

摩擦与润滑

热作模具钢高温销-盘磨损实验研究

张赛军¹, 丁伟洋¹, 宋世光¹, 汤小平²

(1. 华南理工大学机械与汽车工程学院, 广东 广州 510641; 2. 江西豪斯特汽车零部件有限公司, 江西 九江 332400)

摘要: 为研究3种常用热作模具钢的高温硬度和在100和300℃温度条件下的磨损率、摩擦因数的变化规律, 通过高温硬度实验和高温摩擦磨损实验获得了3种热作模具钢的硬度、摩擦因数、磨损率随温度的变化规律。结果表明: 随着温度的升高, 硬度逐渐下降, 表面渗氮处理虽能够大幅度提高材料硬度, 但渗氮处理后的硬度随着温度升高而下降的幅度更明显; 300℃下, 销-盘接触表面的变形抗力降低, 材料与板材之间的摩擦因数小于100℃下的摩擦因数, 同时300℃下销表面产生较厚的氧化层, 其磨损率小于100℃下的磨损率; 材料表面渗氮处理后在100℃下材料的耐磨性提高, 但在300℃下磨损量反而增大。实验结果为模具材料的选择和模具耐磨性的提高提供了可靠的基础数据支撑。

关键词: 热作模具钢; 模具磨损; 高温硬度; 表面渗氮; 磨损率

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2022.01.025

中图分类号: TG376

文献标志码: A

文章编号: 1000-3940 (2022) 01-0172-08

Experimental research on high temperature pin-disc wear for hot work die steel

Zhang Saijun¹, Ding Weiyang¹, Song Shiguang¹, Tang Xiaoping²

(1. School of Mechanical and Automotive Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China;

2. Jiangxi VHST Auto Parts Co., Ltd., Jiujiang 332400, China)

Abstract: In order to study the high temperature hardness of three commonly used hot work die steels and the change laws of wear rate and friction coefficient at 100 and 300℃, the laws for the hardness, friction coefficient and wear rate changing with temperature for three types of hot work die steels were obtained by high temperature hardness test and high temperature friction-wear test. The results show that the hardness gradually decreases with the increasing of temperature. Although the surface nitriding treatment greatly increases the hardness of the material, the hardness decreases more obviously with the increasing of temperature after nitriding treatment. At 300℃, the resistance to deformation of the pin-disc contact surface is reduced, and the friction coefficient between material and plate is less than that at 100℃. At the same time, the pin surface produces a thicker oxide layer at 300℃, and the wear rate is less than that at 100℃. The surface nitriding treatment of the material improves the wear resistance of the material at 100℃, but at 300℃, the wear amount increases instead. Thus, the test results provide reliable basic data support for the selection of mold materials and the improvement of mold wear resistance.

Key words: hot work die steel; mold wear; high temperature hardness; surface nitriding; wear rate

高强度热冲压不仅可以减轻汽车的重量, 而且保证了汽车覆盖件的强度要求。但模具磨损是高强度钢板热冲压过程中经常遇到的问题^[1], 也是导致模具失效的最主要原因, 磨损造成模具失效的占比高达70%。热成形模具的磨损随着冲压次数的累积不断加重, 与此同时, 产品的质量和精度也会因模具的逐渐磨损而不断下降。研究模具磨损影响因素和计算模具磨损量是提高模具耐磨性的关键, 同时,

模具磨损与磨损率、摩擦因数、硬度等有密切的关系, 精确测得这些参数是准确预测热冲压中模具磨损的前提。因此, 需要通过实验测量和研究热作模具钢磨损的关键参数。

对于模具磨损的研究最早开始于20世纪50年代, 英国的 Archard J F^[2]提出了经典的粘着磨损理论。此后国内外学者在 Archard 磨损理论的基础上开展了广泛的研究, 针对磨损理论的研究、磨损量的计算和减小磨损等方面进行了大量实验研究。Stoehr T 等^[3]通过拉深摩擦因数实验测试装置获得了热成形过程中的摩擦因数, 结果表明随着温度的升高, 摩擦因数显著下降。Carlsson P 等^[4]通过销-

收稿日期: 2021-09-22; 修订日期: 2021-12-15

基金项目: 高品质热作模具钢研发与产业化 (2020B010184002)

作者简介: 张赛军 (1978-), 男, 博士, 副教授

E-mail: mesjzhang@scut.edu.cn

盘摩擦磨损实验,研究了板料不同镀层成分和厚度对模具的摩擦和磨损性能的影响。Groche P 等^[5]通过级进模深拉延实验研究铸铁模具材料与镀锌先进高强钢 (DP600) 板对磨时,滑动速度及接触压力对成形模具粘着磨损及磨粒磨损的影响。Hardell J 等^[6]和 Borsetto F 等^[7]通过销-盘 (或球-盘) 摩擦因数实验测试装置测得了摩擦因数,较为系统地研究了热成形过程中温度、接触压力、相对滑动速度和材料表面粗糙度对摩擦因数的影响。Wang W 等^[8]在 550 ℃ 下对 H13 钢进行气体渗氮处理后,完成了摩擦磨损实验,并观察了几种化合物层的磨损形貌。Leite M V 等^[9]研究了经 400 ℃ 恒温等离子渗氮后的 H13 模具钢表面的磨损行为,发现模具表面的磨损机理主要为渗氮层的剥离、磨粒磨损和疲劳磨损。宋宇等^[10]通过高温硬度实验和高温摩擦磨损实验研究了 H13 热作模具钢的磨损规律,并建立了与温度、硬度关联的磨损模型。陈杰^[11]通过销-盘磨损实验研究了模具表面点状、条纹状、网格状处理对磨损量的影响,并利用数值模拟预测了模具的磨损量及寿命。刘义^[12]通过正交实验研究了不同温度、载荷与滑移速度对 B1500HS/H13 钢的高温摩擦

