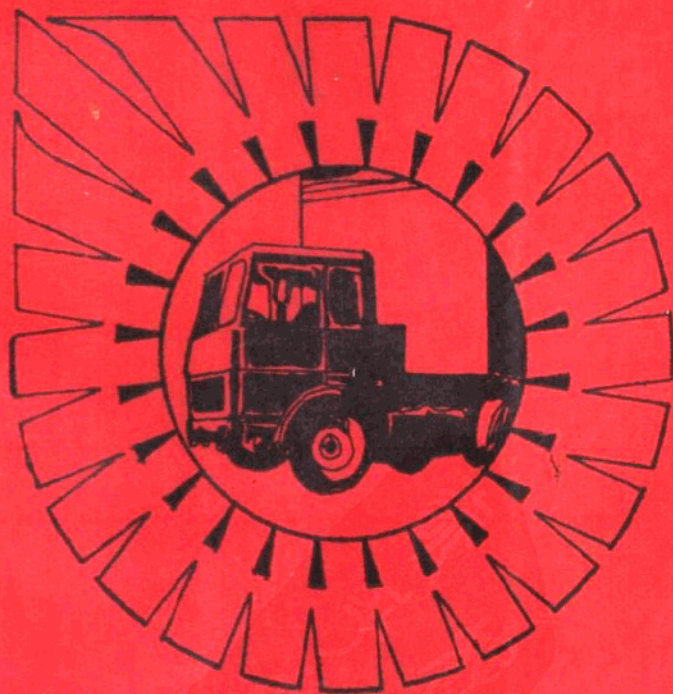


提高汽车零件 的耐磨性

〔苏〕 M.Φ. 拉符里诺维奇 著
M.M. 舒斯捷尔尼亚克



机械工业出版社

译 者 的 话

众所周知，汽车发生故障的主要原因之一是某些零件的摩擦表面过早磨损，因此，提高汽车易损零件的耐磨性是延长汽车使用寿命的根本措施之一。

本书阐述了强化汽车易损零件的先进工艺方法，如激光和电子束热处理、喷涂耐磨层、采用新型减摩自润滑材料等，内容新颖，实用性强，是一本很好的生产及科研用书。

本书由谭玉芳、谭奈林同志翻译，柏庆荣同志校订。书中如有错误和不妥之处，敬请读者指正。

前 言

汽车工业在苏联机器制造业中占有很重要的地位，实际上整个国民经济的发展都与汽车工业有关。现在汽车制造业除了重视减少燃油和润滑油的单位消耗和减轻汽车的质量外，注意力大部分都放在进一步提高汽车使用的耐久性、可靠性和质量方面。在第十一个五年计划中，预计汽车的寿命延长15%，而技术维护和日常修理的劳动量则要降低10%。

为了提高MA3系列汽车的使用寿命，明斯克汽车制造厂的设计部门和工艺部门做了很多工作。如MA3-5335型汽车大修前的行驶里程达32万km。在MA3-6422系列汽车的生产中所采用的设计方案和工艺方法，可以保证汽车大修前行驶40万km。

货运汽车的使用经验表明，汽车在使用8~9年后，工作能力会降低一半。从有效地利用国家的劳动资源的观点来说，提高汽车的耐久性和可靠性是一个迫切的问题。现在，为排除货运汽车的许多故障消耗了大量的劳动量，目前的情况是，一个修理工人的工作能力只能维护1~2辆公共汽车或2~4辆载重汽车。随着汽车的单位功率和汽车的复杂程度的提高（特别是БелАЗ大型载重自卸汽车、КамАЗ系列汽车），提出了对汽车文明使用的要求和对维护人员的技能要求。

汽车的可靠性在很大程度上决定了它的使用效率。根据苏联汽车运输部的数据，如果货运汽车的可靠性和耐久性良好，运输量就可增加28%，它直接或间接地决定着约40%~

45%的运输成本。

货运汽车的大修每年要耗费18亿卢布和1500t金属材料。在修理生产线上工作着45万人。除此以外，修理过的汽车的使用寿命不会高于新汽车寿命的40%，而修理汽车的成本为新车成本的90%。

以典型的ЗИЛ-130型汽车为例，整个汽车使用期的劳动消耗量为：用于制造—2%，用于技术维护—35%，用于日常修理—54%，用于大修—9%。对于苏联生产的其它货运汽车，总的劳动消耗量的结构与上述类似。如МАЗ-5335系列的汽车，在整个汽车使用期内，用户的总的使用费用比汽车的制造成本高9.2倍。这样就必须有大量的修理厂、修理间和庞大的修理工人队伍。

