模压淬火工艺对渗碳轴承套圈畸变的影响

张春宝[1]，赵秀华[2]

1.浙江为尚机械有限公司　浙江湖州　313000
2.北京亿磁电热科技有限公司　北京　100176

摘要：SAE5120钢制轴承套圈渗碳淬火后畸变较大，通过感应加热并模压淬火的方式可有效控制轴承套圈畸变。模具施加不同的压力、不同的加热工艺对套圈的畸变和理化性能有明显影响。阐述了不同模压淬火工艺方法，并通过统计分析，得出了模具压力与淬火冷却介质浓度对硬度、畸变和磨削余量的影响。

关键词：轴承套圈；模压淬火；畸变；磨削余量；压力；淬火冷却介质浓度

Influence of deformation on carburized bearing rings by die quenching

ZHANG Chunbao[1], ZHAO Xiuhua[2]

1.Zhejiang Weishang machinery Co., Ltd., Huzhou, 313000, Zhejiang, China
2.Beijing e-Magnetic Induction Technology Co., Ltd., Beijing 100176, China

Abstract: The bearing ring made of SAE5120, after carburizing and quenching, the deformation of the ring is bad. The deformation of the bearing ring can be effectively controlled through induction heating and die quenching. The application of different pressures and heating processes on the mold has a significant impact on the deformation and physicochemical properties of the ring. This article elaborates on different mold pressing quenching methods and, through statistical analysis, obtains the effects of mold pressure and quenching medium concentration on deformation and grinding allowance.

Keywords: bearing ring; die quenching; deformation; grinding allowance; pressure; quenchant concentration

1　序言

热处理中的畸变实质是外力大于材料本身的屈服强度。热处理过程材料经历了温度变化和相变，由于热胀冷缩和相变的关系，其尺寸变化如图1所示[1, 2]。汽车变速箱在用圆锥轴承套圈淬回火生产中，由于轴承套圈薄端和厚端在加热、冷却过程中组织转变的不同，因此产生畸变的概率非常大。

轴承套圈淬回火后，由于畸变原因造成报废，因此使加工成本大幅度增加，行业内挽救畸变不合格套圈多采用敲击整形、内撑整形或模压淬火的方法。敲击整形与内撑整形法效率较低，适用于少量

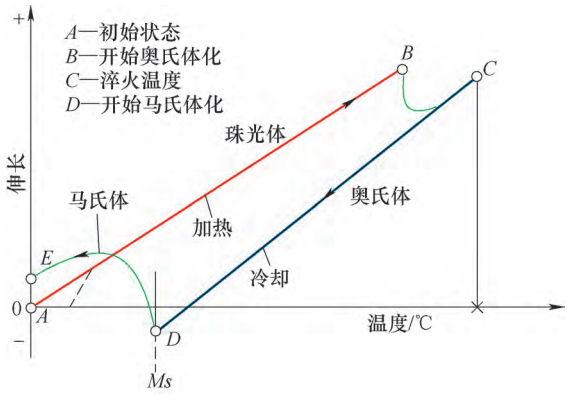


图1　热胀冷缩及组织转变时工件尺寸变化示意

畸变产品，而模压淬火方法效率高、可靠性强、自动化程度高，是热处理行业中改变畸变、控制畸变的重要途径之一[3]。

模压淬火利用工件从室温到奥氏体化温度的转变，金属强度随温度升高急速降低[4]（见图2），屈服强度从室温的1800MPa降低到800℃的100MPa，因此如果在高温阶段施加压力矫形，则理论上所需的压力较低，同时在高温下，金属的屈服强度低，塑性畸变容易，发生断裂的风险低。

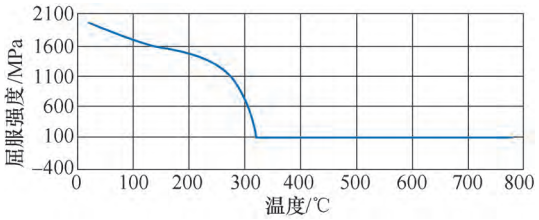


图2　屈服强度随温度变化趋势

模压淬火可有效地解决圆锥轴承套圈的畸变问题。在模压淬火加工过程中，不同的加热方法、模具的不同压力和淬火方法，均对最终零件的畸变有较大影响[5]。

2　试验方法

选取渗碳淬火后的SAE5120钢制轴承套圈32010/01，在北京亿磁电热科技有限公司生产的BRYC6-120型矫形模压感应淬火压床上进行矫形模压淬火试验。所取渗碳轴承套圈化学成分见表1，外径磨削余量0.12～0.48mm，椭圆畸变如图3所示。

