

论著 DOI: 10.16369/j.oher.issn.1007-1326.2024.03.006

• 调查研究 •

某汽车制造企业一线劳动者腕/手部肌肉骨骼疾患及影响因素分析

栗西子, 贾宁

中国疾病预防控制中心职业卫生与中毒控制所, 北京 100050

摘要:目的 分析汽车制造企业一线劳动者腕/手部肌肉骨骼疾患(work-related musculoskeletal disorders, WMSDs)现状及影响因素,为预防腕/手部 WMSDs 的发生提供科学依据。方法 采用方便抽样的方法,于 2023 年 8—10 月选择北京某汽车制造企业总装车间和焊接车间的一线劳动者作为研究对象,采用《中文版肌肉骨骼疾患问卷》调查其过去 1 年中腕/手部 WMSDs 的患病情况,采用 logistic 回归分析腕/手部的 WMSDs 发生的影响因素。结果 共发放调查问卷 648 份,回收有效问卷 591 份,问卷有效回收率为 91.2%。研究对象腕/手部 WMSDs 总体患病率为 8.1%(48/591)。多因素 logistic 回归分析结果显示:工作中存在腕部屈曲、伸展、侧弯或旋转的劳动者,以及工具、手持设备或工件太大或太小而不易掌握情况的劳动者,其腕/手部存在 WMSDs 的风险分别是不存在以上情况劳动者的 5.194 倍(OR = 5.194, 95%CI: 2.239 ~ 12.050)和 2.373 倍(OR = 2.373, 95%CI: 1.266 ~ 4.448)。结论 该汽车制造企业应采取改善一线劳动者腕部的不良姿势,改进工具或手持设备等使其有利于抓取,以预防腕/手部 WMSDs 的发生。

关键词:工作相关肌肉骨骼疾患;汽车制造业;腕/手部;影响因素

中图分类号: R135 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-1326(2024)03-0313-05

引用:栗西子,贾宁. 某汽车制造企业一线劳动者腕/手部肌肉骨骼疾患及影响因素分析[J]. 职业卫生与应急救援, 2024, 42(3): 313-317.

Investigation on wrist musculoskeletal disorders and its influencing factors of frontline workers in an automobile manufacturing industry

SU Xizi, JIA Ning (National Institute of Occupational Health and Poison Control, Chinese Center for Disease Control and Prevention, Beijing 100050, China)

Abstract: Objective To analyze the current status and influencing factors of work-related musculoskeletal disorders (WMSDs) of the wrist/hand among frontline workers in an automobile manufacturing enterprise and to provide a scientific basis for the prevention of wrist/hand WMSDs and the adoption of health intervention measures to alleviate the disorders.

Methods Using convenience sampling, frontline workers from the general assembly and welding workshops of an automobile manufacturing enterprise in Beijing were surveyed from August to October 2023. The prevalence of wrist/hand WMSDs in the past year was investigated by the Chinese version of the Musculoskeletal Disorders Questionnaire. The logistic regression analysis was employed to analyze the influencing factors of the occurrence of WMSDs of the wrist/hand.

Results A total of 648 questionnaires were distributed in this study, and 591 valid questionnaires were returned, with a valid response rate of 91.2%. The overall prevalence of wrist/hand WMSDs among these workers was 8.1% (48/591). Multifactorial logistic regression analysis showed that the risk of WMSDs of the wrist/hand was 5.194 times higher (OR = 5.194, 95% CI: 2.239-12.050) for workers who experienced bending, stretching, side bending, or rotation of the wrist during work, and 2.373 times higher (OR = 2.373, 95%CI: 1.266-4.448) for those for whom the tools, handheld devices, or workpieces were too large or too small to be easily held. **Conclusions** The automobile manufacturing enterprise should take measures to improve the adverse wrist postures of frontline workers, as well as to improve tools or handheld devices to facilitate grasping, in order to prevent the occurrence of wrist/hand WMSDs.

