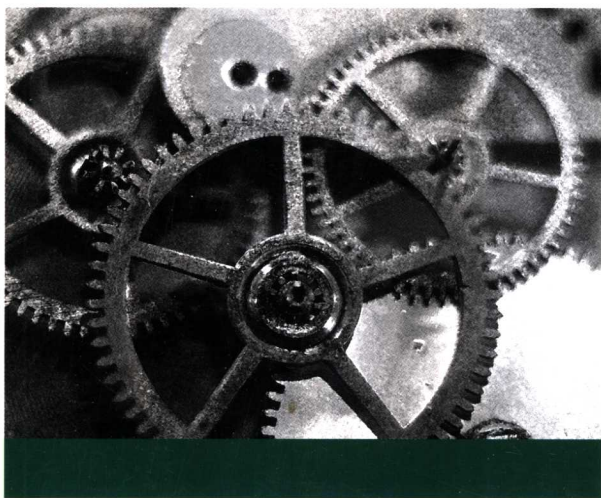


刘维民 夏延秋 付兴国 编著

齿轮传动润滑材料



Chemical Industry Press

41



化学工业出版社

齿轮传动润滑材料

刘维民 夏延秋 付兴国 编著



化学工业出版社

· 北 京 ·

(京) 新登字 039 号

图书在版编目 (CIP) 数据

齿轮传动润滑材料/刘维民, 夏延秋, 付兴国编著.

北京: 化学工业出版社, 2005. 5

ISBN 7-5025-7081-0

I. 齿… II. ①刘…②夏…③付… III. 齿轮传动-润滑剂 IV. TH132.41

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2005) 第 050568 号

齿轮传动润滑材料

刘维民 夏延秋 付兴国 编著

责任编辑: 李晓文 杜春阳

文字编辑: 赵媛媛

责任校对: 战河红

封面设计: 于 兵

化学工业出版社出版发行

(北京市朝阳区惠新里 3 号 邮政编码 100029)

购书咨询: (010) 64982530

(010) 64918013

购书传真: (010) 64982630

<http://www.cip.com.cn>

*

新华书店北京发行所经销

北京市兴顺印刷厂印装

开本 850mm×1168mm 1/32 印张 11 字数 295 千字

2005 年 7 月第 1 版 2005 年 7 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5025-7081-0

定 价: 28.00 元

版权所有 违者必究

该书如有缺页、倒页、脱页者, 本社发行部负责退换

前 言

齿轮是机械产品最重要的基础零件之一。齿轮传动是机器运动和动力传递的一种主要形式,具有传递功率大、传动比准确、使用范围广、安全可靠等特点,一度被视作工业化的象征。随着齿轮传动不断向高速、重载、高低温和微型化方向发展,润滑不当引起的齿轮失效时有发生,因此在新的环境条件下,研制高性能、低黏化、通用化、长寿命齿轮润滑油并且合理选择齿轮润滑越发显得重要。此外,许多企业对齿轮润滑的重要性认识不足,或缺乏润滑知识,致使经常发生因错用、误用润滑油而造成齿轮设备的破坏。因此有必要大力宣传高性能齿轮润滑材料和技术,宣传齿轮的摩擦学设计原理,介绍齿轮摩擦学的最新知识和最新的齿轮润滑油。

本书作者对齿轮润滑油及其添加剂进行了多年的研究,研制开发了多种新型齿轮润滑剂,满足了多种工况和条件下齿轮润滑的需要。根据多年的工作经验和积累,我们编著了本书,介绍最新的齿轮油研究成果,高性能齿轮润滑油及其添加剂及齿轮油的再制造等技术方法。

本书在编写过程中,东北大学马先贵教授提出了许多宝贵的建议,作者在此深表感谢。

本书的许多研究内容曾得到多项国家自然科学基金和中国石油天然气股份公司重点项目的支持,作者在此一并表示感谢。

本书共分十二章,编写分工如下:

