

DOI: 10.11973/jxgccl202403008

喷丸对 4Cr5Mo2V 钢高温摩擦磨损性能的影响

牛 童^{1,2}, 王昕宇^{1,2}, 彭睿智^{1,2}, 吴晓春^{1,2,3}

(上海大学 1. 材料科学与工程学院, 2. 省部共建高品质特殊钢冶金与制备国家重点实验室, 上海 200444;

3. 上大鑫仑材料科技(广东)有限公司, 肇庆 526105)

摘要: 对 4Cr5Mo2V 钢试样进行 3 道次复合喷丸, 通过与未喷丸试样对比, 研究了喷丸对试验钢表面形貌、显微组织、硬度、残余应力以及高温(100, 300, 500 °C)摩擦磨损性能和机制的影响。结果表明: 喷丸处理显著提高了试验钢表面粗糙度, 使试验钢表面形成了明显的塑性变形层、硬化层与残余压应力层; 在 100, 300, 500 °C 下, 与喷丸前相比, 喷丸后试验钢的磨损率分别降低了 41.8%, 17.1%, 63.3%, 耐磨性能的提高与喷丸产生的硬化层和残余压应力层有关。在 100, 300 °C 下, 喷丸前后试验钢的磨损机制均主要为黏着磨损和磨粒磨损, 而当温度升高至 500 °C 时, 磨损机制为氧化磨损, 喷丸试验钢仍能保持较高的硬度与残余压应力, 同时表面氧化层更致密稳定, 仅发生轻微氧化磨损。

关键词: 4Cr5Mo2V 热作模具钢; 喷丸; 高温摩擦磨损性能; 残余应力; 硬度

中图分类号: TG142.45

文献标志码: A

文章编号: 1000-3738(2024)03-0050-07

0 引言

热冲压模具通常在高温高载荷下服役, 其表面在工件高温冲压成型过程中会承受较大的摩擦力, 易发生磨损而失效^[1-3]。因此, 提高模具材料的耐磨性能是延长热冲压模具寿命的关键因素之一。喷丸作为一种常见的表面处理工艺, 具有操作简单、成本低廉等优点, 在工业生产中得到了广泛应用。传统的气动喷丸通过高压空气带动丸粒持续冲击工件表面, 实现加工硬化和细晶强化, 并引入残余压应力层, 从而显著提高工件的耐磨性能、耐腐蚀性能和抗疲劳性能等^[4-7]。研究^[8-9]表明, 喷丸能够改善热作模具钢的室温耐磨性能。CHANG 等^[8]研究发现, 与未喷丸相比, 经过喷丸处理的 H13 钢在磨损前期具有更优异的耐磨性能, 但随着磨损过程的进行, 表面强化层被磨穿, 喷丸带来的强化效果迅速消失。ZHI 等^[9]研究发现, 喷丸处理引起的表面硬度提高是改善 5CrNiMo 热作模具钢摩擦磨损性能的关键

因素, 此外丸粒冲击形成的凹坑能储存润滑油, 对提高摩擦磨损性能有利。

热冲压模具通常在高温环境下服役, 在高温磨损过程中伴随着材料的氧化和软化, 磨损机制相比室温更复杂^[10-11]。刘莉莉等^[12]研究发现, 在磨损试验温度低于 200 °C 时, 喷丸 45 钢试样的耐磨性能优于未喷丸试样, 但当温度升高至 400~500 °C 时, 喷丸强化层发生回复与再结晶, 导致喷丸强化效果急剧减弱, 喷丸试样的耐磨性能与未喷丸试样接近。MEDVEDEVA 等^[13]研究发现: 在高温下喷丸形成的塑性变形层回复以及残余应力释放与材料的热稳定性密切相关; 相较于低合金钢, H13 钢具有更强的抑制喷丸引起的位错重排和湮灭的能力, 其喷丸试样在 500 °C 保温 50 h 后仍能保持较高的残余压应力和微应变。目前, 关于喷丸对热作模具钢摩擦磨损性能影响的研究大多局限于室温条件, 在高温条件下的研究尚不充分。为此, 作者对 4Cr5Mo2V 热作模具钢进行喷丸处理, 分析了喷丸对该钢力学性能及高温摩擦磨损行为的影响, 以期对喷丸工艺在热冲压模具领域的应用提供试验参考。

1 试样制备与试验方法

1.1 试样制备

试验材料为退火态 4Cr5Mo2V 热作模具钢, 由

收稿日期: 2022-12-15; **修订日期:** 2023-11-30

基金项目: 广东省重点领域研发计划项目(2020B010184002); 省部共建高品质特殊钢冶金与制备国家重点实验室、上海市钢铁冶金新技术开发应用重点实验室自主课题项目(SKLASS2021-Z13); 上海市科委基金资助项目(19DZ2270200)