汽车运输工作的效率取决于生产环节中的所有参加者：汽车制造厂、汽车运输企业、公路企业组织和管理部門等。苏联和国外的经验表明，在汽车上约有2/3的故障是由于结构上和生产工艺上的缺陷所引起的，而1/3是由于违犯操作规程而引起的。

现有的经济指标在很大程度上偏重于引导汽车制造者去改善制造本身的经济核算指标（由于采用便宜的代用材料而降低生产成本），而不太重视在汽车运输企业中提高汽车的使用效率问题。现在采用的设计方案和工艺方法并不能完全防止汽车过早损坏。

现在，为了保证汽车使用良好，汽车厂还要生产汽车备件。但是，增加备件的数量——为满足更换损坏的零件和部件的需要，而额外地花费了成千吨金属、大量的电能，还付出了几百万卢布的费用。

为了提高汽车的使用效率，在各总成大修前，汽车尽量少受外部影响。对主要零件不应拆卸、更换和修理。

对载重汽车使用试验结果的分析表明，汽车发生故障的主要原因是某些零件的摩擦表面过早磨损。因此，提高货运汽车耐久性的任务就归结为 提高各个易磨损零件的耐磨性能。

在机器制造业中，有各种各样的提高耐磨性的有效方法。近年来，得到广泛推广的方法有：激光热强化、化学热处理、喷涂耐磨层、采用新型的减摩自润滑材料等。

本书阐述了强化载重汽车易磨损零件的先进工艺方法的应用。

目 录

译者的话

前 言

第一章 汽车底盘零件的工作条件及其损坏的原因 1

第一节 载重汽车使用故障的特征 1

第二节 汽车零件的摩擦与磨损特点 1

第三节 提高汽车零件耐磨性的理论基础 6

第四节 万向传动装置的工作条件和损坏原因 8

第五节 驱动桥的工作条件和损坏原因 11

第六节 悬架和牵引挂接装置零件的磨损特征 15

第七节 前轴和转向系的工作条件和损坏原因 20

第二章 提高汽车零件耐磨性的方法 29

第一节 强化方法的分类 29

第二节 用激光和电子束热强化汽车零件表面 33

第三节 用硬质耐磨材料强化零件表面 39

第四节 摩擦副中新材料的应用 55

第五节 选择合理的强化汽车零件的方法 59

第三章 提高汽车易磨损零件的耐磨性 66

第一节 提高万向传动装置中十字轴和花键连接件的
耐久性 66

第二节 提高驱动桥易磨损零件的耐磨性 74

第三节 用工艺方法强化汽车悬架和牵引挂接装置的
零件 79

第四节 提高汽车前轴的铰链连接和接销连接的耐久性 91

结束语 101

参考文献 104

第一章 汽车底盘零件的工作条件 及其损坏的原因

第一节 载重汽车使用故障的特征

在多数情况下，汽车由于一个或几个零件发生故障而失去工作能力。汽车在大修前的使用过程中，约有三分之一的故障发生在动力部分和它的各个系统(供油系、离合器和变速器)中。由于这些系统的故障，常常使汽车停在运输途中。根据统计数字，发生在动力部分的故障实际上不会导致事故，可是转向系的为数不多的故障却是引起14%汽车事故的原因。货运汽车损坏的原因是机械零件发生故障，这些零件在汽车零件总数中只占一小部分。然而这少数换件的费用却占总换件费用的90%以上。MA3系列汽车零件故障的特征表明，零件工作表面的磨损是单个部件损坏的主要原因，也是汽车整机损坏的原因。

汽车零件的故障形式列于表1中。

因此，提高货运汽车耐久性的总任务通常就是提高那些为数不多的易损件的耐磨性，因为就是这些易损件降低了单个总成和汽车整体的可靠性。

第二节 汽车零件的摩擦与磨损特点

根据外界作用、周围介质和易损件摩擦表面的性质，全苏国家标准ГОСТ23.002—78把磨损分成各种类型。在现有的文献中，对这些类型的磨损作了足够详细的分析。汽车的摩擦部件在使用中有许多特点，如果不考虑这些特点，就很

