温度与载荷协同作用下深地钻具径向轴承的表面损伤行为

娄 明[1] 杨训旺[1] 郝开元[1] 徐 凯[1] 于兴胜[2] 沈海春[3]
张国田[2] 常可可[1*]
1.中国科学院宁波材料技术与工程研究所海洋关键材料全国重点实验室,宁波,315201
2.北京石油机械有限公司,北京,102206
3.中国石油集团渤海钻探工程有限公司第二钻井工程分公司,廊坊,065001

摘要:采用ANSYS仿真分析了深地钻具径向轴承在温度、载荷协同作用下的应力/应变分布状态。仿真结果表明,最大等效应力/应变出现在硬质合金/焊料界面(焊接界面)和硬质合金/硬质合金界面(摩擦界面)附近;温度显著提升应力/应变水平,300 ℃下的最大等效应力/应变较100 ℃下的最大等效应力/应变增大约2.5倍;轴承两端的摩擦应力高于中间区域,且更易发生黏着磨损。上述仿真结果与实地服役轴承的损伤分布特征高度吻合,可为径向轴承的优化设计提供理论参考。

关键词:径向轴承;表面损伤;温度;载荷;有限元分析
中图分类号:TP182
DOI:10.3969/j.issn.1004-132X.2026.07.005 **开放科学(资源服务)标识码(OSID)**:

Surface Damage Behaviors of the Radial Bearings for Deep Drilling Tools under the Synergistic Effect of Temperature and Load

LOU Ming[1] YANG Xunwang[1] HAO Kaiyuan[1] XU Kai[1] YU Xingsheng[2] SHEN Haichun[3]
ZHANG Guotian[2] CHANG Keke[1*]
1.State Key Laboratory of Advanced Marine Materials, Ningbo Institute of Materials Technology and Engineering, Chinese Academy of Sciences, Ningbo, Zhejiang, 315201
2.Beijing Petroleum Machinery Co., Ltd, Beijing, 102206
3.No.2 Drilling Engineering Branch of CNPC Bohai Drilling Engineering Co., Ltd, Langfang, Hebei, 065001

Abstract: The stress and strain distributions of radial bearings for deep drilling tools under the synergistic effects of temperature and load are studied via finite element simulations using ANSYS Workbench. The simulation results show that the maximum equivalent stress and strain occur near the cemented carbide-solder interface (i.e., the welding interface) and the cemented carbide-cemented carbide interface (i.e., the sliding interface). Temperature significantly increases the stress and strain levels; the maximum equivalent stress and strain at 300 ℃ are approximately 2.5 times higher than those at 100 ℃. The frictional stress at both ends of the bearings is higher than that in the middle region, making the end regions more susceptible to adhesive wear. The simulation results are in good agreement with the damage distribution characteristics observed after field application, indicating that these findings can provide a theoretical reference for the optimal design of radial bearings.

Key words: radial bearings; surface damage; temperature; load; finite element analysis

0 引言

我国深部油气资源储量丰富(6.7×10^{10} t油当量),约占全国油气资源总量的34%,但绝大部分尚未开发利用,因此,深部油气钻采是保障国家能源安全、实现能源战略接替的重要举措。

常规地层的地温梯度通常为每百米1~3 ℃,随着油气钻采深度增加,井筒内的温度持续攀升、压力不断增大。马达总成、万向轴总成、传动轴总成中的承力运动部件在温度与载荷协同作用下的服役寿命急剧缩短,已成为制约深地工程钻进效率提升的瓶颈[1-3]。

钻具运转过程中,径向轴承主要承受钻头、万向轴转动产生的侧向力,因此要求轴承柱面具有

收稿日期:2025-06-22
基金项目:国家重点研发计划(2023YFB3712600);国家自然科学基金(52475230);宁波市"科创甬江2035"关键技术项目(2024Z138,2024Z095)

良好的耐磨性[4]。常见的径向轴承强化方法包括焊接(钎焊或等离子堆焊)硬质合金片[5]、喷涂金属陶瓷涂层[4]等。学者主要关注径向轴承制造过程中升/降温导致的硬质合金开裂问题[5-6],对径向轴承服役过程中的表面损伤机制研究较少。许爱荣等[7]采用有限元方法对比了径向轴承在10 kN、25 kN侧向力下的应力分布状态,发现随着侧向力的增大,动圈轴承片的最大应力增加5倍、静圈轴承片的最大应力增加1倍。沈彬等[8]发现,随着侧向力由5 kN增大至25 kN,轴承摩擦接触面的应力分布均匀性显著下降。此外,对于传动轴推力轴承摩擦副应变状态,温度的影响显著大于扭矩的影响,且高温下的轴承变形增大是其失效的最主要因素[9]。

深地钻探的高温环境对钻具承力运动部件的服役可靠性带来了严峻挑战,而目前针对温度与载荷协同作用下的径向轴承表面的应力集中及变形行为尚缺乏深入探讨。本文以典型硬质合金强化径向轴承为研究对象,采用有限元方法分析其在温度、载荷协同作用下的应力/应变分布特征,通过与实地服役轴承损伤形貌的对比明确温度对轴承表面损伤的影响机制,以指导轴承表面结构的优化设计。

1　径向轴承结构

传动轴总成是螺杆钻具的主要承载机构,上端通过水帽与万向轴总成相连,下端与钻头连接,主要起传递钻压载荷、带动钻头破岩的作用。如图1所示,传动轴总成包含承受钻具轴向力的推力轴承组,以及扶正传动轴并保证其正常工作位置的径向轴承组。根据安装位置的不同,径向轴承组可进一步分为上下两组。每组均由一对静圈和动圈组成,且动圈随传动轴主轴运转。

