绿色低碳

绿色无酸除鳞技术的实验分析及机理研究

王松[1],王尚[2],郭彩虹[1],王文杰[3]
(1. 中冶京诚工程技术有限公司,北京 100176; 2. 北京科技职业大学,
北京 100176; 3. 鞍钢股份有限公司热轧带钢厂,辽宁 鞍山 114021)

摘要: 通过系统性实验,对湿式抛丸除鳞后带钢的表面微观形貌、粗糙度、加工硬化程度及磁性等核心参数进行精准检测,实验结果发现带钢表面没有氧化物的残存、钢砂没有嵌入带钢基体,并且除鳞后的带钢表面与未除鳞前的带钢表面状态较为一致,充分证实该技术能够赋予带钢优异的表面质量。此外,基于不同丸粒直径与速度的多元组合,利用有限元仿真对除鳞过程展开深入剖析,揭示了湿式抛丸除鳞的内在机理,发现当钢砂粒径D=0.6mm,抛丸速度v=38.10 m/s时,除鳞效果最优。研究成果为无酸除鳞技术在实际生产中的优化应用提供了重要理论依据与技术指导。

关键词: 无酸;除鳞;形貌;粗糙度;有限元仿真
中图分类号: TG335 **文献标志码:** A **文章编号:** 1006-4613(2026)01-0032-07
DOI:10.3969/j.issn.1006-4613. 2026. 01. 004

Experimental Study and Mechanistic Analysis of Green Acid-free Descaling Technology

WANG Song[1], WANG Shang[2], GUO Caihong[1], WANG Wenjie[3]
(1. Capital Engineering & Research Incorporation Limited, Beijing 100176, China;
2. Beijing Polytechnic University, Beijing 100176, China; 3. Hot Rolled Strip Steel Mill of Angang Steel Co., Ltd., Anshan 114021, Liaoning, China)

Abstract: Precise detection was conducted on core parameters such as the surface micro-morphology, roughness, work-hardening degree, and magnetism of the strip steel after wet shot blasting descaling through systematic experiments. The results showed that there was no residual oxide on the strip steel surface, and the steel grit was not embeded into the strip steel substrate. Moreover, the surface state of the strip steel after descaling was quite consistent with that before descaling, which fully confirmed that this technology could endow the strip steel with excellent surface quality. In addition, based on the multi-combinations of different shot diameters and velocities, in-depth analysis of the descaling process was carried out using finite element simulation, revealing the internal mechanism of wet shot blasting descaling. The optimal descaling effect was achieved with a steel shot particle size (D) of 0.6 mm and a shot blasting speed (v) of 38.10 m/s. These findings provided important theoretical basis and technical guidance for the optimized application of acid-free descaling technology in actual production.

Key words: acid-free; descaling; morphology; roughness; finite element simulation

在热轧过程中,带钢在高温下轧制和卷取,铁原子与空气中的氧气发生剧烈氧化反应,生成铁的氧化物。带钢表面的氧化铁皮主要由三种不同性质的物质组成:最内层为与基体紧贴的

王松,硕士,高级工程师,2008年毕业于北京科技大学机械设计及理论专业。E-mail:wangsong@ceri.com.cn

FeO，这种物质是具有天然最大空隙率的氯化钠型离子晶体；中间层为相对较硬且致密的Fe_3O_4，这种物质是具有磁性的黑色晶体，离子间的排列结构与尖晶石相仿，较致密，相比FeO难溶于酸；而最外层为与大气直接接触的Fe_2O_3，它是一种呈柱状结晶、化学性质稳定且难以溶于酸的物质[1]。

在进入冷轧加工前，热轧带钢一般需要去除这些氧化铁皮。目前，对于普通碳钢材质的热轧带钢，常规的去除氧化铁皮的技术为盐酸化学处理工艺。尽管这种化学酸洗工艺相对成熟，但其带来的酸雾和废酸排放对环境造成了严重的污染和破坏[2]。

为了解决环境这一问题，湿式抛丸除鳞工艺作为一种相对成熟的环保型无酸除鳞技术，正逐渐得到广泛应用。该工艺通过将钢砂和水混合，利用高速抛射的钢砂冲击带钢表面，实现氧化铁皮的去除。目前，国内外已有多条采用此技术的生产线投入使用[3-5]。其中，由中冶京诚工程技术有限公司总承包的某钢厂无酸除鳞生产线，设计年产量达30万t，自2019年投产以来，生产的带钢表面质量优异，展现出该工艺在实际应用中的良好效果。然而，相较于传统的化学酸洗工艺，当前针对湿式抛丸除鳞工艺的研究，在带钢处理后表面的微观形貌、粗糙度及表面加工硬化等关键指标上，仍缺乏深入且明确的系统性分析。这些指标对于评估带钢的后续加工性能和产品质量具有重要意义。因此，本研究对经过湿式抛丸除鳞处理后的带钢进行了系统的实验检测，全面分析其表面特性。同时，对抛丸除鳞的机理性开展深入的研究，旨在揭示该工艺的内在作用机制。这些研究将为无酸除鳞生产工艺的进一步改进和优化提供坚实的理论支撑，进而推动钢铁生产行业向更加低碳、绿色、高效的方向发展。