第1章、第2章部分、第4章、第5章部分、第8章部分、第10章、第11章和第12章由刘维民编写;第2章部分、第3章、第6章部分、第7章部分和第8章部分由夏延秋编写;第5章部分、第8章部分、第6章部分、第7章部分和第9章由付兴国编写。

编著者

2005年3月

内 容 提 要

本书从齿轮润滑过程入手，在国内外研究的基础上，较全面地介绍了齿轮传动用润滑材料。

在本书中，作者结合多年来齿轮润滑油及添加剂的研究成果，依据齿轮传动的润滑形式、特点和润滑剂的选择、齿轮承载能力和齿轮摩擦学设计、齿轮摩擦学原理，介绍了工业齿轮（包括蜗轮蜗杆）和汽车齿轮用润滑油及具有广阔应用前景的纳米添加剂，并对其抗磨减摩机理进行了分析；同时还论述了可用于齿轮的合成油、润滑脂和固体润滑技术，并简单介绍了齿轮和齿轮油的再生方法。

本书的重点是介绍齿轮润滑材料和相关技术，供从事齿轮传动设计、制造、润滑管理、润滑油研制和齿轮维护的工程师和大专院校的师生参考。作为教材适合于研究生和高年级理工科本科生用书。

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 齿轮传动润滑的意义	1
1.2 齿轮润滑的历史和齿轮润滑剂	4
1.3 齿轮传动的润滑形式和齿轮润滑方式的选择	6
1.3.1 齿轮润滑形式	6
1.3.2 齿轮润滑方式	7
1.3.3 齿轮润滑材料的发展	10
参考文献	12
第 2 章 齿轮传动概述	14
2.1 齿轮传动的特点和应用	14
2.1.1 齿轮传动现状及其发展趋势	14
2.1.2 齿轮传动特点和分类	16
2.1.3 几种常用齿轮传动的主要特点和选用原则	18
2.2 齿轮材料的选择及其发展趋势	20
2.2.1 齿轮材料的选择	21
2.2.2 不同齿轮对材料的要求	29
2.3 齿轮传动失效形式及其对策	31
2.4 齿轮传动的摩擦学设计	36
2.4.1 摩擦学发展回顾	36
2.4.2 齿轮与摩擦学	38
2.4.3 防止失效的摩擦学设计	44
2.4.4 润滑油及添加剂对齿轮疲劳点蚀的影响	45
参考文献	49
第 3 章 齿轮承载能力	53
3.1 齿轮承载能力计算	53
3.1.1 齿轮承载能力概述	53
3.1.2 齿面节点处接触应力的计算	55

3.1.3 轮齿弯曲强度计算	57
3.2 齿轮油对齿轮承载能力的影响	58
3.2.1 润滑油对润滑剂系数的影响探讨	59
3.2.2 润滑油对粗糙度系数的影响探讨	62
3.2.3 润滑油对承载能力的影响	64
参考文献	66
第4章 齿轮传动的润滑原理	68
4.1 齿轮的液体润滑	68
4.2 齿轮的边界润滑及其机理	72
4.2.1 齿轮的边界润滑	72
4.2.2 边界润滑机理	73
参考文献	81
第5章 齿轮用润滑油添加剂	82
5.1 常用齿轮油添加剂	82
5.1.1 极压抗磨添加剂	82
5.1.2 复合型添加剂	86
5.1.3 其他类型添加剂	88
5.1.4 不同添加剂之间的复合作用	91
5.2 几种高性能润滑油添加剂	92
5.2.1 磷(膦)酸胺盐	93
5.2.2 硼化油酰胺	98
5.2.3 硼化硫代磷酸酯胺盐	99
5.3 纳米润滑油添加剂	103
5.3.1 金属纳米微粒的摩擦学应用	105
5.3.2 有机物修饰稀土纳米颗粒添加剂	114
5.3.3 有机物修饰纳米二氧化钛颗粒	118
5.3.4 有机修饰硫化锌纳米颗粒	120
参考文献	123
第6章 齿轮油的应用和发展	128
6.1 齿轮油基础油的发展	128
6.1.1 加氢润滑油基础油	128