Keywords: work-related musculoskeletal disorders; automobile manufacturing; wrist/hand; influence factor

基金项目:职业健康风险评估与国家职业卫生标准制定项目(102393220020090000020)

作者简介:栗西子(1995—),女,硕士,实习研究员

通信作者:贾宁,研究员, E-mail: jianing@niohp.chinacdc.cn

工作相关肌肉骨骼疾患 (work-related musculoskeletal disorders, WMSDs) 是由职业活动直接或间接引起的肌肉、神经、肌腱、关节或椎间盘等组织的损伤或疾患,其主要体征和症状是疼痛、感觉异常、疲劳和活动受限等。WMSDs 几乎可发生于各行业,但由于工作性质、行业特点不同,并伴随着科技发展和生产方式转变,不同行业 WMSDs 发生状况也大不相同。贾宁等^[1]在 2018—2020 年对中国 15 个重点行业职业群体的大样本调查中发现,21 560 名汽车制造业劳动者中,腕/手部 WMSDs 的发生率为 14.9%,标化发生率为 14.0%。虽然腕/手部疾患不像颈部、下背部、肩部那么常见,但手的功能直接影响工人的劳动能力,该部位的疾患对患者工作、生活都会造成极大的困扰。腕/手部 WMSDs 的典型疾病——腕管综合征,是工作相关上肢疾患中治疗费用最多、引起缺勤时间最长的病种,也是企业支付赔偿金的主要原因之一^[2]。汽车制造企业作为北京市重点行业之一,广泛存在低负荷、快节奏、高重复、强迫体位等腕/手部 WMSDs 相关的不良工效学问题^[3]。目前对于北京市汽车制造业的腕/手部 WMSDs 研究较少,因此,本研究对北京市某汽车制造业一线劳动者腕/手部肌肉骨骼疾患及其影响因素进行了调查,以期预防汽车制造业劳动者预防腕/手部 WMSDs 的发生提供科学依据。

1 对象与方法

1.1 对象

采用方便抽样方法,于 2023 年 8—10 月选择在北京市某汽车制造企业的总装车间和焊接车间的全部一线劳动者为研究对象,该企业班制均为长白班。本研究发放调查问卷 648 份,回收有效问卷 591 份,有效问卷回收率为 91.2%。纳入标准:年龄 ≥ 18 岁,本岗位工龄 ≥ 1 年,知情同意参与本次调查;既往无外伤、先天性肌肉骨骼疾患以及因其他疾患(如风湿性关节炎等)导致肌肉骨骼损伤者。此次调查已通过中国疾病预防控制中心伦理审查委员会的审查,研究对象均已签署知情同意书。

1.2 方法

1.2.1 WMSDs 调查

《中文版肌肉骨骼疾患问卷》^[1]以北欧肌肉骨骼疾患调查问卷(Nordic Musculoskeletal Questionnaires, NMQ)和荷兰肌肉骨骼疾患调查问卷^[2]为基础,经适当修改后,被证实具有良好的信度和效度,可用于中国职业人群。调查内容包括:(1)一般人口学特征:性别、年龄、身高、体重、文化程度、体育锻炼、工

龄、外伤史和既往病史等;(2)过去 1 年内不同身体部位的 WMSDs 患病情况。WMSDs 判定参考美国国家职业安全卫生研究所对肌肉骨骼疾患的判定标准^[4],本研究中的 WMSDs 是指出现疼、痛、僵硬、烧灼感、麻木或刺痛等不适症状,同时满足以下条件:①过去 12 月内不适;②从事当前工作后出现不适;③既往无事故或突发伤害;④每月均出现不适症状或持续出现的时间 > 7 d,则判定该部位存在肌肉骨骼疾患。某部位 WMSDs 患病率指某部位罹患 WMSDs 的人数占总调查人数的百分比。