表1　试验套圈的化学成分（质量分数）　（%）

元素	C	Si	Mn	Cr	P	S	Fe
标准值	0.17～23	0.15～0.35	0.7～0.9	0.7～0.9	≤0.03	≤0.04	—
实测值	0.21	0.20	0.74	0.78	0.008	0.009	余量

在感应模压淬火工艺中，电源频率、输出功率的主要作用是保证工件的加热均匀、完全奥氏体化，模具压力以及淬火冷却介质喷射压力、温度、浓度等是保证淬火冷却达到模压淬火要求的重要参数，各参数均是热处理工艺的重要组成部分，是影响最终热处理质量的关键因素[6]。为了验证模具压力和淬火冷却介质对最终产品质量的影响，本次验证着重选取了淬火模具施加的压力和淬火冷却介质

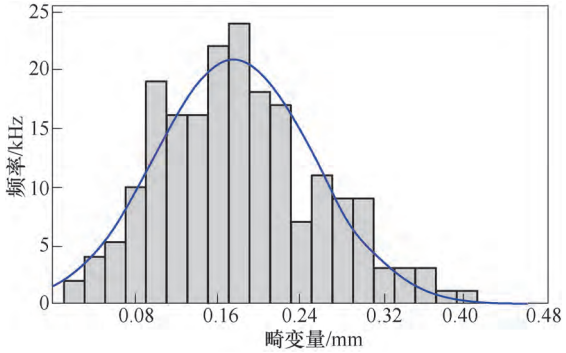


图3　轴承套圈32010/01渗碳淬火后椭圆畸变分布情况

两个因素，各选取2个参数进行工艺验证，每组20件，验证工艺参数见表2。

表2　验证工艺参数

项目	加热工艺	模具施加压力/kgf	淬火冷却介质浓度（%）
工艺1	功率：47～48kW 频率：14.5kHz 时间：13s	65	2
工艺2		65	8
工艺3		110	2
工艺4		110	8

注：采用KR6580淬火冷却介质，温度为（30±5）℃。

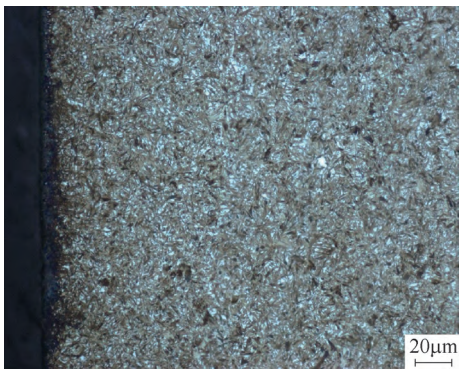
3　感应模压淬火结果检测

3.1　理化性能检测及对比

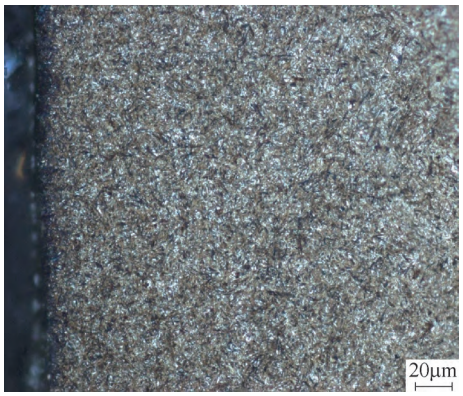
经过模压感应淬火后，每组验证各取2件检测表面金相组织、硬度和有效硬化层深度。表面硬度61～62.5HRC，心部硬度40.5～44.5HRC，具体结果见表3。检测表面组织为细小针状马氏体、残留奥氏体，按JB/T 8881—2011《滚动轴承　零件渗碳热处理 技术条件》规定判定为2级，如图4所示。工件表面硬度、心部硬度、表面组织和心部组织均满足JB/T 8881—2011技术要求。

