几种机械零件的微动磨损失效分析

李光瑾[1]，夏志伟[2]，邓钦球[2]

（1.上海华碧检测技术有限公司，上海　200438；2.苏州华碧微科检测技术有限公司，江苏 苏州　215024）

摘　要：微动磨损对机械零件运行的可靠性有重要影响。高速柴油机连杆体-连杆盖、柴油机主轴承座-主轴承盖、大型压缩机连杆体-连杆盖以及大型挖掘机斗杆高压油管夹等零件往往会因微动磨损而失效。分析了这些零件的工况及其微动磨损的特征，提出了预防微动磨损失效的措施。

关键词：微动磨损；微振斑；工况

中图分类号：TG115.5+8　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1008-1690(2016)04-0047-05

Study on Failure of Several Mechanical Parts due to Fretting

LI Guangjin[1], XIA Zhiwei[2], DENG Qinqiu[2]

(1. Shanghai FALAB Test Technology Co., Ltd., Shanghai 200438, China;
2. Suzhou FALAB Test Technology Co., Ltd., Suzhou 215024, Jiangsu China)

Abstract: Fretting has significant influence on reliability of mechanical parts in service. Generally, connecting rod-rod cap assembly of high-speed diesel engine, main bearing seat -main bearing cap assembly of diesel engine, connecting rod-rod cap of large-scale compressor , and high-pressure tubing clip of large-scale excavator arm are incapable of performing their intended function due to fretting. The operating state and features of fretting of these parts were analyzed, and some measures avoiding their failure due to fretting were put forward.

Key words: fretting; fretting spot; operating state

机械装备的可靠性取决于五大因素：精心的设计、精准的材料与性能、精良的零部件加工、精致的装配与调试、精湛的操作与维护保养技艺。机械零件的多种类型失效发生在不同的运行工况条件下。其中因微动磨损带给机械零件可靠性的影响十分普遍。本文以高速柴油机连杆体-连杆盖、柴油机主轴承座-主轴承盖、大型压缩机连杆体-连杆盖、大型挖掘机斗杆高压油管夹的微动磨损失效为例，分析几种机械零件发生微动磨损的工况、微动磨损的特征，以及预防措施。

1　微动与微动磨损

任何一台机械装备都是由若干零部件以不同连接方式组装而成，为实现装备的功能，不同零部件之间存在着不同形式的相对运动。微动（Fretting）指的是两个接触表面发生极小幅度的相对运动，它通常存在于一个振动工况（如发动机运转、气体流动、热循环应力、疲劳载荷、电磁震动、传动等）下的“近似紧固”的机械配合件之中，一般位移幅度为微米量级[1]。有学者认为微动磨损和微动疲劳是微动的两种重要模式[2]，因微动而产生的磨损，即微动磨损（磨损痕迹也称微振斑）。这种振动不易被发现，但却是机械零件失效的重要潜伏因素。因此，更有学者将微动损伤喻为现代工业机械部件的癌症[3]。

微动损伤普遍存在于各种机械装备、交通运输车辆、输电装备、桥梁工程等领域的紧密配合的部位。例如：轴承类零件、各种螺栓、铆钉、销的连接和搭接处；各种紧固机构和夹持机构（如发动机连杆体-盖结合面、发动机主轴承盖-主轴承座接合面）；各种榫-槽配合以及花键配合面；各种绳索类构件（如电缆、钢丝绳、斜拉索紧固部位等，这类绳索在工况或在风力与自重作用下，在吊线夹附近内部导线发生微动疲劳损伤）；各种过盈配合（如轮轴类部件）；各种间隙配合；各种弹性支撑机构等，都易因微动而产生磨损。

收稿日期：2016-05-07

作者简介：李光瑾（1945-），男，教授级高级工程师，长期从事材料技术、工艺技术、失效分析以及机械装备可靠性技术工作。联系电话：13564564650

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

2 几种机械零件的微动磨损特征与工况

在多种机械装备的运行中，某些机械零件的失效，始于微动磨损，进而产生微振撞击，在相关零件的接触面上留下宏观微振斑，成为分析失效原因的重要特征。

2.1 高速柴油机连杆体-连杆盖

某发电机组的高速 V 型柴油机在大修理重新装配后，仅运行数十小时（转速 1 500 r/min），发生第六缸连杆盖脱落击穿曲轴箱壁事故。该型柴油机连杆体为斜切口结构，连杆体-连杆盖用上、下两只螺栓连接。