1 带钢表面质量的实验检测研究

1.1 微观形貌检测

从无酸除鳞生产线现场取样，利用激光扫描共聚焦显微镜，对试样中部区域进行激光扫描共聚焦观测，获取了试样480倍下的二维与三维微观形貌观测图像，二维微观形貌如图1所示，三维微观形貌如图2所示。

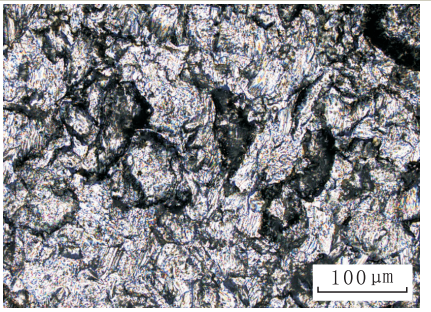


图1 二维微观形貌

Fig. 1 2D Microscopic Morphology

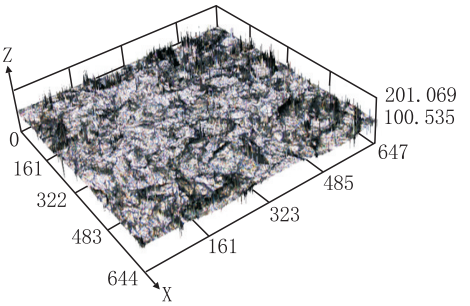


图2 三维微观形貌

Fig. 2 3D Microscopic Morphology

由图1可知，亮白色区域为裸露的钢基体，这说明除鳞后带钢表面鳞层绝大部分被清理掉。由图2可知，除鳞后的钢表面微观形貌犹如山地，凹凸不平且呈无规律性，这是浆料中呈离散体状的钢砂冲撞与冲刷位置的随机性导致的。从图1和图2来看，除鳞后带钢基体表面均没有离散钢砂嵌入。

1.2 表面粗糙度检测

对除鳞后的试样进行了线切割，线切割为10 mm×10 mm小试样，采用激光扫描共聚焦显微镜，对小试样中部区域进行测试，获取其微观形貌及对应的线粗糙度、面粗糙度数据，线粗糙度测定试样二维微观形貌如图3所示，其中红色线为线粗糙度Ra测定的样线。线粗糙度测定试样三维微观形貌如图4所示。

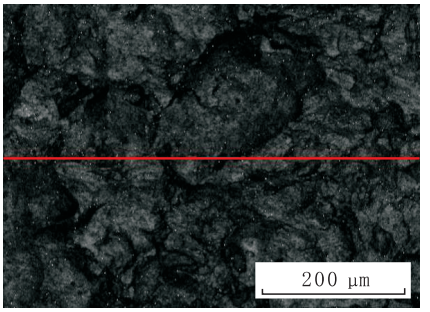


图3 线粗糙度测定试样二维微观形貌

Fig. 3 2D Microscopic Morphology of the Test Specimen by Line Roughness Measurement

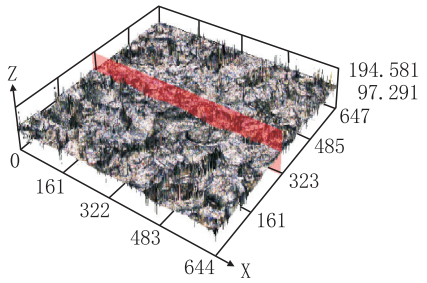


图4 线粗糙度测定试样三维微观形貌
Fig. 4 3D Microscopic Morphology of the Test Specimen by Line Roughness Measurement

由图3、图4测定出试样线长度(x、y轴最大数值)为640 μm,根据粗糙度测定规定,波长λ_c要小于试样线长度的0.2倍,因此在本次测量中设定λ_c=80 μm。测定设备根据数据自动扫描,计算出图3所示线粗糙度数据为Ra=2.301 μm,峰计数为n=3[6]。