表3　模压淬火后硬度及有效硬化层

序号	硬度HRC		有效硬化层/mm（550HV1）
	表面	心部	
工艺1	62.0～62.5	43.5～44	1.35
工艺2	61.0～61.5	40.5～41	1.10
工艺3	62.0～62.5	44～44.5	1.34
工艺4	61.0～61.5	40.5～41	1.13
技术要求	60～64	30～45	1.0～1.5

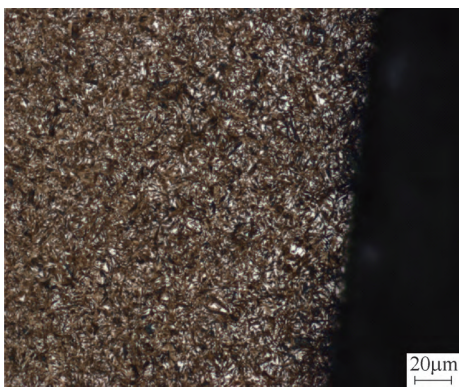


a）工艺1



b）工艺2

c）工艺3



d）工艺4

图4　模压淬火后表面组织

3.2　畸变情况检测

用轴承仪表D913和百分表检测经模压感应淬火的样件，经检测，轴承套圈外径畸变0.03～0.15mm，畸变数据见表4，分布情况如图5所示。从数据结果判断，模具施加的压力和淬火冷却介质的浓度，对淬火后工件的畸变有较大影响。

表4　模压淬火后轴承套圈外径畸变情况　（mm）

序号	外径椭圆畸变情况			
	工艺1	工艺2	工艺3	工艺4
1	0.07	0.05	0.04	0.05
2	0.05	0.04	0.04	0.04
3	0.04	0.03	0.05	0.03
4	0.06	0.06	0.07	0.04
5	0.05	0.08	0.09	0.05
6	0.08	0.10	0.12	0.07
7	0.09	0.12	0.08	0.05
8	0.11	0.09	0.08	0.06
9	0.03	0.07	0.09	0.07
10	0.15	0.05	0.08	0.06
11	0.06	0.04	0.06	0.06
12	0.05	0.07	0.04	0.08
13	0.07	0.09	0.03	0.07
14	0.09	0.05	0.06	0.07
15	0.10	0.04	0.04	0.10
16	0.08	0.07	0.07	0.05
17	0.07	0.08	0.03	0.04
18	0.08	0.06	0.05	0.04
平均	0.074	0.066	0.062	0.057
最小畸变	0.03	0.03	0.03	0.03
最大畸变	0.15	0.12	0.12	0.10
畸变极差	0.12	0.09	0.09	0.07

