

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2026.05.003

过盈配合拆解减损织构承载能力 提升效果的量化研究

周丹¹, 石欣茹¹, 余涛¹, 吕松江²

(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:凹坑型激光织构能有效降低过盈配合的拆解损伤,且织构周边的硬化环形凸起熔融层强化了配合界面间的咬合效应,有利于承载能力的提升。文章对无织构常规表面、保留熔融层的减损织构表面、去除熔融层的织构表面展开检测及承载试验研究。结果表明:表面支承率曲线在经基准对齐、参数取值方法修正预处理后,其峰部参数与承载能力间存在密切关系;当接触接触压力不变时,由减损织构带来的承载能力提升量 $\Delta\mu$ 与其表面的峰部实体体积 $V_{mp}^{2/3}$ 间存在线性关系;但随着 V_{mp} 的增加, $\Delta\mu$ 的增长速率会逐渐放缓。在具体的工程实践中,该线性关系可作为试验数据的拟合模型基础,进而为拆解损伤表面的承载能力恢复工艺拟定合理的形貌修复目标。

关键词:激光织构表面;熔融层;表面支承率曲线;过盈配合;承载能力

中图分类号:TH117.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-5060(2026)05-0591-07

A quantitative study on improvement effect of interference fit disassembly damage reduction texture in bearing performance

ZHOU Dan¹, SHI Xinru¹, YU Tao¹, LYU Songjiang²

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

Abstract: Laser dimple texture can effectively reduce the disassembly damage of interference fit, and the hardened convex ringlike bulges around the texture strengthen the occlusion effect between interfaces, leading to the improvement of bearing performance. This paper studied on the detections and bearing experiments of the conventional surfaces, dimple-textured surfaces with and without bulges. The bearing area curve was preprocessed by the benchmark alignment and parameter value adjustment, and it was found that there was a close relationship between the peak parameters and the bearing performance. When the contact pressure was constant, the enhancement in bearing performance $\Delta\mu$ brought by textures had a linear relationship with the 2/3 power of the peak material volume V_{mp} . However, with the growth of V_{mp} , the increase rate of $\Delta\mu$ would gradually slow down. In the specific engineering practice, this linear relationship can be used as the basis of the fitting model of the experimental data to formulate a reasonable morphology repair target for the bearing performance recovery process of disassembly-damaged surfaces.

Key words: laser texturing surface; bulge; bearing area curve; interference fit; bearing performance

收稿日期:2024-03-04;修回日期:2024-03-26

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2019YFC1908005)

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,通信作者,E-mail:zhoudan80@126.com.

0 引言

在设备的再制造及运行维护过程中,过盈配合组件的拆解损伤会直接影响后续工序的复杂程度和工艺成本,削弱组件再装配后的服役性能^[1]。研究表明,激光表面织构能有效改善表面的摩擦磨损性能^[2],而试验发现保留熔融层的凹坑型织构具备更为良好的拆解减损效果^[3],这对设备的再制造和运行维护具有积极意义。若能将减损织构熔融层的增摩效果引入已损伤的常规配合表面,可在不改变零件材料、形状及尺寸的情况下实现承载能力的提升及恢复,同时也能为下一次的再制造或运行维护做好拆解减损准备。

目前,熔融层的承载能力提升机理尚停留在现象解释层面,在配合界面微观形貌与承载能力间也缺少映射描述工具,难以实现织构表面承载能力的预测评估,亦无法为承载能力恢复工艺拟定具体的参数量化目标。

为此,本文将对过盈配合承载能力(界面滑移阻力)的构成及影响因素展开理论及试验研究。在表面形貌及材料性能检测、承载试验数据分析的基础上,建立表面织构承载能力提升效果的量化描述方法,在表面形貌参数与过盈配合承载能力提升效果间建立有机联系。

1 拆解减损织构与承载能力

1.1 过盈配合拆解减损织构

过盈配合因结构简单、对中性良好、承载能力强等特点被广泛应用于机械设备中,但在运行维护及再制造的拆解阶段,过盈配合表面常会出现划痕、犁沟、黏着堆积等干摩擦损伤,在增加修复成本的同时也降低了该过盈配合下一阶段的服役性能。

