接触, 但由于磨粒等的作用, 凹谷也发生了磨损。

4.2 空间参数

工作辊表面形貌在服役期间的空间参数变化如图 14 所示, 空间参数反映了表面形貌在水平方向

图 14 工作辊磨损表面三维粗糙度幅度参数的变化

分布特征,对表面的润滑和耐磨性能有重要影响,包括工作辊表面形貌峰顶密度 S_{ds} ,最速衰减自相关长度 S_{al} ,表面纹理纵横比 S_{tr} 等。

可以看出, S_{ds} 呈现指数型上升,初期增大明显,后期则趋于平稳,说明前期磨损过程造成凸峰数量增加。 S_{al} 近似线性衰减,说明表面峰值分布越来越密集。 S_{tr} 呈现上升趋势,但总体变化幅度不大,反映表面的纹理方向越发不明显,中后期趋于平稳。

4.3 综合参数

工作辊表面形貌在服役期间的综合参数变化如图15所示,综合参数是影响表面摩擦性能的重要因素,包括工作辊表面算术平均顶点曲率 S_{sc} 、表面形貌斜率均方根 S_{dq} 和表面展开界面面积比率 S_{dr} 。

图15 工作辊磨损表面三维粗糙度综合参数的变化

可以看出,三个参数都呈现上升趋势,总体反映出粗糙表面的表面积在逐渐增加。其中 S_{sc} 逐渐增大反映出粗糙接触点较尖锐; S_{dq} 逐渐增大反映出表面纹理越来越稠密; S_{dr} 逐渐增大反映出有效表面积增加,表面的黏着性能增加。

4.4 功能参数

工作辊表面形貌在服役期间的功能参数变化如图16所示,本文选择表面支承指数 S_{bi} 进行分析。

图16 工作辊磨损表面三维粗糙度功能参数 S_{bi} 的变化

可以看出, S_{bi} 也呈现指数型的上升趋势,反映在工作辊服役初期,随着粗糙峰的剧烈磨损,工作辊表面形貌的承载性能明显增强,并在工作辊磨损过程中逐渐趋于稳定。

5 结论

(1) 基于元胞自动机理论,并利用 Archard 磨损模型、脆性断裂机制、Monte Carlo 方法和“打靶法”等建立了基于元胞自动机理论的冷轧工作辊三维表面形貌动态演变过程仿真分析模型,结合现场测试和实验室试验验证了模型的有效性。

(2) 利用模型对冷轧过程中工作辊表面形貌表征参数的变化规律进行了研究,分别分析了轧制过程中工作辊表面的幅度特性参数、空间特性参数、综合特性参数和功能特性参数的变化规律。

(3) 轧制过程中工作辊表面的三维形貌参数多呈现出指数型的下降或上升的规律,体现了轧制过程中表面形貌变化速率的变化。

(4) 基于元胞自动机的三维表面形貌演变过程研究,更为清楚地展示了轧制过程中轧辊三维表面形貌的变化过程,为进一步研究和控制工作辊表面形貌的磨损,以在轧制过程中更好地进行带钢表面形貌的控制提供了理论基础。

参 考 文 献

- [1] 张清东,张勃洋,李瑞,等. 钢板微观表面质量控制理论与技术研究进展[J]. 机械工程学报, 2016, 52(10): 32-45.
ZHANG Qingdong, ZHANG Boyang, LI Rui, et al. Advances in theory and technology for microscopic surface quality control of steel strip[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2016, 52(10): 32-45.
- [2] 吴越,张清东,刘军,等. 带钢冷轧机工作辊表面粗糙度实测研究[J]. 机械工程学报, 2003, 39(11): 90-94.
WU Yue, ZHANG Qingdong, LIU Jun, et al. Test and statistical research of surface roughness of work roll in cold tandem mills[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2003, 39(11): 90-94.
- [3] XU Dong, ZHANG Jie, LI Hongbo, et al. Research on surface topography wear of textured work roll in cold rolling[J]. Industrial Lubrication and Tribology, 2015, 67(3): 269-275.
- [4] 尤媛,李洪波,夏春雨,等. 冷轧毛化工作辊表面粗糙度衰减过程的试验与数学模型研究[J]. 机械工程学报, 2018, 54(12): 173-183.
YOU Yuan, LI Hongbo, XIA Chunyu, et al. Experimental and mathematical model study of attenuation process of the surface roughness of textured work rolls during cold rolling[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018, 54(12): 173-183.
- [5] De MELLO J D B, Jr GONÇALVES J L, COSTA H L.