6.1.2	可降解植物润滑油	130
6.1.3	可降解合成润滑油	132
6.2	工业齿轮用油	133
6.2.1	齿轮润滑的发展回顾	133
6.2.2	工业齿轮对齿轮油性能的要求	134
6.2.3	工业齿轮油的选用	135
6.2.4	齿轮润滑油的发展	147
6.2.5	润滑油的更新换代——高性能化、低黏化、通用化、 长寿命	147
6.2.6	超级齿轮油	152
6.3	其他设备的齿轮润滑	157
6.3.1	冶金设备齿轮的润滑	157
6.3.2	机床齿轮的润滑	158
6.3.3	矿山机械齿轮的润滑	159
6.3.4	其他齿轮的润滑	159
6.4	车用齿轮润滑油的选择	160
6.4.1	车辆齿轮对润滑油性能的要求	160
6.4.2	车辆齿轮油分类及车辆齿轮油的选用	161
6.4.3	PG-2 车辆齿轮润滑油的研制	166
6.4.4	无级变速器及其润滑	168
	参考文献	173
第 7 章	蜗轮蜗杆传动与润滑	175
7.1	蜗轮蜗杆传动及润滑概述	175
7.2	蜗轮蜗杆传动润滑的特点和分类	177
7.2.1	蜗轮蜗杆传动润滑的特点	177
7.2.2	蜗轮蜗杆传动润滑的分类和标准	178
7.2.3	蜗轮蜗杆油的选择及应用	183
7.3	蜗轮蜗杆传动的跑合	185
7.3.1	齿轮跑合概述	185
7.3.2	齿轮跑合的种类	187
7.3.3	化学跑合实验研究	189

7.4 钢蜗轮蜗杆传动	191
参考文献	194
第8章 合成齿轮油的应用与发展	196
8.1 常用合成齿轮油	196
8.1.1 酯类合成齿轮油	197
8.1.2 聚醚合成齿轮油	199
8.1.3 合成烃类合成齿轮油	203
8.1.4 磷酸酯合成齿轮油	205
8.1.5 全氟聚醚合成齿轮油	205
8.1.6 硅油类合成齿轮油	208
8.2 几种可用于齿轮润滑的新型合成润滑油	210
8.2.1 磷腈类合成齿轮油	211
8.2.2 离子液体作为合成齿轮油	214
参考文献	227
第9章 齿轮油的评定方法	229
9.1 齿轮油的实验室评定	229
9.1.1 几种用于评价齿轮油性能的摩擦磨损试验机	229
9.1.2 齿轮润滑油的氧化性和抗乳化性评定	233
9.1.3 齿轮油的台架试验	234
9.1.4 工业齿轮油测试要点	235
9.1.5 车辆齿轮油测试要点	236
9.2 基于不同试验机的齿轮油承载能力评定方法比较	237
9.2.1 基于不同试验机的齿轮油承载能力的评定	237
9.2.2 不同评定方法的测试条件与破坏形态	238
9.2.3 基于几种不同试验机的齿轮油承载能力评定方法 比较	239
9.2.4 关于现行齿轮油承载能力测试标准的思考	242
9.3 齿轮胶合承载能力计算方法探讨	244
9.3.1 试验方法	244
9.3.2 基于不同测试规范的试验结果对比	244
参考文献	246

