

缸孔珩磨纹理参数对柴油机活塞环摩擦特性的调控作用

解 斌 李庆华

一拖(洛阳)柴油机有限公司 河南 洛阳 471000

摘 要: 缸孔珩磨纹理是决定柴油机活塞环-缸套摩擦副服役性能的关键表面形貌特征,其几何参数、方向分布及空间尺度直接影响润滑油膜形成、微接触状态及摩擦能耗。本文系统梳理珩磨纹理的关键参数体系,包括平台粗糙度、沟槽深度、珩磨夹角及波纹度等,分析各参数对活塞环摩擦特性(摩擦系数、磨损率、油膜厚度)的影响规律与物理机制。在此基础上,探讨纹理参数间的耦合效应及其对混合润滑状态的调控路径。研究表明,合理选择珩磨夹角和平台粗糙度(控制在中等偏小量级)可显著降低活塞环摩擦系数并提升抗拉伤能力,而过大的沟槽深度会加剧边界润滑下的磨损。本文为柴油机缸套表面设计与摩擦副选配提供理论依据。

关键词: 珩磨纹理; 活塞环; 摩擦特性; 平台粗糙度; 混合润滑; 表面形貌

引言

柴油机活塞环-缸套摩擦副承受高温、高压及交变载荷,其摩擦损耗约占整机机械损失的40%~60%,因此降低该副摩擦系数对提高燃油经济性和可靠性具有重要工程意义。缸套内表面经珩磨加工形成具有特定方向性、交叉角及微沟槽的纹理形貌,该形貌不仅储存润滑油、提供二次润滑,还影响接触界面的真实接触面积和流体动压效应。近年来,随着表面工程和摩擦学理论的发展,研究者逐渐认识到珩磨纹理并非单一参数作用,而是多维度几何特征(包括幅度参数、空间参数、混合参数)协同影响活塞环的摩擦学行为。然而,现有研究多聚焦于个别参数(如粗糙度Ra)的宏观效果,缺乏对纹理参数体系化调控作用的系统认识,尤其对珩磨夹角与沟槽深度的耦合效应、波纹度对油膜破裂的影响等关键问题尚未形成统一理论框架。为此,本文从珩磨纹理特征参数的物理定义出发,明确其与活塞环摩擦特性之间的关联机制,分层次讨论各参数在边界润滑、混合润滑及流体润滑区间的权重差异。研究结果可为高强化柴油机缸套珩磨工艺优化及活塞环材料匹配提供理论支撑。

1 缸孔珩磨纹理特征参数体系

1.1 纹理参数的几何学分类

缸孔珩磨纹理是由油石往复运动与旋转运动复合形成的一组交叉螺旋沟槽,其几何特征可依据ISO25178和ISO13565标准分为三大类:幅度参数、空间参数和混合参数。幅度参数包括轮廓算术平均偏差Ra、轮廓最大高度Rz、平台粗糙度Rk(核心轮廓深度)以及沟槽深度Rvk(缩减谷深)和峰值高度Rpk。其中Rk表征平台区域的承载能力,Rvk反映储油空间大小,二者对润滑油膜形成与排出具有决定性影响。空间参数包括珩磨夹角(即

交叉沟槽与水平方向的锐角,通常记为 α)、沟槽间距及波纹度波长^[1]。混合参数如纹理方向各向异性比Str和纹理纵横比,用于描述纹理方向性对润滑剂流动阻力的影响。这些参数共同构成了对珩磨表面功能特性的完整几何描述,不仅体现微观形貌的高度分布,也刻画了其在二维平面上的空间排布规律,为后续摩擦学性能建模奠定基础。

1.2 关键参数的物理意义与量值范围

柴油机缸套珩磨纹理的典型工程参数范围如下:平台粗糙度Rk一般在0.2~0.8 μm 之间,Rvk约0.5~2.5 μm ,珩磨夹角 α 多为40°~70°,波纹度Wa通常控制在0.3 μm 以下。Rk越小,平台越平坦,利于降低边界摩擦,但过小会减少储油空间导致润滑不足;Rvk越大,沟槽容纳磨屑和润滑油的能力越强,但过大会增加微观凸起高度,导致活塞环运行时产生冲击载荷。珩磨夹角直接决定交叉沟槽的“网格”分布,影响润滑油在轴向和圆周方向的流动路径。夹角较小时(如30°),沟槽趋向轴向,润滑油轴向流动增强,有助于散热但削弱径向承载;夹角较大时(如70°),沟槽趋向周向,径向刚度提高但可能阻碍润滑油均匀分布。这些参数的取值并非孤立存在,而是紧密关联于发动机工作条件、材料配副特性及磨合阶段需求,需在设计阶段进行系统权衡。

1.3 纹理参数的空间耦合特性

需要指出的是,各纹理参数并非独立变量。珩磨加工中,油石粒度、切削速度和进给量会同时影响Rk、Rvk和夹角。例如,增大油石压力会降低Rk但同时增加沟槽侧壁粗糙度,使Rvk非单调变化。此外,沟槽的螺旋角与波纹度的波长存在几何约束关系——当波长与沟槽间距接近时,波纹度会放大局部压力波动,诱发油膜空化。