面粗糙度数据比线粗糙度数据更能反映试样的微观形貌特征。针对同一区域进行面粗糙度Sa数值测定,测定区域为640 μm×640 μm,面粗糙度测定峰值图见图5,设定波长λ_c=80 μm。测定设备根据数据自动扫描,计算出面粗糙度的数据为Sa=1.250 μm。根据测量结果显示,面粗糙度比线粗糙度数据小,这说明带钢经过除鳞后的整体平整度较好。

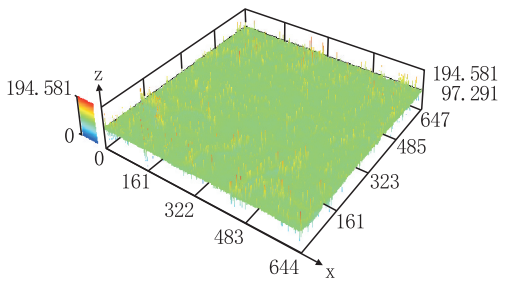


图5 面粗糙度测定峰值图
Fig. 5 Peak Diagram Measurement by Surface Roughness

1.3 表面残留物检测

为了明确评估除鳞后带钢试样表面微观形貌与元素组成的变化,进而验证除鳞工艺的有效性,利用能量色散光谱仪(能谱仪/EDS),对除鳞后带钢试样表面微观形貌与元素情况进行了检测[7]。

在试样表面任意选择了2个区域进行了观测。对第一个区域放大500倍观测其的二维形貌,试样第一观测区500倍放大图见图6。

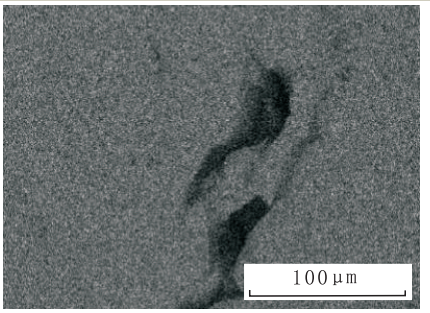


图6 试样第一观测区500倍放大图
Fig. 6 Image of the First Observation Area for the Test Specimen at 500× Magnificaton

对全区域进行了元素扫描,第一观测区内能量色散图见图7,由图7可知,试样表面只有碳元素(质量分数为4.11%)与铁元素(质量分数为95.89%),氧元素含量为零,初步判定试样表面无鳞皮残留。

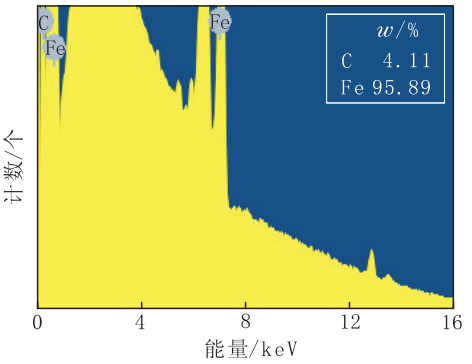


图7 第一观测区内能量色散图
Fig. 7 Energy Dispersive Diagram in the First Observation Area

对局部区域进行进一步放大,在第二个区域内进行微观形貌与残留物检测。第二观测区的2 000倍二维微观形貌如图8所示。并对图8中的高亮部进行能谱扫描,第二观测区的2 000倍能量色散观测图如图9所示。

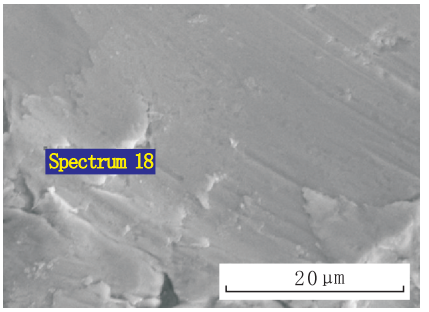


图8 第二观测区的2 000倍二维微观形貌
Fig. 8 2D Microscopic Morphology of the Second Observation Area at 2 000× Magnification

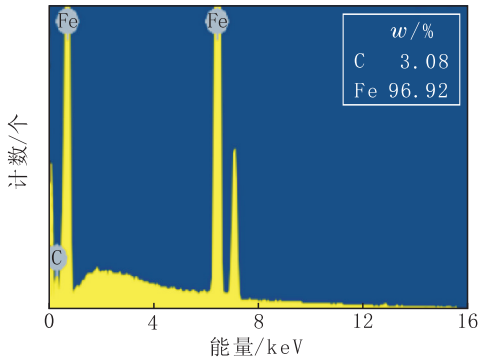


图9 第二观测区的2 000倍能量色散观测图

Fig. 9 Energy Dispersive Observation Diagram of the Second Observation Area at 2 000× Magnification