难选定最佳的可提高其耐磨性的设计和制造方案。这些特点是：部件的工况不稳定、位移的可逆性、振动和周围介质的作用。

表1 汽车各部件的故障模式^①

故障特征	故障数 (%)									
	发动机	离合器	变速器	万向传动	后桥	前轴悬架	转向系	制动系	电器	驾驶室、车箱
磨损	47.2	83.9	65.3	97.6	72.9	58.2	79.3	49.8	6.2	46.8
烧坏	18.8	—	—	—	—	—	—	—	48.2	—
积炭	13.5	—	—	—	—	—	—	—	—	—
断裂	2.6	4.0	—	2.4	—	34.5	2.6	9.0	13.1	48.2
失去弹性	2.8	—	—	—	—	1.3	—	1.7	—	1.5
裂纹	4.2	1.0	9.3	—	2.4	1.6	—	2.1	—	—
剥落	1.7	—	21.3	—	22.4	—	—	—	—	—
拉长、拉断	9.1	11.0	—	—	—	—	9.1	35.3	—	—
扭弯	—	1.0	—	—	—	—	6.5	—	—	—
腐蚀	0.1	—	—	—	—	—	—	2.1	2.8	3.5
切断、压损	—	—	4.1	—	2.3	4.4	2.5	—	—	—
绝缘损坏	—	—	—	—	—	—	—	—	17.4	—
活性物质剥落	—	—	—	—	—	—	—	—	12.3	—

① 参阅 Трикозюк В.А.: Повышение Надежности автомобиля, 1980.

汽车在城市中运行时，不稳定工况为95%~98%，在乡间道路上运行时为50%~81%，在公路干线上运行时为14%~37%。不稳定的工况引起的动载荷增加了零件表层的弹性变形。增加的弹性变形导致金属组织不断改变方向，产生附加的金相缺陷和其它的变化。金属表层正反剪切变形的特性及其引起加速形成的金相缺陷以及在不稳定工况下摩擦材料

发生的疲劳过程，会使汽车零件磨损程度比稳定工况时的磨损程度大一倍。

摩擦部件的位移可逆性，使剪切产生特殊的量变化和方向变化以及产生特殊的内应力变化，在摩擦区温度升高并重新形成断裂层。所有这些变化都促使金属组织的缺陷增大，在可逆的摩擦表面上增加表面自由能、并加速电物理和化学变化过程。

振动对汽车零件的磨损强度有极大的影响，因为它会使变形过程发生质的变化。在振动时，切向力和法向力的分量发生变化，致使变形扩展到金属内部。根据变形值的大小，在接触区域可观察到低周疲劳或高周疲劳过程以及粘着过程等。在摩擦时，周期载荷的作用导致金属表层的本来结构发生极值变化，从而加速接触表面的氧化过程。在这种载荷条件下所形成的氧化层厚度，比无振动摩擦时所形成的厚度高许多倍。与此同时，振动使氧化层急剧破坏，从而导致摩擦面粘着。碎裂的氧化层就象磨料，使局部应力增大，从而导致变形和磨损加剧。在振动频率低于20Hz的情况下，磨损强度最大，而当振动频率不断增高时磨损减少。

在振动冲击载荷的条件下，加速零件磨损的主要原因可以认为是加快了疲劳过程。在工作区域由此产生的多次变形就形成和发展微观的疲劳裂纹。裂纹源可能发生在材料的表层，也可能发生在材料的内部（平行于摩擦面）。微观裂纹常常发生在材料的物理机械性质不同结构组成的交界处。可逆作用和振动作用的综合导致摩擦副的磨损急剧增加。当具有可逆摩擦和频率为15~18Hz的振动时，铸铁件表面磨损会增加十几倍。

