

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2024.01.005

过盈配合织构界面间渗流润滑对拆解损伤的影响

周丹¹, 郑祖建¹, 吕松江², 王鹏程¹

(1. 合肥工业大学 机械工程学院, 安徽 合肥 230009; 2. 中车南京浦镇车辆有限公司, 江苏 南京 210031)

摘要:过盈配合件拆解时极易发生摩擦损伤,研究发现在过盈配合界面上添加激光凹坑织构,可显著降低拆解损伤。但由于添加织构的过盈配合界面拆解仍为干摩擦拆解状态,当过盈量过大时,织构化界面仍会形成较严重的拆解损伤。为此,基于岩石渗流原理,文章采用渗流试验将润滑剂引入配合面,实现过盈配合面的润滑拆解,并通过拆解实验分析大过盈量拆解时配合面的损伤情况。结果表明:过盈配合界面上加工出保留熔融层的凹坑织构,在一定渗流条件下可以将润滑油引入配合面中,形成边界润滑或混合润滑状态,且蜂窝织构的渗流效果较为突出;在大过盈量状态下,当接触压力为 200 MPa 时,有熔融层蜂窝织构干摩擦拆解相较于无织构拆解能够减小拆解损伤,但最大损伤深度仍有 76.7 μm ;而有熔融层蜂窝织构渗流润滑拆解与有熔融层蜂窝织构干摩擦拆解相比,拆解损伤明显降低,可达到无损拆解。

关键词:过盈配合;表面织构;拆解减损;渗流;润滑

中图分类号:TH117.22 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-5060(2024)01-0028-05

Influence of seepage lubrication on disassembly damage between interference fit texture interfaces

ZHOU Dan¹, ZHENG Zujian¹, LYU Songjiang², WANG Pengcheng¹

(1. School of Mechanical Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China; 2. CRRC Nanjing Puzhen Co., Ltd., Nanjing 210031, China)

Abstract: Friction damage is very easy to occur when the interference fit is disassembled. It is found that adding laser pitting texture on the interference fit interface can significantly reduce the disassembly damage. However, due to the fact that the interference fit interface with texture is still in dry friction disassembly state, when the interference amount is too large, the texture interface will still form serious disassembly damage. Therefore, based on the principle of rock seepage, this paper adopts seepage test to introduce lubricant into the fit surface to achieve the lubrication disassembly of interference fit surface, and analyzes the damage of the fit surface during the disassembly with large interference. The results show that the pitting texture can be processed on the interference fit interface to retain the melt layer, and the lubricating oil can be introduced into the fit surface under certain seepage conditions to form boundary lubrication or mixed lubrication, and the honeycomb texture has a more prominent seepage effect. In the state of large interference, when the contact pressure is 200 MPa, the dry friction disassembly with honeycomb texture containing melt layer can reduce the disassembly damage compared with that without texture, but the maximum damage depth is still 76.7 μm . The damage of seepage lubrication disassembly with honeycomb texture containing melt layer is significantly lower than that of dry friction disassembly with honeycomb texture containing melt layer, which can achieve non-destructive disassembly.

收稿日期:2022-12-16; **修回日期:**2023-02-18

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51635010)

作者简介:周丹(1980—),女,湖北咸宁人,博士,合肥工业大学副教授,硕士生导师。

Key words: interference fit; surface texture; disassembly impairment; seepage; lubrication

0 引 言

过盈配合拆解界面损伤是一种干摩擦损伤,其原因在于过盈配合面在单向滑动的拆解过程中,微观峰谷发生变形、剥落,继而形成磨粒,从而在配合面上产生划痕、犁沟、黏着堆积等损伤现象^[1]。为降低拆解损伤,研究人员使用激光技术在配合面上加工出不同参数的表面织构,实验发现合适的凹坑织构可有效降低拆卸损伤,且激光加工形成的熔融层增大了过盈配合面间的滑移阻力,有利于提升其服役承载能力^[2-4]。