作者简介: 牛童(1999—), 男, 河南新乡人, 硕士研究生

通信作者(导师): 吴晓春教授

江苏某钢厂提供,化学成分见表 1。对试验钢进行热处理,热处理工艺为 1 030 ℃保温 30 min,油冷至室温,590 ℃回火 2 h,回火处理 2 次。回火后试验钢硬度在 50~52 HRC。将热处理后的试验钢加工成如图 1 所示的摩擦磨损试样。采用 BX-MT800

表 1 4Cr5Mo2V 钢的化学成分

Table 1 Chemical composition of 4Cr5Mo2V steel

元素	C	Si	Mn	Cr	Mo	V	S	P	Fe
质量分数/%	0.414	0.228	0.41	4.94	2.58	0.63	<0.000 1	0.002 5	余

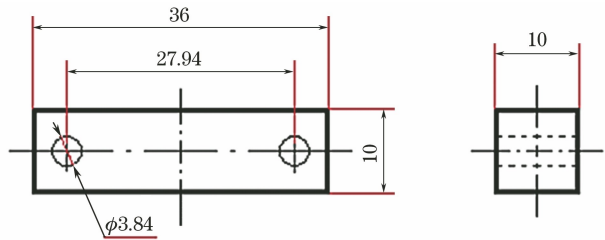


图 1 摩擦磨损试样的形状与尺寸

Fig.1 Shape and size of friction and wear specimen

1.2 试验方法

采用 Bruker 光学轮廓仪观察喷丸前后试样的表面三维形貌,并测试表面粗糙度 R_a 。采用 MH-500 型显微硬度计测试喷丸前后试样表面及截面的显微硬度,载荷为 1 N,保载时间为 10 s。采用 X-350AX 型应力测试仪测试喷丸前后试样截面的残余应力,利用电解抛光法对试样进行剥层后测试,腐蚀液为体积分数 7% 的盐酸乙醇溶液,电流为 0.3 A。利用 Zesis Supre 40 型场发射扫描电子显微镜 (SEM) 观察喷丸前后的试样截面形貌。在 UMT-3 型线性往复式高温摩擦磨损试验机上进行摩擦磨损试验,对磨材料为直径 9.5 mm 的 SiC 陶瓷球,硬度为 2 800 HV,试验温度分别为 100,300,500 ℃,载荷为 20 N,滑移频率为 5 Hz,摩擦时间为 1 h,总滑移距离为 360 m,每组试验进行 3 次。采用 Bruker Contour GT-K 型光学轮廓仪测定试样的磨损体积,参考文献[14]计算磨损率 W_s ,计算公式为

$$W_s = V / (pl) \tag{1}$$

式中: V 为磨损体积; p 为摩擦载荷; l 为总滑移距离。

采用 SEM 观察磨损表面和截面的微观形貌,并用附带的 OXFORD 能谱仪 (EDS) 进行微区成分分析。采用 D/max2500 型 X 射线衍射仪 (XRD) 对磨损表面进行物相分析,采用铜靶, K_α 辐射,工作电压为 40 kV,工作电流为 250 mA,扫描范围为 20°~80°,扫描速率为 2 (°)·min⁻¹。

型气动喷丸机对摩擦磨损试样进行喷丸处理,采用粒径为 0.3 mm 的钢丝切丸,硬度为 55~62 HRC。喷丸工艺为 3 道次复合喷丸,每道次的喷丸强度分别为 0.4,0.2,0.1 mm (A 型试片的弧高值),每道次喷丸的覆盖率为 100%。

2 试验结果与讨论

2.1 表面形貌和显微组织

由图 2 可知:未喷丸试样表面分布着磨床加工痕迹,磨痕呈平行排列,表面粗糙度 R_a 为 0.364 μm;喷丸试样表面受丸粒冲击,形成尺寸不一的弹坑, R_a 提高到 0.766 μm。喷丸前后试样的表面粗糙度均符合热冲压模具的使用要求 (R_a 小于 0.8 μm)。由图 3 可以看出:未喷丸试样的组织为回火马氏体;喷丸试样的表层组织细化,形成厚度为 15~20 μm 的塑性变形层,组织为沿表面方向的流线形组织,亚表层晶粒呈现扁平状。

2.2 显微硬度和残余应力

由图 4 可知:随着距表面距离的增加,未喷丸试样的显微硬度保持稳定,约为 520 HV,而喷丸试样的显微硬度呈降低趋势,表面显微硬度约为 600 HV,硬化层厚度达到了约 145 μm;2 种试样表层均存在残余压应力。由于磨床加工的作用,未喷丸试样表层产生残余压应力,且压应力随着距表面距离的增加而减小,表面的残余压应力最大,约为 200 MPa,残余压应力层厚度约为 80 μm。喷丸后试样的表面残余压应力增大至 857 MPa,且残余压应力随着距表面距离的增加先增大后减小,在距表面 35 μm 处达到最大,为 1 140 MPa,残余压应力层厚度约为 140 μm。