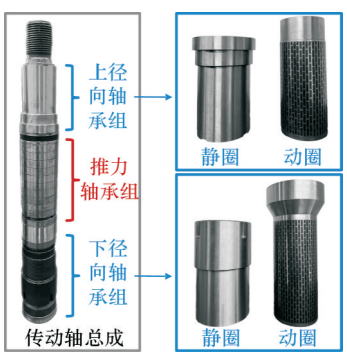


图1　钻探机具传动轴及径向轴承组结构

Fig.1　Typical structures of the drive shaft assembly and the radial bearing set of drilling tools

以油气工程领域最为常见的钎焊式径向轴承为例,参照中国石油集团的产品设计要求,动/静圈(图2)表面均由硬质材料(YG8硬质合金、Ti(C,N)金属陶瓷等)与焊料(Ag基、Cu基焊料等)构成,其中,硬质材料(尺寸未限定)覆盖率超过65%,耐磨层厚度超过2 mm,基体材料为42CrMo合金结构钢。动/静圈为径向间隙配合,单边径向间隙0.1 mm;服役工况下,油基、水基钻井泥浆裹挟岩屑颗粒循环流经配合间隙,润滑摩擦副并带走部分热量。

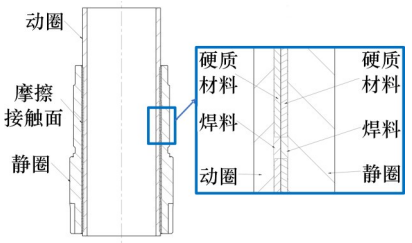


图2　径向轴承动/静圈摩擦接触面示意图

Fig.2　Schematic diagram of sliding contact surfaces between the moving rings and stationary rings of radial bearings

2　有限元分析方法

为探究深地钻探过程中的温度对径向轴承表面损伤的影响,利用ANSYS Workbench软件中的稳态热和静态结构模块开展仿真模拟。采用顺序耦合方法,先求解稳态温度场,再将温度场作为载荷导入结构分析;采用Newton-Raphson迭代法和Augmented Lagrange方法处理摩擦非线性接触;采用显式中心差分法求解动态载荷作用下的瞬态响应问题。

将轴承表面的硬质材料尺寸设为50 mm×12.5 mm×1.75 mm(长×宽×厚),轴向等间距布置5片硬质材料,周向等间距布置25片硬质材料,总覆盖率约70%(满足设计要求),硬质材料间隙填充焊料,得到的计算模型如图3所示,其中,蓝色区域表示静圈硬质材料,浅红色区域表示动圈硬质材料。

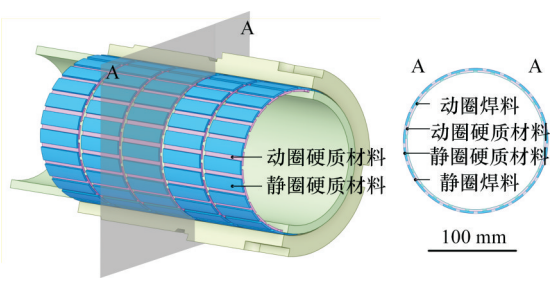


图3　径向轴承动/静圈有限元模拟模型

Fig.3　Simulation model of the moving rings and stationary rings of radial bearings

对轴承的静圈与动圈进行混合网格划分:在硬质材料区域和焊料区域采用结构化网格划分并

加密网格，在基体及其他区域采用非结构化网格划分。为确保计算结果不受网格数量影响，开展网格独立性分析，即对硬质材料区与焊料区分区精细化划分网格，网格尺寸为1～3 mm；计算结果见表1，随网格加密、单元增多，最大计算应力逐步收敛至稳定，不同数量网格的计算结果差异较小，粗细网格的最大应力的计算结果相对误差为2.9%。选取第3组网格配置作为计算模型，以兼顾计算效率和结果准确性。

表1 网格独立性验证

Tab.1 Validation of mesh independence

序号	硬质材料和焊料区域的网格尺寸/mm	基体区域的网格尺寸/mm	网格数量	最大等效应力/MPa
1	1.0	10.0	537 233	382
2	1.5	10.0	339 793	380
3	2.0	10.0	294 712	383
4	2.0	8.0	337 581	385
5	2.5	10.0	258 271	387
6	3.0	10.0	248 091	391

根据轴承相关材料体系的性能参数，依次确定径向轴承动/静圈的硬质材料（YG8硬质合金、Ti(C,N)金属陶瓷）、焊料（AgCuZn、CuNiZn）及基体材料（42CrMo钢）的物理性能和力学性能，如表2所示[10-16]，并将这些参数作为仿真计算的输入条件。

表2 材料属性定义[10-16]

Tab.2 Definition of materials properties[10-16]

材料	密度 ρ/(kg·m^{-3})	热膨胀系数 α/K^{-1}	热导率 K/(W·m^{-1}·K^{-1})	比热容 C/(J·kg^{-1}·K^{-1})	弹性模量 E/GPa	泊松比 ν	硬度HV	屈服强度MPa
YG8合金片	14600	5.8×10^{-6}	134	200	577	0.23	1270	-
Ti(C,N)片	6400	9.4×10^{-6}	17	466	484	0.19	1300	-
AgCuZn焊料	9500	1.9×10^{-5}	150	300	80	0.34	130	400
CuNiZn焊料	8400	1.6×10^{-5}	40	380	120	0.33	200	557
42CrMo基体	7850	1.2×10^{-5}	40	460	210	0.28	260	550