文献[4]研究发现,直径 100 μm 、面密度 25% 的圆形激光凹坑织构具备良好的过盈配合拆

解减损效果,且因织构凹坑周围熔融层的存在,织构化界面的过盈配合承载能力得到显著提高。拆解减损织构参数见表 1 所列,拆解减损织构示意图如图 1 所示,后文将以该织构为研究对象,开展后续的试验及分析工作。

表 1 拆解减损织构参数

织构形状	直径/ μm	织构面 密度/%	图案排布 方式	图案间距/ mm	深度/ μm
圆形凹坑	100	25	矩形均布	0.2	120~140

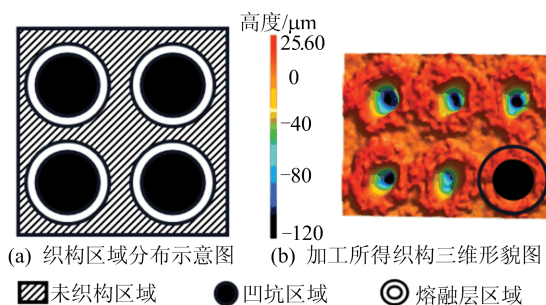


图 1 拆解减损织构示意图

1.2 承载能力及表面支承率曲线的参数表征

1.2.1 织构化界面的承载能力构成

静摩擦力组成示意图如图 2 所示,过盈配合承载能力来源于配合界面间的静摩擦力 F_f ,当外加载荷在界面处形成的切向载荷 F_2 超过 F_f ,配合组件间将出现相对位移,过盈配合即失效。因此在界面间接触载荷 F_1 一定的情况下, F_f 越大,过盈配合的承载能力越强。由 Bowden 与 Tabor 的黏着摩擦理论可知, F_f 是黏着效应和犁沟效应所产生阻力的总和,即

$$F_f = \mu F_1 = F_s + F_p = A_r \tau_s + A_p \tau_p \quad (1)$$

其中: μ 为最大静摩擦因数; F_s 为黏着阻力分量; F_p 为犁沟阻力分量; A_r 为黏着面积,即实际接触面积; τ_s 为黏着节点的剪切强度; A_p 为犁沟面积; τ_p 为单位面积的犁沟力^[5]。

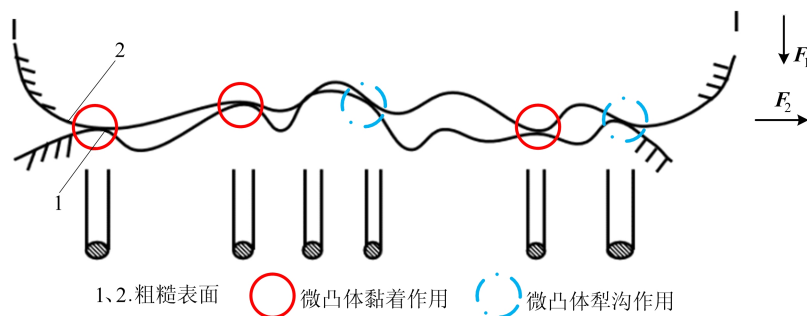
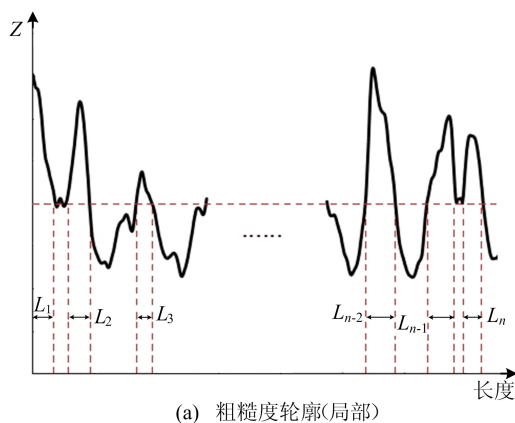