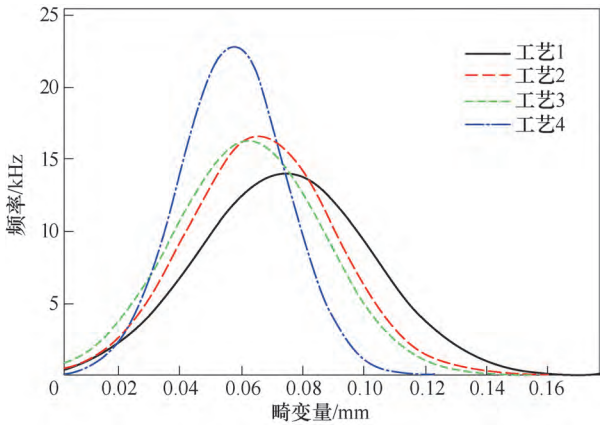


图5　模压淬火后轴承套圈畸变分布

3.3 外径磨削余量检测

用D913轴承仪表进行外径尺寸测量，各工艺磨削余量见表5。经对比，模压感应淬火施加的压力变化时，外径余量有一定改变。

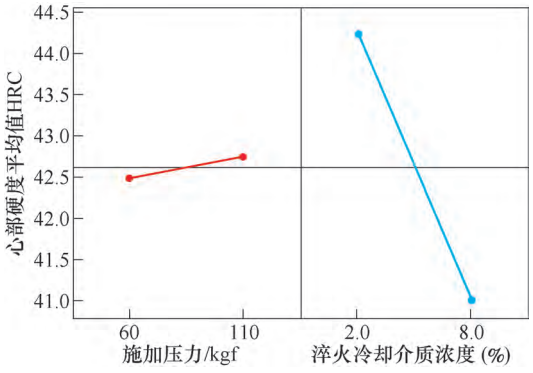
表5 模压感应淬火后外径磨削余量情况 （mm）

编号	外径平均磨削余量			
	工艺1	工艺2	工艺3	工艺4
1	0.26	0.34	0.36	0.39
2	0.32	0.35	0.37	0.37
3	0.35	0.26	0.36	0.38
4	0.38	0.25	0.38	0.32
5	0.28	0.33	0.33	0.33
6	0.3	0.26	0.31	0.39
7	0.32	0.33	0.36	0.38
8	0.34	0.37	0.36	0.32
9	0.35	0.35	0.38	0.34
10	0.37	0.34	0.38	0.3
11	0.33	0.35	0.35	0.31
12	0.26	0.29	0.33	0.38
13	0.28	0.32	0.36	0.39
14	0.32	0.3	0.32	0.35
15	0.36	0.3	0.35	0.34
16	0.33	0.36	0.3	0.36
17	0.27	0.35	0.36	0.37
18	0.31	0.34	0.35	0.34
平均余量	0.318	0.322	0.351	0.353
最小余量	0.26	0.25	0.30	0.30
最大余量	0.38	0.37	0.38	0.39
余量极差	0.12	0.12	0.08	0.09

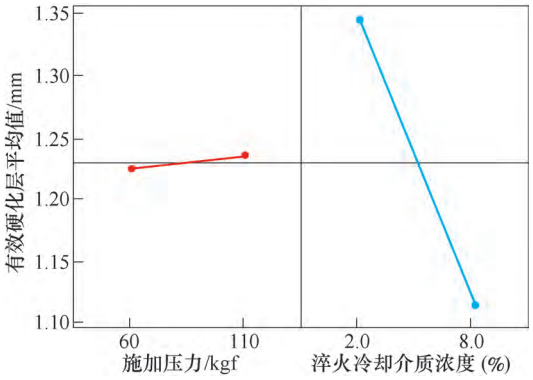
4 数据统计与分析

4.1 理化性能的影响因素

理化检测结果显示，4种工艺均能满足JB/T 8881—2011的技术要求，但心部硬度及有效硬化层深有明显区别。工艺验证中，采用了2%和8%2种不同浓度的淬火冷却介质，根据淬火冷却能力与淬硬性的关系和淬火冷却介质烈度计算方法可知，低浓度的淬火冷却介质淬硬能力大于高浓度的淬火冷却介质[7]，表3的硬度检测结果与上述理论相符，即在加热条件相同的情况下，低浓度的淬火冷却介质更容易获得较大淬火烈度，工件可获得更高的热处理硬度。根据表3相关数据，对施加压力和淬火冷却介质浓度与工件硬度、有效硬化层的相关性进行分析，结果如图6所示。从图6可看出，施加压力对工件理化性能影响较小，而淬火冷却介质浓度对工件硬度和有效硬化层深度影响较大。



a）心部硬度



b）有效硬化层深

图6 施加压力与淬火冷却介质浓度对心部硬度和有效硬化层的影响

4.2 畸变的影响因素分析

1）轴承套圈模压感应淬火的重要目的之一是获得较好的畸变，以此来改善工件淬回火畸变并优化磨削余量，为提升磨削效率做准备。验证工艺未调整加热参数，只对模具施加的压力和淬火冷却介质进行研究，从数据分析可知工艺1～工艺4均可获得较好的畸变结果，但畸变结果又有一定区别。未模压感应淬火前，存在较小余量且畸变较大情况，套圈最小磨削余量0.12mm、最大磨削余量0.48mm，外径椭圆畸变最大0.44mm，磨削余量散差0.36mm，磨削黑皮报废风险较高；对比模压感应淬火后各工艺情况发现，模压感应淬火后磨削余量为0.25～0.39mm，最大椭圆畸变0.15mm，磨削余量