实际钻探工程中，由于地质条件和井温的不断变化，径向轴承间隙中循环的钻井泥浆的成分、黏度和热物性等参数变化，且轴承实际接触状态和承载情况无法监测，因此，有必要对有限元模型进行合理的简化。钻具轴承应力/应变分布的仿真大多不考虑间隙及钻井泥浆的影响[7-9]，故在轴承动/静圈的摩擦界面施加摩擦连接副，并设置100 ℃、200 ℃、300 ℃的界面温度载荷。在静圈外表面施加对流换热边界条件，设定环境温度为25 ℃，对流传热系数为5×10^{-6} W/(mm^2·K)。旋转力矩作用于动圈内表面法线方向，大小设为10 N·m，且限制动圈外表面在X、Y、Z方向的位移为0。在静圈外表面设置固定支撑。在轴承动圈内表面施加径向的动态载荷（大小为0～10 kN，持续时间为0～1 s）。通过设置的上述边界条件，重点分析摩擦界面处的压应力p_N和摩擦应力t_T，其中，摩擦应力为界面上阻碍相对运动的剪切应力：滑动接触状态（$|\dot{g}_T|>0$）下

$$t_T=-\mu p_N\frac{\dot{g}_T}{|\dot{g}_T|} \tag{1}$$

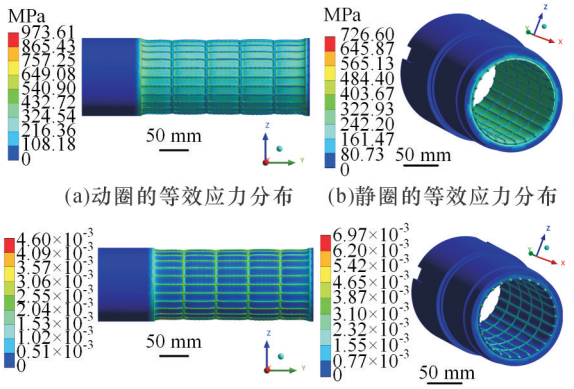
黏着接触状态（$|\dot{g}_T|=0$）下

$$|t_T|<\mu p_N \tag{2}$$

式中：μ为界面摩擦因数，μ=0.1；$\dot{g}_T$为相对滑动速度。

3 仿真结果与实验验证

YG8硬质合金强化径向轴承（AgCuZn焊料）在温度（100 ℃）、载荷（动态轴承载荷0～10 kN）协同作用下的应力/应变分布如图4所示。轴承动圈（图4a）摩擦接触面应力分布不均匀，且分布状态与材料区域密切相关。YG8硬质合金区域的应力较AgCuZn焊料区域高，表明硬质合金在轴承工作过程中起承载作用。轴承静圈（图4b）摩擦接触面的应力分布类似，且静圈的最大等效应力726.6 MPa小于动圈的最大等效应力973.6 MPa，与已有研究结论[8]相符。产生该现象的原因是旋转部件（动圈）与非旋转部件（静圈）的形变量不同。轴承动圈的应变分布仿真结果（图



(a)动圈的等效应力分布 (b)静圈的等效应力分布

(c)动圈的等效应变分布 (d)静圈的等效应变分布

图4 径向轴承在温度100 ℃和动态轴承载荷0~10 kN下的仿真结果

Fig.4 Simulation results of the radial bearings at a temperature of 100 ℃ and dynamic bearing loads of 0~10 kN

4c)表明，YG8硬质合金区域应变较小，AgCuZn焊料区域应变较大，这是由于硬质合金的硬度、硬度/弹性模量比较大(表2)、抗弹/塑性变形能力较强[17]，因而在高应力下依然表现出相对较小的应变。图4d所示的仿真结果表明，轴承静圈的应变集中于焊料区域，且静圈焊料区域的最大等效应变 7.0×10^{-3} 大于动圈的最大等效应变 4.6×10^{-3}。整体而言，硬质合金是径向轴承摩擦界面的承载区域，应力大而应变小，焊料呈现完全相反的应力/应变分布状态。由此推断，轴承动/静圈在高温、重载极端条件下服役时，硬质合金与焊料之间的变形差异会愈发显著，二者界面因应力集中而易成为薄弱环节，率先断裂失效。

为进一步明晰硬质合金/焊料界面处的应力/应变分布情况，对摩擦界面在温度100 ℃和轴承载荷0～10 kN下的轴向等效应力/应变变化趋势进行分析。如图5a所示，等效应力在轴向周期性波动，其中，硬质合金作为承载区域，应力较高(225～275 MPa)，而焊料区域应力均小于200 MPa；硬质合金与焊料界面处存在显著的应力集中，最大值为383.0 MPa。等效应变仿真结果(图5b)表明，轴向应变同样呈现周期性波动特征，应变峰值出现在焊料区域，约为硬质合金区域最大应变的5倍。