柴油机的连杆盖受到的最大拉载出现在进气冲程开始的上止点附近，其数值为活塞组件质量与部分连杆体质量的往复惯性力。连杆体与两只连杆螺栓形貌见图 1，其中上螺栓因拧紧力不足，在高速运转过程中逐渐松驰而退出直至脱落，螺纹上有自连杆体螺纹孔中拉下的金属碎屑。下螺栓因拧紧力高，在上螺栓退出的过程中以及其脱落后，仍单独带动连杆盖高速甩动，直至甩动圆轨迹超出连杆体-曲柄回转直径范围，螺栓呈现塑性弯曲变形并最终断裂，连杆盖直接砸穿曲轴箱壁。经检测螺栓的各项质量指标正常。

连杆装配时，连杆螺钉拧紧轴向力未达到规定的扭矩要求。在连杆体-盖接触平面上，本案失效的过程中，连杆体-盖接触平面上出现较大面积因微振撞击形成的微振斑，见图 2[4]。其中在图 2 右侧圆圈所示部位，因连杆盖在绕下螺栓甩动的过程中，与连杆体平面反复接触，产生了被挤压后的圆弧状塑性变形。



图 1 连杆总成及其连接螺栓形貌

Fig. 1 Assembled connecting rod and its jointing bolts

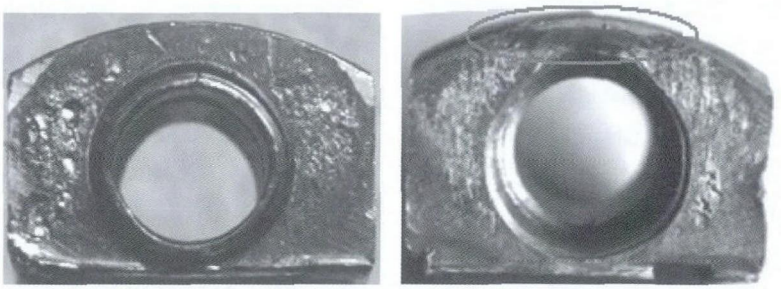


图 2 连杆体-连杆盖接合面上的微振斑

Fig. 2 Fretting spots on joint faces of the connecting rod body and connecting rod cap

2.2 高速柴油机曲轴箱主轴承座与轴承盖

某高速直列式柴油机，安装在专用船舶上，进行围海吹泥造地作业。该吸泥机构十分简陋粗糙：柴油机的功率输出端（飞轮）直接与吸泥机构的皮带轮轴连接，再经皮带轮带动大口径高压水泵，利用抽水管的高压水流，给予抽水管相通的吸泥管形成一定的低真空，源源不断地将水底的泥沙吸起并随水流喷出（原理与零件的喷砂相同，在此不予赘述）。现场调查发现柴油机飞轮与吸沙泵传动轴的连接为硬连接，4 只皮带盘的中孔与传动轴为松动配合，两者有多次焊接痕迹，同轴度极差。柴油机与吸泥机构传动轴的连接示意图见图 3。该机组运行一段时间后，柴油机曲轴在第七主轴颈位置断裂，曲轴断口为典型的旋转弯曲疲劳断口（图 4）。

吸泥机构在吸泥作业过程中，水下的吸口盲目在水下移动，水下的水草、沉积的杂物易堵塞吸泥口，水下的泥层厚薄和密度不均匀，均易导致吸泥过程“喘振”，使皮带轮轴强烈抖动。这种抖动传递至

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

发动机飞轮端，以发动机第七主轴承座为支点，对曲轴进行高速“摇曳”，致使第六主轴承座松动，并使曲轴第七主轴颈圆角处疲劳断裂；主轴承座（HT250材料）平面表层珠光体塑性变形。同时发现第七主轴承座平面有大量微振斑（图5）。对此曾有鉴定机构将微振斑误认为“硬物压入”痕迹。

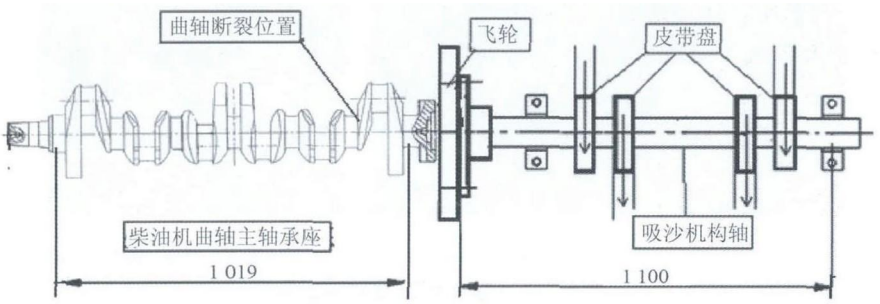


图3　柴油机与吸泥机构传动轴的连接的示意图

Fig. 3　Schematic of connecting a diesel engine to silt-sucking machine by a transmission shaft