2.3 高温摩擦磨损性能

当试验温度为 100,300,500 ℃时,喷丸试样的磨损率分别为 0.25×10^{-5} , 1.06×10^{-5} , 0.29×10^{-5} mm³·N⁻¹·m⁻¹,未喷丸试样的磨损率分别为 0.43×10^{-5} , 1.28×10^{-5} , 0.79×10^{-5} mm³·N⁻¹·m⁻¹。可见:随着试验温度的升高,喷丸试样和未喷丸试样的磨损率均呈先增后减的趋势,且均在 300 ℃下较高;喷丸试样的磨损率均低于未喷丸试样。与未喷丸试样相比,在 100,300,500 ℃下喷丸

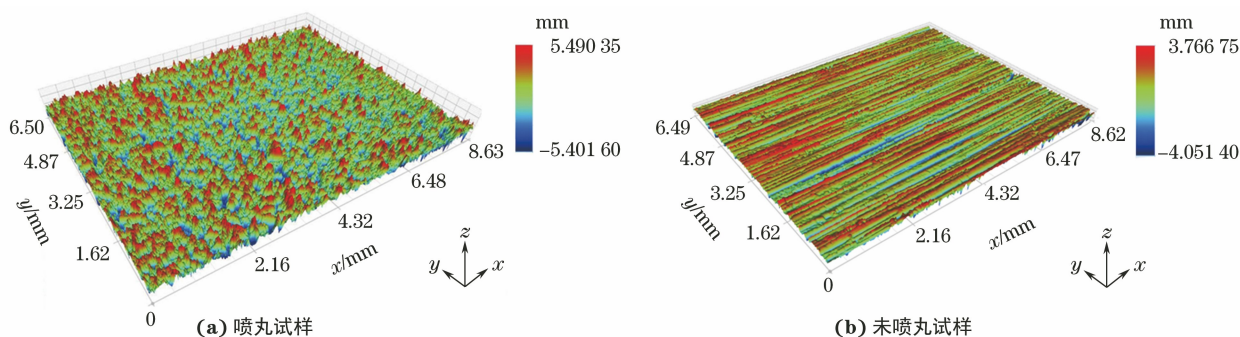


图 2 喷丸试样和未喷丸试样表面的三维形貌

Fig. 2 Three-dimensional morphology of shot peened (a) and non-shot peened (b) specimens

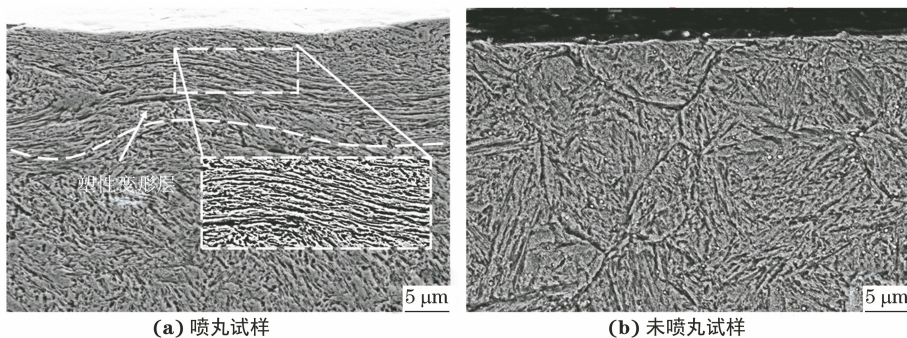


图 3 喷丸试样和未喷丸试样截面 SEM 形貌

Fig. 3 SEM micrographs of cross section of shot peened (a) and non-shot peened (b) specimens

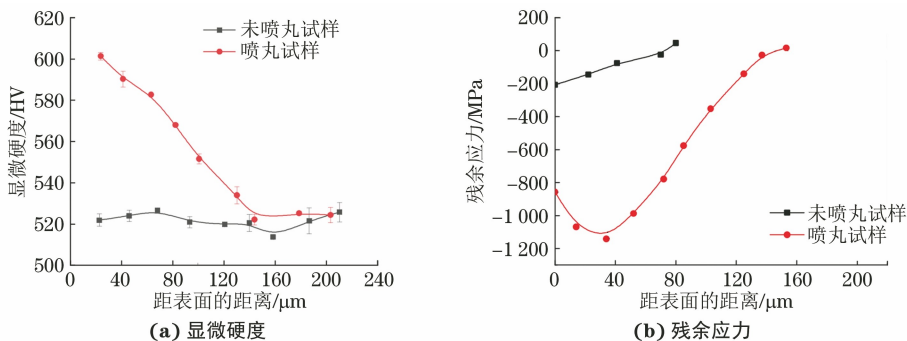


图 4 喷丸试样和未喷丸试样截面显微硬度和残余应力分布曲线

Fig. 4 Distribution curves of microhardness (a) and residual stress (b) on cross section of shot peened and non-shot peened specimens