但当过盈量过大时织构化界面仍会形成严重的拆解损伤,若能将润滑剂引入拆解滑移表面,改变原有的干摩擦状态,则可进一步降低拆解的损伤程度。此时在润滑剂的作用下,织构化的配合界面将处于边界润滑或混合润滑状态,而流入凹坑中的润滑剂也可在拆解滑移运动中形成动压,从而起到一定的二次润滑作用^[5]。因此,润滑剂的有效渗入是进一步降低过盈配合拆解损伤的必要条件。而对于保留熔融层的织构化过盈配合界面来说,微凸于表面的熔融层会在配合界面间形成连通的缝隙通道,这为润滑剂的顺利导入提供了可能。

润滑剂在界面间的渗入过程与水在岩石缝隙中的渗流过程极为相似。研究人员在岩石渗流试验中发现,当岩石裂隙宽度达到或大于 $1 \mu\text{m}$ 时,在岩石裂隙的两端提供一定的水力梯度即可达到岩石渗流效果^[6]。文献^[7]研究微裂隙和极微裂隙,提出只要裂隙宽度大于 $0.2 \mu\text{m}$,岩石渗流即可实现,且裂隙宽度对岩石渗流起主导作用^[8-11]。当裂隙的平均宽度相同时,裂隙的形状与分布则是影响岩石渗流的主要因素^[12]。在岩石渗流理论的启发下,过盈配合件能否通过渗流的方式引入润滑剂,并由此获得更优的拆解减损效果,值得进一步的研究与分析。因此,本文尝试在过盈配合界面上添加了圆形及蜂窝 2 种凹坑织构,通过实验研究了织构形状、熔融层状态对润滑剂渗流效果的影响,并对比由润滑剂渗流带来的拆解减损效果。

1 表面微织构及其制备

1.1 表面微织构参数

在本课题前期的研究中发现,圆形织构相较

于其他常见形状如椭圆、正方形、三角形织构对于降低过盈配合拆解损伤效果较为突出^[13],且大量研究表明,六边形织构密排组成的形似蜂窝的表面织构(以下称蜂窝织构)具有良好的液体铺展性能,蜂窝织构的这种特性可以为配合面引入润滑剂提供便利^[14-15]。因此,本文重点研究了圆形织构和蜂窝织构 2 种类型,探究织构形状与熔融层状态对渗流以及拆解的影响。表面微织构的加工排列分布如图 1 所示。图 1 中:圆形织构的直径为 $100 \mu\text{m}$,织构加工面上所有织构凹坑的面密度为 30%,试样表面的织构呈等距行列排布,织构深度为 $25 \mu\text{m}$;蜂窝织构的边长为 $100 \mu\text{m}$,织构面的面密度为 30%,织构深度为 $25 \mu\text{m}$ 。

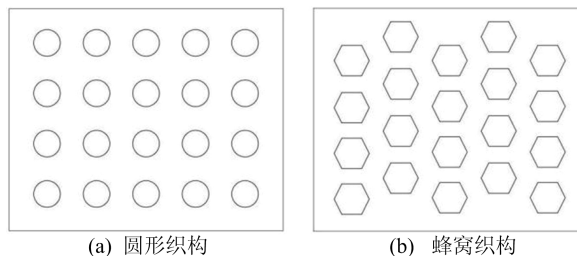


图 1 表面微织构的加工排列分布

1.2 织构的加工与处理

结合实际配合与实验要求,使用上试件和下试件模拟过盈装配关系。初始试件的最后一道加工工艺为磨削,表面粗糙度 R_a 为 $0.8 \mu\text{m}$ 。试样的材料、尺寸参数及材料性能见表 1 所列。

表 1 上、下试件属性

试样	材料	宽×长×高	弹性模量/ GPa	屈服强度/ MPa
上试件	FV520B	10×10×18	191	700
下试件	40CrNiMo	10×40×18	209	835