第 10 章 齿轮润滑脂	248
10.1 润滑脂概述	248
10.1.1 齿轮传动用润滑脂的组成和结构特点	249
10.1.2 矿物油型齿轮传动用润滑脂	249
10.1.3 合成润滑脂	253
10.2 润滑脂在齿轮润滑中的应用	255
10.2.1 润滑脂在冶金工业齿轮润滑中的应用	256
10.2.2 铁路齿轮用润滑脂	257
10.2.3 润滑脂在其他齿轮润滑中的应用	260
参考文献	260
第 11 章 固体润滑	262
11.1 固体润滑概述	262
11.1.1 固体润滑材料	263
11.1.2 金属及复合固体润滑材料	266
11.1.3 自润滑材料	267
11.1.4 黏结固体润滑涂层	269
11.1.5 固体润滑剂的润滑机理	274
11.2 固体润滑剂在齿轮传动中的应用	275
11.2.1 固体润滑剂在齿轮润滑中的应用	276
11.2.2 各种固体润滑膜在齿轮润滑中的应用	277
11.3 未来齿轮传动与润滑的发展	283
11.3.1 未来齿轮的发展	283
11.3.2 微机械齿轮的润滑方式	284
11.3.3 有机薄膜的摩擦磨损性能	301
11.3.4 微机械齿轮润滑的发展	306
参考文献	308
第 12 章 齿轮与齿轮油的再制造	312
12.1 常用的几种齿轮再生方法	312
12.2 齿轮油的故障诊断	318
12.2.1 润滑油引起的齿轮设备故障	319
12.2.2 润滑油的检测	322

12.2.3 油液监测与诊断技术	323
12.3 齿轮油的再制造	332
12.3.1 齿轮油的再生	332
12.3.2 再生齿轮润滑油的理化性能检测	335
12.3.3 齿轮润滑油的质量检测	337
参考文献	339

第1章 绪 论

作为关键的机械传动部件, 齿轮是机械产品最重要的基础零件之一。齿轮传动是机器运动和动力传递的一种主要形式, 具有传递功率大、传动比准确、使用范围广、安全可靠等特点。齿轮在工业发展中占据重要而独特的地位, 一度被视作工业化的象征。毫无疑问, 在优化齿轮设计、提高齿轮制造技术以及合理利用传统润滑材料和润滑技术的基础上, 不断开发新型润滑材料和技术, 对于保证齿轮产品的性能和质量具有重要应用价值。

据史料记载, 公元前 300 年已出现木制和金属齿轮。我国于公元前 400~200 年开始使用齿轮, 古老的指南车就是以齿轮机构为核心的机械装置, 在我国山西省出土的青铜齿轮是迄今发现的最古老的齿轮之一。

近年来, 随着大型甚至超大型机械设备的问世, 齿轮的设计制造技术获得了新的发展, 齿轮工作参数进一步提高。如高速齿轮的功率传递能力达 $1000\sim 30000\text{kW}$ 、圆周速度达 $20\sim 200\text{m/s}$ 、设计寿命达 $5\times 10^4\sim 10\times 10^4\text{h}$ 。以高速线材轧钢机齿轮为例, 其圆周速度已由第一代的 $43\sim 60\text{m/s}$ 提高到第六代的 $100\sim 140\text{m/s}$, 传递扭矩达 $100\sim 200\text{t}\cdot\text{m}$, 设计使用寿命达 $20\sim 30$ 年。与此同时, 齿轮的制造精度不断提高, 部分齿轮产品的制造精度高达 2~3 级。而随着纳米技术的发展, 微米和纳米级齿轮相继问世^[1,2]。

1.1 齿轮传动润滑的意义

资料显示, 机器故障的 34.4% 源于润滑不足, 19.6% 源于润滑不当; 换言之, 约 54% 的机器故障是由于润滑问题所致^[3]。因此, 齿轮润滑对齿轮传动具有极其重要的意义, 为了保证齿轮正常运行和提高其使用寿命, 必须高度关注齿轮润滑技术。