试样的磨损率分别降低了 41.8%, 17.1%, 63.3%。可见, 在 300 °C 下喷丸处理的减磨作用不显著, 500 °C 下减磨效果最显著。

由图 5 可见: 在 100 °C 下磨损后, 未喷丸试样和喷丸试样表面均呈撕裂状, 并存在沿摩擦方向分布的沟槽状磨痕, 同时还存在少量细小磨屑; 未喷丸试样表面形成深犁沟, 导致基体发生分层; 二者的磨痕表面均出现深色块状区域, EDS(点 1)分析显示其成分(质量分数/%)为 56.8Fe, 29.2O, 6.8C, 2.9Si, 2.2Cr, 1.8Mo, 0.1Mn, 0.1V, 可知该区域主要为铁元素和氧元素, 推测是铁的氧化物。虽然此时的试验温度较低, 但摩擦过程产生的摩擦热使磨损表面一

些接触凸起处达到了闪点温度, 同时摩擦过程中氧化反应的激活能低于静态氧化的热激活能, 因此形成了摩擦氧化物; 随后, 在摩擦力的持续作用下, 局部氧化物脱落, 产生了一些细小的颗粒状磨屑。当试验温度升至 300 °C 时, 2 种试样的磨损表面均出现大量氧化物磨屑, 片状氧化物减少且边界碎裂, 表明此时摩擦氧化物剥落严重; 由于此时温度仍较低, 新鲜基体未能被快速氧化, 而被磨屑反复犁削, 因此形成了大量犁沟状痕迹。当试验温度达到 500 °C 时, 试样表面均被连续的氧化物覆盖。根据氧化磨损理论^[15], 表面氧化层通过阻碍摩擦副间的直接接触起到减磨作用, 因此 2 种试样在 500 °C 下的磨损

率均低于 300 ℃ 下的磨损率。500 ℃ 下未喷丸试样的表面氧化层破碎和剥落现象明显,并在剥落处留下了许多大尺寸的氧化物磨屑。在高温下当氧化层剥落后,基体迅速氧化,形成氧化-剥落交替的动态过程,从而造成未喷丸试样表面氧化物分层现象,氧化磨损较严重。喷丸试样磨损表面形成了较为光

滑、致密的氧化层,氧化层表面仅出现少量犁沟状磨损痕,处于轻微氧化磨损阶段。由图 6 可知,500 ℃ 下喷丸试样和未喷丸试样磨损表面的氧化物种类相似,主要是 Fe_2O_3 、 Fe_3O_4 和少量 FeO ,但喷丸试样表面的氧化物含量明显较高,这可能是喷丸强化在试样表面引入大量缺陷,促进了氧化反应的进行^[16]。

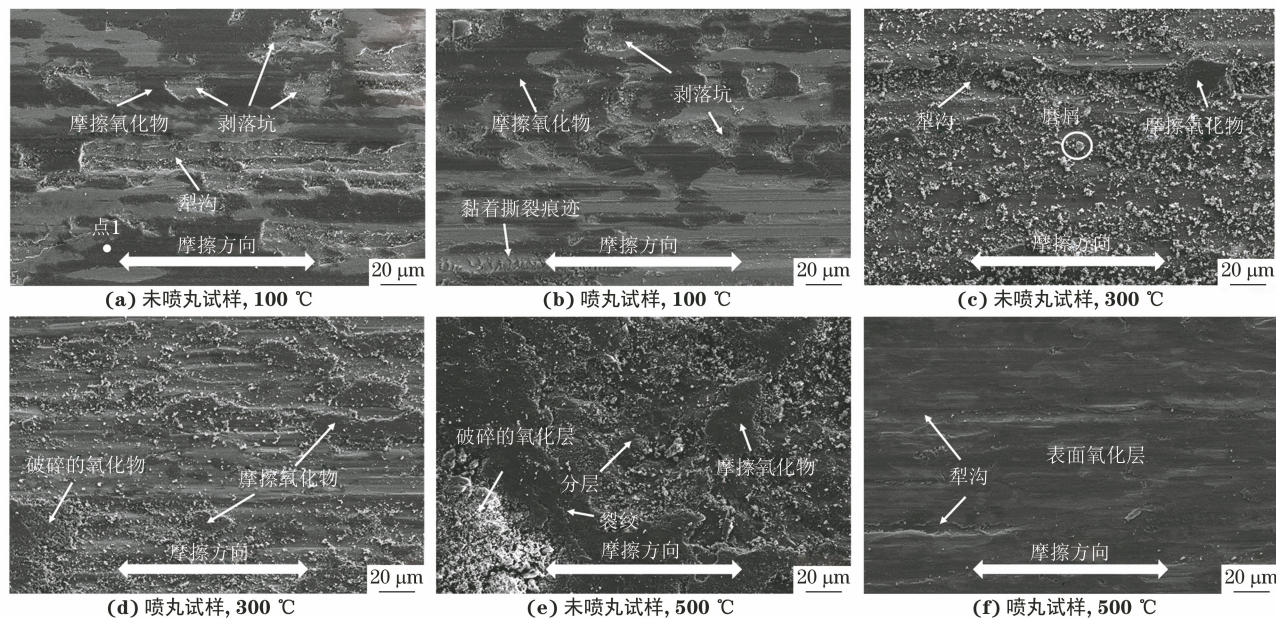


图 5 未喷丸试样和喷丸试样在不同温度下磨损后的表面形貌

Fig.5 Surface morphology of non-shot peened (a, c, e) and shot peened (b, d, f) specimens after wear at different temperatures