因数和磨损量的影响,并使用 Abaqus 有限元软件研究了热冲压盒型件关键区域的摩擦因数对成形性能的影响。铁争鸣^[13]采用 DEFORM 软件对初始工艺方案下的冲压成形效果进行了模拟,通过分析得到了影响凹模磨损的关键工艺参数。

针对模具钢在实际热冲压中硬度、摩擦因数以及磨损率的大小,本文基于高温摩擦磨损、高温硬度实验,对比 3 种热作模具钢的磨损行为,为热冲压模具选材提供一定的依据;除此之外,还研究了模具表面渗氮对耐磨性的影响,为热冲压过程中提高模具的耐磨性提供可靠的基础数据支撑。

1 实验材料

本文研究了常用的 3 种热作模具钢 CR7V-L、1.2344ESR 和国产 H13,对磨材料为高强钢板 22MnB5,主要化学成分如表 1 所示。3 种模具钢材料分别在 850 ℃ 保温充足之后,升温至 1020 ℃ 进行淬火,加热速率为 10 ℃ · min⁻¹,保温 60 min,油淬;油淬后 530 ℃ 回火,保温 4 h,回火两次,空冷至室温。

表 1 3 种热作模具钢和 22MnB5 高强钢的主要化学元素含量 (%, 质量分数)

Table 1 Contents of main chemical elements in three types of hot work die steels and 22MnB5 high strength steel (%, mass fraction)

材料	C	Si	Mn	Cr	Mo	V	P	S	B
CR7V-L 热作模具钢	0.420	0.500	0.400	6.500	1.300	0.800	-	-	-
1.2344ESR 热作模具钢	0.400	1.000	0.350	5.000	1.300	1.000	-	-	-
H13 热作模具钢	0.370	0.940	0.320	4.900	1.280	0.900	0.019	0.011	-
22MnB5 高强钢	0.258	0.250	1.240	0.143	0.005	0.006	0.021	0.005	0.003

2 实验过程

2.1 高温硬度实验

在 MH-3 型显微硬度计上进行 3 种热作模具钢的高温硬度实验。实验温度分别为 25、100、200、300、400、500 和 600 ℃,所加荷重为 10 kg,加载时间为 5 s。高温硬度圆柱试样的尺寸为直径 $d = \Phi 10$ mm,高度 $h = 6$ mm,为了提高数据测量的准确性、减小误差,一个温度值下保温 10 min,同一个温度下测量 3 次硬度值,然后取其平均值作为该温度下的硬度。同时,为考虑表面渗氮对硬度的影响,分别对 3 种材料试样进行表面渗氮处理。采用武汉八一零离子氮化炉进行模具材料表面渗氮处理。炉

内通入氮气与氢气的体积比例为 2 : 1,氮气流量为 70 mL · min⁻¹,530 ℃ 渗氮 4 h。

2.2 高温摩擦磨损实验

根据摩擦磨损实验原理,本文研究中基于往复式摩擦磨损的实验平台如图 1 所示。该平台主要由一台 Bruker 公司的 UMT-3 型高温摩擦磨损试验机、预处理后的试样和一台计算机组成,销试样施加的载荷、实验的温度、销的往复滑动速度主要由计算机控制。在实验前,将销盘试样装到卡槽内,加热腔开始对试样进行加热,当腔内温度达到预设的实验温度后进行保温。温度平稳后启动驱动马达,将磨销下降到加热腔中并加载到预设载荷,当载荷平稳后启动加热腔中的驱动马达,带动摩擦块进行往复式移动^[14]。实验过程中的载荷和摩擦因数由系