散差0.12mm以内，磨削黑皮报废概率极低。模压感应淬火前后磨削余量的最大、最小情况对比如图7所示。由图7可知，模压淬火后工件尺寸趋于集中。

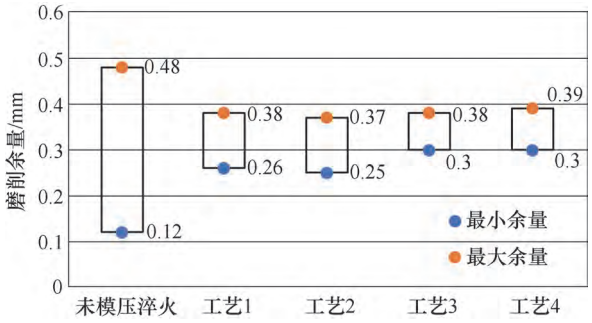
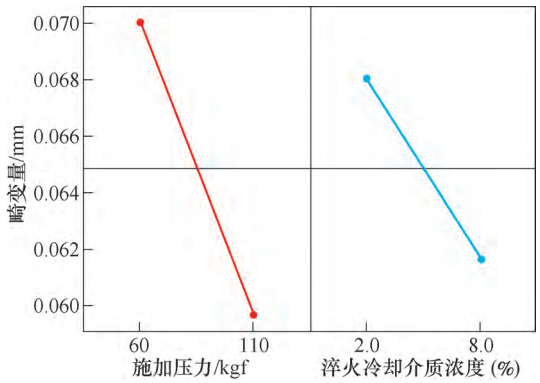


图7　模压淬火前后套圈磨削余量情况

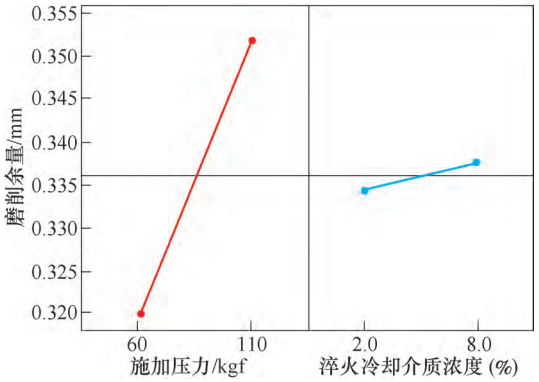
2）在加热条件相同的情况下，施加于模具的压力分别为60kgf、110kgf，淬火冷却介质浓度分别是2%、8%时，平均畸变分别为0.074mm、0.066mm和0.062mm、0.057mm，工件的最大畸变分别为0.15mm、0.12mm和0.12mm、0.10mm。根据数据对比发现，当施加于模具的压力增大时，畸变的平均值和最大值均呈下降趋势；当淬火冷却介质浓度增大时，畸变的平均值和最大值均呈下降趋势。

3）在加热条件相同的情况下，施加于模具的压力为60kgf和110kgf、淬火冷却介质浓度分别是2%和8%时，轴承套圈外径平均磨削余量分别为0.318mm 、0.322mm和0.351mm、0.353mm，外径最大磨削余量分别为0.38mm、0.37mm和0.38mm、0.39mm；根据数据对比发现，当施加于模具的压力增大时，余量平均值和最大值均呈上升趋势；当淬火冷却介质浓度增大时，磨削余量增大情况不明显。

在加热条件一定的情况下，结合上述对施加压力和淬火冷却介质浓度与轴承套圈畸变、外径磨削余量的影响情况进行相关性分析，结果如图8所示。施加于模具的压力、淬火冷却介质浓度对轴承套圈模压淬火的外径磨削余量、畸变均有不同程度的影响。施加的压力越大，轴承套圈外径磨削余量越大，同时轴承套圈的畸变控制效果越好；淬火冷却介质浓度越大，轴承套圈的畸变控制越好，但是对轴承套圈外径磨削余量的影响程度较小。施加的压力对畸变和磨削余量均有较大影响，而淬火冷却介质浓度对畸变影响较大，对磨削余量影响较小。



a）畸变



b）磨削余量

图8　施加压力与淬火冷却介质浓度对畸变和磨削余量的影响

5　总结与讨论

1）在轴承套圈模压淬火工艺中，施加的压力和淬火冷却介质浓度对轴承零件的理化性能、畸变和磨削余量均有一定程度的影响，制定工艺时应充分考虑加热条件、模具压力和淬火冷却介质浓度对工件最终结果的影响。总体而言，施加的压力对畸变和磨削余量影响较大，对零件的理化性能影响较小，淬火冷却介质浓度对畸变和理化性能均有较大影响。