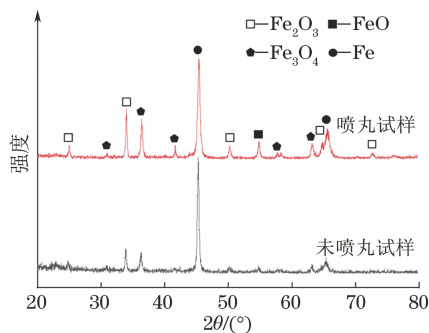


图 6 未喷丸试样和喷丸试样在 500 ℃ 下磨损后表面的 XRD 谱

Fig.6 XRD patterns of surface of non-shot peened and shot peened specimens after wear at 500 ℃

由图 7 可见:在 100 ℃ 下,2 种试样的磨损表层均存在不连续的氧化物,氧化物层厚度为 2~3 μm ,并且表面均出现磨粒犁削的坑状痕迹,但喷丸试样磨损表面更平整。随着试验温度升高至 300 ℃,未喷丸试样塑性变形区域出现水滴状氧化物,而内部裂纹在后续摩擦中扩展,促使氧化物破碎与剥落,同时表面出现下陷的现象;而喷丸试样表面较平整。当试验温度达到 500 ℃ 时,2 种试样表面均形成一定厚度的连续氧化层。未喷丸试样的氧化层及其与

基体连接处存在较多裂纹,同时氧化层下方基体组织出现严重的回复现象,板条状马氏体消失,大量碳化物析出。在磨球的挤压下,未喷丸试样基体塑性变形严重,在碳化物界面处形成应力集中,当应力达到临界值后,裂纹萌生并扩展至表面,氧元素通过裂纹进入基体,形成多层氧化物^[17]。喷丸试样磨损表面覆盖着连续、致密的单层氧化物,其厚度为 3~5 μm ,氧化层表面较平整;氧化层下方基体仍保留板条马氏体特征,塑性变形层较薄,说明此时基体仍保持较高的硬度。

2.4 高温摩擦磨损机制

高温摩擦磨损涉及多种磨损机制,其主要磨损机制随试验温度改变而改变。喷丸处理对不同温度下磨损机制的影响也具有显著差异。在 100 ℃ 时,磨损机制主要包括磨粒磨损、黏着磨损和轻微氧化磨损。

材料的黏着磨损量与表面硬度呈反比^[5];同时高硬度表面还能有效抑制磨粒的犁削^[18]。喷丸处理大幅提高了材料表面硬度,改善了材料表面抵抗黏着磨损和磨粒磨损的能力,有效降低了试样的磨