1.2.2 职业因素调查

采用本课题组编制的《职业健康调查问卷》进行调查,内容包括工作情况、工作姿势、用力负荷、劳动组织、工作环境等情况。指标定义:体重指数(body mass index, BMI) = 体重/身高²(单位为 kg/m^2):正常范围为 $18.5 \sim 23.9 \text{ kg}/\text{m}^2$, $< 18.5 \text{ kg}/\text{m}^2$ 为偏低, $24.0 \sim 27.9 \text{ kg}/\text{m}^2$ 为超重, $\geq 28.0 \text{ kg}/\text{m}^2$ 为肥胖^[5]。体育锻炼指每次锻炼持续时间 $\geq 30 \text{ min}$ 或流汗^[6]。本工种工龄指截至进入本研究时从事当前工种的工龄。

1.2.3 疲劳感觉调查

首先采用主诉下班后疲劳感觉的方式判定研究对象是否存在作业疲劳情况,再通过《Borg 6—20 主观疲劳等级(Borg 6—20 rating of perceived exertion, RPE)量表》^[7]对研究对象全身整体作业疲劳程度进行评估。该量表以 RPE 得分 6 ~ 20 分代表由“无疲劳”到“精疲力竭”的自觉作业疲劳程度。本研究中下班后疲劳感觉按照 RPE 得分划分为以下 4 组:RPE 得分 ≤ 12 分为无疲劳, 13 ~ 14 分为稍疲劳, 15 ~ 16 分为疲劳, ≥ 17 分为非常疲劳。

1.2.4 质量控制

正式调查前进行小样本预调查。调查前统一培训调查人员,调查时由调查人员统一讲解调查内容与填写要求及注意事项。调查采用电子问卷的形式,电子问卷设置有自动逻辑纠错功能,可避免不合理信息,以确保问卷的真实性、完整性及较高的回收率。

1.2.5 统计学分析

采用 SPSS 26.0 软件进行统计学分析。计量资料经正态性检验符合正态分布者采用均数和标准差($\bar{x} \pm s$)描述,不符合正态分布者用中位数和四分位位数 $[M(P_{25}, P_{75})]$ 描述;计数资料采用率或构成比描述。计数资料组间比较采用 Pearson χ^2 检验或 Fisher 确切概率法。影响因素分析采用多因素 logistic 回归分析(向前法,纳入水准为 0.05,剔除水准为 0.10)。检验水准 $\alpha = 0.05$ (双侧)。

2 结果

2.1 基本情况

591 名研究对象中焊接车间 197 人,总装车间 394 人;男性 547 人,女性 44 人;大学本科以下 537 人,大学本科及以上 54 人;平均年龄为(34.82 ± 6.51)岁;本工种平均工龄为(7.96 ± 4.95)年,平均总工龄为(13.25 ± 6.41)年;BMI 为(26.03 ± 10.68)kg/m²;下班后稍疲劳 356 人,疲劳和非常疲劳各 79、68 人。详见表 1。

2.2 腕/手部 WMSDs 报告情况

研究对象腕/手部 WMSDs 症状患病率为 8.1% (48/591)。单因素分析发现,下班后疲劳感觉,工作中腕部是否发生屈曲、伸展、侧弯或旋转,工具、手持设备或工件是否不易拿握,在工作时手是否保持在肩以下或以上,工作区域照明感受等情况不同的劳动者腕/手部 WMSDs 症状的患病率不同,差异有统计学意义($P < 0.05$)。见表 1。

表 1 不同个体特征劳动者腕/手部肌肉骨骼疾患患病情况
[人数(占比/%)]