由图9可知，第二观测区（点扫）试样表面同样只有碳元素（质量分数为3.08%）与铁元素（质量分数为96.92%），没有发现氧元素。说明无酸除鳞后试样表面没有氧元素残留，即没有鳞层残留。

考虑到无酸除鳞产线上的钢砂是不停息地循环利用的，其表面不可避免地与空气接触，如果有钢砂嵌入到基体中，那么钢砂的表面元素能谱中必然能测定出氧元素。因此，从能谱角度也可以说明，无酸除鳞后的试样表面没有钢砂嵌入式残留[8]。这为除鳞工艺的稳定性和有效性提供了有力的数据支持。

1.4 表面弱磁性检测

采用综合物性测量系统（PPMS），对试样表面的磁性强度进行了测试。测试结束后，得到了试样磁滞回线，试样磁滞回线如图10所示。在试样周围，从零开始逐渐增加磁化场的磁场强度直至达到磁饱和状态，随后逐渐减小磁性，若磁滞回线几乎完全按照原有路径返回，这说明试样并没有发生磁性改变，即没有被磁化[9]。由图10可知，当外加磁场H为零时，磁化强度B的数值为零，表明初始状态磁场为零，即试样在无酸除鳞后的表面，并没有被磁化（无磁场）。这说明带钢在钢砂混合浆料持续性冲击除鳞后表面并没有发生磁化行为。

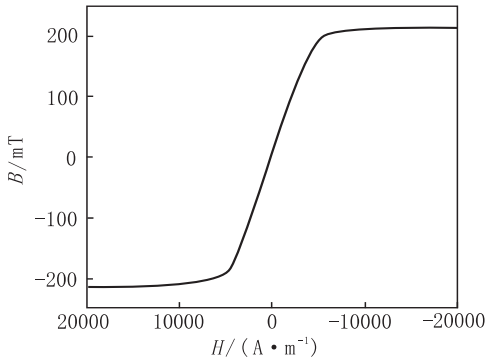
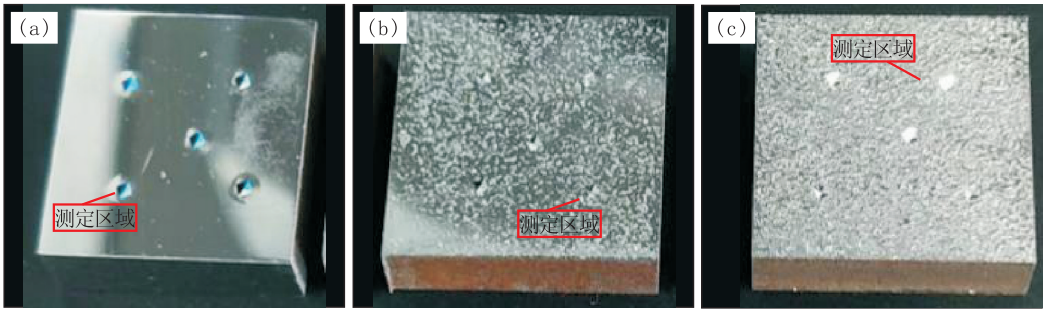


图10 试样的磁滞回线

Fig. 10 Hysteresis Loop of the Test Specimen

1.5 表面强度强化检测

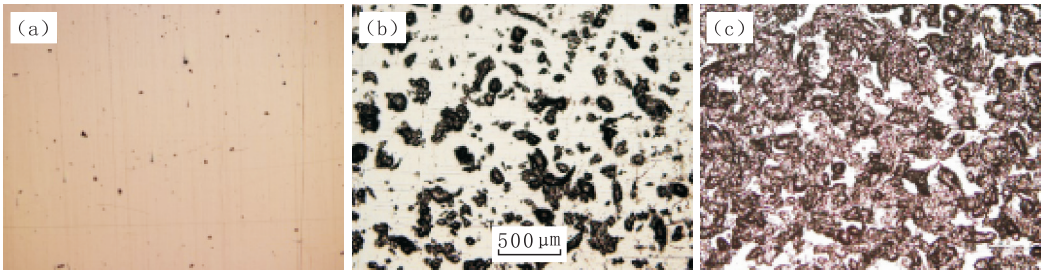
为了探究在浆料持续性冲击下带钢表面的硬化程度，同时考虑到无酸除鳞工艺与试样表面形貌特征，结合维氏硬度的测定方法，对试样表面进行了不同程度的抛光处理，并分别进行了维氏硬度的测定。根据实验设备对测试对象尺寸要求，对除鳞后的试样进行了线切割，线切割为10 mm×10 mm小试样。对试样表面分别进行深抛、中抛和浅抛等不同程度的处理，得到标记为深层、中层、浅层的三个表面试样，试样不同的抛光面如图11所示。进而对这三个表面的不同区域进行维氏硬度测试，试样表面的维氏硬度测定微观观测图见图12。为了保障测试的精度，每个表面进行五个区域的测试，并对表面强化问题进行对比分析。不同测定区域的维氏硬度测定微观观测图见图13。