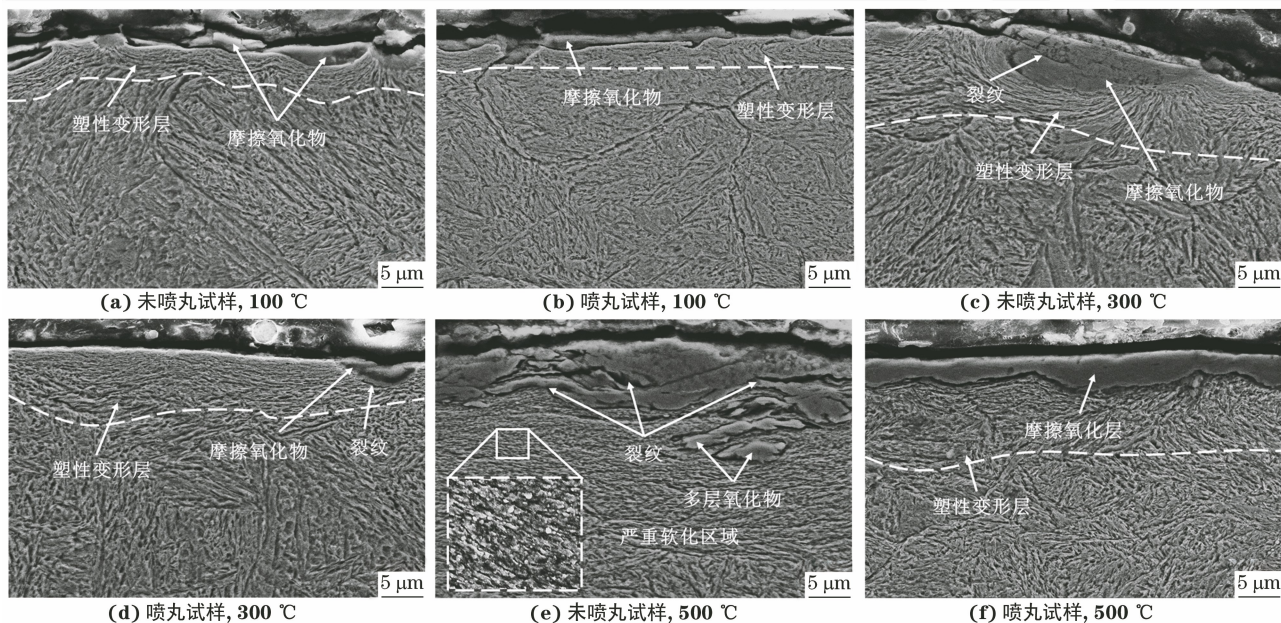


图 7 未喷丸试样和喷丸试样在不同温度下磨损后的截面形貌

Fig.7 Section morphology of non-shot peened (a, c, e) and shot peened (b, d, f) specimens after wear at different temperatures

损率。此外,喷丸引入的残余压应力能够抵消摩擦拉应力,阻碍疲劳裂纹产生,减少摩擦表面疲劳剥落^[19]。当试验温度升至 300 °C 时,由于磨损表面的片状氧化物大量剥落,磨球与基体直接接触,使材料的磨损率大幅上升,磨痕深度随之增加^[20]。此时材料的磨损机制依然以磨粒磨损和黏着磨损为主。

当试验温度升到 500 °C 时,磨损表面被连续的氧化层覆盖,主要磨损机制为氧化磨损。耐磨性能与磨损表面氧化层的特征与基体组织的力学性能密切相关。当磨损表面形成致密、完整的氧化层,且基体保持较高的强度和硬度时,氧化层才能有效保护基体^[21-22]。在高温环境下,未喷丸试样磨痕下方基体组织出现了严重的回复现象,导致基体强度和硬度大幅降低,而喷丸试样基体组织具有良好的热稳定性^[23],仍保持板条马氏体的特征。由图 8 可见,在 500 °C 磨损条件下,2 种试样均发生软化。未喷丸试样表面硬度下降至约 380 HV,软化层厚度约为 200 μm;喷丸试样表面硬度约为 480 HV,且软化层较薄,厚度约为 80 μm。未喷丸试样的软化基体无法支撑表面氧化层,导致氧化层在磨球的挤压下产生严重破碎和剥落,氧元素更易接触基体,使基体内部氧化,引起应力集中^[24],加剧裂纹扩展,使得氧化层进一步剥落,导致高磨损率。根据魏敏先^[25]的磨损机制转变理论,在 500 °C 下未喷丸试样正处于由轻微氧化磨损向严重氧化磨损过渡的阶段。喷丸处理后的表面塑性变形层具有更强的热稳定

性^[26-27],因此喷丸试样能够保持较高的硬度,为表面氧化层提供有效支撑,减少氧化层的破碎和剥落,使裂纹不易在基体内部产生;此时喷丸试样发生轻微氧化磨损。通过测定磨痕表面的残余应力可知,喷丸试样磨痕表面存在 631.5 MPa 的残余压应力。4Cr5Mo2V 钢较高的热稳定性使喷丸引入的残余压应力未完全释放。残余压应力可以抵消部分摩擦产生的剪切拉应力^[19],有效抑制基体中裂纹的萌生和扩展,阻碍多层氧化物的出现,推迟轻微氧化磨损向严重氧化磨损的转变,显著提高材料的耐磨性能。

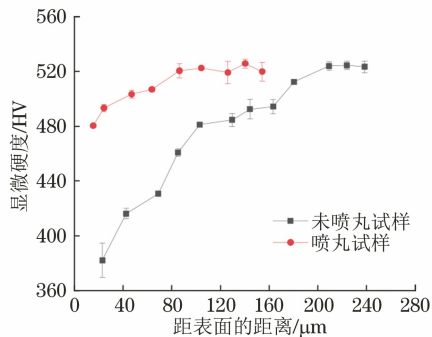


图 8 未喷丸试样和喷丸试样在 500 °C 下磨损后的截面硬度分布曲线

Fig.8 Section hardness distribution curves of non-shot peened and shot peened specimens after wear at 500 °C

3 结 论

(1) 喷丸处理使 4Cr5Mo2V 钢表面粗糙度由 0.364 μm 增大到 0.766 μm,表面形成厚度为 15~

20 μm 的塑性变形层和厚度约为 145 μm 的硬化层以及明显的残余压应力层,表面硬度由 520 HV 提高到约 600 HV,最大残余压应力由约 200 MPa 增大到 1 140 MPa,残余压应力层厚度由约 80 μm 增大到约 140 μm 。

(2) 喷丸处理降低了 4Cr5Mo2V 钢的磨损率,在试验温度分别为 100, 300, 500 $^{\circ}\text{C}$ 时,与喷丸前相比,喷丸后的磨损率分别降低了 41.8%, 17.1%, 63.3%, 喷丸对该钢在 500 $^{\circ}\text{C}$ 下耐磨性能的改善效果最显著。