图 2 静摩擦力组成示意图

一般情况下,常规金属摩擦副的 F_p 分量远小于 F_s 分量。但对于具备拆解减损织构的过盈配合界面,面上规律分布的熔融层硬度较基体更大,且可稳定存在于过盈配合界面上,这有助于在配合界面间形成咬合效应,从而大幅提升 F_p 的量值。同时,织构凹坑降低了配合界面间的名义接触面积,且强化的凸起熔融层抬升了界面间的接触高度, A_r 被减小, F_s 分量被降低。因此,只有当 F_p 的提升幅度大于或者等于 F_s 的降低值时,织构化界面的承载能力才能得以保持或者提升。由于犁沟分量 F_p 主要由熔融层的咬合部位承担,而这些咬合部位只会出现在界面上的微观高点位置,由此可以推断织构化界面微观高点的强度和数量将影响 F_p 的提升幅度,并最终决定织构化界面的过盈配合承载能力。



1.2.2 表面支承率曲线及承载能力表征参数

表面支承率曲线作为粗糙峰的统计学曲线,可以直观地给出不同高度位置的微观轮廓峰宽度情况,反映其摩擦磨损性能^[6]。以二维表面支承率曲线为例,曲线如图3所示,在某一高度 C 下粗糙峰形成的累计峰宽为 $L_1 + L_2 + \dots + L_n$,则对应的曲线上,当深度 $Z = C$ 时,横坐标表面支承度计算公式为:

$$t_p = \frac{L_1 + L_2 + \dots + L_n}{L} \times 100\% \quad (2)$$

其中, L 为二维轮廓取样长度。随着 Z 逐渐从最高峰降低到最低谷,可绘制得到完整的二维表面支承率曲线。三维表面支承率曲线的绘制方式与之类似,只需要将横坐标的峰宽数据由长度替换成截面积, L 则用取样面积替换即可。

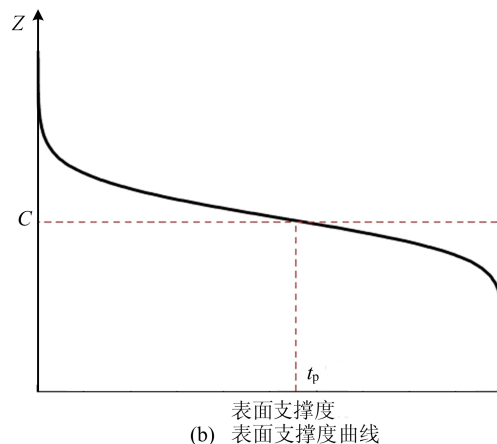


图3 表面支承率曲线

表面支承率曲线形貌参数的获取示意图如图4所示,表面支承率曲线一般为平滑的S型曲线,参数 S_{mr1} 与 S_{mr2} 可将其划分为峰部、中心部以及谷部3个区域^[7]。

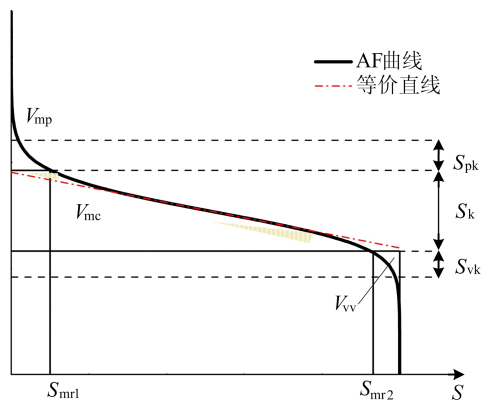


图4 表面支承率曲线形貌参数的获取示意图

对于常规粗糙表面,峰部区域所涉及的轮廓峰会先一步与对偶表面发生接触,并在磨合阶段被迅速磨损;中心部区域所涉及的表面轮廓则是接触载荷与摩擦载荷的主要承载区域;谷部区域所涉及的轮廓谷则是干摩擦状态下存储磨粒(或者油润滑状态下储存润滑油并形成流体动压)的区域。

这3个区域的大小可以由峰部实体体积、中心部实体体积、谷部空隙容积来表征;而各区域的轮廓高度变化范围则可用峰部高度、中心部高度差和谷部深度来描述。表面支承率曲线参数与摩擦性能间有着密切的相关性^[7],而表面支承率曲线的峰部与中心部的轮廓数据及材料性能也会直接影响 F_p 和 F_s 分量的数值。