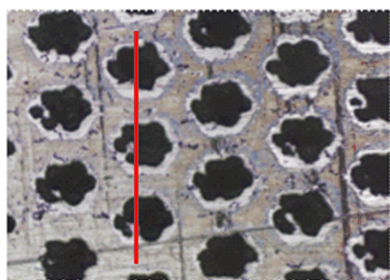
注:长、宽、高单位为 mm。

利用 HGTECH LSF20D 光纤激光打标机在下试件上表面制备蜂窝织构和圆形织构,其余面保持原始状态,激光加工参数见表 2 所列。

表 2 激光加工参数

激光波长/nm	平均功率/W	功率密度/ (W/cm^2)	扫描速度/ (mm/s)	重复频率/kHz	光斑直径/mm
1 064	15	63.71	500	20	0.06

表面织构加工完成后,用粒度为 400 目的砂纸对织构表面进行抛磨,去除织构化表面的黄褐色氧化层,对织构凹坑边缘的熔融层毛刺加以钝化。织构表面的抛磨程度决定熔融层状态,本文抛磨加工了有熔融层织构与无熔融层织构 2 种类型,有熔融层织构的熔融层平均高度为 15 μm ,其中蜂窝织构和圆形织构的表面粗糙度 R_a 分别为 18.2、16.5 μm ;无熔融层织构的熔融层平均高度为 0 μm ,蜂窝织构和圆形织构的表面粗糙度 R_a 分别为 8.3、6.7 μm 。实验前用丙酮超声波清洗实验试样,再用乙醇擦拭试样表面,最后使用烘干机烘干。渗流与拆解实验利用过盈配合模拟试验机完成。加工后的有熔融层蜂窝织构表面轮廓如图 2 所示。其中图 2a 为有熔融层蜂窝织构表面的显微图,图 2b 为图 2a 中红线处的轮廓图。



(a) 显微图

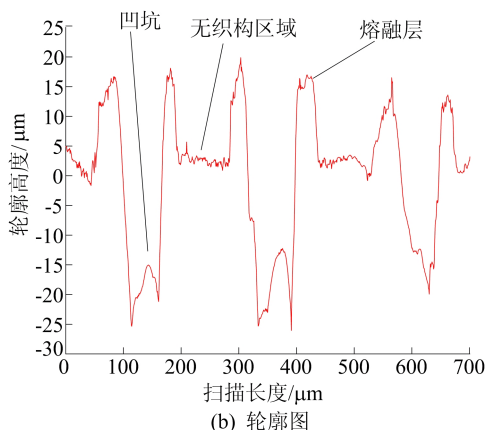


图 2 有熔融层蜂窝织构表面显微轮廓

2 渗流实验与分析

2.1 渗流实验原理与实验过程

渗流实验原理如图 3 所示。从图 3 可以看出,因织构熔融层及轮廓微观峰谷的存在,上下试件接触面间会形成若干微小的缝隙空间,当这些缝隙空间具有良好的导通性时,润滑油可在压力的作用下进入接触界面,逐渐铺展开并形成有效

的隔离油膜。在实验中,过盈配合界面间的接触压力 F_1 为 200 MPa,渗流润滑剂为 L-AN10 润滑油,该润滑油在 40 $^{\circ}\text{C}$ 下运动黏度为 9.48 mm^2/s ,闪点 130 $^{\circ}\text{C}$,倾点 -5 $^{\circ}\text{C}$,由可控式高压油枪在配合界面一端提供压力 0.5 MPa、足量的润滑油,渗流 30 s 后观测润滑油在界面间的铺展长度 L 。实验涉及 5 类试样,分别是无织构试样、无熔融层的蜂窝试样、圆形织构试样、有熔融层的蜂窝试样和圆形织构试样。其中,每种试样均制备 3 组,每组试样按前述实验参数进行 3 次渗流实验,以渗流区域的长度 L 的平均值作为渗流效果的衡量指标。

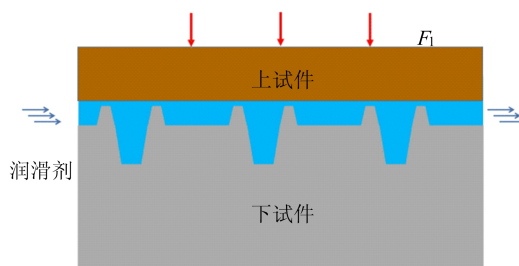


图 3 渗流试验原理

2.2 实验结果与分析

由于实验所用材料中只有润滑油含羟基,可以根据羟基的分布情况来判断润滑油在下试件的铺展状态。为此,实验结束后使用 Nicolet IS50 iN10 显微红外光谱仪,扫描渗流实验后的下试件表面得到的检测结果如图 4 所示。