摩擦表面的磨粒磨损对汽车零件、特别是底盘部件的磨损强度有很大的影响。磨料对摩擦表面磨损的影响程度取决

于空气中的灰尘含量。影响灰尘含量的因素有：路面覆盖层类型和路面的状态、风向和风速、空气的温度和湿度、汽车在道路上的运行情况等等。

汽车在道路上运行时，视上述因素的相互关系，空气中的含尘量可以在 $1 \sim 2000 \text{ mg/m}^3$ 范围内变化。在中亚细亚的沙漠地区，当遇到风暴天气时，灰尘含量可达 17000 mg/m^3 。灰尘中的矿物质成分以及与汽车零件接触处的磨粒尺寸是影响零件磨损很重要的因素。分析道路灰尘颗粒尺寸的结果表明，随着颗粒离地表的距离不同，其尺寸也有变化，如距地表 65 cm 处，76% 的颗粒尺寸为 $5 \sim 50 \mu\text{m}$ 。而这些颗粒的矿物质成分是：50%~60% 为二氧化硅，40%~45% 为氧化铝、钙、铁和其它元素。因此，道路灰尘的主要成分是石英颗粒，其尺寸为 $10 \sim 60 \mu\text{m}$ 。必须注意到，随着颗粒尺寸的减小，在所有灰尘中的石英的含量也减少，这是因为石英硬度比灰尘中其它矿物质的硬度要大得多。在有关磨粒磨损的文献中，科学工作者错误地把矿物质颗粒当成含有氧化硅和氧化铝的化学物质去理解，并与石英和刚玉混为一谈。石英和刚玉都具有很高的硬度，并有相应氧化物同样的化学式。实际上，氧化硅和氧化铝存在于各种矿物质中，其硬度比石英和刚玉的硬度小得多。例如，从汽车的机罩和驾驶室表面收集的道路灰尘具有很弱的磨粒性能，而常用于台架试验的人工石英砂废弃物的磨粒性能却强得多。人工石英砂（含石英 98%）和自然的道路灰尘的磨粒尺寸相应为 70 和 $55 \mu\text{m}$ 时，它们的磨粒磨损性能达最大值。由颗粒尺寸小于 $4 \mu\text{m}$ 的灰尘而引起的磨损，实际上是没有的，这是因为颗粒尺寸小于摩擦面间的油膜厚度，颗粒起不到摩擦作用。当颗粒尺寸增大到一定值时，就会增大磨料的磨削能力，当石英砂颗粒尺寸大于 $80 \mu\text{m}$ 和道路灰尘的颗粒尺寸大于 $60 \mu\text{m}$ 时，表现出较

小的磨料能力。看来,可以认为大颗粒落入摩擦表面间隙中的可能性很小,破碎颗粒的应力因其尺寸增大也增大了。

因为空气中的含尘量大和密封件的质量差,汽车摩擦部件中的润滑油就会被磨粒弄脏,润滑油中的磨粒量一般是和汽车的行驶里程成正比的。当行车6000~8000km以后,分析传动系的润滑油中的灰尘成分,其结果表明,在50%~60%的传动系中,道路的灰尘颗粒总量占润滑油质量的0.58%。毫无疑问,这就要求经常更换润滑油。为了保证底盘各部件的正常工作性能,在传动系中润滑油更换时的磨粒浓度不应大于0.1%。但实际情况是,汽车和拖拉机在同样的工作条件下,润滑油的含尘浓度都大于允许值。例如,中耕用的拖拉机工作1050h后,在变速器的油槽中含有0.31%的土尘。行走机构、悬架和转向机构等一些防护较差的部件的处境就更差。例如,MT3-50型和T-40型拖拉机工作5300h后,在凸轮轴套和转向节的黄油中,不能燃烧的机械杂质量达12.3%。在这种情况下,颗粒组份的分布是:小于 $30\mu\text{m}$ 的占40%, $40\sim 60\mu\text{m}$ 的占40%, $60\sim 100\mu\text{m}$ 的占20%。

磨粒磨损还可能因摩擦表面在氧化、机械腐蚀或疲劳过程中产生的物质而引起。在这种情况下,起磨粒作用的是原始金属、它们的氧化物、剥落的次生组织的颗粒以及脱落的表层覆盖物磨屑等等。这些颗粒的尺寸范围为 $0.01\sim 100\mu\text{m}$ 。这些磨损产物的硬度取决于它们的化学成分和形成条件。 FeO 型的氧化亚铁的硬度为5500MPa, Fe_3O_4 —6400MPa, Fe_2O_3 —11000MPa, 而 SiO_2 的硬度为10500~11300MPa。由于强烈的塑性变形,在接触区形成的磨屑和金属颗粒,其硬度比摩擦表面的原始硬度高得多。很显然,这样的颗粒会导致磨损强度增大。

运输机械部件的摩擦和磨损的显著特点是零件外部使用

条件的多样性。这是由于汽车的载荷和速度变化、年工作时间不同以及处于各种气候地区所形成的。在冬季，发动机、传动系和行驶系的零件的承载能力要降低。这是因为汽车的平均运行速度降低了20km/h，轮胎与雪覆路面的附着系数减小了。在汽车零件表面引起电化学反应的根本原因（特别是在存放期间）是大气的的作用。为此，就要提高零件的耐腐蚀性能。