2）淬火冷却介质浓度对零件的硬度和有效硬化层有较大影响，较低的淬火冷却介质浓度可以获得更高的硬度和更深的有效硬化层，在满足硬度要求的情况下，可以适当降低其浓度，但浓度降低会使淬火畸变增大，影响模压淬火的效果；如果渗碳工艺与模压感应淬火的淬火冷却介质浓度进行有效的配合调整，可以在一定程度上降低渗碳工序渗碳层深度，缩短渗碳工艺周期时间，降低渗碳加工成本。

3）施加于模具的压力对淬火的畸变和磨削余量均有较大的影响，压力增大时可以获得较小的畸变和较大的外径磨削余量，因此在模压淬火压床设计时应考虑预留足够的压力冗余，同时设备的主要受力机构应具备足够的强度，以保证整体设备的持久精度。对于工件而言，经模压感应淬火后外径磨削余量趋于一致，散差减小，应注意外径余量与滚道余量、模具尺寸和施加压力的匹配设计，压力的选择应综合考虑外径余量和滚道余量的平衡关系，在提升整体生产效率和产品质量的同时，避免出现磨削黑皮报废。

6 结束语

SAE5120 钢制轴承套圈渗碳淬火后畸变较大，采用新开发的矫形模压感应淬火设备可以通过改变矫形压力。淬火液浓度等工艺参数将圆度畸变从0.4mm减小到012mm以内，而且绝大部分在 0.06mm附近，这样给磨削余量优化留下了很大的空间，进而优化轴承套圈的加工工艺，达到提质增效的有益效果，对行业有很大的借鉴意义。

参考文献：

[1] 中国机械工程学会热处理学会. 热处理手册（第1卷：工艺基础）[M]. 5版. 北京：机械工业出版社，2008.

[2] 邢振平. GCr15钢套圈模压淬火规律探讨[J]. 机械工人（热加工），2004（11）：18-22.

[3] 陈国民. 对齿轮热处理畸变控制技术的评述[J]. 金属热处理，2012，37（2）：1-13.

[4] 易亮，朱百智，蒋运东，等. 风电用齿圈感应淬火裂纹的防控研究：“第13届中国热处理活动周”论文集[C]. 北京：中国机械工程学会热处理学会，2020.

[5] 张光荣. 控制畸变的模压淬火技术与装备[J]. 金属热处理，2012，37（7）：138-141.

[6] 闫满刚. 模压式感应淬火和回火技术及装备工艺[J]. 金属热处理，2010，35（3）：129-131.

[7] TOTTEN G E，BATES C E，CLINTON N A. Handbook of quenchants and quenching technology（Volume 4F）[M]. USA：ASM International，2024.

MW 20240316

（上接第57页）

6.3 生产验证

根据感应淬火试验得到的第三组A参数，进行产品加工，经过淬火、回火处理后，检测齿面齿根硬度、硬化层深度、磁粉检测均达到了产品技术要求，大模数、高要求的齿部感应淬火技术，取得了实质性的突破。

7 结束语

1）通过仿形设计、线切割制作的感应器，避免了齿部处的电流密集及过热、过烧等现象，甚至淬火裂纹的产生，实现了硬化层仿齿廓形状均匀分布，硬化层深度超过了6mm。

2）通过感应器间隙大小及加热功率、扫描速度等工艺参数的调整，使得齿部感应淬火的淬硬层深度得到有效的控制，分布均匀，继而提升了淬火质量。

3）感应器设计互相独立的两路冷却液的设计，能够充分保证齿轮的冷却均匀性，进一步确保了淬火质量的控制，且调整简单可靠，易于实施，质量稳定，效率高，具有较好的应用推广价值。

4）优化后的工艺参数，满足了齿部所需的淬火硬度、淬硬层深度以及淬火均匀性，且热后变形小，达到了产品设计要求，提高了产品质量。

参考文献：

[1] 梁朋涛，李志强，汤晓敏，等. 汽车传动轴凸缘的感应淬火工艺研究[J]. 金属加工（热加工），2019（8）：55-57.

[2] 孔春花，曹淑芬，蔡安克，等. 车辆零件热处理技术及应用实例 [M]. 北京：化学工业出版社，2013：124-129.

[3] 朱会文，胡晓平，许建芳. 导磁体在汽车零件感应加热中的应用技术[J]. 热处理， 2003，18（3）：36-42.

MW 20240408