分组	调查人数	WMSDs	χ^2 值	P 值
车间			< 0.001	> 0.999
焊接车间	197(33.33)	16(8.12)		
总装车间	394(66.67)	32(8.12)		
性别			2.180	0.140
男	547(92.55)	47(8.59)		
女	44(7.45)	1(2.27)		
年龄/岁			3.362	0.186
< 30	135(22.84)	6(4.44)		
30 ~ 40	324(54.82)	31(9.57)		
> 40	132(22.34)	11(8.33)		
工龄/年			0.355	0.949
< 5	160(27.07)	14(8.75)		
5 ~ 9	262(44.33)	22(8.40)		
10 ~ 15	155(26.23)	11(7.10)		
> 15	14(2.37)	1(7.14)		
总工龄/年			2.853	0.415
< 5	68(11.51)	5(7.35)		
5 ~ 9	136(23.01)	9(6.62)		
10 ~ 15	146(24.70)	9(6.16)		
> 15	241(40.78)	25(10.37)		
BMI			1.770	0.621
低体重	17(2.88)	2(11.76)		
正常	232(39.25)	18(7.76)		
超重	207(35.02)	14(6.76)		
肥胖	135(22.84)	14(10.37)		
学历			0.525	0.469
大学本科以下	537(90.86)	45(8.38)		
大学本科及以上	54(9.14)	3(5.56)		
惯用手			0.586	0.746
左手	69(11.68)	4(5.80)		
右手	423(71.57)	36(8.51)		
双手	99(16.75)	8(8.08)		

表 1(续)

分组	调查人数	WMSDs	χ^2 值	P 值
体育锻炼			3.676	0.452
从不	263(44.50)	27(10.27)		
1 ~ 3 次/季度	85(14.38)	7(8.24)		
2 ~ 3 次/月	80(13.54)	5(6.25)		
1 ~ 2 次/周	119(20.14)	7(5.88)		
> 2 次/周	44(7.45)	2(4.55)		
下班后疲劳感觉			11.889	0.008
无疲劳	88(14.89)	3(3.41)		
稍疲劳	356(60.24)	25(7.02)		
疲劳	79(13.37)	8(10.13)		
非常疲劳	68(11.51)	12(17.65)		
工作中腕部屈曲、伸展、侧弯或旋转			25.839	< 0.001
是	297(50.25)	41(13.80)		
否	294(49.75)	7(2.38)		
工具、手持设备或工件不易拿握			19.345	< 0.001
是	133(22.50)	23(17.29)		
否	458(77.50)	25(5.46)		
使用工具或物品时手用力情况			7.956	0.093
力量极低/低(15%最大力量)	231(39.09)	12(5.19)		
力量中等(30%最大力量)	215(36.38)	20(9.30)		
力量高(50%最大力量)	98(16.58)	9(9.18)		
力量极高(80%最大力量)	22(3.72)	2(9.09)		
力量达到峰值(> 80%最大力量)	25(4.23)	5(20.00)		
在工作时,手一般保持高度			9.155	0.002
肩或肩以下	420(71.07)	25(5.95)		
肩以上	171(28.93)	23(13.45)		
工作中手臂上下左右移动的发生频率			4.888	0.087
低(< 10 次/min)	347(58.71)	21(6.05)		
中(10 ~ 20 次/min)	176(29.78)	19(10.80)		
高(> 20 次/min)	68(11.51)	8(11.76)		
手部抓握质量/kg			1.699	0.637
< 5	394(66.67)	28(7.11)		
5 ~ 10	97(16.41)	10(10.31)		
11 ~ 15	45(7.61)	4(8.89)		
> 15	55(9.31)	6(10.91)		
经常搬运 > 5 kg 的物体			3.418	0.064
是	166(28.09)	19(11.45)		
否	425(71.91)	29(6.82)		
每天工作多久后休息(不含午休)/h			2.878	0.579
< 1	47(7.95)	2(4.26)		
1 ~ < 2	158(26.73)	12(7.59)		
2 ~ < 3	297(50.25)	29(9.76)		
3 ~ < 4	41(6.94)	2(4.88)		
≥ 4	48(8.12)	3(6.25)		
工作能否顺利跟上工作节奏			4.237	0.120
能	454(76.82)	31(6.83)		
有时难以跟上	125(21.15)	16(12.80)		
经常难以跟上	12(2.03)	1(8.33)		
工作场所地面不平、湿滑、倾斜			1.920	0.166
是	94(15.91)	11(11.70)		
否	497(84.09)	37(7.44)		
空间受限而以不舒适的姿势工作			3.013	0.083
是	116(19.63)	14(12.07)		
否	475(80.37)	34(7.16)		