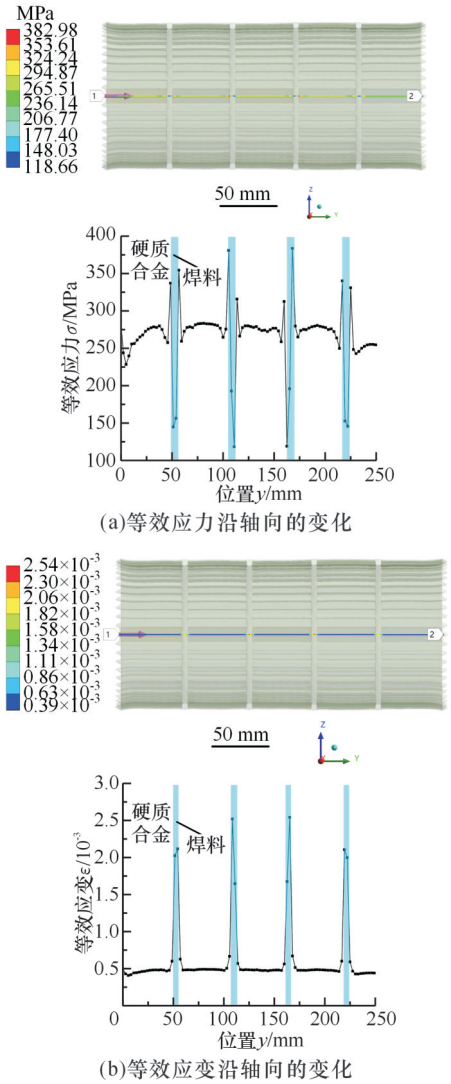


图5　轴承摩擦界面的仿真结果(100 ℃，动态载荷0～10 kN)

Fig.5　Simulation results of the sliding interfaces for bearing (100 ℃, dynamic loads of 0～10 kN)

轴承动/静圈在温度100 ℃和轴承载荷0～10 kN下的径向等效应力与应变分布如图6所示。由图6a可看出，钢质轴承基体/焊料、焊料/硬质合金、硬质合金/硬质合金界面(摩擦界面)处均存在显著的应力变化，等效应力最大值261.8 MPa出现在摩擦界面附近。轴承基体/焊料、焊料/硬质合金、摩擦界面处的应变也存在较大幅度波动，

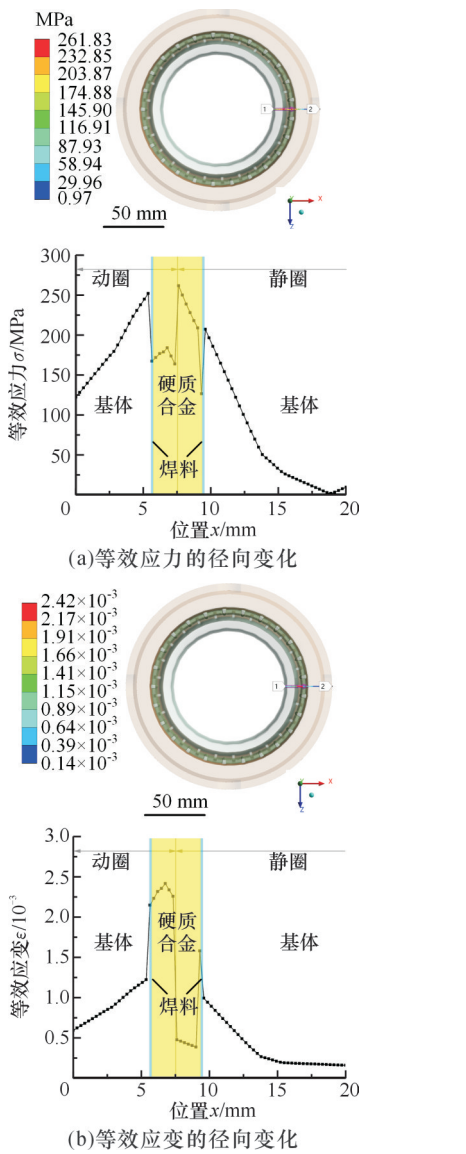


图6　径向轴承在温度100 ℃和动态轴承载荷0~10 kN下的仿真结果

Fig.6　Simulation results of the radial bearings at a temperature of 100 ℃ and dynamic bearing loads of 0~10 kN

等效应变最大值2.4×10^{-3}在摩擦界面附近(图6b)。对比分析图5a、图6a可知,轴向的硬质合金/焊料界面附近应力383.0 MPa最大;径向的硬质合金/硬质合金界面附近应力261.8 MPa最大。由硬质合金的屈服强度通常大于3000 MPa[18],AgCuZn焊料的屈服强度通常大于400 MPa[15],可推断随着温度或载荷的进一步增加,硬质合金/焊料界面附近区域将率发生宏观塑性变形,进而出现界面开裂。

径向轴承摩擦界面在温度100 ℃和轴承载荷0~10 kN下的压应力、摩擦应力和接触状态如图7所示。压应力(图7a)和摩擦应力(图7b)分布均呈现轴承摩擦副中间区域低、两端区域高的特征,故轴承摩擦副的两端更易损伤。接触状态(图7c)分析表明,硬质合金区域以滑动磨损(机械磨损)为主,焊料区域易发生黏着磨损;轴承摩擦副两端的黏着磨损较中间区域更显著。高温、重载条件下,硬度较低、抗变形能力较差的材料更易发生脱附、转移和黏着[19](表2所示的焊料硬度约为硬质材料硬度的1/10),这与本工作的预测结果一致。