那些对各部件、各系统和汽车整体的可靠性和耐久性起限制作用的零件，其耐磨性的提高可以从设计、制造或使用方面的措施加以保证。从中选用哪种方法时通常考虑的因素有：设计或制造部门的能力、企业中的设备和厂房条件、各地区的习惯、设计和工艺研究人员的主动性以及汽车技术维护规则等。

也常遇到这样的情况，用先进的工艺方法去修正设计师粗糙的设计。除此以外，现行的经济指标体系在更大程度上为汽车制造者们指出减少劳动用量和降低制造成本的方向，但忽视提高汽车的耐久性。这就使得旨在保证所必需的汽车耐久性而去选择合适的解决方法的问题复杂化，但也不得不使人去考虑解决提高易损件耐磨性的综合方法。

第三节 提高汽车零件耐磨性的理论基础

零件的耐磨性取决于它的使用工况、零件表面宏观的和微观的几何参数、零件表层的化学成分和组织结构、物理机械性质和摩擦疲劳性质，这些因素具有不可分割的相互关系。汽车（部件）的工况影响零件的几何参数、零件表层的化学成分、组织结构和物理机械性质。不稳定的工况、摩擦可逆性和振动使零件表面的不平度受到挤压，原始凹凸纹产生变形，接触面增大，这些在机器磨合时都会表现出来。外

界的作用使相组织发生变化、使零件表面发生磨粒磨损、使润滑油分解形成次生组织、重新组成位错的晶体结构等等。此外，还可看到物理机械性质的变化，产生表面硬化，非均质变形，还可能出现列宾杰尔效应。从零件本身看，其几何参数、化学成分、表面组织结构等又会引起摩擦表面粘着和擦伤以及引起对部件的工况有影响的其它变化。材料的物理机械性质也对零件表面的几何参数起一定的影响作用。

在零件的表面上对耐磨性起影响的宏观和微观的几何参数包括形状特征、零件设计尺寸的宏观偏差以及按照苏联国家标准规定的表面粗糙度和波纹度。零件表面的化学成分和组织结构在这里则以晶格的相组织、晶格型式及其缺陷、晶粒尺寸和其它指标来表征。零件表面的物理机械性质和摩擦疲劳特性可理解为微观和宏观的硬度、强度极限、屈服点、弹性模量、泊松系数、摩擦系数以及粘着特性和摩擦疲劳特性。对于每一种具体材料，上述这些特性都可在试验中取得。

易损零件和部件的使用工况取决于载荷、周围介质的作用和维护条件，后者本身又取决于所施载荷和速度的大小以及它们持续的时间、摩擦系统的设计形式、运动的可逆性、振动、润滑、灰尘污染度、技术维护周期和维护质量等等（图1）。

图1中的虚线、实线和虚实线表示相应的设计、制造和使用措施对耐磨性的可能作用的范围。为了选择提高易损件耐久性的最佳方法，就需建立图1中所示参数之间的关系，这是工作的第一步，然后再对它们作出数量上的估算，并与汽车的行驶里程联系起来；为了提高某个零件的耐磨性，根据可能，还要估计出各种特征数的变化范围。提高耐磨性的优化设计方法和工艺方法应是：保证在汽车报废前用于生产

保证有最低的动载荷、较高的效率和具有一定的耐久性和可靠性。

万向传动装置在使用中特有的故障模式是轴销表面损坏、十字轴端面磨损、轴销断裂、万向传动装置中的直线伸缩接头擦伤或卡住以及轴的平衡性破坏等。轴的平衡破坏会引起振动，进而使变速器的轴承、前后桥和中间支承的轴承受到破坏。

传动机构的主要元件是万向节，它由十字轴及其轴承、密封件和紧固件组成。MA3系列汽车的万向传动装置，其67%~91%的故障就发生在这里。

在分析这一系统损坏的原因时，可以把它的故障分为突发性的和渐进性的。

十字轴销损坏（断裂）即属于突发性的故障，林业用的汽车就常常出现这种故障。当汽车在稳定的工况下运行时传动轴的载荷、在驱动轮打滑时传动系高频扭转振动载荷和自振所施加的载荷都积聚在轴销上，足以造成微观疲劳破坏。