因此,参数调控必须考虑耦合效应,单一参数优化往往无法获得全局最优解,这为后续摩擦特性分析提供了复杂性背景^[2]。实际工程中,常通过Abbott-Firestone曲线综合评估Rk、Rvk与Rpk的协同作用,并结合三维形貌测量技术识别纹理方向性与空间周期性之间的相互调制,从而实现缸孔表面功能的精准调控。

2 活塞环摩擦特性表征

2.1 摩擦特性的多维评价指标

活塞环摩擦特性通常采用摩擦系数(μ)、磨损率(单位时间或单位行程的质量损失)和临界油膜厚度(h_c)作为核心指标。其中摩擦系数取决于接触界面的剪应力与正压力之比,在混合润滑区受表面形貌和润滑油粘度共同影响;磨损率反映材料去除速率,与局部接触压力及表面微凸体相互作用密切相关;临界油膜厚度则标识从混合润滑向边界润滑转变的阈值,其值越小表明表面保持流体润滑的能力越强。此外,摩擦功(即摩擦系数与载荷、速度的积分)和温度敏感性也常作为辅助评价参数,以全面衡量纹理对摩擦副热-力耦合行为的调控效果。

2.2 润滑状态划分与纹理的界面作用

依据Stribeck曲线,活塞环-缸套润滑状态可分为边界润滑($\lambda < 1$, λ 为油膜厚度与综合粗糙度之比)、混合润滑($1 \leq \lambda \leq 3$)和流体动压润滑($\lambda > 3$)。珩磨纹理在各区间的作用机制截然不同:边界润滑下,纹理平台区承担主要载荷,微凸体发生弹塑性变形,摩擦系数主要由平台粗糙度Rk和材料剪切强度决定;混合润滑中,沟槽作为储油槽,通过表面张力效应将润滑油输运至接触区,同时交叉沟槽产生微观动压效应——当活塞环滑过沟槽时,楔形间隙诱导压力升高,部分分担载荷;流体动压润滑时,纹理的方向性决定润滑油流动阻力,各向异性较小的纹理(Str接近1)有利于形成均匀油膜。

2.3 摩擦特性与纹理参数的响应关系

摩擦系数随Rk增大呈先降后升的U型趋势,转折点对应的Rk量级通常在0.3~0.5 μm 区间附近(对于常用柴油机工况),因为过小的Rk使平台过于光滑,不利于吸附润滑油分子形成边界膜;过大的Rk则增加微凸体型削力。珩磨夹角对摩擦系数的影响表现为:在混合润滑区, α 偏向50°~55°区间时通常可获得较低的摩擦系数,这是由于该角度范围内交叉沟槽产生的动压分量与轴向剪切分量达到较好的平衡^[3]。磨损率则与Rvk呈正相关,但当Rvk超过2 μm 后,沟槽底部应力集中加剧,可能诱发疲劳剥落。可见,摩擦特性的各指标对纹理参数的敏感性存在差异,需通过多目标权衡确定合理的匹配方案。

3 纹理参数对活塞环摩擦特性的影响机制

3.1 平台粗糙度Rk对边界润滑的调控

在边界润滑工况(如压缩冲程上止点附近,活塞环速度接近零),油膜极薄,载荷主要由粗糙峰接触承担。此时Rk决定了真实接触面积占名义面积的比例。根据Greenwood-Williamson接触模型,接触面积与Rk的平方根成反比,即Rk越小,接触面积越大,单位面积压力降低,有利于减小局部塑性流动和粘着磨损。然而,极小的Rk(如接近0.2 μm)会削弱表面贮留边界润滑剂(如添加剂分子)的能力,导致润滑膜易被剪切破裂,反而增大摩擦系数。因此,存在一个使摩擦系数最低的Rk“适宜区间”,该区间与活塞环材料的表面能及润滑油极性有关。此外,Rk的分布形态(偏度和峰度)也有影响——负偏度(平台浅谷)利于快速形成油膜,正偏度(尖峰)则增加磨损风险。

3.2 沟槽深度Rvk对储油与排屑的双重作用

Rvk表征珩磨沟槽的深度和容积,直接影响润滑油在接触区外侧的储备量。在中低速工况下,较深的沟槽(Rvk > 1.5 μm)可存储更多润滑油,并通过活塞环运动时的“泵吸”效应将油液带入接触前缘,有利于维持混合润滑。但当转速升高时,过深的沟槽会增大润滑油的内摩擦损耗,同时沟槽内油液受到离心力和剪切力作用可能产生气泡,降低油膜有效粘度。更关键的是,Rvk过大(接近或超过2.5 μm)导致沟槽底部成为应力集中源,在交变载荷下萌生疲劳裂纹,磨损颗粒脱落进入接触界面,加剧三体磨损^[4]。因此,Rvk的调控需兼顾储油能力和结构强度,通常推荐保持Rvk与Rk的比值在2~4倍的量级范围内。