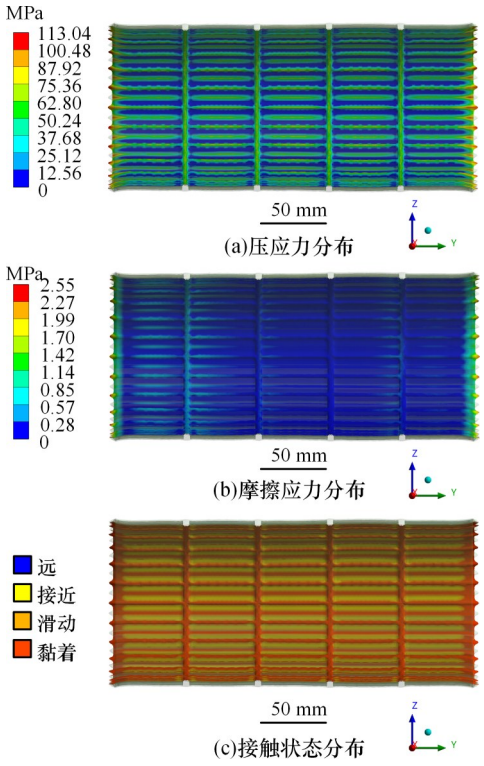


图7 摩擦界面在温度100 ℃和动态轴承载荷0~10 kN下的仿真结果:

Fig.7 Simulation results of the sliding interfaces at a temperature of 100 ℃ and dynamic bearing loads of 0~10 kN

为验证模拟仿真的可靠性,笔者拆解了某石油钻井(平均井温130 ℃)服役232 h的螺杆钻具,分析硬质合金径向轴承动/静圈的损伤形貌。如图8所示,轴承动/静圈两端的损伤明显高于中间区域。静圈中间区域的硬质合金及焊料结构完整性较好,表面存在平行于轴承转动方向的划痕,表明该区域以磨粒磨损为主。该区域硬质合金表面出现少量微裂纹的原因可能是硬质合金应力较高(图4b)。静圈下端表面损伤严重(以黏着磨损为主),除微裂纹外还存在明显的材料转移与黏着(由成分分析结果可知黏着材料主要成分为焊料及其氧化物)。静圈截面的电子显微分析结果表明,中间区域的剩余耐磨层厚度约为1.2 mm;下端区域的剩余耐磨层厚度仅有0.3 mm,且焊料存在剥落现象。这与模拟仿真中硬质合金/焊料界面处应力/应变较高(图5a、图5b)、摩擦界面两端应力较高(图7a、图7b)且黏着磨损趋势更显著(图7c)等预测结果相吻合。

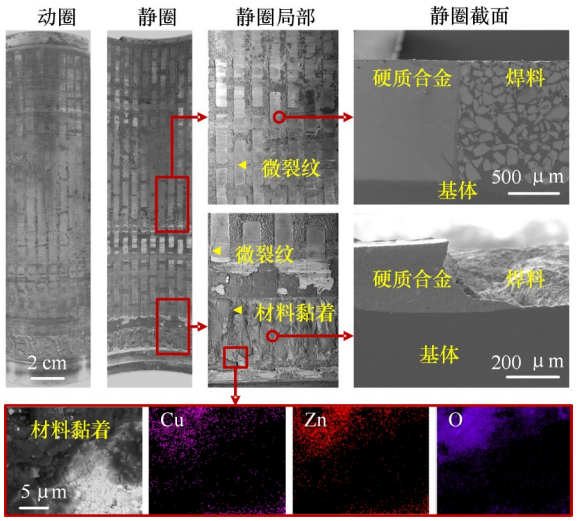
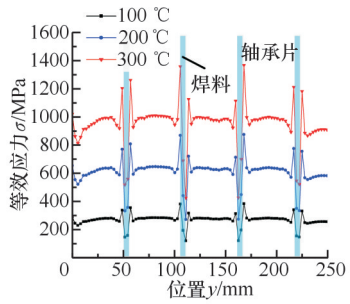


图8 深地钻具径向轴承动/静圈表界面损伤形貌分析

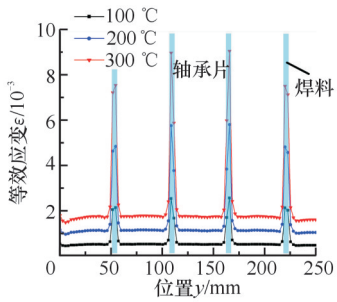
Fig.8 Morphological analyses on the damaged surfaces and interfaces of the moving ring and stationary ring of radial bearings dismantled from deep drilling tools

验证仿真模型的有效性后,研究不同温度、不同材料组合的应力/应变分布。由图9可以看出,摩擦界面轴向的最大应力在硬质合金/焊料界面处,且随着温度升高,应力峰值显著增大,100 ℃、200 ℃、300 ℃下的应力峰值分别为383.0 MPa、874.7 MPa、1366.8 MPa(图9a)。等效应变随温度上升同样显著增大,100 ℃、200 ℃、300 ℃下的最大应变分别为2.5×10^{-3}、5.8×10^{-3}、9.1×10^{-3},且最大应变均出现在焊料区域。由此可见,摩擦界面轴向的应力/应变均随温度升高而增大。高温下,材料的弹性模量减小[20]、弹性应变增大,强化界面处的应力集中,300 ℃下的最大等效应力和最大等效应变均较100 ℃时增大2.5倍。