表 1(续)

分组	调查人数	WMSDs	χ^2 值	P 值
在低温环境下工作或处理低温物料			0.353	0.552
是	131(22.17)	9(6.87)		
否	460(77.83)	39(8.48)		
对工作区域照明的感受			10.644	0.001
太亮刺眼/光线暗淡	125(21.15)	19(15.20)		
舒适	466(78.85)	29(6.22)		

2.3 腕/手部 WMSDs 影响因素分析

以研究对象腕/手部是否罹患 WMSDs 为响应变量(否 = 0, 是 = 1), 以表 1 中单因素分析 $P < 0.15$ 的因素为预测变量, 进行多因素 logistic 回归分析。多重共线性诊断结果显示, 各因素间容忍度均 > 0.1 , 方差膨胀因子均 < 10.0 , 各变量间的多重共线性程度不高。多因素 logistic 回归分析结果显示: 工作中存在腕部屈曲、伸展、侧弯或旋转, 工具、手持设备或工件太大或太小而不易掌握的情况时, 劳动者腕/手部发生 WMSDs 的风险分别是不存在以上情况劳动者的 5.194 倍(95%CI: 2.239 ~ 12.050)和 2.373 倍(95%CI: 1.266 ~ 4.448)。见表 2。

表 2 腕/手部肌肉骨骼疾患影响因素的
多因素 logistic 回归分析

因素	偏回归 系数	标准 误	Wald χ^2 值	P 值	OR(95%CI)值
工作中腕部屈曲、伸展、侧弯或旋转					
否					1.00
是	1.647	0.429	14.720	< 0.001	5.194(2.239 ~ 12.050)
工具、手持设备或工件太大或太小, 不易掌握					
否					1.00
是	0.864	0.320	7.273	0.007	2.373(1.266 ~ 4.448)

注: 预测变量赋值中, 性别: 男性 = 1(对照), 女性 = 2; 下班后疲劳感觉: 无疲劳 = 1(对照), 稍疲劳 = 2, 疲劳 = 3, 非常疲劳 = 4; 工作中腕部屈曲、伸展、侧弯或旋转: 否 = 0(对照), 是 = 1; 工具、手持设备或工件太大或太小, 不易掌握: 否 = 0(对照), 是 = 1; 使用工具或物品时手的用力情况: 力量极低/低 = 1(对照), 力量中等 = 2, 力量高 = 3, 力量极高 = 4, 力量达到峰值 = 5; 工作中, 手的位置一般保持在肩或肩以下 = 1(对照), 在肩以上 = 2; 工作中手臂上下左右移动的发生频率: 低 = 1(对照), 中 = 2, 高 = 3; 经常搬运 > 5 kg 的物体: 否 = 0(对照), 是 = 1; 工作时能顺利跟上工作节奏 = 1(对照), 有时难以跟上 = 2, 经常难以跟上 = 3; 工作中以不舒适的姿势工作: 否 = 0(对照), 是 = 1; 对工作区域照明的感受: 太亮刺眼/光线暗淡 = 1(对照), 舒适 = 2。

3 讨论

腕/手部损伤是上肢常见的损伤。本次研究结果显示, 某汽车制造企业一线劳动者腕/手部 WMSDs 患病率(8.1%), 低于李峥等(44.1%)^[8]、徐宇萍等(15.7%)^[9]、Chen 等(14.9%)^[10]、舒友梅等(10.1%)^[11]对汽车制造业劳动者的调查结果。本研究腕/手部发