对于制备了拆解减损织构的过盈配合界面,其表面上规则分布的圆形凹坑增大了 V_{vv} 和 S_{vk} ,而凹

坑周围的硬质凸起熔融层则会显著增加 V_{mp} 和 S_{pk} 的量值,这使得织构化界面中心部实际所承担的 F_1 与 F_t 分量被降低,并交由峰部去承担。在前期的试验研究发现,无织构区域中高于熔融层平均高度的轮廓峰数量十分有限,且由过盈配合接触压力引起的接触变形主要来源于熔融层凸缘的压缩变形,即熔融层承担了大部分的 F_1 与 F_t ;而这些凸起的熔融层的高度和表面分布比例可由支撑曲线的峰部参数 V_{mp} 和 S_{pk} 得以体现。因此,在熔融层得到合理强化的前提下, V_{mp} 和 S_{pk} 量值的增加将有利于 F_p 分量的提升;而 V_{vv} 和 S_{vk} 则与该织构表面的磨粒捕捉能力成正相关关系。

从 ISO 标准可知, V_{mp} 、 S_{pk} 、 V_{vv} 和 S_{vk} 量值的界定与 S_{mr1} 、 S_{mr2} 的取值相关。目前,对于常规的粗糙摩擦表面,可通过绘制等价直线或者取默认值(10%与 80%)的方式来确定 S_{mr1} 、 S_{mr2} 的数值。但对于制备了拆解减损织构的表面,只有当 S_{mr1} 与 S_{mr2} 具备区分被测表面的熔融层区域与织构凹坑区域的能力时,由此获得的 V_{mp} 、 S_{pk} 、 V_{vv} 、 S_{vk} 才能作为过盈配合承载能力和拆解减损能力的表征参数。

2 承载能力测试方法及测试结果

2.1 承载能力测试方法

过盈配合的承载能力测试原理详见文献[4]。上、下试样的尺寸及材料参数见表 2 所列。其中,上试样所用材料 FV520B 是一种马氏体沉淀不锈钢,具有优异的耐腐蚀性、耐高温性和强度性能,广泛应用于航空航天、海洋石油、核工业等领域的高强度结构件、齿轮、叶轮等零部件。下试样所用材料 40CrNiMo 是一种高淬透性合金调质钢,常用于制造大截面、重载荷的轴类零件。

表 2 试样尺寸及材料参数

试样	宽×长×高	材料	弹性模量/GPa	屈服强度/MPa	HV0.5
上试样	10×10×18	FV520B	210	1 182	300~310
下试样	10×40×18	40CrNiMo	208	835	280~285

注:宽、长、高单位为 mm。

试验使用相同的上试样,其表面均为精磨后得到的原始表面,试验前仅做清洁处理;下试样共有 3 种类型,具体见表 3 所列。其中,位于 2[#] 和 3[#] 试样上表面的拆解减损织构由 HGTECH LSF20D 纳秒脉冲光纤激光打标机加工获得,具

体的加工参数见表 4 所列。

表 3 下试样类型

编号	表面类型	试样制备方式
1 [#]	无织构常规表面	精磨+超声波清洗
2 [#]	保留熔融层的织构表面	精磨+加工拆解减损织构+去氧化层+超声波清洗
3 [#]	去除熔融层的织构表面	精磨+加工拆解减损织构+去氧化层与熔融层+超声波清洗

表 4 织构激光加工参数

激光波长/nm	平均功率/W	功率密度/(W·s/cm ²)	扫描速度/(mm/s)	重复频率/kHz	光斑直径/mm
1 064	4	16.98	500	20	0.06

2.2 承载能力测试结果

按照表 3、表 4 所述参数,制作对比试样(A 组)。其中,2[#] 试样的熔融高度约为 22 μm 。将 F_1 设置为 150 MPa,每对上、下试样均进行 3 次的承载能力测试,得到最大静摩擦系数的平均值 $\bar{\mu}$ 见表 5 所列。由表 5 可知,具备不同强化骨架的 2[#] 和 3[#] 试样的承载能力均高于 1[#] 试样,且具备凸起熔融层的 2[#] 试样的承载能力提升幅度更为显著。

表 5 A 组的承载能力测试结果

下试样类型	$\bar{\mu}$	相对增量/%
1 [#]	0.358	
2 [#]	0.964	169.4
3 [#]	0.402	12.3

3 承载能力的表面支承率曲线表征

3.1 表面支承率曲线的预处理与参数界定

表面支承度曲线多应用于一般表面,而凹坑与熔融层均会剧烈改变表面形态,使得曲线走形,支承率参数的可信度下降。为使测取的 3 类形貌各异的表面的支承率曲线间具有可比性,需要进行高度方向的对齐操作^[8],使其在纵坐标方向上具有统一的零位标尺,故以无织构表面作为参考基准,对支承率曲线进行预处理并比较由此获得的支承率参数,以证明其对真实表面形貌的反映。