图4　曲轴断口

Fig. 4　Fracture of the crankshaft

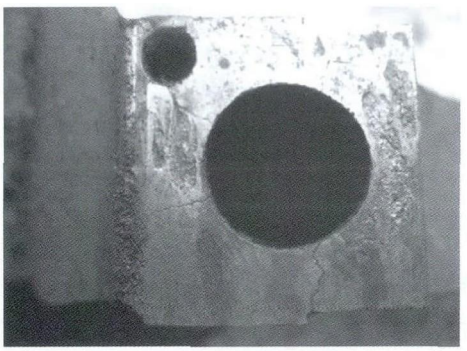


图5　主轴承座平面的微振斑

Fig. 5　Fretting spots on the main bearing seat plane

2.3　大型压缩机连杆体-连杆盖

某大型高压往复式氮氢气体压缩机（图6（a）），为对动对置七列七缸排列，为年产数万吨合成氨的关键设备。压缩机机体庞大，轮廓尺寸为6 044 mm×1 630 mm×1 570 mm；曲轴总长6 000 mm；缸径从第一级ϕ990 mm到第七级ϕ185 mm不等；驱动电机功率5 300 kW；活塞行程400 mm；转速333 r/min；单列活塞力50 t；压缩气体排出压力32 MPa。该压缩机在大修理后投入运行不久，发生第二级缸体破碎（图6（b））。

拆机检查发现该缸的连结连杆体-连杆盖的下螺栓脱落，而上螺栓螺纹段仍紧拧在连杆体上，连杆盖被上螺栓甩动，至连杆盖砸破厚壁机体，并使上螺栓的螺杆段已经断裂，断裂前螺杆已经弯折了一个α角。连杆体-连杆盖平面上分布较大面积微振斑（见图2），且图中的连杆体-盖上部均产生了被挤压后的圆弧状塑性变形。

经调查和检查，连杆体与连杆螺栓材料与性能正常。该型压缩机为确保连杆安全可靠地传递交变载荷，连杆螺栓必须有足够的预紧力，其预紧力的大小，需用专用液压紧固工具的压力来保证[5]，拧紧状态螺栓伸长量应达到0.986 ±0.05 mm。而该压缩机大修后安装，螺栓的拧紧仅凭人工力量，未能保证连杆螺栓的预紧效果，致使运行中因连杆盖-连杆盖平面间的微幅振动，最终引发压缩机破损事故。

2.4　挖掘机斗杆高压油管夹

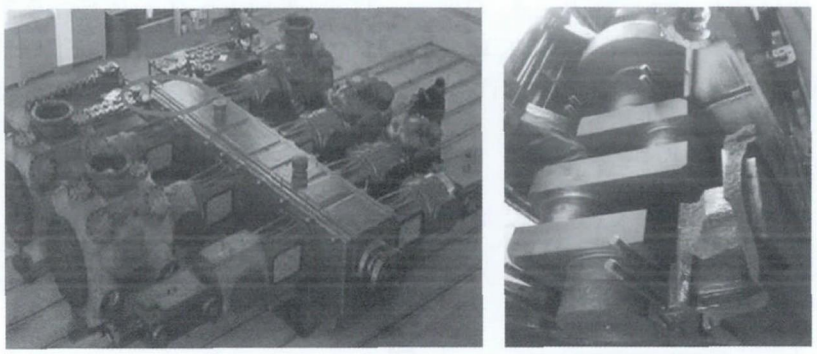
某挖掘机的斗杆油缸输油管（图7），在施工作业约1 820 h时发生破裂，液压油外泄而停机。经检查，确认系液压油管夹松动所致。

夹板在夹持油管时，油管外圆未与夹板圆弧妥帖吻合，在拧紧夹板螺栓时，存在虚假拧紧现象。在挖掘机作业过程中，油管内液压油压力的波动以及斗杆的振动，致使油管夹持部位与夹板发生微幅振动，在夹板内圆弧面上留下逐渐严重的微振斑（图8）。被夹板约束的液压油管，同时被磨损并出现微裂纹致使液压油泄漏。