图 1 高温摩擦磨损实验设备
Fig. 1 High temperature friction-wear test equipment

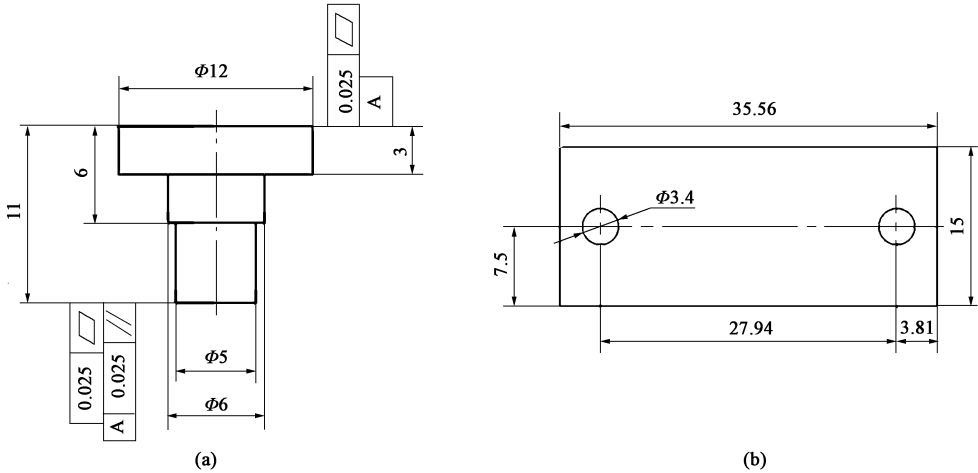


图 2 高温摩擦磨损试样尺寸图
(a) 销试样 (b) 盘试样
Fig. 2 Size diagrams of high temperature friction-wear samples
(a) Pin sample (b) Disc sample

试样磨损 90 min 后，盘试样上被磨掉的体积和表面磨损形貌可以用 ContourGT-K 型光学轮廓仪计算和观察。该光学轮廓仪采用白光干涉原理和非接触式测量方式，可迅速观测到盘试样表面的二维和三维轮廓形貌表征，同时可以取不同部位的截面，观察截面磨损轮廓以及最大磨损深度。然而销试样由于磨损后没有参考点，所以，采用 0.001 mg 精度

的综合热分析仪称重并计算磨损率。

3 实验结果与讨论

3.1 高温硬度实验结果

表 2 为不同温度下 3 种热作模具钢材料及其渗氮处理后的维氏硬度。

表 2 高温显微硬度维氏硬度值 (HV)
Table 2 Vickers hardness values of high temperature microhardness (HV)

材料	温度/℃						
	25	100	200	300	400	500	600
CR7V-L 热作模具钢 (未渗碳)	581.3	572.0	554.5	530.7	478.1	456.3	429.8
CR7V-L 热作模具钢 (渗碳)	1259.0	1155.8	1087.9	1011.1	808.4	700.9	533.3
1.2344ESR 热作模具钢 (未渗碳)	551.7	526.9	530.1	511.8	452.9	445.9	417.2
1.2344ESR 热作模具钢 (渗碳)	1218.3	1050.0	958.5	862.3	824.3	675.7	539.2
H13 热作模具钢 (未渗碳)	548.0	533.5	523.3	519.5	507.5	486.0	430.2
H13 热作模具钢 (渗碳)	1184.9	1107.4	1072.3	1023.6	860.4	757.4	614.9

图 3 为 6 种试样的维氏硬度随温度的变化曲线。从图3中可以看出，随着温度的升高，6种试样的

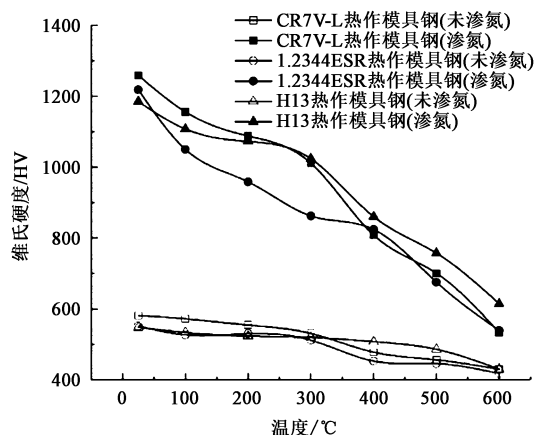
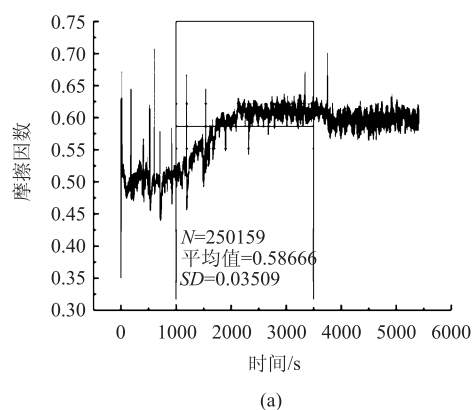
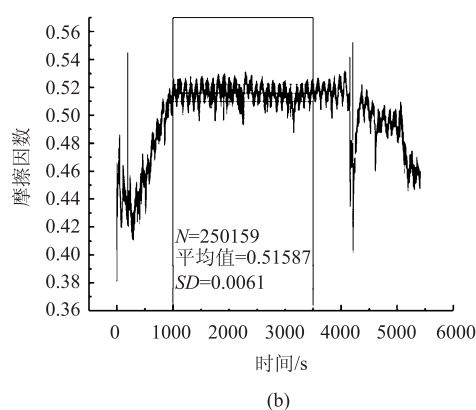


