

四辊轧机工作辊辊颈端部铸接修复部位寿命评估*

LIFE EVALUATION OF THE CASTING REPAIR PART AT THE END OF THE WORK ROLL NECK OF A FOUR-HIGH ROLLING MILL

瞿海霞**¹ 秦晓峰***²

(1. 宝山钢铁股份有限公司中央研究院, 上海 201900)

(2. 太原理工大学机械与运载工程学院, 太原 030024)

QU HaiXia¹ QIN XiaoFeng²

(1. Baoshan Iron and Steel Co., Ltd., Central Research Institute, Shanghai 201900, China)

(2. College of Mechanical and Vehicle Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

摘要 轧辊作为带钢生产轧机的核心部件,其消耗对生产成本有重要影响。随着钢铁企业竞争加剧导致的降本增效需求逐步提高,轧辊再制造循环利用得到逐步推广。大型轧机大尺寸轧辊工作层消耗后改造用于小轧机为其中主要方式之一;对于局部尺寸尤其是辊肩尺寸不足的轧辊通常采用铸接方式加长以满足进一步使用的需求;铸接再制造后轧辊的使用寿命成为保障安全生产的关键。针对上述问题,在轧辊铸接部位取样开展了疲劳性能测试,同时选用扭转疲劳模型在证明计算精度的基础上,结合基于现场生产数据建立的载荷谱,对工作辊修复后的辊颈进行了寿命预测,预期服役寿命满足现场对修复后轧辊的性能需求,可为现场轧辊安全使用维护制度建立提供理论支撑。

关键词 轧辊再制造 铸接 工作辊 扭转疲劳试验 寿命预测

中图分类号 TH12

Abstract As the core component of strip mills, roll consumption has an essential influence on the production cost. With the increasing demand for cost reduction and efficiency increase caused by the intensifying competition of iron and steel enterprises, the recycling of roll re-manufacturing has been gradually promoted. It is one of the main ways to transform the large-size roll of the large rolling mill to a small rolling mill after its work layer consumption. For rolls with local size, especially those with insufficient shoulder size, casting lengthening is usually adopted to meet the needs of further use. The service life of the roll after casting joint repair and re-manufacturing becomes the key to ensuring safe production. Because of the above problems, the fatigue performance test was carried out on the roll casting part sample. At the same time, the torsional fatigue model was used to predict the life of the roll neck after the repair of the work roll based on proving the calculation accuracy and combining it with the load spectrum established based on the field production data. The expected service life met the performance requirements of the repaired roll on the site. It can provide theoretical support for establishing an on-site roll safety maintenance system.

Key words Roll re-manufacturing; Casting joint; Work roll; Torsional fatigue test; Life prediction

Corresponding author: QU HaiXia, E-mail: quhaixia@baosteel.com

The project supported by the Research on Key Technologies of Roll Recycling and Multi-Base Demonstration Application (No.D20ECES500).

Manuscript received 20231026, in revised form 20240126.

0 引言

轧辊作为带钢生产设备轧机的核心部件,其性能不仅影响轧制带钢的质量,使用中的消耗也严重影响轧制生产的成本^[1-2]。在正常生产中轧辊的寿命由其

有效工作层的消耗决定。轧辊的正常消耗主要由轧辊在使用过程中的在机磨损和下机后的修磨组成。部分轧辊在生产中由于轧制事故会导致局部辊身剥落掉肉,此类严重的失效通常会导致轧辊直接报废。随着钢铁生产对成本控制要求的逐步提高和再修复

*20231026收到初稿,20240126收到修改稿。轧辊回收关键技术及多基地示范应用研究项目(D20ECES500)资助。

**瞿海霞,女,1984年生,河南南阳人,汉族,宝山钢铁股份有限公司中央研究院高级工程师,主要研究方向为轧辊全寿命服役关键技术。

***秦晓峰,男,1987年生,山西临县人,汉族,太原理工大学副教授,主要研究方向为轧辊全寿命服役关键技术、疲劳强度。

技术的发展,局部失效轧辊不再直接报废,而是在评估失效程度的基础上决定轧辊报废或修复后重新使用。轧辊的失效形式决定了轧辊的修复方法^[3],针对轧辊不同部位的失效及失效形式,目前现场常用的轧辊修复技术主要有堆焊技术、热喷涂技术、激光熔覆技术以及铸接等^[4-7]。