(a) 深层；(b) 中层；(c) 浅层

图11 试样不同的抛光面

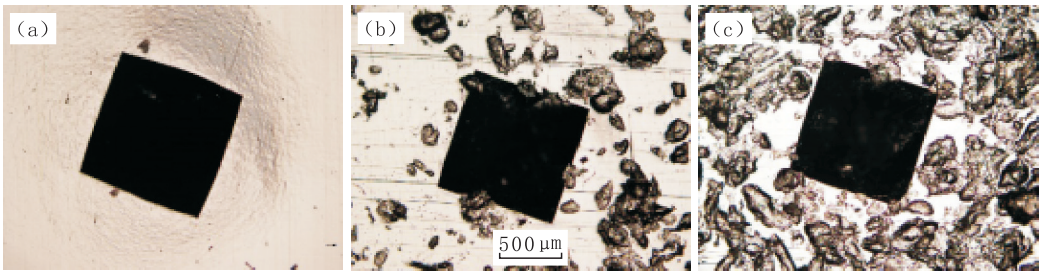
Fig. 11 Different Polished Surfaces of the Test Specimen



(a) 深层; (b) 中层; (c) 浅层

图 12 维氏硬度测定前的微观观测图

Fig. 12 Microscopic Observation Images Prior Vickers Hardness Measurement



(a) 深层; (b) 中层; (c) 浅层

图 13 维氏硬度测定的微观观测图

Fig. 13 Microscopic Observation Images of Vickers Hardness Measurement

由图 11、图 12 及图 13 可知,试样经深抛后钢基体裸露在外,已经没有了除鳞痕迹,因此可以认为该层的硬度受到钢砂冲击的干扰很小。不同抛光面的硬度分别测定五组数值,不同抛光面的硬度测定数值如表 1 所示。

表 1 不同抛光面的硬度测定数值

Table 1 Hardness Measurement Values of Different Polished Surfaces

工艺	最终测定数据/(HV_{30})					
	数据 1	数据 2	数据 3	数据 4	数据 5	均值
深抛	114.4	122.3	120.4	117.20	117.0	118.3
中抛	136.9	135.0	132.7	135.8	130.5	134.2
浅抛	148.4	130.7	146.2	147.1	142.7	143.0

由表 1 可知,随着抛层的加深,表面硬度数值下降;浅抛面的硬度均值是深抛面硬度均值的 1.21 倍。同时发现,无论是深层、中层、还是浅层,硬度测定数据的波动性都很小。这说明无酸除鳞工艺对带钢表面浅层的硬度有一定的影响,导致出现轻微的表面硬化。以上试验结果都论证了无酸除鳞表面均匀性很强的技术特征。

经过湿式抛丸除鳞处理后,带钢表面氧化层基本被去除,表面状态较为均匀,且未发现钢砂嵌入现象。粗糙度测试表明,除鳞后的表面平整性良好,且存在轻微的加工硬化现象。此外,磁性测试结果确认带钢表面未被磁化,进一步验证了该工艺的有效性。

2 带钢无酸除鳞的机理研究

钢砂粒径是影响除鳞机理的关键变量。通过分析不同钢砂粒径的除鳞效果,探究能量传递效率与氧化铁皮去除机制,有助于优化钢砂选择,以最少能量与磨料消耗实现最佳的除鳞效率,降低运行成本。同时,不同粒径钢砂的除鳞效果,也为通过钢砂粒径控制带钢形貌的工艺实现提供了思路。

2.1 湿式抛丸系统关系

无酸除鳞实质上就是一种湿式抛丸工艺,抛丸机功率 P_0 为[10-11]:

$$P_0 = \frac{\pi K_1 N \rho_b D^3 v^2}{6(2R_0^2 - r_0^2)} \tag{1}$$

单个钢砂的动能表达式为:

$$E_{kb} = \frac{\pi \rho_b D^3 v^2}{12} \tag{2}$$

联立公式(1)、(2)可得:

$$P_0 = \frac{2E_{kb}K_1}{(2R_0^2 - r_0^2)} \quad (3)$$

式中,K_1与抛丸机的抛丸轮半径、重力加速度、摩擦系数等物理参数有关,为固定值,m^2;N为单位时间内钢砂料用量数量,个;ρ_b为钢砂密度,kg/m^3;D为钢砂直径,m;V为冲击速度,m/s;R_0为抛丸轮内半径,m;r_0为抛丸机分丸轮内半径,m。