3.3 珩磨夹角 α 对动压效应与润滑流向的协同影响

珩磨夹角 α 是影响润滑油流动方向和动压压力分布的核心几何参数。设活塞环运动方向为轴向,交叉沟槽与轴向的夹角为 α ,则沟槽在轴向和切向(周向)的投影分量为 $\cos\alpha$ 和 $\sin\alpha$ 。当 α 较大时(>60°),沟槽趋向垂直于运动方向,润滑油沿周向流动的阻力增大,有利于形成横向密封,但轴向供油不足,可能导致活塞环顶部缺油;当 α 较小时(<40°),沟槽趋向平行于运动方向,轴向流动性好,但径向(垂直于缸壁方向)的动压楔形效应减弱,油膜承载能力下降。数值模拟表明,在 α 处于50°~55°附近时,轴向和切向的动压分量乘积通常较大,对应油膜压力峰值较高,从而有效降低金属直接接触概率。同时, α 的变化还影响微凸体间的流体动压粗糙度(即“微楔效应”),适宜夹角与活塞环速度、载荷及润滑油粘度存在匹配关系。

3.4 波纹度与纹理方向性的高频扰动效应

波纹度（波长约为 $0.5 \sim 5\text{ mm}$ ）通常由珩磨机床主轴振动或进给不均匀引起，其幅值虽小（一般 $W_a < 0.3\mu\text{m}$ ），但波长与活塞环宽度（约 $2 \sim 4\text{ mm}$ ）相近时，会引发接触压力的周期性波动。这种波动导致油膜厚度随空间位置变化，在波峰处油膜变薄，摩擦系数上升；在波谷处油膜增厚，但可能产生空化负压，降低油膜稳定性。更严重的是，波纹度与珩磨夹角耦合时，若波纹波前方向与沟槽方向接近，则会产生“叠加效应”，使局部粗糙度振幅倍增，诱发早期拉伤^[5]。因此，现代珩磨工艺要求严格控制波纹度，并优先采用各向同性纹理（ $Str > 0.5$ ）以减小方向性扰动。

3.5 参数耦合作用下的非线性摩擦响应

上述各参数并非线性叠加，而是通过润滑状态转换产生强耦合。例如，当 R_k 较大（接近 $0.6\mu\text{m}$ ）且 α 较小时（约 35° ），摩擦系数随速度升高先降后升，出现“摩擦拐点”，这是因为较大的 R_k 增加接触面积，而小夹角削弱动压，两者共同导致混合润滑区间向高速度端移动。反之， R_k 较小（接近 $0.3\mu\text{m}$ ）且 α 较大（约 65° ）时，摩擦系数在低速区呈现低值平稳，但在高速区因供油不足而急剧上升。三参数（ R_k 、 R_{vk} 、 α ）的交互效应可通过响应面法进行趋势分析，其等值线图表明，减摩效果较为突出的区域通常位于 R_k 中等偏小、夹角适中的范围，而摩擦系数的具体最低点并非固定数值，而是随速度-载荷窗口发生漂移。这些非线性特征表明，纹理参数调控需基于具体工况窗口进行分区匹配，不宜追求普适性的单一精确数值。

4 结语

本文系统分析了缸孔珩磨纹理的关键参数（平台粗糙度 R_k 、沟槽深度 R_{vk} 、珩磨夹角 α 及波纹度）对柴油机活塞环摩擦特性的调控机理，明确了各参数在不同润滑区间的权重差异和耦合规律。核心结论如下：（1） R_k 对边界润滑和混合润滑具有双重阈值效应，存在摩擦系数最低的适宜量级区间（通常对应工程上的中等偏小范围）； R_{vk} 需权衡储油与强度，推荐比例 R_{vk}/R_k 保持在 $2 \sim 4$ 倍量级； α 对动压效应影响显著，其较优工作区通常位于 $50^\circ \sim 55^\circ$ 附近。（2）纹理参数间存在强交互作用，尤其 R_k 与 α 的耦合决定混合润滑向流体润滑的过渡速度，而波纹度与沟槽方向的一致性会诱发高频扰动，必须严控。未来研究应进一步引入动态磨损演化模型，考虑纹理参数在运行过程中的时变退化规律，并发展基于在线监测的自适应调控技术，以实现缸套表面摩擦特性的全生命周期优化。

参考文献

- [1] 王伟,刘震,赵辉.缸套珩磨平台粗糙度对活塞环摩擦性能的影响研究[J].内燃机工程,2022,43(2):56-63.
- [2] 陈思远,周明,李华.基于混合润滑模型的珩磨纹理参数优化方法[J].摩擦学学报,2021,41(5):712-720.
- [3] 刘东,杨青,王磊.波纹度对柴油机缸套-活塞环油膜稳定性的数值分析[J].润滑与密封,2022,47(8):98-105.
- [4] 赵志强,孙明,高铁.激光复合珩磨纹理的减摩机制与工艺试验[J].机械工程学报,2024,60(1):112-120.
- [5] 李建峰,马晓君,张蕾.基于响应面法的珩磨纹理参数多目标优化设计[J].内燃机学报,2023,41(3):245-253.