- Influence of surface texturing and hard chromium coating on the wear of steels used in cold rolling mill rolls[J]. *Wear*, 2013, 302(1-2): 1295-1309.
- [6] KARAM K, CHRIS P, LAWRENCE W. Analysis of changes in 3D surface texture anisotropy ratio parameter and friction during sheet rolling campaigns[J]. *Wear*, 2008, 264(5-6): 434-438.
- [7] 黄德武, 陈克. 模拟材料损伤的移动元胞自动机法[J]. 南京理工大学学报, 2005, 29(3): 292-295.
HUANG Dewu, CHEN Ke. Movable cellular automata method for simulation on materials damage[J]. *Journal of Nanjing University of Science and Technology*, 2005, 29(3): 292-295.
- [8] GONG Ran, CHEN Yongliang, CHE Huajun, et al. Multiscale simulation of sliding contacts between two rough sealing surfaces[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*, 2014, 228(3): 339-351.
- [9] MARTIN C, MARINACK J R, FRED H C. The inclusion of friction in lattice-based cellular automata modeling of granular flows[J]. *Journal of Tribology*, 2011, 133(3): 031302.
- [10] POPOV V L, PSAKHIE S G. Numerical simulation methods in tribology[J]. *Tribology International*, 2007, 40(6): 916-923.
- [11] POPOV V L, PSAKHIE S G. Physical nature and properties of dynamic surface layers in friction[J]. *Tribology International*, 2006, 39(5): 426-430.
- [12] DMITRIEV A I, SCHARGOTT M, POPOV V L. Direct modelling of surface topography development in a micro-contact with the movable cellular automata method[J]. *Wear*, 2010, 268(7-8): 877-885.
- [13] DMITRIEV A I, POPOV V L, PSAKHIE S G. Simulation of surface topography with the method of movable cellular automata[J]. *Tribology International*, 2006, 39(5): 444-449.
- [14] WAHLSTRÖM J, SÖDERBERG A, OLOFSSON U. A cellular automaton approach to numerically simulate the contact situation in disc brakes[J]. *Tribology Letters*, 2011, 42(3): 253-262.
- [15] MÜLLER M, OSTERMEYER G P. A Cellular Automaton model to describe the three-dimensional friction and wear mechanism of brake systems[J]. *Wear*, 2007, 263(7-12): 1175-1188.
- [16] 燕松山, 刘佐民. 高温发汗自润滑材料摩擦过程动态特征的元胞自动机模型[J]. 中国机械工程, 2011, 22(10): 1222-1225, 1231.
YAN Songshan, LIU Zuomin. A cellular automaton model for friction process dynamic characteristics of gland self-lubricating composite[J]. *China Mechanical Engineering*, 2011, 22(10): 1222-1225, 1231.
- [17] ZHENG Chengwu, XIAO Namin, LI Dinzhong, et al. Microstructure prediction of the austenite recrystallization during multi-pass steel strip hot rolling: A cellular automaton modeling[J]. *Computational Materials Science*, 2008, 44(2): 507-514.
- [18] 张雍, 张清东, 李瑞, 等. 带钢冷轧机工作辊表面轧制磨损形貌的模拟仿真[J]. 中国表面工程, 2015, 28(3): 114-121.
ZHANG Yong, ZHANG Qingdong, LI Rui, et al. Simulation of the rolling-wear microtopograph of workingroll surface during strip cold rolling[J]. *China Surface Engineering*, 2015, 28(3): 114-121.
- [19] HASSAN Z, FRANCOIS S. Rough surfaces and elasto-plastic contacts[J]. *Comptes Rendus Sciences-Series IV-Physics*, 2001, 2(5): 709-715.
- [20] ZUM G K H. Wear by hard particles[J]. *Tribology International*, 1998, 31(10): 587-596.

作者简介: 李洪波(通信作者), 男, 1982 年出生, 副教授, 硕士研究生导师。主要研究方向为板带轧制过程中的板形控制和表面形貌控制等。
E-mail: lihongbo@ustb.edu.cn