由公式(3)可以看出,在钢砂量N不变的情况下,抛丸机功率P_0与单个钢砂动能E_{kb}成正比例关系。从能量转化的角度可知,钢砂速度或钢砂粒径的增加,都会引起单个钢砂动能的增加,进而引起系统总能量耗损的增加。因此,单纯增加动能以提高除鳞能力,会引起抛丸机总功率的增加。

2.2 粒径-速度组合方案的设置

在钢砂料用量N固定的前提下,抛丸机的总功率与钢砂的动能成正比。在相同动能数值的前提下,探究不同工艺组合的除鳞规律性是非常值得研究的,对钢砂的粒径-速度组合方案进行了设置。设定钢砂的动能数值为3.135×10^{-4} J;设定冲击角度(钢砂冲击方向与带钢表面夹角)为60°。根据式(2),对不同速度-粒径组合的工艺方案具体数据进行了计算,粒径-速度组合方案如表2所示。

表2 粒径-速度组合方案

Table 2 Particle Size-velocity Combination Schemes

编号	粒径/mm	合速度/(m/s)	切向速度/(m/s)	法向速度/(m/s)
D_1	0.4	70.00	35.00	60.62
D_2	0.5	50.09	25.04	43.38
D_3	0.6	38.10	19.05	32.99
D_4	0.7	30.23	15.12	26.19
D_5	0.8	24.75	12.37	21.43
D_6	0.9	20.74	10.37	17.96
D_7	1.0	17.71	8.85	15.34
D_8	1.1	15.35	7.68	13.29

2.3 有限元建模

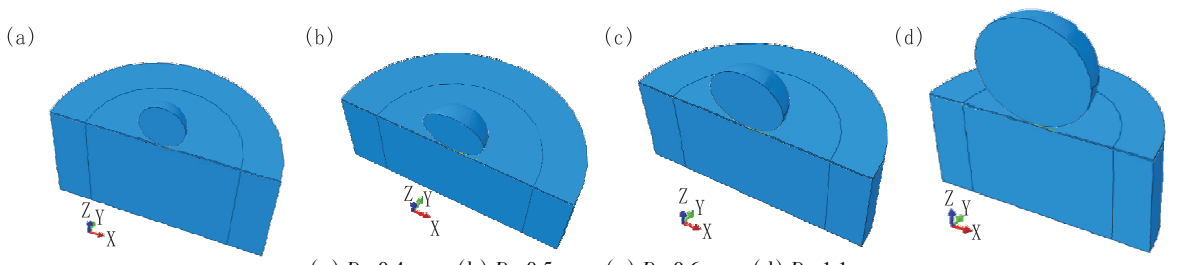
建立了除鳞三维有限元模型。该模型包括8个子模型,每个子模型均由钢砂、钢基体和鳞层组成。8个子模型的钢基体和鳞层结构完全相同,但钢砂粒径大小不同。8个子模型钢砂粒径的数值取值如表2所示[12]。

取4个典型的子模型进行展示,有限元模型的子模型如图14所示,鳞层设置为脆性材料,对鳞层和带钢基体部分区域进行了网格细化。网格细化后的模型如图15所示。

2.4 仿真结果分析与讨论

不同子模型在计算机上进行了运算。对方案1的仿真结果进行分析。D_1=0.4 mm仿真计算后模型的应力云图如图16所示。

由图16可以看出,钢砂在完成冲击除鳞后反弹,离开钢基体。冲击除鳞结束后,鳞层部分区域



(a) D_1=0.4 mm; (b) D_2=0.5 mm; (c) D_3=0.6 mm; (d) D_8=1.1 mm

图14 有限元模型的子模型

Fig. 14 Submodel of the Finite Element Model

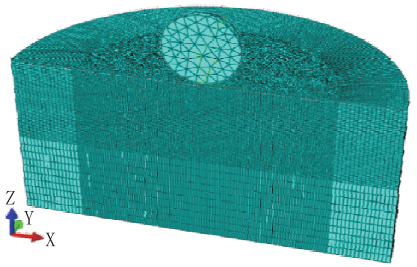


图15 网格细化后的模型
Fig. 15 Model after Mesh Refinement

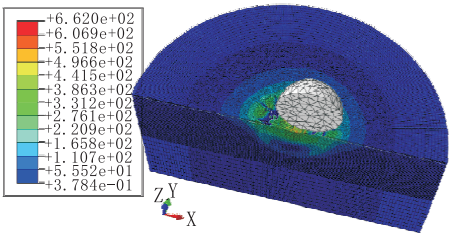


图16 仿真计算后模型的应力云图
Fig. 16 Stress Contour of the Model after Simulation Calculation