(3) 在 100, 300 $^{\circ}\text{C}$ 下磨损后,喷丸前后 4Cr5Mo2V 钢的磨损机制均主要为黏着磨损和磨粒磨损,在 500 $^{\circ}\text{C}$ 下磨损后,磨损机制主要为氧化磨损,与喷丸前相比,喷丸后该钢仍能保持较高的硬度和残余压应力,同时表面氧化层更致密稳定,耐磨性能更好。

参考文献:

- [1] NEUBAUER F, MERKLEIN M. Tribological and thermal investigation of modified hot stamping tools[J]. Tribology in Industry, 2019, 41(1): 76-89.
- [2] LIU Y, LIN J P, MIN J Y, et al. Effect of deep cryogenic treatment on mechanical properties and microstructure of the tool steel CR7V for hot stamping[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2018, 27(9): 4382-4391.
- [3] SCHIRDEWAHN S, SPRANGER F, HILGENBERG K, et al. Investigation of the thermal and tribological performance of localized laser dispersed tool surfaces under hot stamping conditions[J]. Wear, 2021, 476: 203694.
- [4] ZHANG Y L, LAI F Q, QU S G, et al. Effect of shot peening on residual stress distribution and tribological behaviors of 17Cr2Ni2MoVNb steel[J]. Surface and Coatings Technology, 2020, 386: 125497.
- [5] 胡英俊, 黄小波, 高玉魁. 喷丸处理对铝合金微动磨损及抗腐蚀性能的影响[J]. 表面技术, 2020, 49(7): 238-244.
HU Y J, HUANG X B, GAO Y K. Effect of shot peening on fretting wear and corrosion resistance of zirconium alloy[J]. Surface Technology, 2020, 49(7): 238-244.
- [6] MALEKI E, UNAL O, KASHYZADEH K R. Effects of conventional, severe, over, and re-shot peening processes on the fatigue behavior of mild carbon steel[J]. Surface and Coatings Technology, 2018, 344: 62-74.
- [7] 吴瑛, 雷丽萍, 曾攀. 喷丸对 H13 钢单边带缺口试样疲劳裂纹扩展行为的影响[J]. 中国表面工程, 2017, 30(4): 117-126.
WU Y, LEI L P, ZENG P. Effects of shot peening on fatigue crack propagation behavior of single notched H13 steel specimens[J]. China Surface Engineering, 2017, 30(4): 117-126.
- [8] CHANG S H, TANG T P, TAI F C. Enhancement of thermal cracking and mechanical properties of H13 tool steel by shot peening treatment[J]. Surface Engineering, 2011, 27(8): 581-586.
- [9] JIA Z, JI J J. Influence analysis of shot peening on hot forging die[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, 90(5): 1779-1787.
- [10] LI S, WU X C, CHEN S H, et al. Wear resistance of H13 and a new hot-work die steel at high temperature[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2016, 25(7): 2993-3006.
- [11] 李爽, 陈士浩, 何西娟, 等. 两种热作模具钢高温耐磨性对比研究[J]. 摩擦学报, 2017, 37(1): 59-67.
LI S, CHEN S H, HE X J, et al. A comparison of wear resistance of two types hot-work die steels at high temperature[J]. Tribology, 2017, 37(1): 59-67.
- [12] 刘莉莉, 麦永津, 揭晓华, 等. 45 $^{\#}$ 钢表面纳米晶层的高温磨损特性[J]. 摩擦学报, 2010, 30(3): 285-290.
LIU L L, MAI Y J, JIE X H, et al. The sliding wear behavior of nano-crystalline surface layer on 45 $^{\#}$ steel at elevated temperature[J]. Tribology, 2010, 30(3): 285-290.
- [13] MEDVEDEVA A, BERGSTRÖM J, GUNNARSSON S, et al. Thermally activated relaxation behaviour of shot-peened tool steels for cutting tool body applications[J]. Materials Science and Engineering: A, 2011, 528(3): 1773-1779.
- [14] 黎欣欣, 李爽, 吴晓春, 等. 一种新型热冲压模具钢的高温摩擦磨损性能[J]. 金属热处理, 2016, 41(2): 43-48.
LI X X, LI S, WU X C, et al. Friction and wear behavior of a new type of hot stamping die steel at elevated temperature[J]. Heat Treatment of Metals, 2016, 41(2): 43-48.
- [15] QUINN T. The origins of oxidational wear[J]. Tribology International, 1983, 16(5): 257-271.
- [16] 张骏, 蔡文河, 杜双明, 等. 喷丸奥氏体耐热钢抗蒸汽氧化性的研究与使用现状[J]. 表面技术, 2020, 49(9): 133-140.
ZHANG J, CAI W H, DU S M, et al. Research and application status of steam oxidation resistance of shot peening austenitic heat-resistant steel[J]. Surface Technology, 2020, 49(9): 133-140.
- [17] SHI Y J, WU X C. Research on oxidation wear behavior of a new hot forging die steel[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2018, 27(1): 176-185.
- [18] 李林龙, 杨丽琪, 薛伟海, 等. 稀土改性 GCr15 钢与保持架材料间的滑动摩擦磨损[J]. 材料研究学报, 2023, 37(6): 408-416.
LI L L, YANG L Q, XUE W H, et al. Sliding friction and wear between rare earth modified GCR15 steel against cage materials [J]. Chinese Journal of Materials Research, 2023, 37(6): 408-416.
- [19] 李国宾, 关德林, 张明星. 表面纳米化中碳钢在干摩擦条件下的摩擦磨损性能研究[J]. 摩擦学报, 2008, 28(1): 39-43.
LI G B, GUAN D L, ZHANG M X. Friction and wear properties of medium carbon steel by means of surface