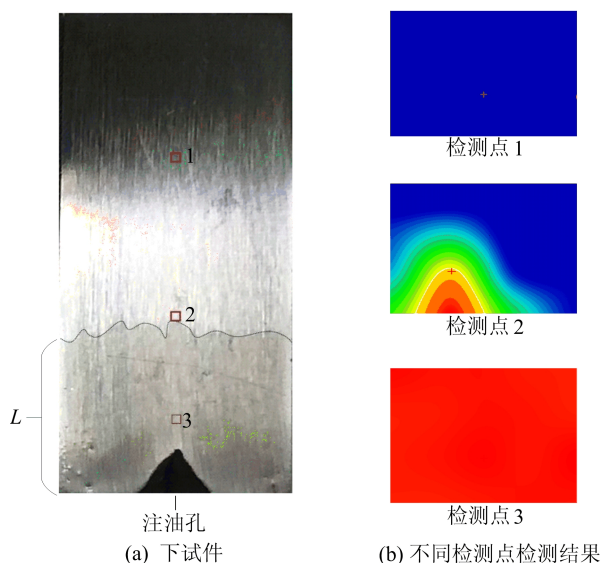


图 4 下试件表面润滑油检测结果

从图 4 可以看出:靠近注油孔的检测点 3 烃

基含量较高,检测图像呈全红状态;远离注油孔的检测点 1 未检测出烃基,检测图像呈全蓝状态;渗流边界位置的检测点 2 检测到少量烃基,检测图则呈红黄绿蓝带状分布。由此可精确判定润滑油铺展的界限所在,进而测量获得 L 的数值。

渗流实验结果见表 3 所列。由表 3 可知,有熔融层蜂窝织构渗入量范围为 21~22 mm,有熔融层圆形织构渗入量为 12~14 mm,而无织构和无熔融层织构表面的渗入量为 1~5 mm。可以看出,有熔融层织构表面渗入量明显高于无织构表面,而无织构表面与无熔融层织构表面的渗入量相近,这说明织构熔融层的存在为润滑剂提供了有效的渗流通道。对于有熔融层织构来说,蜂窝织构的渗入量大于圆形织构,说明织构的形状与排布也会影响渗入量的大小。因为表面微织构间隙对于液体铺展具有毛细作用,而蜂窝织构的织构间隙相较于圆形织构更加密集,所以蜂窝织构的毛细作用也更明显,这使得液体在蜂窝织构面的铺展变得更加容易,因此蜂窝织构的渗流效果好于圆形织构。

表 3 渗流实验结果 单位:mm

织构类型	渗入量		
	第 1 组	第 2 组	第 3 组
无织构	3	2	4
无熔融层蜂窝织构	5	3	4
无熔融层圆形织构	1	4	3
有熔融层蜂窝织构	21	22	22
有熔融层圆形织构	13	12	14

3 拆解实验与分析

由于有熔融层的蜂窝织构渗流效果相对较优,在此将通过拆解实验,探讨该类型织构的过盈配合拆解减损效果。

3.1 实验原理与实验过程

拆解实验原理及过盈配合模拟试验机的情况见参考文献[16],此处不再赘述。在本实验中,接触压力 F_1 设置为 200 MPa;试样主要为无织构和有熔融层蜂窝织构 2 种类型,制备方法如前所述。实验共分 3 组:第 1 组为无织构拆解实验,下试样表面为无织构的初始磨削表面,拆解前不做润滑油渗流处理;第 2 组为有熔融层蜂窝织构干摩擦拆解实验,下试样表面制备有熔融的蜂窝织构,拆解前不做渗流处理;第 3 组为有熔融层蜂窝织构渗流润滑拆解实验,下试样表面制备有熔融的蜂