内的单元被击碎,并从钢基体表面剥离。钢基体表面发生了明显的弹塑性变形,形成了类似陨石坑的冲击坑道。有限元模型最大的应力为662.0 MPa,位于钢基体的冲击坑道内。

为了对模型仿真计算后的除鳞区域进行更好地观测,隐匿了图16中的钢砂与钢基体,并沿着Z轴负方向对鳞层表面(*XOY*平面)进行观测,得到除鳞效果图,有限元仿真结果如图17所示,图17空白区域为模型中的鳞层单元应力/应变达到了临界破坏阈值,并被模型删除(用来模拟除鳞过程)。除鳞区域整体来看呈半圆形。在圆周边缘有“须”向各个方向延伸。这些“须”的产生,是因为基体能够发生较好的弹塑性变形,并借助于鳞层与基体的结合面,将应力/应变向更远的区域传递。

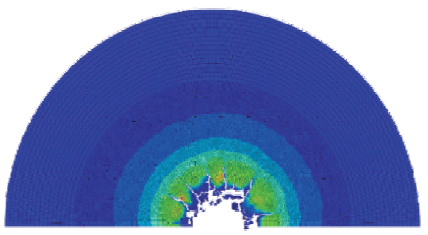


图17 有限元仿真结果
Fig. 17 Finite Element Simulation Result

在有限元建模中,鳞层设置为理想材料,无任何缺陷、分布均匀,且与基体接触也为理想接触,这是向外延伸的“须”产生的根源。为了更加准确地对不同粒径-速度组合的工艺参数进行分析,对不同方案得到的除鳞面积进行了统计,不同工艺参数下的除鳞区域统计如图19所示。由图19所知,随着钢砂粒径增加(冲击速度减少),仿真结果呈现出除鳞面积先增加后减少的规律,特别是当钢砂粒径*D*=0.6mm时,除鳞面积最大,除鳞效果最优。

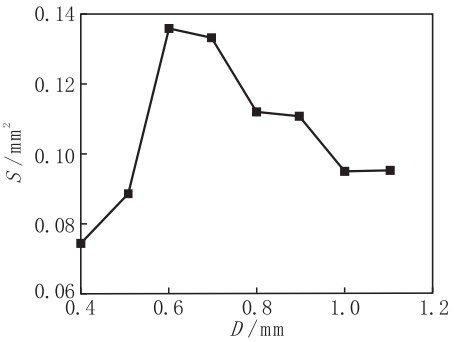


图18 不同工艺参数下的除鳞区域统计
Fig. 18 Statistics of Descaling Areas under Different Process Parameters

3 结论

(1)在针对采用湿式抛丸除鳞工艺去除氧化铁皮的带钢所开展的实验检测中,发现带钢表面没有氧化物的残存、钢砂没有嵌入带钢基体,除鳞后的带钢表面状态较为一致;粗糙度相对较大,但整体的平整性较好;带钢表面未被磁化,仅出现了轻微的加工硬化现象。

(2)单个钢砂在相同动能数值前提下,不同钢砂粒径-速度组合的除鳞方案,呈现出不同的除鳞效果。随着粒径的增加(速度减小)除鳞面积呈先增加后减小趋势。合理的粒径-速度组合工艺参数,既可以保证钢砂与基体有足够的接触面积,也可以保证速度足够大进而作用更长的时间,避免更大规模的鳞层破裂。有限元仿真结果显示,当钢砂粒径*D*=0.6 mm,抛丸速度*v*=38.10 m/s时,除鳞面积最大,效果最优。

参考文献

[1] 王鹏,于峰,徐小科,等. 影响SPHC酸洗效率因素分析及解决措施[J]. 鞍钢技术,2020(2):60-66.
[2] 孙建平. 热轧酸洗商品卷生产工艺选型[J]. 冶金设备,2021(1):30-32.
[3] 于邦超. 带钢无酸除鳞技术应用进展[J]. 金属世界,2019(3):6-8.