- nanocrystallization in dry sliding[J]. Tribology, 2008, 28(1): 39-43.
- [20] 梁力文,王青峰,毛忆瑄,等. 不同冲击载荷下轻质耐磨钢的组织及耐磨性研究[J]. 上海金属, 2023, 45(6): 32-41.
LIANG L W, WANG Q F, MAO Y X, et al. Study on microstructure and wear resistance of light-weight wear resistant steel under different impact loads [J]. Shanghai Metals, 2023, 45(6): 32-41.
- [21] 陈士浩,李爽,吴晓春. 热冲压模具钢 SDCM 高温摩擦磨损性能[J]. 摩擦学学报, 2016, 36(5): 538-545.
CHEN S H, LI S, WU X C. High temperature friction and wear property of hot stamping tool steel SDCM [J]. Tribology, 2016, 36(5): 538-545.
- [22] 白植雄,左鹏鹏,计杰,等. 两种热作模具钢的高温摩擦磨损性能[J]. 工程科学学报, 2019, 41(7): 906-913.
BAI Z X, ZUO P P, JI J, et al. High temperature friction and wear properties of two hot work die steels [J]. Chinese Journal of Engineering, 2019, 41(7): 906-913.
- [23] 杨浩鹏. H13 热作模具钢低温固体渗硼层形成机理的研究[D]. 上海: 上海大学, 2014.
- YANG H P. Study on formation mechanism of low temperature solid boronizing layer of H13 hot work die steel [D]. Shanghai: Shanghai University, 2014.
- [24] BAI Z X, YANG H, SU N, et al. Effect of different loads on the wear behaviors of 5Cr5Mo2V steel at 700 °C [J]. Materiali in Tehnologije, 2021, 55(6): 753-761.
- [25] 魏敏先. 严酷工况下钢铁材料的氧化磨损及轻微-严重磨损转变[D]. 镇江: 江苏大学, 2011.
WEI M X. Oxidative wear and slight-severe wear transition of iron and steel materials under severe working conditions[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2011.
- [26] MAI Y J, JIE X H, LIU L L, et al. Thermal stability of nanocrystalline layers fabricated by surface nanocrystallization [J]. Applied Surface Science, 2010, 256(7): 1972-1975.
- [27] ZHU L H, GUAN Y J, LIN J, et al. The enhanced thermal stability of the nanocrystalline-amorphous composite layer on pure titanium induced by ultrasonic shot peening [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2019, 791: 1063-1069.

Effect of Shot Peening on High Temperature Friction and Wear Properties of 4Cr5Mo2V Steel

NIU Tong^{1,2}, WANG Xinyu^{1,2}, PENG Ruizhi^{1,2}, WU Xiaochun^{1,2,3}

(1. School of Materials Science and Engineering, 2. State Key Laboratory of Advanced Special Steel, Shanghai University, Shanghai 200444, China; 3. Shangda Xinlun Material and Technology Co., Ltd., Zhaoqing 526105, China)

Abstract: 4Cr5Mo2V steel specimens were processed by three-pass complex shot peening. The effects of shot peening on the surface morphology, microstructure, hardness, residual stress, and high temperature (100, 300, 500 °C) friction and wear properties and mechanism of the test steel were studied by comparing with those of un-shot peened specimens. The results show that the shot peening significantly improved the surface roughness of the test steel, and induced an obvious plastic deformation layer, a hardened layer and a residual compressive stress layer on the surface. The wear rate of the test steel after shot peening was reduced by 41.8%, 17.1% and 63.3% at 100, 300, 500 °C, compared with that before shot peening, respectively. The improvement of wear resistance of shot peened test steel was related with the hardened layer and residual compressive stress layer produced by shot peening. At 100 °C and 300 °C, the wear mechanism of the test steel before and after shot peening was mainly adhesive wear and abrasive wear. When the temperature rised to 500 °C, the wear machanism was oxidation wear; the shot peened test steel could still maintain high hardness and residual compressive stress, and the surface oxide layer was more dense and stable, therefore only slight oxidative wear occurred.

Key words: 4Cr5Mo2V hot work die steel; shot peening; high temperature friction and wear property; residual stress; hardness