窝织构,拆解前采用如 2.1 节所述方式进行润滑油渗流处理。每组实验使用 3 对长方体试样进行 3 次重复实验以减小误差,在每组重复实验中选取具有中等损伤程度的试样表面进行形貌检测,作为该组实验的拆解损伤表征数据。

3.2 实验结果与分析

拆解实验后的下试件损伤情况通过 VK-X250 型 3D 激光测量显微镜和 OPTIKA IM-3MET 显微镜进行测量与观察,具体损伤形貌如图 5 所示。图 5 中:红色方框为三维形貌扫描区域;右侧为对应扫描情况。

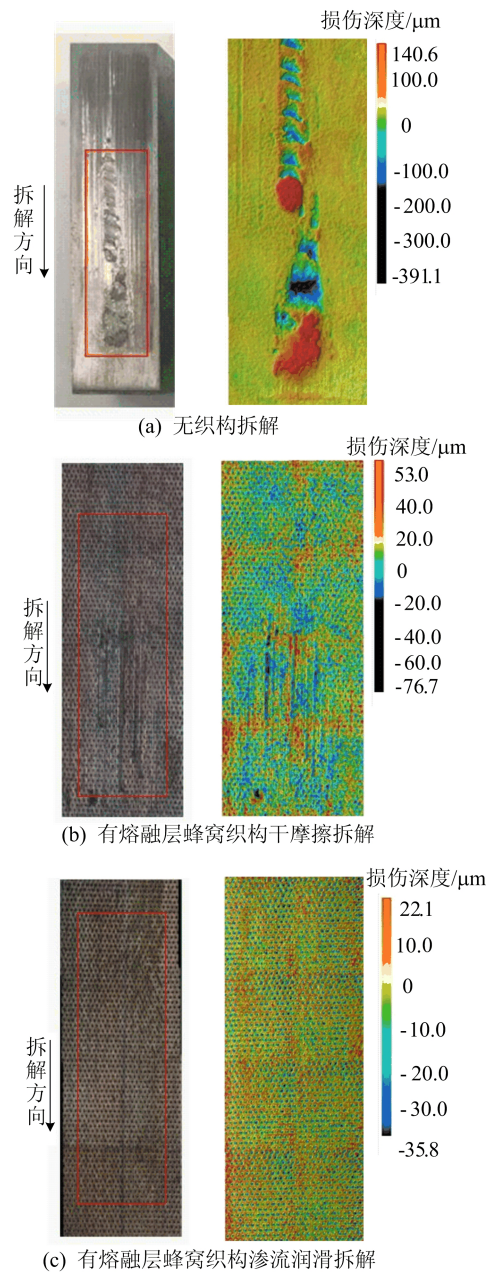


图 5 下试件上表面拆解损伤形貌

从图 5 可以看出:无织构拆解试样表面存在

明显的凹坑与堆积型损伤,且损伤面积较大;有熔融层蜂窝织构干摩擦拆解时,试件的损伤较无织构拆解实验小,但试件表面仍有明显的划痕;有熔融层蜂窝织构渗流润滑拆解时,试件表面没有发现明显的拆解损伤,且微观形貌轮廓与实验前基本一致。

根据下试件的表面轮廓数据可以发现,无织构表面拆解的最大损伤深度达到 $391.1\ \mu\text{m}$,远大于有熔融层蜂窝织构面干摩擦拆解的损伤深度 $76.7\ \mu\text{m}$,可见有熔融层的蜂窝织构具有较好的干摩擦拆解减损效果,这是由于织构熔融层的材料性能优于原始材料,且织构凹坑对于摩擦产生的磨粒具有收集作用。但在 $200\ \text{MPa}$ 的高接触压力作用下,配合界面间的干摩擦还是会导致剧烈的磨损,形成的磨粒无法被织构凹坑完全捕捉,在拆解滑移距离 $20\ \text{mm}$ 处即开始出现拆解损伤。增加渗流润滑后,润滑油在拆解滑移表面间形成有效的润滑膜,改变原本的干摩擦状态,获得无损拆解效果。由表 3 可知,有熔融层的蜂窝织构润滑油初始铺展长度约为 $22\ \text{mm}$,约等于下试样长度的 $1/2$ 。在上试样的表面黏附力和界面缝隙通道的毛细吸力的联合作用下,处于前半段位置的润滑油会随着拆解滑移动作的进行,被逐渐导入到下试样的后半段表面中。此外,流入凹坑中的润滑剂在拆解滑移运动中也会形成动压,从而起到一定的二次润滑作用。