(下转第57页)

2024：69-79.
[10] Iranzad R，Liu X. A review of random forest-based feature selection methods for data science education and applications[J]. International Journal of Data Science and Analytics，2024，17(2)：1-15.
[11] Borup D，Christensen B J，Mühlbach N S，et al. Targeting predictors in random forest regression[J]. International Journal of Forecasting，2023，39(2)：841-868.
[12] 董红瑶，王弈丹，李丽红. 随机森林优化算法综述[J]. 信息与电脑(理论版)，2021，33(17)：34-37.
[13] Çetin V，Yıldız O. A comprehensive review on data preprocessing techniques in data analysis [J]. Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi，2022，28(2)：299-312.
[14] Maharana K，Mondal S，Nemade B. A review：Data preprocessing and data augmentation techniques[J]. Global Transitions Proceedings，2022，3(1)：91-99.
[15] Naidu G，Zuva T，Sibanda E M. A review of evaluation metrics in machine learning algorithms[C]//Computer science on-line conference，On-line：Springer International Publishing，2023：15-25.
[16] Hodson T O. Root mean square error (RMSE) or mean absolute error (MAE)：When to use them or not[J]. Geoscientific Model Development Discussions，2022，15(14)：1-10.
[17] Gavryushina M，Marshakov A，Panchenko Y. Application of the random forest algorithm to predict the corrosion losses of carbon steel over the first year of exposure in various regions of the world [J]. Corrosion Engineering，Science and Technology，2023，59：85-95.
[18] Muley R，Priya S. Development of Property Prediction Model for Hot Strip Mill Using Machine Learning Algorithms[J]. Machine Learning Research，2024，9(1)：1-9.
[19] Sarir P，Ruangrassamee A，Iwanami M. Estimation of the axial capacity of high-strength concrete-filled steel tube columns using artificial neural network，random forest，and extreme gradient boosting approaches[J]. Frontiers of Structural and Civil Engineering，2024，18(11)：1794-1814.
[20] Gupta P，Bagchi A. Essentials of Python for Artificial Intelligence and Machine Learning[M]. New York：Springer Nature，2024：161-196.
[21] 王丹，董浪. 基于Pyecharts和Matplotlib的绘图原理研究[J]. 科技创新与生产力，2024，45(5)：121-123.
[22] Pajankar A. Hands-on Matplotlib：Learn Plotting and Visualizations with Python 3[M]. Berkeley：Apress，2021：243-267.

(编辑 许营)
修回日期：2025-05-10

(上接第38页)

[4] 谭宁，李俊. 热轧带钢免酸洗技术进展[J]. 轧钢，2014(1)：34-36.
[5] 葛国军. 钢板表面无酸处理新技术研究[J]. 冶金设备，2013(3)：42-47.
[6] 魏万珍. 基于图像技术的零件表面粗糙度检测方法及系统研究[D]. 山西：太原理工大学，2022.
[7] 王植，孙荣生，王静，等. 冷轧先进高强钢表面色差缺陷综合控制技术研究[J]. 鞍钢技术，2023(3)：24-27，32.
[8] 刘玉堂，夏强强，胡建平，等. 湿式抛丸处理板表面粗糙度的控制[J]. 冶金设备，2016(5)：13-16.
[9] 张俊武，王红理，黄丽清. 铁磁材料交流磁化曲线及磁滞回线的观测[J]. 物理实验，2017(8)：21-25.
[10] 王尚. 轧制带钢无酸除鳞的抛丸冲击工艺仿真与实验研究[D]. 北京：北京科技大学，2018.
[11] 李通. 抛丸分析与计算[J]. 铸造机械，1978(1)：45-53
[12] H.R. Le，M. P. F Sutcliffe，P. Z. Wang，et al. Surface oxide fracture in cold aluminum rolling[J]. Acta Materialia，2004，52(4)：911-920.

(编辑 白璐)
修回日期：2025-07-04

(上接第49页)

参考文献

[1] 史晓强. 冷轧带钢表面清洁度与氧化色现象的探讨[D]. 沈阳：东北大学，2009.
[2] 陈慧，邓建平. 冷轧连续机组入口张力辊的设计计算[J]. 冶金设备，2013(2)：49-51.
[3] 严明哲，田奇伟，陈兴璞. 冷轧轧辊表面辊痕改善研究[J]. Dubai Medical Journal，1998：327-330.
[4] 胡雷. 高表面质量带钢轧辊的磨削工艺分析[J]. 设备管理与维修，2019(6)：172-173.
[5] 韦莹，唐水清. 浅谈轧辊磨削质量影响因素及主要缺陷控制[J]. 金属世界，2021(5)：38-43.
[6] 徐继根. 数控轧辊磨床砂轮选型和使用[J]. 中国新技术新产品，2020(7)：69-70.
[7] 杨腾，齐海峰，许秋，等. 酸轧带钢表面短线划伤原因分析及改善[J]. 河南冶金，2022，30(6)：45-48.

(编辑 白璐)
修回日期：2025-03-11