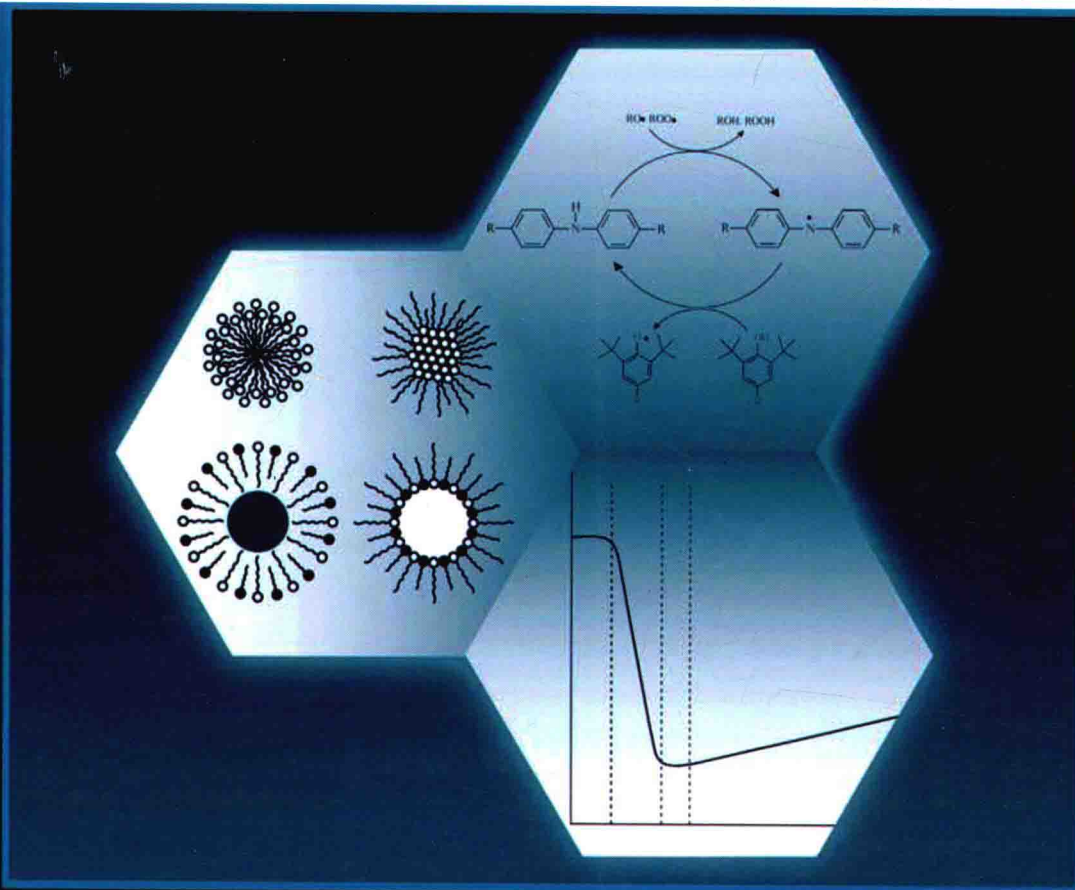


LUBRICANT ADDITIVES  
CHEMISTRY AND APPLICATIONS SECOND EDITION

# 润滑剂添加剂 化学及应用 (第二版)

[美] 莱斯利·鲁德尼克(Leslie R. Rudnick) 主编  
《润滑剂添加剂化学及应用》翻译组 译  
伏喜胜 潘元青 主审



 **CRC Press**  
Taylor & Francis Group

中国石化出版社  
[HTTP://WWW.SINOPEC-PRESS.COM](http://www.sinopec-press.com)

Lubricant Additives  
Chemistry and Applications  
Second Edition

润滑剂添加剂化学及应用

(第二版)

【美】莱斯利·鲁德尼克(Leslie R. Rudnick) 主 编  
《润滑剂添加剂化学及应用》翻译组 译  
伏喜胜 潘元青 主 审

中国石化出版社

## 内 容 提 要

《润滑剂添加剂化学及应用》(第二版)系统介绍了润滑油添加剂的最新进展,包括作用机理、实验室检测评定方法、与基础油的配伍性和商品应用等;同时对环保法规等对添加剂的影响因素及润滑油添加剂在新兴领域中的应用趋势进行了分析。全书共分为29篇专题论文,分为8个部分,分别为:沉积物控制添加剂、成膜添加剂、抗磨和极压添加剂、黏度控制添加剂、其他类添加剂、添加剂的应用、添加剂及其发展趋势、方法和术语等。

《润滑剂添加剂化学及应用》(第二版)是一部对润滑油及其添加剂研究工作十分有用的专著,也可供从事油品和添加剂科研、生产管理、销售和教学培训人员参考。

著作权合同登记 图字:01-2013-4648

Lubricant Additives; Chemistry and Applications(Second Edition)/Leslie R. Rudnick/ISBN 978-1-4200-5964-9

Copyright© 2009 by Taylor & Francis Group, LLC. All Rights Reserved. Authorized translation from English Language edition published by CRC Press, part of Taylor & Francis Group LLC.