表面支承率曲线可通过 VK-X250 共焦显微镜测量获取,所有试样的初始表面均是由同样的精磨加工获得,具有充分的相似性,因此可以将这些精磨表面作为轮廓高度零位的对齐依据。当测

取的轮廓 0 位对齐后,由此获得的表面支承率曲线也就具有了可比性。3 种表面的表面支承率曲线对比如图 5 所示。由图 5 可知:A 组试样的表面支承率曲线,织构熔融层抬高了 2[#] 试样表面支承率曲线峰部的高度,最大高度超过了 20 μm ;织构凹坑则显著加深了 2[#] 和 3[#] 试样表面支承率曲线谷部的深度,达到 -120 μm 左右;而表面支承率曲线较为平缓的中心部的陡峭程度也会随着峰部与谷部的情况发生变化。

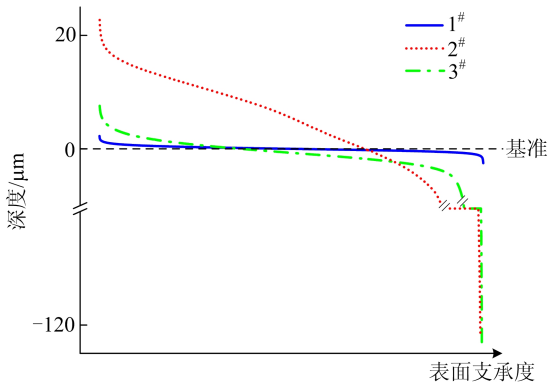


图 5 3 种表面的表面支承率曲线对比图

因此对于有熔融层织构表面,参与承载的主要是环状的熔融层区域,而处于零位之下的凹坑、低谷与承载无关。可以将环状熔融层在整个表面上的面积占比作为 S_{mr1} ,而将零位基准线所对应的面积比作为 S_{mr2} ,如图 6 所示。

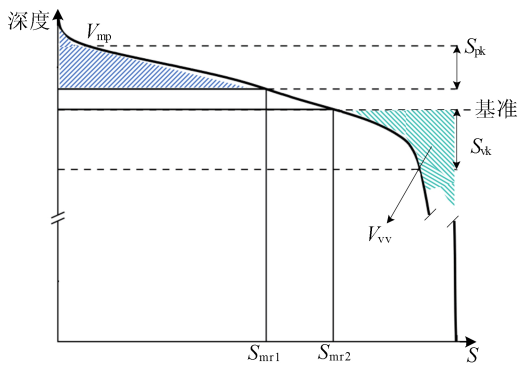


图 6 2[#] 试样表面支承率曲线区域划分示意图

3.2 表面支承率曲线参数与承载能力分析

根据 3.1 节中所述,获取 A 组的 V_{mp} 、 S_{pk} 、 V_{vv} 和 S_{vk} 参数,以及表面算术平均高度 S_a ,具体见表 6 所列。2[#]、3[#] 试样的 V_{vv} 和 S_{vk} 远大于 1[#],这表明织构凹坑的存在显著提升了表面的磨粒收集容纳能力,有助于拆解损伤的降低,这一现象已在前期

的研究中得以证实^[3]。此外,2[#]、3[#] 试样的 V_{mp} 、 S_{pk} 也同样大于 1[#] 试样,尤其 2[#] 试样,这主要是由于激光加工形成的硬化凸起熔融层造成的,同时可知 S_a 的数据大小、总体变化趋势与同样用于表征高度的 S_{pk} 相近,说明经优化的表面支承率曲线参数是符合表面实际状况的、合理的。

故仅从 2[#] 试样的各类支承率参数与 1[#]、3[#] 试样的差异便可合理推测其在表面承载能力的表现也将与 1[#]、3[#] 试样有所不同,再结合表 5、表 6 数据,可进一步推测拆解减损织构表面的 V_{mp} 、 S_{pk} 数值与 μ 间存在密切联系,且呈正相关关系。