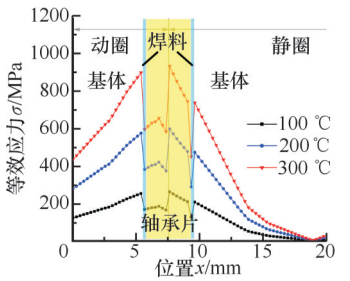
不同温度下的应力径向分布趋势基本一致,



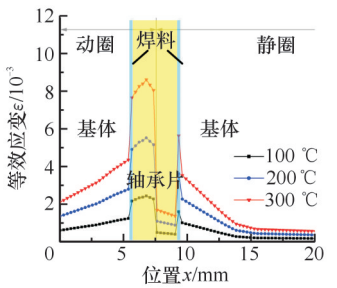
(a)等效应力沿摩擦界面轴向的变化



(b)等效应变沿摩擦界面轴向的变化



(c)等效应力沿动/静圈径向的变化



(d)等效应变沿动/静圈径向的变化

图 9　不同温度和动态轴承载荷 0~10 kN 下的仿真结果

Fig.9　Simulation results at different temperatures and dynamic bearing loads of 0~10 kN

最大等效应力出现在摩擦界面处，100 ℃、200 ℃、300 ℃下的最大等效应力分别为 261.8 MPa、597.8 MPa、933.8 MPa。最大等效应变出现在邻近摩擦界面的动圈硬质合金区域，100 ℃、200 ℃、300 ℃下的最大等效应变分别为 2.4×10^{-3}、5.5×10^{-3}、8.6×10^{-3}。由此可见，径向的应力/应变均随温度升高而增大，其中，300 ℃下的最大等效应力和最大等效应变较 100 ℃时增大约 2.5 倍，与温度对轴向应力/应变的影响规律基本一致。

分析摩擦界面在 300 ℃的压应力、摩擦应力和接触状态，如图 10 所示。与 100 ℃下的仿真结果（图 7）相比，压应力和摩擦应力在磨损区域中间低、两端高的整体趋势未变，但 300 ℃的最大压应力 408.3 MPa 较 100 ℃的 113.0 MPa 增加约 2.5 倍，最大摩擦应力 31.6 MPa 较 100 ℃时的 2.6 MPa 增大约 11 倍。摩擦副接触面的损伤仍以黏着磨损和滑动磨损（机械磨损）为主，其中，焊料区域、轴承两端的黏着磨损更明显，硬质合金区域以滑动磨损为主（图 10c）。硬质合金的硬度随温度升高而线性下降（300 ℃下的硬度约为 1070 HV[21]），这意味着硬质合金的抗机械磨损性能降低，滑动磨损率增大（300 ℃的滑动磨损率约 1.2×10^{-6} $mm^3/(N\cdot m)$[22]）。由此可见，即使服役温度 300 ℃没有改变摩擦界面处的应力分布和主导磨损机制，摩擦应力的显著增大和承载区域的硬度减小也会导致轴承磨损的加剧。

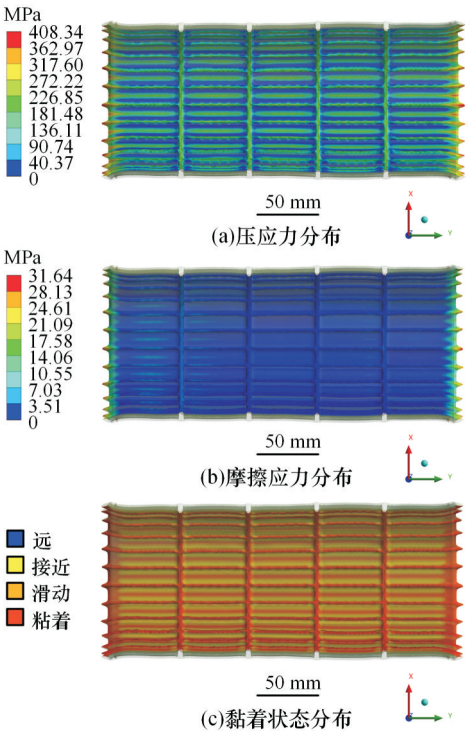


图 10　摩擦界面在温度 300 ℃和动态轴承载荷 0~10 kN 下的仿真结果

Fig.10　Simulation results of the sliding interfaces at a temperature of 300 ℃ and dynamic bearing loads of 0~10 kN

图 11 显示硬质材料与焊料的不同组合的等效应力/应变分布。轴向上，采用 Ti(C,N)金属陶瓷轴承片的轴承片/焊料界面处的最大等效应力比 YG8 硬质合金轴承片增大 13.6%，采用 Cu 基焊料的轴承片/焊料界面处的最大等效应力较采用 Ag 基焊料时增大约 5.5%。轴向的等效应变分布较为复杂，Ti(C,N)金属陶瓷轴承片的等效应变较 YG8 硬质合金轴承片大 70%，轴承片/焊