随着钢铁企业间竞争加剧,内部资源循环利用成为钢铁生产节能降本和提高竞争力的主要措施之一。轧辊再制造循环利用作为带钢生产中降本增效的主要措施逐步在不同钢铁企业得到了推广。对于大型轧机中因工作层消耗报废的轧辊通过再制造用于小型轧机是目前轧辊再制造循环利用的方式之一。但部分轧机中轧辊尺寸要求不同,在实施过程中采用的再制造方式各有特点;对于部分轧辊应用于小型轧机中时存在的辊肩长度不足的问题,目前主要采用如图1所示的冷型铸造焊接的工艺方法进行再制造。但辊颈铸接再制造后的性能评估及使用寿命的有效评估是目前现场使用此类修复后轧辊面临的主要问题。如何有效预估修复后的安全使用寿命,对现场维护制度建立及现场机组安全生产保障具有重要意义。

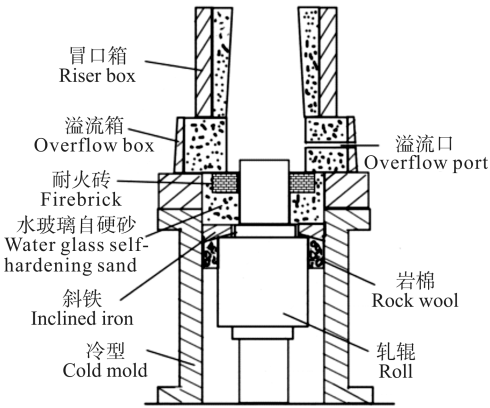


图1 轧辊冷型铸造焊接示意图
Fig. 1 Casting welding diagram of roll

本文针对辊颈铸接再制造后服役面临的寿命不确定问题,结合已有报道的文献中的扭转疲劳寿命模型,在设计铸接段小试样疲劳试验确定铸接结合材料疲劳性能及模型参数的基础上,通过试验数据验证模型结果的可靠性;然后以现场生产数据建立辊颈铸接段的载荷谱,并联合寿命模型建立辊颈铸接再制造后轧辊辊颈铸接段的寿命评估方法,对现场铸接再制造后轧辊的疲劳寿命进行了预测,为现场铸接再制造轧辊使用维护提供保障。

1 工作辊辊颈铸接材料疲劳试验

1.1 铸接工艺

铸接工艺是在被铸接件的铸接部位打制型腔然

后铸造,进而增加尺寸的方法。目前在大型轧辊再制造修复方面应用较广,不仅可满足轧钢企业现代化高效生产和钢材质量提升、品种开发的要求^[8];对促进轧辊再制造后循环利用也具有重要意义。

1.2 工作辊铸接段应力分析

根据现场实际情况,工作辊铸接段位于端部扁头部位,其为工作辊辊肩部位联接轧辊与传动轴的结构。在轧机工作过程中工作辊扁头部位受到电机通过传动轴传递的转矩作用,结合扁头部位的结构特征,可近似采用矩形截面的扭转切应力计算式对其应力分布进行计算,整个截面的剪应力分布如图2所示,最大剪应力位于矩形长边的中点,其计算式如式(1)所示。

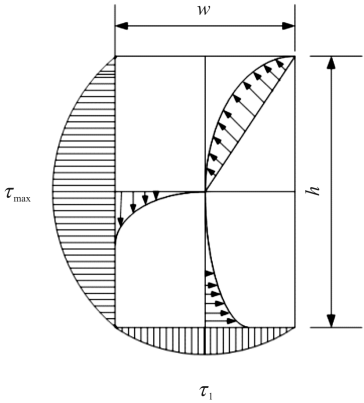


图2 工作辊扁头铸接段剪应力分布示意图
Fig. 2 Casting roll flat head stress calculation diagram

$$\tau_{\max} = \frac{M}{W} = \frac{M}{U_a h w^2} \tag{1}$$

式中, M 为工作辊的输入转矩; W 为抗扭截面系数; h 、 w 分别为扁头段矩形的长边和短边; U_a 为与 h/w 比值有关的系数,标准数值取值如表1所示。