表 6 A 组的表面支承率曲线参数

参数	1 [#]	2 [#]	3 [#]
$V_{mp}/(\text{mL}/\text{m}^2)$	0.055	5.735	0.141
$S_{pk}/\mu\text{m}$	1.097	12.386	2.498
$V_{vv}/(\text{mL}/\text{m}^2)$	0.132	6.069	2.176
$S_{vk}/\mu\text{m}$	1.178	39.154	33.736
$S_a/\mu\text{m}$	1.224	11.287	3.931

为探讨表面支承率曲线参数 V_{mp} 、 S_{pk} 与承载能力间的关系,制备了一组具有不同熔融层高度的 2[#] 型试样(记作 B 组),获取相应的表面支承率曲线参数并进行承载能力测试,结果见表 7 所列。2[#] 试样的参数关系如图 7 所示。

表 7 不同熔融层高度试样的表面支承率曲线参数

下试样	$H/\mu\text{m}$	$V_{mp}/(\text{mL}/\text{m}^2)$	$S_{pk}/\mu\text{m}$	$\bar{\mu}$	$V_{mp}^{2/3}$
A 组	1 [#]	0.055	1.097	0.358	0.145
	3 [#]	0.141	2.498	0.402	0.271
		21.903	5.735	0.964	3.204
		18.032	3.363	0.721	2.245
B 组	2 [#]	15.736	1.967	3.982	0.685
		11.821	1.221	2.497	0.567
		8.900	0.710	1.581	0.491
		5.493	0.254	0.921	0.401

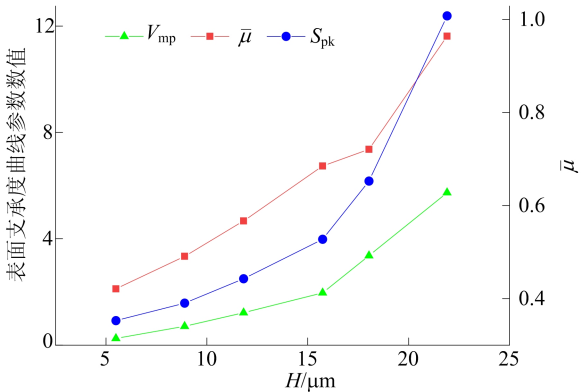


图 7 B 组试样表面支承率曲线参数、 $\bar{\mu}$ 与 H 的关系

由图 7 可知,随着熔融层平均高度 H 的增大, V_{mp} 、 S_{pk} 、 $\bar{\mu}$ 的数值均逐渐增大,其中 V_{mp} 与 $\bar{\mu}$ 具有相似的增长趋势。

对于制备了解减损结构的配合表面, H 越大咬合效应越明显,且熔融层承担了大部分的 F_1 与 F_f 。因此,依照理想粗糙表面的接触理论作出如下假设:① 熔融层上参与界面接触的轮廓凸峰为一系列半径为 R 的等高半球体,示意图如图 8 所示,且 R 正比于 H ,半球体数量为 n ;② 其中比例为 d 半球体与对偶平面发生黏着接触,其余则发生犁沟接触;③ 在接触压力 F_1 的作用下,对偶平面与球体凸峰的接触高度为 $\delta = fR$,即黏着接触球体的变形量与犁沟接触球体的犁削深度均为 δ ;④ 发生犁沟接触的半球体无压缩变形,发生黏着接触的半球体实际接触区域是半径为 a 的圆, $a^2 = R\delta$,且轮廓凸峰间相互不影响。

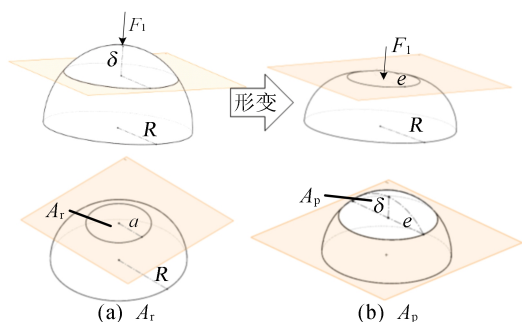


图 8 单个微凸体接触示意图

$$A_r = nd\pi a^2 = nd\pi R\delta = ndf\pi R^2 \quad (3)$$

犁削截面可近似看成长、短轴分别为 $2e$ 、 2δ 的椭圆形,则有:

$$e^2 = R^2 - (R - \delta)^2 \approx 2R\delta \quad (4)$$

熔融层的犁沟面积 A_p 为:

$$A_p = n(1-d) \frac{\pi}{2} e\delta = n(1-d) e\delta = n(1-d) \frac{\sqrt{2} f^{3/2}}{2} \pi R^2 \quad (5)$$