生率较低的原因可能是其他部位的疼痛更为普遍, 可能比上肢远端疼痛发生得更早, 这会影响劳动者继续操作, 而上肢远端疼痛可能需要更长的时间来发展^[2, 13]。另一个原因可能是目前职业流行病学研究中, WMSDs 的判断多采用自报式的病例判定标准, 导致不同研究结果之间存在差异^[2, 12-14]。

研究显示, 反复和高强度的手密集型工作与腕/手部 WMSDs 的发生和严重程度有关。本研究多因素分析结果显示, 工作时存在手腕屈曲、伸展、侧弯或旋转, 以及工具、手持设备或工件太大或太小而不易掌握情况, 其腕/手部发生 WMSDs 的可能性高。Chen 等^[10]研究发现, 工作时需要频繁上下弯曲手腕, 劳动者手腕损伤的可能性增高(OR = 1.81; 95%CI: 1.84 ~ 2.11), 与本研究结果相似。汽车制造业属于劳动密集型企业, 在焊接和总装车间中, 工人一般是在岗位原地长时间地重复工作, 手腕需要频繁地运动来完成任务。在单调重复的手工装配和焊接操作中, 如总装车间的底盘、分装、车门仪表等工段, 除了手腕姿势的频繁运动, 工人还需要重复取放工件和工具; 当工件或者工具大小不合适时, 就需要手用力捏住或握住物体或工具, 使腕部组织和肌肉处于紧张状态。长期处于这样的工作状态, 肌肉、神经和肌腱容易出现损伤。

本研究单因素分析结果显示, 下班后不同疲劳感觉的劳动者腕/手部 WMSDs 患病率不同($P < 0.01$)。姜萍等^[15]研究发现制造企业装配劳动者班后疲劳者的多部位 WMSDs 发生风险为非疲劳者的 2.95 ~ 2.61 倍。作业疲劳可导致职业人群面临较大的伤害和疾病风险^[16]。但在本次多因素分析中, 未发现下班后疲劳感觉是腕/手部 WMSDs 的影响因素, 可能原因是疲劳感是一种主观感受; 另外在此次调查中, 员工大多认为处在稍疲劳状态, 与其他研究的分组标准存在差异。本研究未发现性别、年龄等常见的个体特征与腕/手部 WMSDs 间的关系, 可能原因是参与调查的企业, 劳动者多为男性, 在生活习惯等方面类似, 无法体现出这些个体特征与疾病之间的关系。后续需增加其他企业数据, 来综合分析判断个体特征等因素与腕/手部 WMSDs 之间的关系。

综上所述, 本研究发现汽车制造业一线劳动者腕/手部肌肉骨骼疾患的发生主要与腕/手部工作姿势、持续重复和局部受压等要素密切相关。建议加强劳动者工效学健康宣教, 通过完善管理制度、合理布局工作站、开展操作技能和工效学培训、改善劳动者工作姿势、优化工作空间、改善工作环境等