3　预防措施

微幅振动现象在产生的初期，由于接触表面没有宏观的相对运动，无论是机械产品装配、运行，以及随后的维修中，不易被察觉。在日常的失效分析

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net



(a)卧式压缩机(圈出位置被击穿)　　(b)第二级缸体破碎形貌

图6　卧式压缩机及其破损部位

Fig. 6　Damaged horizontal compressor: (a) ringed location; (b) 2nd cylinder

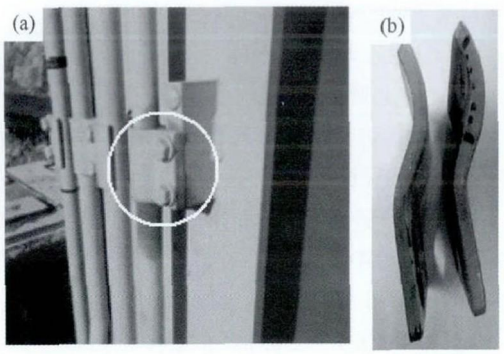


图7　大型挖掘机斗杆高压油管安装位置(a)和夹板(b)

Fig. 7　Locations of (a) the high-pressure tubing and (b) clipping plates inf the large-scale excavator arm

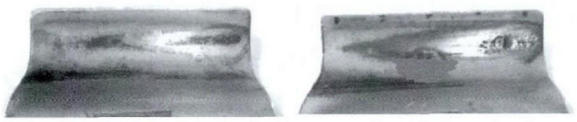


图8　油管夹板内圆弧面上的微振斑

Fig. 8　Fretting spots on the high-pressure tube clipping plates of the Large-scale excavator arm

中,常常只关注零部件材料的组织与性能,以及对显而易见的损伤的检测,忽视了将零件间配合面的微动磨损作为一个重要因素加以考虑。

上述列举的几例微动磨损失效案例,归结于两大原因:其一,螺栓拧紧不当;其二,连接构成的长轴系的同轴度不良。微动磨损涉及的影响因素复杂,本文仅就对螺纹拧紧方法对微动磨损的预防进行讨论。

在机械装备的装配中,各种螺栓、螺柱的拧紧,使用最广泛的方法是扭矩法,扭矩法是利用扭矩值与预紧力的线性关系进行控制的方法,初始预紧力的最大值与最小值之比,被称为紧固因数($Q = F_{max}/F_{min}$),用以表示初始预紧力的离散度[6]。用扭矩法拧紧时,只对紧固扭矩进行控制,操作简便。但是由于紧固扭矩的90%左右被螺纹和支撑面摩擦扭矩所消耗,初始预紧力的离散度随着拧紧时摩擦消耗等因素的控制程度而变化,因而离散度较大。三种典型的螺纹拧紧方法对紧固因数的影响见表1。该方法以可靠性设计为前提,严格按照拧紧力矩的要求操作,一般都能满足机械装备安装的可靠性要求。但对于长期处于振动工况的机械装备,扭矩法的潜在不足就很明显。

表1　典型的螺栓拧紧方法

Table 1　Typical methods for tightening bolt

方法	指标	区域	紧固因数 Q(参考)
扭矩法	力矩值	弹性区	1.4～3
转角法	回转角度	弹性区	1.5～3
		塑性区	1.2
扭矩斜率法	对应于回转角紧固扭矩斜率	弹性极限	1.2

4　结束语

微动磨损涉及的影响因素复杂,本文涉及的案例主要与螺纹拧紧方法对微动磨损的影响有关。

各种机械装备零部件通过不同的连接方式组装而成,连接件之间的微幅振动产生微动磨损,导致微振斑的出现。随着振幅的加大,微振斑变成宏观斑痕,成为日常鉴别微动磨损的直接证据。为了较好的减轻零部件连接面之间发生的微幅振动,拟做好几方面工作:

(1)机械装备上凡相互配对的零部件,应通过试验选择合适的材料与性能的匹配。

(2)确保零部件配对接触平面的加工精度,使平面接触均匀平稳。

(3)注重对机械装备失效情况的统计分析,结合具体装备的结构特点,进行零部件紧固件拧紧方

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

法的试验研究，制订适合具体装备紧固件的拧紧工艺。在振动的工况下，装备装配拧紧最好采用转角法或扭矩斜率法，获得较小的紧固因数，使紧固接触面预紧力大小适合，拧紧可靠。

参考文献

[1] 周仲荣，Léo Vincent. 微振磨损[M]. 北京：科学出版社，2002.

[2] 于　群，齐富民，闻天苑. 最新轴承设计与技术规范、故障诊断实务全书[M]. 北京：当代中国音像出版社，2005.