表1 U_a 标准对照表

Tab. 1 Standard comparison table of U_a					
h/w	1.0	1.2	1.5	2.0	∞
U_a	0.208	0.219	0.231	0.246	0.333

现场铸接工作辊扁头铸接部位尺寸 $h=0.695\text{ m}$ 、 $w=0.526\text{ m}$,且 $h/w=1.32$ 。以表2为基础,通过插值法可计算得到 $U_a=0.226$ 。

1.3 辊颈铸接材料疲劳试验

轧辊辊颈扁头铸接部分在轧制过程中主要受到驱动电机输入的转矩作用,其失效的发生主要由转矩作用产生的扭转切应力引起,因此辊颈铸接修复铸接材料的疲劳性能测试采用扭转疲劳测试以确定铸接材料的疲劳性能。

根据国家标准GB/T10128—2007,结合工作辊辊

颈铸接段的实际受力情况,按图 3(a)所示设计并在铸接后的工作辊辊颈部分原位取样加工,其中浅色框线部分为铸接材质,深色框线部分为原始辊颈部分材质。



(a) 铸接材料疲劳试样示意图

(a) Schematic diagram of fatigue sample of cast joint material



(b) 铸接材料疲劳试样

(b) Cast joint material sample for fatigue testing

图 3 铸接材料疲劳试验试样

Fig. 3 Fatigue testing specimen

依据国家标准,结合铸接工作辊现场生产中的工况特征,开展 4 级扭转应力水平下试样的扭转疲劳试验。其中,扭转试验频率为 10 Hz,试验载荷应力比为 $r = 0$,结合现场铸接工作辊驱动端扁头部位受力情况及扭转切应力计算式,确定扭转疲劳试验 4 级转矩分别为 13 N·m、14 N·m、15 N·m、16 N·m,每级应力水平试验 4 个试样,然后通过对试验数据统计分析获取铸接材料的 $S-N$ 曲线,并为铸接段服役寿命预测模型中参数确定提供数据。

1.4 试验结果分析

根据第 1.2 节中确定的试验方案对按图 2 所示图纸加工的铸接试样分别开展 4 级应力水平下的扭转疲劳试验,结果如表 2 所示。

表 2 试验数据

Tab. 2 Test data

编号 No.	转矩 Torque $T/(N \cdot m)$	循环次数 Cycle times N
1	16	167 334
2	16	192 270
3	16	240 876
4	16	144 794
5	15	663 038
6	15	477 849
7	15	352 879
8	15	292 960
9	14	1 003 985
10	14	671 024
11	14	491 905
12	14	432 095
13	13	1 583 154
14	13	671 753
15	13	866 582
16	13	977 423

在疲劳试验的基础上,根据肖维勒准则确定试验结果的有效性,然后参考国家标准 GB/T 24176—2009^[9-10]试验结果数据进行统计分析处理以确定铸接材料的扭转疲劳 $S-N$ 曲线。根据国家标准,令 $x = \lg N$ 。

$$\begin{cases} \tau = \frac{T}{W_z} = \frac{32T}{\pi d^3} \\ s = \tau_m \end{cases} \quad (2)$$

式中, N 为寿命循环次数; T 为转矩; W_z 为试样截面抗扭截面系数; s 为应力; τ 和 τ_m 分别为切应力和切应力幅; d 为直径。

假定铸接材料扭转疲劳 $S-N$ 关系满足线性方程

$$\lg N = b - as \quad (3)$$

式中, a 、 b 均为常数。

基于试验数据通过样本估计确定方程中关键参数如下:

$$\hat{a} = - \frac{\sum_{i=1}^n (\lg N_i - \overline{\lg N})(s_i - \bar{s})}{\sum_{i=1}^n (s_i - \bar{s})^2} = 0.0065 \quad (4)$$

$$\hat{b} = \overline{\lg N} + \hat{a}\bar{s} = 9.0582 \quad (5)$$

其中, $\overline{\lg N} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \lg N_i$, $\bar{s} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n s_i$ 。

因此,铸接材料 $S-N$ 曲线表达式为

$$\lg N = 9.0582 - 0.0065s \quad (6)$$

拟合优度为

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (s_i - \hat{s}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (s_i - \bar{s})^2} = 0.8033 \quad (7)$$