分析表明，齿轮的磨损同润滑状态密不可分。如图 1-1 所示，在润滑状态下，齿轮的跑合时间短，正常磨损阶段长，对应于正常磨损状态（曲线 1）；而在无润滑或润滑失效情况下，齿轮在运转初期即因发生剧烈磨损而失效（曲线 2）。这种失效行为多见于未经跑合的新齿轮（齿轮表面大多处于边界润滑或局部干摩擦状态），主要是由于齿轮加工精度过低、表面粗糙度较高、润滑油极压抗磨性能不佳等原因所致。齿轮传动的常见破坏形式包括磨损、点蚀、胶合、折断及塑性变形等。其中前三者同润滑油直接密切相关，后二者则同润滑油间接相关。因此，就减速机而言，其在运转过程中的传动失效主要取决于润滑状态，通过合理选用齿轮润滑油可以避免或减轻传动齿轮的破坏、提高其传动寿命。我们研究发现^[4,5]，采用合适的跑合油或极压齿轮油进行跑合，可以有效地提高齿轮的接触精度、降低齿面粗糙度、大幅度提高齿轮的寿命，这对加工精度过低或表面粗糙度过大的齿轮同样适用。值得注意的是，由于油品选择不当，某些新型高性能润滑油在提高齿轮使用寿命方面的潜力还远未得到充分发挥，合理选择并科学使用润滑油依然是润滑工程师面对的艰巨任务。

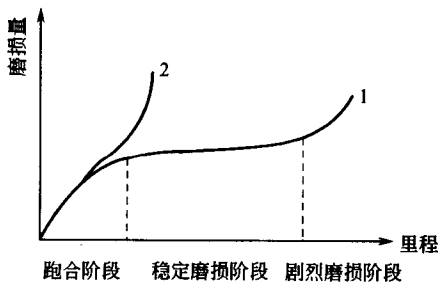


图 1-1 油润滑状态下的齿轮磨损过程示意图

含极压抗磨添加剂的齿轮润滑油在齿轮润滑方面受到了高度重视并获得了广泛应用。其原因在于，含极压抗磨添加剂的齿轮润滑油可以在齿轮啮合面形成有效的保护膜，从而阻止啮合面直接接触，抑制或减轻齿面磨损并避免齿轮胶合。在齿轮啮合过程中，含

极压抗磨添加剂的齿轮润滑油经由摩擦化学反应而在齿面接触凸峰处形成由有机和无机化合物组成的保护膜，从而改善齿面接触条件，提高齿轮的承载和抗磨能力；而齿轮齿面之间的化学反应有利于强化齿轮表面、提高齿面硬度，从而提高齿轮的承载能力和使用寿命；此外，合理复配的齿轮油还可以提高齿轮的承载和抗疲劳性能。总体而言，通过优化齿轮材料选择、优化齿轮参数、提高齿轮制造精度、降低齿面粗糙度、采用含有极压抗磨剂的齿轮油可以达到提高齿轮抗磨性能和抗胶合能力的目的，同时，采用含有极压抗磨剂的齿轮润滑油润滑时具有明显的成本优势。研究表明，采用新型润滑油添加剂完全可以避免普通齿轮在各种工况条件下的胶合，并最大限度地降低齿轮磨损，满足保护齿轮齿面和延长齿轮寿命，降低维护费用的要求^[6]。可以认为，齿轮在啮合过程中因摩擦而产生的接触区局部适当高温不仅无害，反而有利于形成保护膜。极压抗磨添加剂在齿面局部高温条件下更易同齿面金属发生摩擦化学反应，形成压缩强度高、剪切强度低的化学反应膜，从而保护了齿轮齿面，避免齿轮过度磨损和胶合。新型齿轮润滑油的抗磨承载作用及其对齿面的保护作用远非传统齿轮润滑油可比。以 20 世纪 50~60 年代的王牌齿轮润滑油——高黏度 28# 轧钢机油为例，该类齿轮油不含极压抗磨剂，仅能在齿轮表面经由物理吸附和化学吸附形成表面保护膜，这种物理吸附和化学吸附膜的强度较低，在齿轮运转过程中易发生破裂和脱落，从而失去对齿面金属的保护作用，导致齿轮严重磨损而失效。因此，就齿轮传动而言，合理润滑具有不可替代的重要作用，否则将严重影响齿轮的运转，甚至导致企业的生产线停止运转^[7]。作者在解决企业的实际润滑问题时发现，由于企业技术人员缺乏对润滑和润滑油的了解，致使大量生产设备的齿轮润滑不规范、代用、错用严重，如有的企业至今仍用 28# 轧钢机油或机械油代替中、重负荷齿轮油，导致相应的齿轮齿面磨损和擦伤，使齿轮使用寿命明显降低。或者采用高性能润滑油，但仍然采用传统的润滑方式，导致润滑油使用不当，降低齿轮使用寿命。