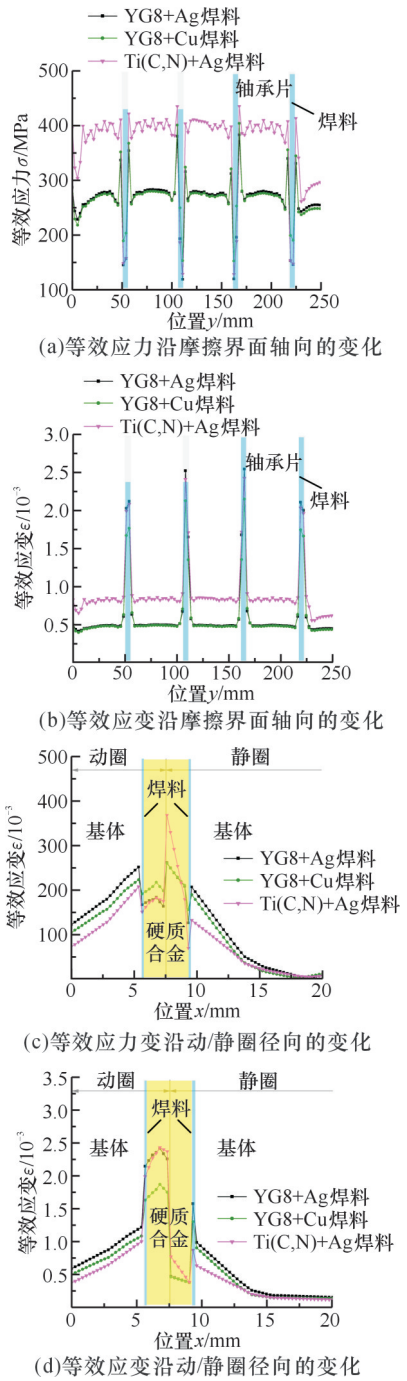


图11 不同材料组合在温度100 ℃和动态轴承载荷0~10 kN下的仿真结果

Fig.11 Simulation results of different materials combinations at a temperature of 100 ℃ and dynamic bearing loads of 0~10 kN

料界面处的最大等效应变减小5%；采用Cu基焊料的轴承片区域等效应变不变，轴承片/焊料界面处的最大等效应变减小15%。径向上，采用Ti(C,N)基金属陶瓷轴承片时，摩擦界面附近的最大等效应力显著增大；采用Cu基焊料时，该区域的最大等效应力无明显变化。Ti(C,N)基金属陶瓷轴承片与YG8硬质合金轴承片的最大等效应变差别不大；采用Cu基焊料时，最大等效应变减小。等效应变可反映复杂应力状态下材料的变形规律。分析等效应变能发现，YG8硬质合金与Cu基焊料的组合可有效减小最大应变，并优化界面应变分布，进而提高径向轴承在高温钻探工况下的服役可靠性。

综合图9、图11所示的仿真结果可知，温度对的应力/应变分布的影响不大，但会显著增大动/静圈的应力/应变；材料组合的改变对应力/应变及其分布均会产生较大影响。需要特别指出的是，轴承片/焊料的焊接界面、轴承片/轴承片的摩擦界面是存在最大等效应力和最大等效应变的区域，这与径向轴承损伤表面(图8)观察到的焊料剥落、轴承片开裂等损伤形式相符。

4 结论

1)轴承动/静圈表面的硬质合金片是主要承载区域，区域表现具有高应力、低应变特征；焊料区域与之相反，具有低应力、高应变特征；最大等效应力/应变出现在硬质合金/焊料界面(焊接界面)和硬质合金/硬质合金界面(摩擦界面)附近。

2)仿真发现轴承动/静圈摩擦界面两端的压应力和摩擦应力均大于中间区域，焊料区域较硬质合金区域更易发生黏着磨损，这与实地服役轴承的损伤特征高度吻合。

3)温度对轴承表/界面的应力/应变分布影响不大，但会显著提高应力/应变(300 ℃下的最大等效应力/应变较100 ℃时增大约2.5倍)；YG8硬质合金与Cu基焊料的组合可改善界面附近的应变分布，有利于提升径向轴承的高温服役可靠性。

本文关注油气钻探领域最常见的钎焊式径向轴承用Ag基、Cu基焊料，但相关研究方法同样适用于等离子堆焊式径向轴承，未来研究可将等离子堆焊用Ni基焊料等纳入研究范围，同时考虑焊料的高温抗氧化性能、高温力学性能等影响因素，进一步完善仿真模型，以加快新型径向轴承材料组合及加工工艺的筛选与应用。

参考文献：

[1] 常可可，陈雷雷，周若男，等. 极端环境表面工程及其共性科学问题研究进展[J]. 中国机械工程，2022，33(12)：1388-1417.
CHANG Keke，CHEN Leilei，ZHOU Ruonan，et al. Progresses of Surface Engineering in Extreme Environments and Its Common Scientific Problems[J]. China Mechanical Engineering，2022，33(12)：1388-1417.

[2] 常可可，王立平，薛群基. 极端工况下机械表面界面损伤与防护研究进展[J]. 中国机械工程，2020，31(2)：206-220.

CHANG Keke, WANG Liping, XUE Qunji. Progresses of Damage and Protection for Surfaces and Interfaces in Machinery under Extreme Operating Conditions[J]. China Mechanical Engineering, 2020, 31(2): 206-220.

[3] 尹浩，梁健，李宽，等. 万米科学钻探关键机具优化措施研究[J]. 钻探工程，2023，50(4)：16-24.
YIN Hao, LIANG Jian, LI Kuan, et al. Research on Optimization Measures of Key Instrument for Myriametric Scientific Drilling[J]. Drilling Engineering, 2023, 50(4): 16-24.

[4] 杨胶溪，胡星，王艳芳. TC轴承激光增材制造工艺及组织性能研究[J]. 材料工程，2016，44(7)：61-66.
YANG Jiaoxi, HU Xing, WANG Yanfang. Microstructure and Properties of Laser Additive Manufacturing TC Bearing[J]. Journal of Materials Engineering, 2016, 44(7): 61-66.

[5] LIU Qiancheng, CUI Mei, HE Qingkun, et al. Failure Analysis of Tungsten Carbide Bearing on Screw Drill[J]. Engineering Failure Analysis, 2018, 89: 37-45.

[6] 汪文斋，岳林，杨荡，等. 铜基焊料对浸渍烧结TC轴承中硬质合金性能的影响[J]. 硬质合金，2016，33(4)：230-237.
WANG Wenzhai, YUE Lin, YANG Dang, et al. Influence of Copper Based Solder on Properties of Cemented Carbide for Impregnated Sintered TC Bearing[J]. Cemented Carbide, 2016, 33(4): 230-237.