本书中文简体翻译版授权由中国石化出版社独家出版并限在中国大陆地区销售。未经出版者书面许可,不得以任何方式复制或发行本书的任何部分。

Copies of this book sold without a Taylor & Francis sticker on the cover are unauthorized and illegal.

本书封面贴有 Taylor & Francis 公司防伪标签,无标签者不得销售。

### 图书在版编目(CIP)数据

润滑剂添加剂化学及应用/(美)莱斯利·鲁德尼克  
(Leslie R. Rudnick)主编;《润滑剂添加剂化学及应用》  
翻译组译. —2版. —北京:中国石化出版社,2016.8

书名原文:Lubricant Additives:Chemistry and  
Applications(Second Edition)

ISBN 978-7-5114-4205-5

I. ①润… II. ①莱… ②润… III. ①润滑油-石油  
添加剂-基本知识 IV. ①TE624.8

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 200366 号

未经本社书面授权,本书任何部分不得被复制、抄袭,或者以任何形式或任何方式传播。版权所有,侵权必究。

### 中国石化出版社出版发行

地址:北京市东城区安定门外大街58号

邮编:100011 电话:(010)84271850

读者服务部电话:(010)84289974

<http://www.sinopec-press.com>

E-mail:press@sinopec.com

北京柏力行彩印有限公司印刷

全国各地新华书店经销

\*

787×1092毫米 16开本 43.5印张 1099千字

2016年10月第2版 2016年10月第1次印刷

定价:120.00元

# 译者的话

润滑油质量的保证离不开添加剂产品，添加剂是提高润滑油质量、扩大润滑油品种的主要途径，也是改进润滑油性能、节能及减少环境污染的重要手段。由 Leslie R. Rudnick 主编的《润滑剂添加剂化学与应用》，对润滑剂添加剂的作用机理、产品应用、发展趋势等进行了详细的介绍。2006 年，中国石化出版社将该书引入中国并出版，深受广大读者欢迎。

随着节约能源和保护环境的需求增大，新的机械设备朝着缩小体积、减轻质量、增大功率、提高效率、增加可靠性和环境友好的方向发展，对润滑剂及其添加剂也提出了更苛刻的要求。基于此，Leslie R. Rudnick 于 2009 年对原著进行了第二次修订，在对润滑剂添加剂的作用机理、实验室检测评定方法、与基础油的配伍性和商品应用等进行论述的同时，更对环保法规等对添加剂的影响因素及润滑剂添加剂在新兴领域中的应用趋势进行了详细的分析。

为了将第二版《润滑油添加剂化学与应用》介绍给广大读者，中国石化出版社委托润滑油及其添加剂专家伏喜胜组织了该版的翻译工作。参加该版翻译的人员(按拼音首字母排序)有：安文杰、仇建伟、范闯、高敬民、郭鹏、李建明、刘玉峰、罗海棠、吕丙琴、毛箐箐、潘元青、钱伯章、祈有丽、孙令国、王俊明、王林春、王鹏、薛卫国、周惠娟、周康、张翔等，伏喜胜、潘元青、党兰生、薛卫国、王力波、关子杰等对译稿进行了校核，最后由伏喜胜审定全稿。

在全书的翻译过程中，虽经译者多次校对、讨论并修改，缺点和错误仍在所难免，真诚地期待广大读者的真知灼见。

# 序

润滑油添加剂仍在持续发展用于提高现代润滑油的性能。

环境问题和润滑油在苛刻工况下运行的要求促使合成润滑油的应用增长，由于性能和维护方面的优势，传统上应用石油衍生类润滑油的领域已开始转向应用合成润滑油。另一方面，考虑到成本问题，若能使用烃类产品，市场还是趋向于使用Ⅱ类和Ⅲ类基础油。当然，可再生和生物降解油品的需求同样在增长，这就需要更多新型高效添加剂，以满足不同应用领域油品配方要求的挑战。

以下几个方面的因素显示润滑油添加剂产业将呈现增长和变化的趋势。

法规的持续推动已使燃料和润滑油的组成逐渐发生变化，润滑油的配方开发将会受到一定的制约。欧盟《化学品注册、评估、授权与限制法案》(即 REACH 法规)对化学品的管理将约束新化合物在添加剂中的应用，也会给新材料开发公司带来一定的成本负担。通常，常用添加剂由少数几家生产商生产，将通过分享相关材料毒性或生物降解性等数据来分担成本。

发动机油技术的不断进步表现在要能改善燃油经济性，同时添加剂不能对排放系统部件产生不良影响。这就需要更为严格的试验方法，用来评价发动机油中磷的挥发性和发动机保护的相关性能。

预计未来润滑油添加剂市场将增长。如在代表人口高度密集的中国和印度，由于基础设施的不断完善，促使工业设备和汽车市场增长。美国和欧洲相关公司也继续通过兴建地区性生产厂或销售物流中心来发展太平洋和东南亚市场。