1.2 齿轮润滑的历史和齿轮润滑剂

在齿轮进入人们日常生活和生产的早期，齿轮润滑的必要性并未引起人们的重视。随着金属齿轮的面世及其在工业和交通运输中的不断推广应用，齿轮齿面磨损和噪声成为齿轮传动的主要制约因素，为此人们尝试采用动植物脂肪来实现齿轮的润滑，而随着 20 世纪初期石油的成功开发和利用，廉价的石油馏分逐渐被用于齿轮润滑。

第一代齿轮油是石油分馏后残余的黑色黏稠的液体，由于其可大幅度降低齿轮的磨损和噪声，而且价格低廉，因此迅速在齿轮传动中获得了广泛应用。随着汽车工业的发展，原来的齿轮油难以满足新一代汽车齿轮传动的需要，因此，美国于 20 世纪 30~40 年代开展了早期合成齿轮油的研制工作，通过在双曲线齿轮油中引入铅皂、含硫化合物极压剂、油性添加剂（动物油脂），满足了苛刻工作条件下双曲线齿轮的润滑需要。随着齿轮工作性能的提高，20 世纪 50 年代中期出现了含硫-磷-氯-锌等多种活性元素的齿轮油极压抗磨添加剂，铅皂和动物油脂逐步退出了齿轮油市场；20 世纪 60 年代末期开发成功了硫-磷型极压添加剂；20 世纪 70 年代，硫-磷型齿轮油逐渐取代硫-铅型齿轮油；20 世纪 90 年代，性能更优的硫-磷-硼型齿轮油添加剂开始投入工业应用。1995 年，美国汽车工程师协会颁布了关于车辆齿轮油的新规格，即用于变速箱润滑的 PG-1 和用于汽车后桥润滑的 PG-2。1997 年美国军方规定了同时适用于变速箱和汽车后桥润滑的 MT-1 标准。目前，齿轮润滑油正朝着高性能、多功能、通用、长寿命、合成的方向迅速发展。

我国在 20 世纪 60 年代大多将机械油、轧钢油和汽缸油用于齿轮装置，满足了当时条件下齿轮润滑的需要。然而，随着齿轮承载能力的提高，齿轮工作条件更加苛刻，原有的润滑油已不能满足齿轮润滑的需要。以 28# 轧钢机油为例，其烧结负荷仅为 1400N，而目前重负荷工业齿轮油标准要求齿轮油烧结负荷不小于 2500N，这就要求采用新一代齿轮油以满足齿轮传动的需要，在某些特殊工况

条件下则必须选用特种齿轮油。目前国产的新一代工业齿轮油——超级工业齿轮油的烧结负荷高达 8000N 以上^[6,8]。

我国借鉴 ISO 6743/6—1990 标准制订了工业齿轮油分类国家标准 GB/T 7631.7—1995。推荐使用的国产工业齿轮油列于表 1-1。另外还有一些特殊齿轮油，如适合野外的低凝点齿轮油、无级变速齿轮油等。

表 1-1 工业齿轮油分类和使用范围^[9]