[3] 王泽爱. 油脂润滑对钢材料微动磨损的影响及其作用机理研究[D]. 成都：西南交通大学，2009：1.

[4] 李光瑾，胡金寿，徐金福. 微动磨损对柴油机可靠性的影响[J]. 柴油机设计与制造，2008(3)：36-38.

[5] 夏雨鑫，齐荣琴. 7M50 系列压缩机结构特点[J]. 压缩机技术，2013(2)：30-32.

[6] GB/T 16823.2-1997 螺纹紧固件紧固通则[S].

[知识园地]

不锈钢的种类和特点

在弱腐蚀性介质中(如大气)能抵抗腐蚀的钢，称为不锈钢。而在各种强腐蚀介质中能抵抗腐蚀的钢，称为耐酸钢。通常将以上两种统称为不锈钢。

按正火后钢的组织组成物来划分，可分为马氏体型不锈钢、铁素体型不锈钢、奥氏体型不锈钢和过渡型不锈钢(半奥氏体型不锈钢)即兼有奥氏体和马氏体不锈钢的优点。现将各种不锈钢及其特点分述如下。

(1)马氏体型不锈钢

钢中含 Cr 量为 12%～19%，含 C 量为 0.10%～0.45%，个别含 C 量达 1.00%。如：2Cr13、3Cr13、4Cr13、9Cr18 等。它们的主要特点是除含较高的 Cr 外，与铁素体型不锈钢相比，还含有较高的 C，所以它具有较高的强度、硬度和耐磨性。主要用来制作力学性能要求较高、腐蚀性能要求一般的工件。

(2)铁素体型不锈钢

钢中含 Cr 量为 12%～30% 和小于 0.20% 的 C，如：1Cr17、1Cr25、1Cr28、0Cr17Ti、1Cr25Ti 等。它们的特点是含 Cr 量高，而含 C 量低。它能抗大气、抗硝盐及盐水腐蚀；高温(低于 700 ℃以下)抗氧化能力强；塑性和热加工工艺性均好；并具有较好的切削加工性能，对热疲劳不敏感，可制作高温下工作的工件。铁素体不锈钢通常是在退火状态下使用，其退火温度不能超过 900 ℃，以免晶粒长大变脆和降低耐蚀性。

(3)奥氏体型不锈钢

钢中含 Cr 量为 12%～25%，含 Ni 量为 1%～29%，有的还含有 Mn 和 N(用它们代替 Ni)。如：1Cr18Ni9、1Cr18Ni9Ti 等。钢中含 Cr 量为 18%，含 Ni 量为 8% 左右的奥氏体不锈钢通常称为“18-8”型不锈钢。这类钢具有良好的韧性、塑性、焊接性及抗腐蚀性能，广泛应用于各种要求不锈、耐酸的设备中。它的缺点是含贵重元素 Ni 较多，同时在含 S 的气氛中容易损坏，切削性能较差。

(4)过渡型不锈钢

过渡型不锈钢又叫半奥氏体型不锈钢或沉淀硬化不锈钢。这类钢兼有奥氏体和马氏体不锈钢的优点，即有较高的强度和良好的工艺性，有具有良好的耐腐蚀性能，工业常用的过渡型不锈钢有 17-7PH(0Cr17Ni7Al)、17-4PH(0Cr17Ni4Cu4Nb)、Cr12Mn5Ni4Mo3Al(69111)等。这类钢由于含镍量较低，经热处理可形成不稳定的奥氏体甚至马氏体，再经过时效处理，便可沉淀析出金属间化合物(例如 Ni_3Al)使金属强化。强化后的抗拉强度可达 1 250～1 600 MN/m^2。这类钢主要用作高强度、高硬度而又耐蚀的化工机械设备及零件。17-7PH 钢的冷加工和热处理过程比较复杂，主要有下列几种情况：固溶处理、调质处理、冷处理、冷变形及沉淀硬化处理。以 17-7PH(0Cr17Ni4Cu4Nb)为例：在 620 ℃下进行双时效硬化处理，步骤如下：在 1 040±14℃固溶退火处理，随后空冷或在适宜的液体中冷却至 32 ℃以下；在 620±14 ℃进行第一次硬化，并在此温度下保温至少 4 h，随后空冷或在适宜的液体中冷却淬火至 32 ℃以下；温度在 620±14 ℃进行第二次硬化，并在此温度下保温至少 4 h，随后空冷或在适宜的液体中冷却淬火至 32 ℃以下。

·薄鑫涛·

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net