根据试验数据及统计分析确定的 $S-N$ 曲线方程如图 4 所示。

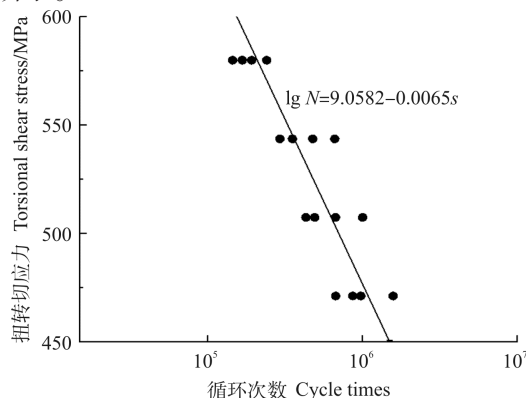


图 4 铸接材料的 $S-N$ 曲线

Fig. 4 $S-N$ curve of casting material

2 工作辊铸接段服役寿命预测

目前国内外对再制造结构件的疲劳寿命预测评估方法主要有三类^{[11]417-422[12][13]31-34}:①基于力学和疲劳损伤理论的分析计算方法;②结构件的疲劳性能试

验;③基于无损检测的剩余寿命预测法^{[11]417-422}。采用方法②对材料和结构进行疲劳性能试验需要采用专用的设备,且如果要准确获得结构件的疲劳性能数据需采用 1:1 试件进行试验,成本较高;采用方法③则由于无损检测变量与损伤间的定量关系具有一定的不确定性,同时准确评估剩余寿命对检测设备的识别精度要求较高,且对于在线损伤无法进行提前预测评定。现场生产中对铸接后工作辊的服役需首先预估其安全服役寿命,然后制定合理的维护制度并结合无损检测手段对下机后工作辊的损伤进行评估,以保障后续上机安全运行。因此,结合损伤模型和铸接材料小试样疲劳试验对现场服役的铸接修复工作辊进行寿命预测具有一定的可行性。

2.1 工作辊铸接段疲劳寿命模型

根据文献[13]³¹⁻³⁴中应变损伤和损伤累积理论,在扭转应力作用下疲劳寿命封闭解可表示为

$$\frac{\alpha}{G^m} \Delta \tau_c^m N_{cr} = \frac{1}{\xi} \frac{1}{m+1} [1 - (1 - \xi)^{m+1}] \quad (8)$$

其中,

$$\xi = \frac{I_{p0}}{I_{pm}} \quad (9)$$

$$a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \lg N_i - \frac{b}{n} \sum_{i=1}^n \lg \tau_i \quad (10)$$

$$\alpha = 10^{\lg G^m K} \quad (11)$$

$$b = \frac{\sum_{i=1}^n \lg \tau_i \lg N_i - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \lg N_i \sum_{i=1}^n \lg \tau_i}{\sum_{i=1}^n (\lg \tau_i)^2 - \frac{1}{n} (\sum_{i=1}^n \lg \tau_i)^2} \quad (12)$$

式中, I_{p0} 为横截面的极惯性矩; I_{pm} 为横截面的广义极惯性矩; α 为循环特征有关的材料常数; G 为剪切弹性模量; $\Delta \tau$ 为剪应力变程; m 为材料常数; ξ 为无量纲常量; a 、 b 为常数; τ 为剪应力; N_{cr} 为扭转切应力作用下的疲劳寿命。令 $K = \frac{1}{\xi} \frac{1}{m+1} [1 - (1 - \xi)^{m+1}]$, 则零部件在扭转切应力作用下的疲劳寿命计算式可简化为