图3 热作模具钢维氏硬度随温度的变化曲线

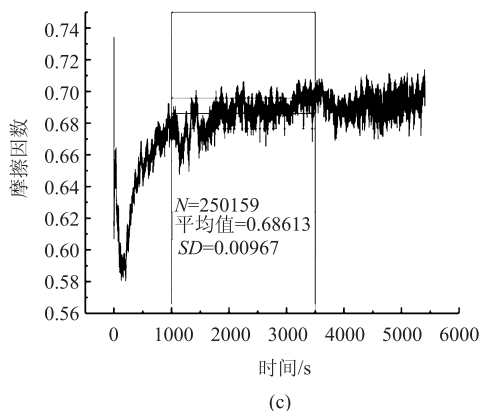
Fig. 3 Change curves of Vickers hardness for hot work die steels with temperature



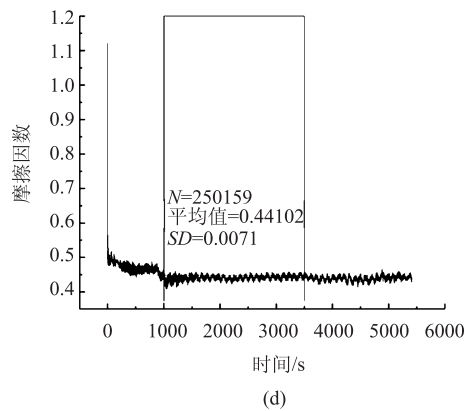
(a)



(b)



(c)



(d)

图4 CR7V-L 热作模具钢的摩擦因数随时间的变化曲线

(a) 未渗氮, 100 °C (b) 未渗氮, 300 °C (c) 渗氮, 100 °C (d) 渗氮, 300 °C

Fig. 4 Change curves of friction coefficient for CR7V-L hot work die steel with time

(a) No nitriding, 100 °C (b) No nitriding, 300 °C (c) Nitriding, 100 °C (d) Nitriding, 300 °C

由表3可知：相同温度和载荷下，渗氮和未渗氮的CR7V-L热作模具钢与板材之间的摩擦因数最大，1.2344ESR热作模具钢材料与板材之间的摩擦因数最小；相同材料在100和300℃下的摩擦因数不同，300℃下，3种材料与板材的摩

硬度值逐渐减小。这是因为温度升高，模具钢材料软化，使材料的硬度降低。且表面渗氮处理后材料的硬度明显提高，但材料渗氮处理后，其硬度受温度的影响更加明显，即随着温度的升高，其硬度的降幅较大，未渗氮材料的硬度受温度的影响较小。

3.2 高温摩擦磨损实验结果

3.2.1 摩擦因数的测定

在高温摩擦磨损实验中，通过计算机实时测量摩擦因数，并利用专业的绘图软件Origin绘制摩擦因数随时间的变化曲线，如图4、图5和图6所示。由于摩擦磨损实验起始阶段中的摩擦因数不平稳，所以，选取图4中偏差较小的区域（1000~3500s）计算平均值，摩擦因数平均值的计算结果和标准差SD如图4~图6所示，其中N为选取的数据量。

擦因数小于100℃下的摩擦因数。这主要是由于温度高，再加上磨损过程中产生的摩擦热使盘试样和销试样的接触表面的变形抗力降低，导致摩擦阻力降低。同种材料渗氮处理后，100℃下的摩擦因数增大，这是由于氮原子与基材的结合差