4 结 论

为进一步降低过盈配合拆解界面损伤,本文提出一种利用织构渗流引入润滑剂的方法,并对该方法进行实验验证,得出如下结论:

1) 渗流实验结果表明,有熔融层的蜂窝织构对润滑剂渗流的促进效果最突出。对实验结果分析可知熔融层在润滑剂渗流中起主导作用,蜂窝织构相较于圆形织构渗流效果更好,其原因可能是渗流时蜂窝织构的毛细作用更突出。

2) 拆解实验结果证明,本文提出利用织构渗流润滑的方法能够显著减小过盈配合拆解界面损伤,且在 $200\ \text{MPa}$ 高接触压力作用下获得了无损拆解效果。

3) 本文提出的利用织构渗流引入润滑剂的方法不仅可以有效地减小过盈配合拆解界面损伤,为过盈配合件的无损拆解提供新思路,并且操

作简易安全、成本低、可靠性高,可广泛应用于过盈配合拆解场合。

[参 考 文 献]

- [1] 温诗铸,黄平. 摩擦学原理[M]. 4 版. 北京:清华大学出版社,2012:227-233.
- [2] 周丹,高鑫,易利详,等. 面向再制造低拆解损伤需求的过盈配合界面织构试验研究[J]. 机械工程学报,2018,54(21):166-172.
- [3] 兰森. 拆解减损织构对过盈配合服役性能的影响机理及实验研究[D]. 合肥:合肥工业大学,2020.
- [4] 吴亮. 激光表面织构熔融层对过盈配合服役性能的影响试验研究[D]. 合肥:合肥工业大学,2022.
- [5] WANG L. Use of structured surfaces for friction and wear control on bearing surfaces[J]. Surface Topography: Metrology and Properties,2014,2(4):043001.
- [6] 蒋宇静,李博,王刚,等. 岩石裂隙渗流特性试验研究的新进展[J]. 岩石力学与工程学报,2008,27(12):2377-2386.
- [7] ROMM E S. Flow characteristics of fractured rocks[M]. Moscow: Nedra Publishing House,1966:123-134.
- [8] 盛金昌,速宝玉. 裂隙岩体渗流应力耦合研究综述[J]. 岩土力学,1998,19(2):92-98.
- [9] LIU J, ELSWORTH D, BRADY B H. Linking stress-dependent effective porosity and hydraulic conductivity fields to RMR[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences,1999,36(5):581-596.
- [10] 周宏伟,谢和平. 岩石节理张开度的分形描述[J]. 水文地质工程地质,1999(1):1-4.
- [11] 张文杰,周创兵,李俊平,等. 裂隙岩体渗流特性物模试验研究进展[J]. 岩土力学,2005,26(9):1517-1524.
- [12] TSANG Y W, WITHERSPOON P A. The dependence of fracture mechanical and fluid flow properties on fracture roughness and sample size[J]. Journal of Geophysical Research Solid Earth,1983,88(B3):2359-2366.
- [13] 高鑫. 面向再制造低拆解损伤需求的过盈配合界面织构试验研究[D]. 合肥:合肥工业大学,2018.
- [14] LIU K S, YAO X, JIANG L. Recent developments in bio-inspired special wettability[J]. Chemical Society Reviews,2010,39(8):3240-3251.
- [15] YANG L, LUO X C, CHANG W L. Manufacturing of anti-fogging super-hydrophilic microstructures on glass by nanosecond laser[J]. Journal of Manufacturing Processes,2020,59:557-565.
- [16] 饶树林. 大型压缩机叶轮和轴过盈配合无损拆解的研究[D]. 合肥:合肥工业大学,2014.

(责任编辑 闫杏丽)