$$N_{cr} = \frac{KG^m}{\alpha(\tau)^m} \quad (13)$$

2.2 疲劳寿命模型验证

结合表 1 试验结果数据和试样尺寸,代入式(9)~式(12),可得到式(8)所示疲劳寿命封闭解中相关参数值,如表 3 所示。

然后基于式(13)编制材料或构件扭转疲劳寿命计算程序,预测在试验应力水平下的理论疲劳寿命,实际试验试样寿命、试样中值寿命和模型预测寿命对比如图 5 所示。

表 3 模型参数

Tab. 3 Model parameter

ξ	a	α	b
0.393 4	22.436 8	2.68×10^{15}	-6.167 2

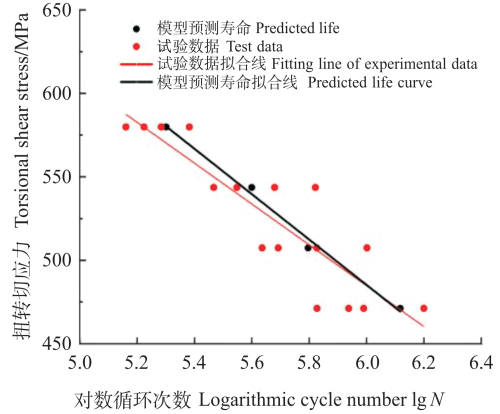


图 5 循环次数对比

Fig. 5 Comparison of cycle times

同时定义式(14)所示误差 ψ 对模型预测误差进行评估,结果如表 4 所示。

$$\psi = \left| \frac{N_1 - N_0}{N_0} \right| \times 100\% \quad (14)$$

结合式(14)及图 5 中的试验寿命和预测寿命可计算得到预测值与试验中值寿命的相对误差,结果如表 4 所示。从表中可知,由疲劳寿命封闭解预测模型计算得到的寿命误差在 20% 之内,满足工程实际要求。

表 4 寿命对比

Tab. 4 Life contrast

扭转切应力 Torsional shear stress τ /MPa	中值寿命 Median life	模型预测寿命 Predicted life N_1	误差 Error ψ /%
579.83	194 674	208 795	7.25
543.59	334 860	397 924	18.83
507.35	575 996	625 343	8.57
471.11	990 776	873 122	11.87

2.3 工作辊铸接段服役寿命预测

根据现场生产中工作辊驱动端的输入载荷及轧制数据,建立服役工作辊颈修复部位的载荷谱,并编制程序计算对应应力谱下的服役寿命,为现场轧辊维护制度建立提供参考。

以某热连轧产线为研究对象,结合产线 R_2 机架 r_1 道次 2022 年 1 月的生产记录数据,参考文献[14]、[15]、[16]中的方法建立载荷谱的基础上结合式(8)的应力计算模型,建立工作辊颈铸接部位的应力谱。

首先,以板宽和压下率为主要参数,对现场调取的生产记录数据进行分析并划分区间,其中轧制带钢

宽度规格区间边界尺寸矩阵为 $W \in [1\ 000, 1\ 100, 1\ 200, 1\ 300, 1\ 400, 1\ 500, 1\ 600, 1\ 700, 1\ 800, 1\ 900, 2\ 000, 2\ 100, 2\ 200]$, 压下率区间边界尺寸矩阵为 $Y \in [0.2, 0.3, 0.4, 0.5]$ 。按前述矩阵边界对规格进行划分后对应编号为 $W_i Y_j (i=1, 2, \dots, 13; j=1, 2, 3, 4)$ 。然后编制程序筛选不同区间带钢记录卷数及相关轧制参数及铸接修复部位对应的应力水平, 结果如表 5 所示。

表 5 铸接修复辊铸接段应力谱

Tab. 5 Casting repair roll casting section stress spectrum

编号 No.	区间 Section	扭转切应力 Torsional shear stress τ/MPa
1	$W_1 Y_3$	51.573 4
2	$W_2 Y_3$	60.640 3
3	$W_3 Y_3$	55.267 4
4	$W_4 Y_3$	60.389 4
5	$W_5 Y_3$	55.728 9
6	$W_6 Y_3$	54.110 4
7	$W_7 Y_3$	57.409 4
8	$W_8 Y_3$	54.279 7
9	$W_9 Y_3$	55.168 8
10	$W_{10} Y_3$	55.286 8
11	$W_{11} Y_3$	52.287 3
12	$W_{12} Y_3$	58.076 1
13	$W_{13} Y_3$	51.573 4