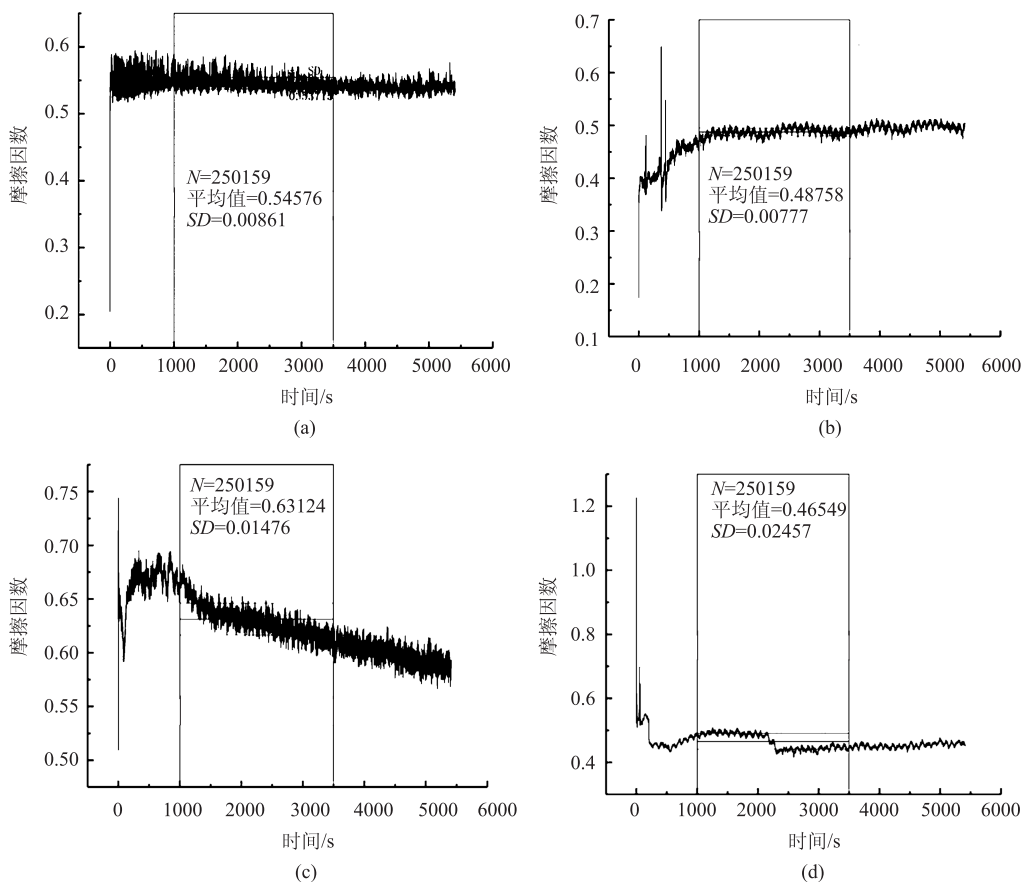


图 5 1.2344ESR 热作模具钢摩擦因数随时间的变化曲线

(a) 未渗氮, 100 °C (b) 未渗氮, 300 °C (c) 渗氮, 100 °C (d) 渗氮, 300 °C

Fig. 5 Change curves of friction coefficient for 1.2344ESR hot work die steel with time

(a) No nitriding, 100 °C (b) No nitriding, 300 °C (c) Nitriding, 100 °C (d) Nitriding, 300 °C

造成的, 而 300 °C 下的摩擦因数变小, 这主要是因为温度高导致互磨销盘接触面软化而引起的。

3.2.2 磨损量及磨损率的测定

实验前采用精度为 0.001 mg 的综合热分析仪称重获得 12 个试样的重量, 并采用精度为 0.001 mm 的螺旋测微器测量磨损前销的高度和直径, 为保证数据的准确性, 高度、直径和质量数据均测量 3 次并取平均值。磨损实验完成后, 同样测量质量和磨损高度, 获得磨损后的质量损失和磨损深度。

磨损率的计算是利用经典 Archard 模型来推导, 磨损体积的计算如式 (1) 所示。

$$V = K_{(T)} \cdot F \cdot L \quad (1)$$

式中: V 为磨损体积, mm^3 ; $K_{(T)}$ 为温度 T 下的磨损率, $(\times 10^{-5} \text{ mm}^3 \cdot (\text{N} \cdot \text{m})^{-1})$; F 为施加的载荷, N ; L 为往复滑动的距离, mm 。

通过实验称重获得质量损失, 进而根据 $V = m/\rho$ 可以获得平均磨损体积。经式 (1) 可推导出磨损

率的计算如式 (2) 所示。

$$K_{(T)} = \frac{m}{\rho \cdot F \cdot L} \quad (2)$$

式中: m 为质量, mg ; ρ 为密度, $(\text{mg} \cdot \text{mm}^{-3})$, 3 种材料 CR7V-L、1.2344ESR、H13 热作模具钢的密度分别为 7.60、7.85 和 7.85 $\text{g} \cdot \text{mm}^{-3}$ 。

磨损前后的质量、高度, 以及磨损质量损失和磨损深度磨损实验结果如表 4 所示。

由图 7 可知: CVR7-L 和 1.2344ESR 热作模具钢在 100 °C 下的磨损率大于 300 °C 下的磨损率, 这主要是因为 300 °C 下, 销头接触表面氧化, 故磨损量较小; 而两种材料的渗氮试样的磨损结果却相反, 这是因为销试样表面渗碳后, 在温度达到 300 °C 时, 氧化不起主要作用, 销试样基体热软化, 导致渗碳试样在 300 °C 下的磨损量大于 100 °C 下的磨损量。H13 热作模具钢材料的渗氮和未渗氮试样的磨损主要受温度影响, 300 °C 时的磨损量大于 100 °C 时的磨损量。