传动方式	品种代号	通用名称	适用范围
闭式齿轮传动	CKB	抗氧防锈齿轮油	适用于低负荷、齿面接触应力小于 500MPa 的齿轮传动润滑
	CKC	中负荷工业齿轮油	适用于齿面接触应力小于 1100MPa 的工业齿轮传动润滑
	CKD	重负荷工业齿轮油	适用于齿面接触应力大于 1100MPa 的工业齿轮传动润滑
	CKE (轻负荷) CKE/P (重轻负荷)	蜗轮蜗杆油	摩擦系数低, 适合蜗轮传动润滑
	CKS	合成烃齿轮油	适用于轻负荷、极高、极低温度下齿轮的润滑, 其他同重负荷工业齿轮油
	CKT	合成烃极压齿轮油	适用于极高和极低温度下工作的齿轮的润滑, 其他同中负荷工业齿轮油
	CKG	普通齿轮润滑脂	适用于轻负荷下运转的齿轮润滑
开式齿轮传动	CKH (沥青)	普通开式齿轮油	用于中等环境温度和轻负荷下运转的圆柱齿轮和圆锥齿轮的润滑
	CKJ	中负荷开式齿轮油	用于中等环境温度和中等负荷下运转的圆柱齿轮和圆锥齿轮的润滑
	CKL	重负荷开式齿轮润滑脂	在高温和重负荷下使用的润滑脂, 用于圆柱齿轮和圆锥齿轮的润滑
	CKM	重负荷开式齿轮油	允许在极限负荷 (特殊重负荷) 下使用的齿轮传动润滑油

通过借鉴美国石油学会 (API) 车辆齿轮油规格和美国军用车

辆齿轮油规格，我国制订了车辆齿轮油分类国家标准 GB/T 7631.7—1989。推荐使用的国产车辆齿轮油列于表 1-2。新的美国标准规定手动变速箱油为 PG-1，重负荷双曲线齿轮油为 PG-2，其中 PG-2 的质量优于 GL-5；美国军方则将手动变速箱油和重负荷双曲线齿轮油合并归入 MT-1。

表 1-2 车辆齿轮油分类和使用范围^[9]

品种代号	美国分类	通用名称	适用范围
CLC	GL-3	普通车辆齿轮油	适用于中等速度和负荷下比较苛刻的手动变速箱和螺旋伞齿轮的传动
CLD	GL-4	中载车辆齿轮油	适用于低速高转矩、高速低转矩的各种齿轮及使用条件不太苛刻的车辆用准双曲线齿轮传动
CLE	GL-5	重载车辆齿轮油	适用于高速冲击负荷、高速低转矩、低速高转矩的各种齿轮或苛刻的车辆用准双曲线齿轮传动

1.3 齿轮传动的润滑形式和齿轮润滑方式的选择

1.3.1 齿轮润滑形式

齿轮传动润滑形式主要包括流体润滑、混合润滑和边界润滑。我们采用 Stribeck 曲线来说明齿轮的润滑状态。如图 1-2 所示，根据油膜厚度可以将齿轮润滑划分为三个区，用油膜参数 λ 作为评定润滑有效性的标志，即 $\lambda = \frac{h}{\sigma}$ ，其中 $\sigma = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2}$ 为均方根粗糙度， h 为油膜厚度。当 $\lambda > 3$ 时，齿轮处于流体动压润滑状态（d 区）；当 $0.4 < \lambda < 3$ 时，齿轮处于混合润滑状态（c 区）；当 $\lambda < 0.4$ 时，齿轮处于边界润滑状态（a 区和 b 区）。应当指出，增大负荷 P 或降低速度 v ，都有可能使润滑状态由动压润滑向混合润滑或边界润滑状态转变。随着设备向小型、高速、重载方向发展，大部分齿轮传动处于混合和边界润滑状态，此时齿面凸峰相互接触甚至碰撞，很难达到弹流润滑状态^[10]。

大多数齿轮需要采用液体润滑即齿轮油润滑，部分齿轮则采用