根据体积相等原则, 结合 R_2 机架 r_1 道次对应规格区间宽度和出口厚度参数, 按式(15)计算对应于具体规格区间的应力循环次数。

$$N_0 = \frac{L}{\pi d} \quad (15)$$

式中, L 为轧制长度; d 为铸接辊直径。

同时, 利用表 5 中的应力谱, 结合式(13)所示寿命预测模型, 计算在特定规格对应应力水平下服役时辊颈铸接段的预期服役循环次数, 结果如表 6 所示。

表 6 中 N_0 为原产线 R_2 机架 r_1 道次在 1 月份实际生产规程下的循环次数, N_1 为使用铸接材料试验数据结合寿命模型预测得到的在 1 月份生产应力谱扭转切应力下的可运行循环次数。从表中可以看出, 在现执行的生产规程应力谱扭转切应力平均水平情况下服役时, 铸接工作辊可安全服役约 335.58 个月。

3 结论

辊颈铸接修复后的服役寿命的有效评估保障修复后轧辊安全服役的基础。为了合理地制定铸接修复后轧辊的维护制度, 本文以现场轧制生产数据为基础, 结合试样测试和扭转疲劳寿命预测模型对修复后的工作辊辊颈铸接修复部位的服役寿命进行了研究,

表 6 循环次数计算

Tab. 6 Cycle times calculation

区间 Section	N_0	N_1
$W_1 Y_3$	5 817.808	1 841 691.68
$W_2 Y_3$	5 419.403	1 384 805.96
$W_3 Y_3$	5 468.349	1 630 515.01
$W_4 Y_3$	6 435.581	1 394 951.10
$W_5 Y_3$	4 405.855	1 606 818.24
$W_6 Y_3$	4 412.407	1 692 392.43
$W_7 Y_3$	4 318.949	1 524 935.34
$W_8 Y_3$	4 356.285	1 683 110.28
$W_9 Y_3$	5 352.773	1 635 648.91
$W_{10} Y_3$	4 323.883	1 629 507.87
$W_{11} Y_3$	4 130.971	1 797 652.55
$W_{12} Y_3$	4 019.875	1 494 250.31
$W_{13} Y_3$	4 586.340	1 841 691.68
小计 Subtotal	63 048.480	21 157 971.36

得出以下结论:

1) 通过扭转疲劳试验获得了铸接材料-基体结合材料的疲劳 $S-N$ 曲线, 结合试验数据验证了扭转疲劳寿命模型的预测误差, 结果表明所采用的疲劳寿命预测模型的预测误差均在 20% 以内, 符合工程实际中修复类轧辊服役寿命预测精度要求。

2) 以某产线 R_2 机架 r_1 道次为研究对象, 基于实际生产数据, 通过建立现场工作辊辊颈修复部位的应力谱对修复部位进行了寿命预测, 结果表明在现有服役工况下修复轧辊可安全服役 335.58 个月, 符合现场服役安全要求。

3) 通过试验验证铸接材料扭转疲劳寿命预测模型精度的基础上, 建立了可供现场铸接修复工作辊铸接修复部位寿命评估的基本方法。

参考文献 (References)

- [1] 赵志国. 热轧过程中轧辊的温度场和应力场分析[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2011: 1-4.
ZHAO ZhiGuo. Analysis of temperature field and stress field of roll during hot rolling[D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2011: 1-4 (In Chinese).
- [2] 任 嘉. 球墨铸铁轧辊激光熔覆表面修复的研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2019: 15.
REN Jia. Study on laser cladding surface repair of nodular cast iron roller[D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2019: 15 (In Chinese).
- [3] 张 钰. 铸铁轧辊表面激光熔覆修复强化研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2022: 5-6.
ZHANG Yu. Research on laser cladding repair and strengthening of cast iron roll surface[D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2022: 5-6 (In Chinese).
- [4] 刘士彬, 杜江伟, 张 雨, 等. 球铁轧辊辊颈等离子堆焊材料设计和工艺研究[J]. 四川冶金, 2021, 43(3): 29-32.