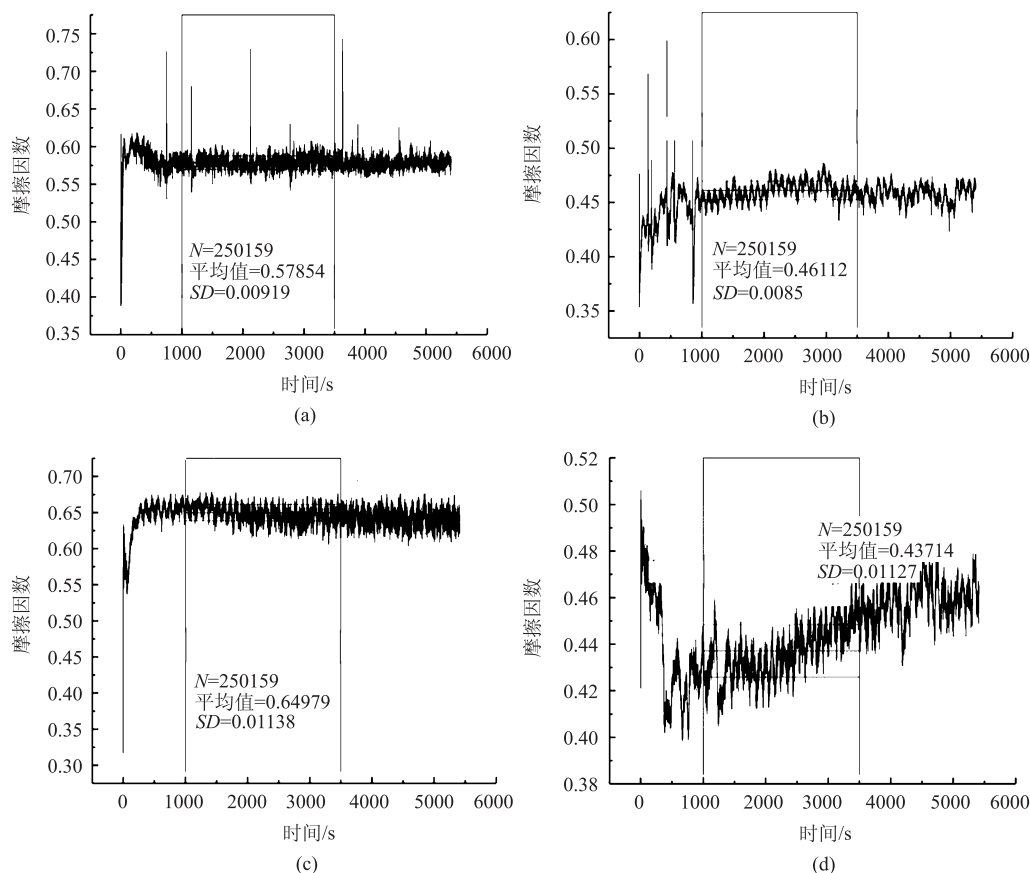


图 6 H13 热作模具钢摩擦因数随时间的变化曲线

(a) 未渗氮, 100 °C (b) 未渗氮, 300 °C (c) 渗氮, 100 °C (d) 渗氮, 300 °C

Fig. 6 Change curves of friction coefficient for H13 hot work die steel with time

(a) No nitriding, 100 °C (b) No nitriding, 300 °C (c) Nitriding, 100 °C (d) Nitriding, 300 °C

表 3 不同材料的销盘试样的摩擦因数

Table 3 Friction coefficients of pin-disk specimens for different materials

材料	表面渗氮处理	温度/°C	
		100	300
CR7V-L 热作模具钢	未渗氮	0.58666	0.51587
	渗氮	0.68613	0.44102
1.2344ESR 热作模具钢	未渗氮	0.54576	0.48758
	渗氮	0.63124	0.46549
H13 热作模具钢	未渗氮	0.57854	0.46112
	渗氮	0.64979	0.43714

22MnB5 高强钢盘试样的磨损体积采用 Bruker 光学轮廓仪测量。摩擦磨损测试后, 用酒精超声波清洗后用光学轮廓仪进行三维、二维形貌及磨损体积的测试, 以渗氮 H13 热作模具钢试样在 100 °C 下为例, 实验中的盘试样的磨损二维、三维轮廓如图 8、图 9 所示。从图 8 可以看出, 中间部位最大磨损深度为 54.7641 μm , 这是由于中间往复运动速率最

快, 摩擦产生的热量较大, 中间部分磨损较大。为观察盘试样磨损截面轮廓, 在二维形貌扫描图中选取 X 轴和 Y 轴方向截取截面, 可以观察到两个截面的磨损轮廓。

3 种材料对应的盘试样磨损体积统计如表 5 所示。由图 10 可知: 100 °C 下, 盘试样的三维磨损轮廓更加明显; 盘试样在 100 °C 下的磨损体积大于 300 °C 下的磨损体积。这是因为: 在 300 °C 时, 销盘试样表面氧化, 硬度增加, 使得销盘试样的磨损量减小; 而渗氮处理后, 销试样与表面粗糙度和硬度增大, 使得 100 °C 下盘试样的磨损量加大; 然而在 300 °C 下, 渗氮处理后销试样表面氧化不再占主导地位, 温度较高, 会导致硬度下降, 使得盘试样的磨损量减小。

4 结论

(1) 高温硬度实验表明, 3 种材料的硬度随着温度的增加而逐渐减小; 表面渗氮处理后, 材料

表 4 磨损实验结果
Table 4 Wear experiment results

材料	渗氮处理	温度/℃	质量/mg		高度/mm		质量损失/ mg	磨损深度/ mm	磨损率/ ($\times 10^{-5} \text{ mm}^3 \cdot (\text{N} \cdot \text{m})^{-1}$)
			磨损前	磨损后	磨损前	磨损后			
CR7V-L 热作模具钢	未渗氮	100	4078.578	4071.916	11.069	11.036	6.662	0.032	3.247
		300	4105.950	4102.432	11.073	11.051	3.518	0.022	1.714
	渗氮	100	4068.326	4063.408	11.048	10.983	4.918	0.065	2.397
		300	4068.846	4054.058	11.015	10.883	14.788	0.132	7.206
1.2344ESR 热作模具钢	未渗氮	100	4084.700	4079.000	11.063	11.030	5.744	0.033	2.710
		300	4077.600	4073.600	11.067	11.040	3.992	0.027	1.883
	渗氮	100	4079.200	4073.700	11.078	11.033	5.486	0.045	2.589
		300	4072.000	4060.300	11.077	11.002	11.738	0.075	5.584
H13 热作模具钢	未渗氮	100	4053.300	4048.100	11.072	11.040	5.212	0.032	2.459
		300	4077.400	4068.800	11.073	11.026	8.634	0.047	4.074
	渗氮	100	4076.500	4071.300	11.077	11.040	5.236	0.037	2.470
		300	4054.600	4040.300	11.071	10.966	14.376	0.105	6.783