[7] 许爱荣，柳梅梅，薛佳男，等. 旋转导向工具多列块式滑动轴承载荷研究[J]. 石油机械，2022，50(12)：32-39.
XU Airong, LIU Meimei, XUE Jianan, et al. Load Characteristics of Multi-row Block Sliding Bearing for Rotary Steerable System[J]. China Petroleum Machinery, 2022, 50(12): 32-39.

[8] 沈彬，杨皓，薛哲婧，等. 钻压与推靠力对推靠式旋转导向轴承应力变化规律研究[J]. 测井技术，2024，48(5)：653-660.
SHEN Bin, YANG Hao, XUE Zhejing, et al. Investigation of Stress Variation in Push-the-bit Rotary Steering Bearings under Weight on Bit and Push Forces[J]. Well Logging Technology, 2024, 48(5): 653-660.

[9] 赵雯婕，张宇欣，谭松成，等. 基于SolidWorks的螺杆钻具PDC推力轴承失效仿真分析[J]. 钻探工程，2023，50(增刊1)：175-182.
ZHAO Wenjie, ZHANG Yuxin, TAN Songcheng, et al. Failure Simulation Analysis of PDC Thrust Bearing of Screw Drill Based on SolidWorks[J]. Drilling Engineering, 2023, 50(S1): 175-182.

[10] WANG Hongtao, WEBB T, BITLER J W. Study of Thermal Expansion and Thermal Conductivity of Cemented WC - Co Composite[J]. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, 2015, 49: 170-177.

[11] KAZYMYROVYCH V, KRYZHANIVSKYY V. Thermal Properties of Cemented Carbides Used for Metal Cutting[J]. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, 2023, 111: 106097.

[12] OKAMOTO S, NAKAZONO Y, OTSUKA K, et al. Mechanical Properties of WC/Co Cemented Carbide with Larger WC Grain Size[J]. Materials Characterization, 2005, 55(4/5): 281-287.

[13] CHO S, LEE J, SHIN S, et al. Enhancing High-temperature Properties of Stainless Steel Composite with Titanium Carbide Reinforcement: a Study on Coefficient of Thermal Expansion, Thermal Conductivity, and Strength[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2023, 25: 7241-7253.

[14] YI Shanjie, YIN Haiqing, ZHENG J, et al. The First-principles Study on the Mechanical and Electronic Properties about Rim Phase and Hard Phase of Ti(C, N) Based Cermets[J]. Computational Materials Science, 2013, 79: 417-423.

[15] LONG W M, ZHANG G X, ZHANG Q K. In Situ Synthesis of High Strength Ag Brazing Filler Metals during Induction Brazing Process[J]. Scripta Materialia, 2016, 110: 41-43.

[16] ANSUINI F J, BADIA F A. High Strength Microduplex Cu-NI-Zn Alloys[J]. Metallurgical Transactions, 1973, 4(1): 15-20.

[17] LOU Ming, CHANG Keke, XU Kai, et al. Achieving Exceptional Wear Resistance in Cemented Carbides Using B2 Intermetallic Binders[J]. Composites Part B: Engineering, 2023, 249: 110400.

[18] KLÜNSNER T, MARSONER S, EBNER R, et al. Effect of Microstructure on Fatigue Properties of WC-Co Hard Metals[J]. Procedia Engineering, 2010, 2(1): 2001-2010.

[19] 张开源，尹延国，张国涛，等. 高能球磨-粉末冶金法制备硫化亚铁/铁基轴承材料的摩擦学性能[J]. 中国机械工程，2019，30(18)：2172-2178.
ZHANG Kaiyuan, YIN Yanguo, ZHANG Guotao, et al. Tribological Properties of FeS/Iron-based Bearing Materials by High Energy Ball Milling-powder Metallurgy Method[J]. China Mechanical Engineering, 2019, 30(18): 2172-2178.

[20] LI Weiguo, KOU Haibo, ZHANG Xuyao, et al. Temperature-dependent Elastic Modulus Model for Metallic Bulk Materials[J]. Mechanics of Materials, 2019, 139: 103194.

[21] MILMAN Y V, CHUGUNOVA S, GONCHARUCK V, et al. Low and High Temperature Hardness of WC-6 wt%Co Alloys[J]. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, 1997, 15(1/3): 97-101.

[22] DENG Jianxin, ZHANG Hui, WU Ze, et al. Friction and Wear Behaviors of WC/Co Cemented Carbide Tool Materials with Different WC Grain Sizes at Temperatures up to 600℃[J]. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, 2012, 31: 196-204.

（编辑　张　洋）

作者简介：娄　明，男，1988年生，副研究员、硕士研究生导师。研究方向为钻探金属陶瓷复合材料。发表论文50余篇。E-mail: louming@nimte.ac.cn。**常可可***（通信作者），男，1986年生，研究员、博士研究生导师。研究方向为苛刻环境机械表面与界面。发表论文100余篇。E-mail: changkeke@nimte.ac.cn。

本文引用格式：

娄明，杨训旺，郝开元，等. 温度与载荷协同作用下深地钻具径向轴承的表面损伤行为[J]. 中国机械工程，2026，37(7)：1572-1579.

LOU Ming, YANG Xunwang, HAO Kaiyuan, et al. Surface Damage Behaviors of the Radial Bearings for Deep Drilling Tools under the Synergistic Effect of Temperature and Load[J]. China Mechanical Engineering, 2026, 37(7): 1572-1579.