- LIU ShiBin, DU JiangWei, ZHANG Yu, et al. Material design and process research on plasma surfacing of ductile iron roll neck [J]. Sichuan Metallurgy, 2021, 43(3): 29-32 (In Chinese).
- [5] 陈惠国. 热(冷)轧制辊表面喷涂强化与应用[C]. 第二十二届国际热喷涂研讨会(ITSS'2019)暨第二十三届全国热喷涂年会(CNTSC'2019)论文集, 2019: 7.
- CHEN HuiGuo. Strengthening and application of hot (cold) rolling roller surface spraying [C]. 22nd International Thermal Spraying Symposium (ITSS'2019) and 23rd National Thermal Spraying Annual Conference (CNTSC'2019), 2019: 7 (In Chinese).
- [6] 秦翔, 杨军, 邹德宁, 等. 轧辊再制造及其表面强化技术的研究进展[J]. 材料保护, 2019, 52(2): 119-125.
- QIN Xiang, YANG Jun, ZOU DeNing, et al. Research progress of roll remanufacturing and surface strengthening technology [J]. Material Protection, 2019, 52(2): 119-125 (In Chinese).
- [7] 吕建斌. 球墨铸铁表面激光熔覆高钒高速钢涂层的工艺优化与组织性能[D]. 沈阳: 东北大学, 2013: 8-10.
- LÜ JianBin. Process optimization and micro-structure of laser cladding high vanadium high speed steel coating on ductile iron surface performance [D]. Shenyang: Northeastern University, 2013: 8-10 (In Chinese).
- [8] 肖连华, 刘宇. 轧辊铸造工艺装备的自主设计与应用[J]. 铸造设备与工艺, 2023(3): 19-21.
- XIAO LianHua, LIU Yu. Independent design and application of roller casting process equipment [J]. Casting Equipment and Process, 2023(3): 19-21 (In Chinese).
- [9] 刘洋. 某型飞机翼梁根部连接区域模拟件疲劳性能试验与分析[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2019: 7-8.
- LIU Yang. Fatigue performance test and analysis of simulated parts in the root connection area of an aircraft wing beam [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2019: 7-8 (In Chinese).
- [10] 中国国家标准化管理委员会. 金属材料疲劳试验数据统计方案与分析方法: GB/T 24176—2009[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009: 1-17.
- China National Standardization Management. Statistical and analysis of fatigue test data for metallic materials scheme methods: GB/T 24176—2009[S]. Beijing: Standards Press of China, 2009: 1-17 (In Chinese).
- [11] 徐海铭, 夏乔阳, 李勇, 等. 基于深度可分离卷积神经网络轴承剩余寿命预测[J]. 机械强度, 2022, 44(4): 763-771.
- XU HaiMing, XIA QiaoYang, LI Yong, et al. Bearing remaining life prediction based on deep separable convolutional neural network [J]. Journal of Mechanical Strength, 2022, 44(4): 763-771 (In Chinese).
- [12] 徐友坤, 鲁连涛, 曾东方, 等. 基于临界距离法的含表面缺陷车轴试样疲劳强度预测[J]. 机械强度, 2022, 44(4): 825-830.
- XU YouKun, LU LianTao, ZENG DongFang, et al. Fatigue strength prediction of railway axle specimen with surface notch by TCD [J]. Journal of Mechanical Strength, 2022, 44(4): 825-830 (In Chinese).
- [13] 高宏伟. 液压支架结构件失效分析及可再制造性评估方法研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2023: 31-34.
- GAO HongWei. Research on failure analysis and remanufacture ability evaluation method of hydraulic support structural parts [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2023: 31-34 (In Chinese).
- [14] 谭文锋, 徐晓, 张文志. 扭转构件的疲劳裂纹形成寿命预估[J]. 重型机械, 2007(4): 52-54.
- TAN WenFeng, XU Xiao, ZHANG WenZhi. Fatigue crack initiation life prediction of torsional members [J]. Heavy Machinery, 2007(4): 52-54 (In Chinese).
- [15] 薄昊. 热轧机支承辊载荷谱编制理论研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2018: 47-57.
- BO Hao. Theoretical study on load spectrum compilation of backup roll of hot rolling mill [D]. Shenyang: Northeastern University, 2018: 47-57 (In Chinese).
- [16] 秦晓峰. 大型锻钢支承辊接触疲劳机理研究及修磨参数优化[D]. 沈阳: 东北大学, 2014: 64-76.
- QIN XiaoFeng. Research on contact fatigue mechanism of large forged steel backup roll and optimization of grinding parameters [D]. Shenyang: Northeastern University, 2014: 64-76 (In Chinese).