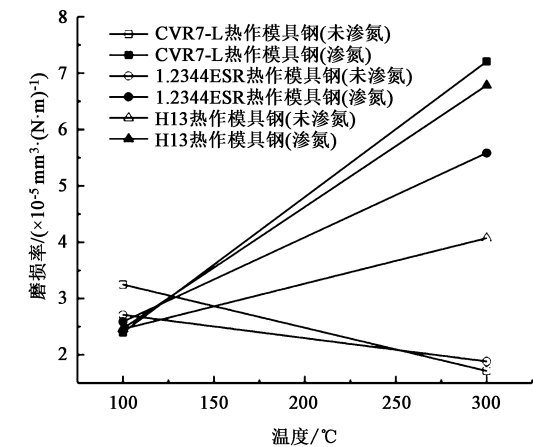


图 7 3 种热作模具钢材料不同温度下的磨损率曲线
Fig. 7 Wear rate curves for three types of hot work die steel materials at different temperatures

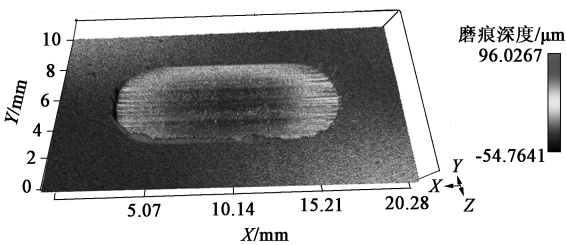


图 8 盘试样磨痕深度分布
Fig. 8 Wear scar depth distribution of disc sample

的硬度有较大提升,但其更易受温度的影响,即随温度增加,硬度的降幅较大。

(2) 高温摩擦磨损实验中,CR7V-L 热作模具钢与板材之间的摩擦因数最大,1.2344ESR 热作模

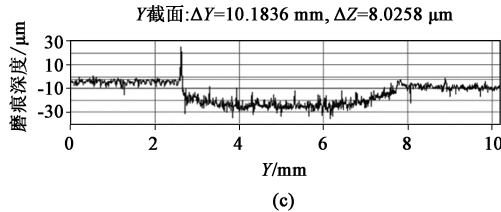
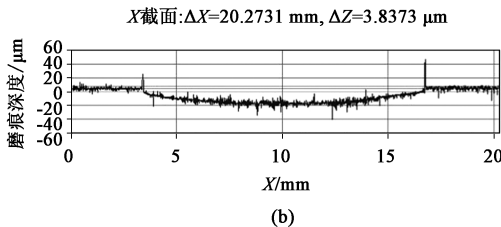
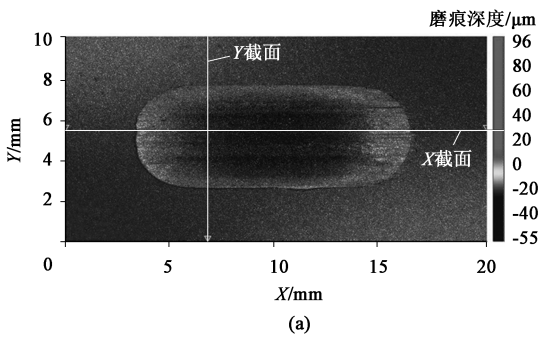


图 9 盘试样磨痕二维形貌图
(a) 磨痕二维形貌 (b) X 截面磨痕深度 (c) Y 截面磨痕深度
Fig. 9 Two-dimensional morphology diagrams of wear scar for disc sample
(a) Two-dimensional morphology of wear scar (b) Depth of wear scar on X section (c) Depth of wear scar on Y section

具钢与板材之间的摩擦因数最小;300℃下渗氮与未渗氮材料与板材之间的摩擦因数小于100℃的摩

表 5 3 种材料对应的盘试样的磨损体积 (mm^3)Table 5 Wear volumes of disc specimens corresponding to three types of materials (mm^3)

材料	实验条件			
	100 °C	300 °C	100 °C	300 °C
	(未渗氮)	(未渗氮)	(渗氮)	(渗氮)
CR7V-L 热作模具钢	0.4964	0.1797	0.6042	0.1671
1.2344ESR 热作模具钢	0.3255	0.2611	0.8256	0.1153
H13 热作模具钢	0.2096	0.1637	0.3400	0.0816