综合式(1)、式(3)、式(5),由熔融层带来的滑动阻力增量 ΔF_f 为:

$$\Delta F_f = \Delta\mu F_1 = A_r \tau_s + A_p \tau_p = nf \left[d\tau_s + \frac{\sqrt{2}}{2} (1-d) f^{1/2} \tau_p \right] \pi R^2 \quad (6)$$

其中, $\Delta\mu$ 为由熔融层导致的承载能力增量。

由假设可知:

$$V_{mp} = \frac{2}{3} n\pi R^3 \quad (7)$$

将式(7)代入式(6),可得:

$$\Delta\mu = k V_{mp}^{2/3} \quad (8)$$

$$k = \frac{(2.25n\pi)^{1/3} f \left[d\tau_s + \frac{\sqrt{2}}{2} (1-d) f^{1/2} \tau_p \right]}{F_1} \quad (9)$$

其中, k 为过盈配合界面的承载系数,与配合表面的微观轮廓状态、材料性能、接触载荷密切相关。因此在具体的应用场景中, $\Delta\mu$ 仅随 $V_{mp}^{2/3}$ 的变化而变化。

3.3 承载能力提升效果的量化描述与验证

根据 3.2 节可知, $\Delta\mu$ 正比于 $V_{mp}^{2/3}$ 是以织构熔融层作为承载主体,并在若干假设条件下推导得到的,与实际情况的吻合程度还需进一步探讨。为此,对表 7 中的 B 组数据(共 6 组)进行线性回归拟合,可建立承载能力量化表征模型,模型的确定系数 R^2 为 0.976 7,拟合效果良好。

$$\Delta\mu = 0.187 1 V_{mp}^{2/3} + 0.349 7 \quad (10)$$

相较于理论推导得到的式(8),式(10)增加了常数项 0.349 7,其值与无织构常规表面(A 组 1# 试样)的 μ 实测值 0.358 极为接近,相对差仅为 2.32%。由此可以推测,式(10)的常数项表达了织构化界面无织构区域(即常规表面)所提供的承载能力分量;而 0.187 1 $V_{mp}^{2/3}$ 则表达了织构区域所带来的承载能力增量 $\Delta\mu$ 。

为检验式(10)对织构表面的适用性,另制备了一组面密度为 15%且保留熔融层的织构试样,其他参数与表 1 相同,通过改变 H 获得不同的 V_{mp} ,记为 C 组,相关的测量结果见表 8 所列。

由表 8 可知,由式(10)得到的 μ 理论值与测量值间具有良好的一致性,最大相对误差仅为 2.32%。说明织构面密度与熔融层平均高度 H 的改变并未干扰式(10)对承载能力的量化描述精度,其给 μ 带来的影响($\Delta\mu$)均可由参数 V_{mp} 来统一描述;而 C 组试样无织构区域的微观形貌及材料性能均与之前相同,所提供的承载能力分量保持不变。

表 8 C 组试样的 V_{mp} 与 μ

下试样 类型	$H/\mu\text{m}$	$V_{mp}/$ (mL/m^2)	μ		
			理论值	测量值	相对误差/%
2#	11.823	0.845	0.514	0.529	-2.84
	15.043	1.125	0.550	0.542	1.48
	13.219	1.091	0.545	0.537	1.49

依照式(10)函数关系,可以绘制出的变化曲线如图 9 所示。

从图9可以看出, μ 随着 V_{mp} 的增加而增加,但增长速率 $d\mu/dV_{mp}$ 却逐渐放缓。当 V_{mp} 增加到 2.75 mL/m^2 时, μ 增加到0.717,较常规表面多了1倍;但 μ 的增长速率却降低73.7%。表明在通过增加 V_{mp} 来调节承载能力时,初期是最为有效的;且由于熔融层是源自加工表面高温熔化后的熔渣^[9],受加工工艺限制, V_{mp} 的增加是有上限的。