措施预防和控制 WMSDs 的发生。

作者声明 本文无实际或潜在的利益冲突

参考文献

- [1] JIA N,ZHANG M,ZHANG H,et al. Prevalence and risk factors analysis for low back pain among occupational groups in key industries of China[J]. BMC Public Health. 2022,22(1):1-10.
- [2] SALVENDY G. Handbook of human factors and ergonomics: fourth edition[M]. New York:John Wiley & Sons,Inc.,2012.
- [3] 康伏梅,单永乐,冯斌,等. 某汽车总装车间工人多部位肌肉骨骼疾患调查及影响因素分析[J]. 中华劳动卫生职业病杂志,2021,39(1):40-43.
- [4] 王忠旭. 工作相关肌肉骨骼疾患及人因工效学评估方法[M]. 北京:人民卫生出版社,2023.
- [5] 陈春明,孔灵芝. 中国成人超重和肥胖症预防控制指南[M]. 北京:人民卫生出版社,2006.
- [6] 莫连芳. 对大学生体育锻炼习惯概念的界定[J]. 江汉大学学报(自然科学版),2007,35(1):91-93.
- [7] BORG G A. Psychophysical bases of perceived exertion[J]. Med Sci Sports Exerc,1982,14(5):377-381.
- [8] 李峥,吴家兵,赵国兵,等. 某汽车制造厂电焊工手/腕部肌肉骨骼疾患的影响因素及归因分析[J]. 环境与职业医学,2023,40(1):43-48.
- [9] 徐宇萍,刘小安,时庆华,等. 某汽车制造企业员工职业性肌

肉骨骼疾患及相关危险因素研究[J]. 中国工业医学杂志,2020,33(4):295-299.

- [10] CHEN N,LI G,SUN X,et al. Prevalence status and associated factors of wrist postural injury in the Chinese occupational population[J]. Front Public Health,2022,10:1047814.
- [11] 舒友梅,陈培仙,杨燕,等. 某汽车零部件生产企业工人工作相关肌肉骨骼损伤影响因素分析[J]. 职业卫生与应急救援,2021,39(3):272-276.
- [12] HE X,XIAO B,WU J,et al. Prevalence of work-related musculoskeletal disorders among workers in the automobile manufacturing industry in China:a systematic review and meta-analysis[J]. BMC Public Health,2023,23(1):2042.
- [13] WANG P C,REMPEL D M,HARRISON R J,et al. Work-organisational and personal factors associated with upper body musculoskeletal disorders among sewing machine operators[J]. Occup Environ Med,2007,64(12):806-813.
- [14] 秦东亮,王生,张忠彬,等. 工作相关肌肉骨骼疾患判别标准研究进展[J]. 中国职业医学,2017,44(3):362-364.
- [15] 姜萍,董一丹,金旭,等. 四家制造企业装配作业人员工作相关肌肉骨骼疾患的影响因素[J]. 环境与职业医学,2022,39(6):593-599.
- [16] CUNNINGHAM T R,GUERIN R J,FERGUSON J,et al. Work-related fatigue:a hazard for workers experiencing disproportionate occupational risks[J]. Am J Ind Med,2022,65(11):913-925.

收稿日期:2024-03-04

(上接第 312 页)

- formaldehyde at room temperature on $\text{MnxCo}_{3-x}\text{O}_4$ catalysts derived from metal-organic frameworks [J]. Appl Catal A-Gen,2021,611:117975.
- [26] CHEN L,LIU Y,FANG X,et al. Simple strategy for the construction of oxygen vacancies on $\alpha\text{-MnO}_2$ catalyst to improve toluene catalytic oxidation [J]. J Hazardous Mater,2021,409:125020.
- [27] XU X,WANG P,XU W,et al. Plasma-catalysis of metal loaded SBA-15 for toluene removal:comparison of continuously introduced and adsorption-discharge plasma system [J]. Chem Eng J,2016,283:276-284.
- [28] XU W,CHEN B,JIANG X,et al. Effect of calcium addition in

plasma catalysis for toluene removal by Ni/ZSM-5:acidity/basicity,catalytic activity and reaction mechanism[J]. J Hazardous Mater,2020,387:122004.

- [29] ZHOU M,LI S,CAO M,et al. Enhanced hydrophobic microporous Pt/silica with high adsorption and catalytic oxidation for trace toluene removal[J]. J Environ Chem Eng,2023,11(5):110821.
- [30] LI S,WANG T,ZHOU M,et al. PtPd/molecular sieve as dual-functional monolithic adsorbent/catalyst for effective removal of trace toluene at low-temperature and their electric-heating performance[J]. J Ind Eng Chem,2022,114:549-559.

收稿日期:2024-04-01