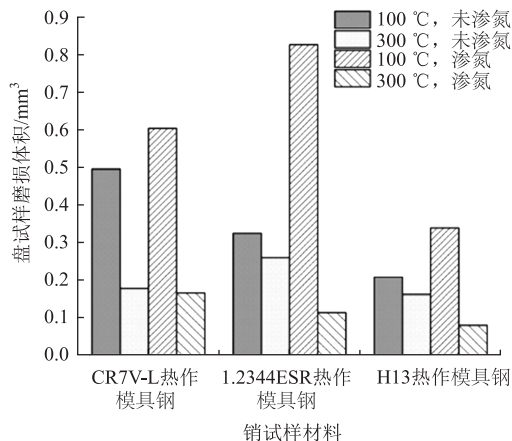


图 10 3 种材料对应盘试样的磨损体积分布

Fig. 10 Wear volumes distributions of disc specimens corresponding to three types of materials

擦因数；同种材料，销试样表面渗氮处理后，在 100 °C 下的摩擦因数大于未渗氮试样，而在 300 °C 下小于未渗氮试样。

(3) 高温磨擦磨损实验表明，销试样的磨损情况为：同种材料，在 300 °C 时的磨损量小于 100 °C 时的磨损量，这主要是因为温度高，表面氧化导致磨损量小；在 100 °C 下，渗氮处理能够提高材料的耐磨性，但在 300 °C 下，渗氮处理反而导致磨损量较大。盘试样的磨损情况为：同一条条件下，在 300 °C 时的磨损量大于 100 °C 时的磨损量；对磨销渗氮处理后，100 °C 下，销的硬度较大，盘试样硬度较小，导致盘试样的磨损量较大，而 300 °C 下，销、盘均会出现表面氧化现象，导致盘的磨损量较小。

参考文献：

[1] 门超, 徐晓东. 支撑板冲压成形模具磨损分析及优化 [J]. 锻压技术, 2020, 45 (3): 131-136.
Men C, Xu X D. Wear analysis and optimization of stamping die for support plate [J]. Forging & Stamping Technology, 2020, 45 (3): 131-136.

[2] Archard J F. Contact and rubbing of flat surfaces [J]. Journal of Applied Physics, 1953, 24 (8): 981-988.
[3] Stoehr T, Merklein M, Lechler J. Determination of frictional and thermal characteristics for hot stamping with respect to a numerical process design [A]. 1st International Conference on Hot Sheet Metal Forming of High-performance Steel [C]. Kassel, 2008.
[4] Carlsson P, Bexell U, Olsson M. Tribological performance of thin organic permanent coatings deposited on 55% Al-Zn coated steel-Influence of coating composition and thickness on friction and wear [J]. Wear, 2001, 251 (1-12): 1075-1084.
[5] Groche P, Moeller N, Hoffmann H, et al. Influence of gliding speed and contact pressure on the wear of forming tools [J]. Wear, 2011, 271 (9-10): 2570-2578.
[6] Hardell J, Prakash B. High-temperature friction and wear behaviour of different tool steels during sliding against Al-Si-coated high-strength steel [J]. Tribology International, 2008, 41 (7): 663-671.
[7] Borsetto F, Ghiotti A, Bruschi S. Investigation of the high strength steel Al-Si coating during hot stamping operations [A]. Sheet Metal [C]. Italy, 2009.
[8] Wang W, Zheng X, Hua M, et al. Influence of surface modification on galling resistance of DC53 tool steel against galvanized advanced high strength steel sheet [J]. Wear, 2016, 360: 1-13.
[9] Leite M V, Figueroa C A, Gallo S C, et al. Wear mechanisms and microstructure of pulsed plasma nitrided AISI H13 tool steel [J]. Wear, 2010, 269 (5-6): 466-472.
[10] 宋宇, 张丰收, 皇涛, 等. 基于高温磨损的 H13 热作模具钢磨损规律和模型研究 [J]. 塑性工程学报, 2018, 25 (4): 187-193.
Song Y, Zhang F S, Huang T, et al. Study on wear and model of H13 hot working die steel based on high-temperature wear [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2018, 25 (4): 187-193.
[11] 陈杰. H13 钢表面磨损行为的数值模拟研究及模具寿命预测 [D]. 长春: 吉林大学, 2015.
Chen J. Numerical Simulation Study of Surface Wear Behavior of H13 Steel and Die Life Prediction of the Mould Life [D]. Changchun: Jilin University, 2015.
[12] 刘义. 超高强钢热成形摩擦磨损及其对成形性能的影响 [D]. 南京: 江苏大学, 2020.
Liu Y. Friction and Wear of Ultra-high Strength Steel During Hot Forming and Its Effects on Forming Properties [D]. Nanjing: Jiangsu University, 2020.
[13] 铁争鸣. 基于响应面法的幅板冲压成形模具磨损 [J]. 锻压技术, 2021, 46 (5): 174-178.
Tie Z M. Wear of stamping mould for shield based on response surface method [J]. Forging & Stamping Technology, 2021, 46 (5): 174-178.
[14] 李爽. 新型热冲压模具钢组织与高温摩擦磨损机理研究 [D]. 上海: 上海大学, 2017.
Li S. The Study on Microstructure and High Temperature Friction and Wear Mechanism of New Type Hot Stamping Die Steel [D]. Shanghai: Shanghai University, 2017.