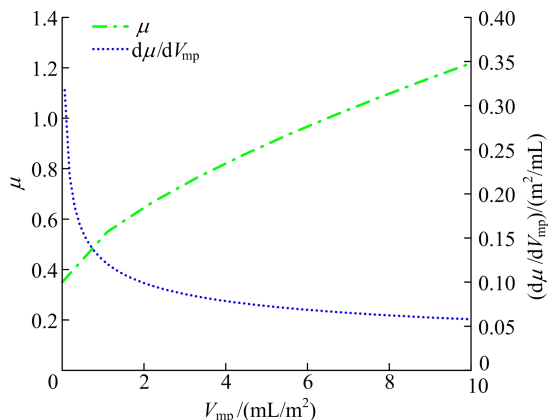


图9 μ 随 V_{mp} 的变化情况

3.4 承载能力提升量化方法的应用分析

若要利用熔融层的承载能力提升效果来恢复拆解损伤表面的承载能力,需要让熔融层带来的 $\Delta\mu$ 大于或者等于因拆解损伤导致的承载能力损失量 μ_1 ,即 $\Delta\mu \geq \mu_1$ 。而在具体的应用场景中,材料性能、表面轮廓状态、界面接触压力是确定的,因此可以通过若干预试验,以 $\Delta\mu$ 正比于 $V_{mp}^{2/3}$ 为模型拟合基础,获得织构化界面承载能力系数 k 的具体数值,并推算得到所需的 V_{mp} ,作为承载能力恢复的形貌目标。

以上方法在理论上具有较好的可行性,但要将其转变为工程实践,尚需解决以下问题:① 确保织构化界面在长时服役环境中的性能稳定性;② 提高表面织构的加工及检测效率;③ 针对具体的应用场景,建立试验数据库,完善承载能力提升目标的参数选用方法。

4 结 论

1) 配合界面间摩擦阻力 F_f 由黏着阻力分量

F_s 与犁沟阻力分量 F_p 组成,在过盈配合高接触压力 F_1 的作用下,被强化的熔融层提升了界面间的犁沟阻力分量 F_p ,承载能力也同步提升。

2) 表面支承率曲线的峰部区域可以直观地给出被测表面轮廓高点的统计情况,为使不同类型表面间的表面支承率曲线具有可比性,根据表面承载特点建立了包括表面支承率曲线基准对齐、参数取值修正在内的预处理方法。

3) 模型推导和试验结果发现,在具体的应用场景下,由减损织构带来的承载能力提升量 $\Delta\mu$ 正比于表面支承率曲线的峰部参数 $V_{mp}^{2/3}$,该线性关系可作为试验数据的拟合模型基础,为拆解损伤表面的承载能力恢复工艺提供具体的形貌参数修复目标。

[参 考 文 献]

- [1] 吕松江,江宏,徐意,等.基于表面织构的转向架节点拆装减损试验研究[J].机车电传动,2023(3):97-103.
- [2] 赵立新,章宝玲,刘洋,等.基于表面织构技术改善摩擦学性能的研究进展[J].摩擦学学报,2022,42(1):202-224.
- [3] 周丹,吴亮,徐意,等.激光凹坑拆解减损织构对过盈配合服役承载性能的影响实验研究[J].机械工程学报,2022,58(23):208-217.
- [4] ZHOU D, XU Y, GAO X, et al. Experimental study on the reduction effect of pit texture on disassembly damage for interference fit[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2023, 36(2): 265-276.
- [5] 温诗铸.摩擦学原理[M].北京:清华大学出版社,1990.
- [6] 李伯奎,左敦稳,刘远伟.轮廓支承长度率曲线的应用研究[J].润滑与密封,2006(1):114-116,126.
- [7] 赵仕宇,周超,詹艳然.基于功能参数的渐进成形件表面质量表征研究[J].表面技术,2020,49(10):346-352.
- [8] HE P Y, LU S W, WANG Y, et al. Analysis of the best roughness surface based on the bearing area curve theory [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology, 2022, 236(3): 527-540.
- [9] 嵇佳佳,柯文敏,丁琪,等.减少激光加工毛刺和飞溅技术研究[J].金属加工(热加工),2021(1):26-28.

(责任编辑 吴 亮)