外力作用引起的扭转扰动、传动轴的不平衡、齿轮的参数波动以及由于轴的倾斜而引起的传动轴旋转的不均匀度等，都是引起传动轴高频振动的原因。

在汽车起步、换档以及路面不平的情况下，就会产生载荷的低频振动。十字轴销断裂这一突发性故障是由于严重超载所引起的，这种现象常常在出现极大的扭矩和活节处于最大的折断角时产生。一般情况下，突发性故障产生的原因可以认为是错误选用了十字轴的规格尺寸、外形和材料（设计中的错误），不正确地选用机械加工和强化加工的手段和方法（工艺上的错误），违犯了制造工艺、检验和使用规程（制造和使用中的错误）。

十字轴销的渐进性故障有：工作表面“虚”硬化、磨粒

磨损和疲劳剥落。

“虚”硬化——这是在十字轴销上与轴承滚动体接触部位出现的沟槽。当滚针相对于十字轴销的工作表面和轴承套的轴线发生位移时，沿滚针长度上作用的载荷不均匀分布，从而产生“虚”硬化。在万向节叉的刚度不足，十字轴销的硬度太低，润滑油的数量不足、质量不好、密封不好以及违反装配件的技术维护规程等情况下常会产生“虚”硬化。

当汽车在多尘土的道路上，特别是在密封件损坏的情况下行驶，十字轴销表面和端面以及轴承套和滚针表面会因在连接处掉入尘土、脏物和水分而产生磨粒磨损。这时，可能发生万向节楔住（因为润滑油漏干了）、万向节叉损坏、花键伸缩轴磨伤和卡住等故障（图2）。

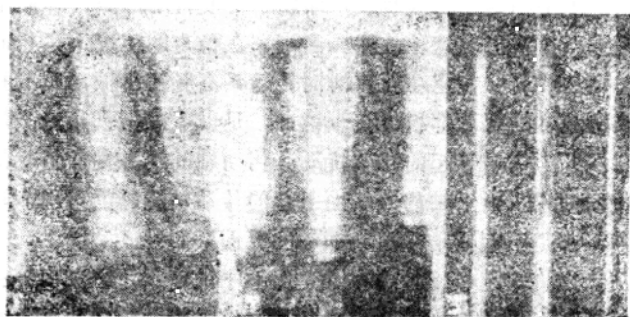


图2 万向传动装置磨损件外形

- a) 当滚针轴承用皮碗密封时十字轴销的“虚”硬化和磨损区 b) 十字轴销的疲劳剥落区 c) 传动轴端部花键的粘着破坏区

十字轴销工作表面的疲劳剥落或“麻点”，是在极大的接触应力时产生的，此力可达4000MPa，它是由在滚针上及其长度方向不均匀分布的重载荷而引起的。疲劳剥落的原因是零件表面形成微观疲劳裂缝，这些裂缝逐渐扩大，导致

金属剥落。“麻点”表现为在零件表面上出现的凹坑和痘痕，它碍于部件继续正常工作（见图2a）。

万向节损坏报废的特征是：配合间隙增大、万向传动装置中发生撞击、零件过热的油等。

万向传动装置的花键配合损坏的主要形式是花键接触部位磨损和挤坏以及花键扭曲。花键摩擦表面的磨损常常表现为轴与轴套接合处磨损。其产生的原因是由于交变冲击载荷和摩擦表面相对位移的综合作用，这种相对位移是由于花键接合零件的歪斜和不同心、花键各单元面在空间位置的误差和在径向力的作用下轴与轴套的轴心发生了偏移而引起的。

汽车一些部件的花键接合的磨损也可能是因为摩擦耗蚀造成的。当接触面上发生高频的微观位移时，花键接头即磨损。当压力很大、润滑油不足或无润滑油、单质材料摩擦和花键接合表面的硬度低时，在摩擦面上就会产生粘着或擦伤（见图2b）。

花键接合件的磨损机理可以理解为：因交变的冲击载荷的作用，在花键工作面个别的接触区域的压力达到极限值。此时润滑油被挤出，或者造成不好的润滑条件，零件表面（无氧化层）暴露出来，最后产生粘着现象。由于施加载荷的可逆性质和各种频率的振动所引起的相对位移，使形成的金属键受到破坏，金属颗粒分离，又组成新的金属键。由硬化和氧化的金属颗粒所组成的磨损产物以及落入接合件的磨料，使花键接合的摩擦表面加速损坏。

第五节 驱动桥的工作条件和损坏原因

汽车驱动桥是用来变换发动机的扭矩，并将扭矩传递给车轮的。载重汽车的后桥（驱动桥）的最显著的故障是：油封过早损坏、主动齿轮和被动齿轮的工作面损坏、齿轮传动