在太空和海洋领域，由于极端的工作环境和低维护要求，对润滑油性能要求也更为严格，这就需要新型润滑油及具有新技术的添加剂。

最后，我要说的是，在这本书的完成过程中，我的同事给予了无私的帮助和鼓励。在此，我要感谢所有作者，虽然有着工作职责和出版计划的冲突，仍然及时提交了论文。我谨对各位致以衷心的感谢，正是由于你们，为润滑油添加剂工业奉献了这一宝贵资源。

我还要特别感谢泰勒弗朗西斯集团(Taylor & Francis Group)的 Barbara Glunn 女士，之前我们合作出版过《合成、矿物和生物基润滑油》，从这本书的早期构架到最后的出版发行，Barbara Glunn 女士一直支持着我。我还要感谢 Kari Budyk 编辑，在本书完成的每个环节中都给予了很多协调，这种无私的帮助对我来说犹如是一笔巨大的财富。我也要感谢麦克米伦出版社(Macmillan Publishing Solutions)的 Jennifer Derima、Jennifer Smith 及整个团队一直以来所付出的努力、耐心和理解。

我还要感谢给予过帮助的 Paula、Eric 和 Rachel。

Les Rudnick

# 目 录

## (一) 沉积物控制添加剂

1 抗氧化剂 .....	3
1.1 引言 .....	3
1.2 硫化物 .....	3
1.3 硫氮化合物 .....	5
1.4 磷化合物 .....	6
1.5 硫磷化合物 .....	7
1.6 酚胺类抗氧化剂 .....	9
1.7 铜抗氧化剂 .....	14
1.8 含硼抗氧化剂 .....	14
1.9 杂环有机金属抗氧化剂 .....	15
1.10 碳氢化合物氧化机理和抗氧化作用 .....	16
1.11 氧化台架试验 .....	26
1.12 实验观测 .....	29
1.13 基础油的选择与抗氧化剂的性能 .....	32
1.14 未来需求 .....	33
1.15 商品抗氧化剂 .....	34
1.16 商品金属减活剂 .....	36
参考文献 .....	36
2 二硫代磷酸锌 .....	46
2.1 引言 .....	46
2.2 合成和生产 .....	46
2.3 化学和物理性质 .....	47
2.4 热稳定性和水解稳定性 .....	48
2.5 抑制氧化作用 .....	50
2.6 抗磨以及极压膜的形成 .....	52
2.7 应用 .....	53
参考文献 .....	55
3 无灰含磷润滑油添加剂 .....	57
3.1 引言及概述 .....	57
3.2 历史背景 .....	59
3.3 含磷润滑油添加剂的制备 .....	60
3.4 润滑添加剂的功能 .....	65

3.5	含磷添加剂的机理和活性研究	70
3.6	市场地位和商业实用性	94
3.7	毒性和生态毒性	97
3.8	磷基润滑油添加剂的未来	99
3.9	润滑油配方(概要)	99
3.10	液压油	99
3.11	汽车发动机润滑油	100
3.12	燃料油	101
3.13	结论	101
	参考文献	102
	附录 A: 早期含磷化合物的专利文献	106
	附录 B: 含磷化合物机理与性能的补充文献和专利文献	108
<b>4</b>	<b>清净剂</b>	<b>110</b>
4.1	引言	110
4.2	清净剂类型	111
4.3	清净剂参数	112
4.4	清净剂	113
4.5	中性和碱性清净剂的合成	117
4.6	测试	124
	参考文献	125
<b>5</b>	<b>分散剂</b>	<b>127</b>
5.1	引言	127
5.2	沉积物的性质及其生成模式	128
5.3	用分散剂控制沉积物	130
5.4	理想分散剂的性能	130
5.5	分散剂的结构	130
5.6	分散剂的制备	132
5.7	分散剂的性质	141
5.8	性能测试	145
	参考文献	147

## (二)成膜添加剂

<b>6</b>	<b>固体润滑剂作为摩擦改进剂的选择和应用</b>	<b>155</b>
6.1	引言	155
6.2	固体润滑剂的特性	157
6.3	润滑剂的应用及制备	162
6.4	应用	165
	参考文献	172
<b>7</b>	<b>有机摩擦改进剂</b>	<b>174</b>
7.1	引言	174



7.2	摩擦和润滑方式 .....	174
7.3	摩擦改进剂与抗磨剂/极压添加剂 .....	177
7.4	有机摩擦改进剂的化学性质 .....	178
7.5	其他摩擦改进剂的化学性质 .....	180
7.6	影响摩擦改进剂性能的因素 .....	180
7.7	目前使用的摩擦改进剂 .....	181
7.8	摩擦改进剂性能 .....	182
7.9	新发动机油规范的重要性和展望 .....	185
7.10	研究减摩化合物的模拟试验 .....	186
	参考文献 .....	186

### (三) 抗磨和极压添加剂

8	无灰抗磨和极压添加剂 .....	191
8.1	引言 .....	191
8.2	化学结构、性质和使用性能(按元素分类) .....	192
8.3	生产、市场和前景 .....	211
8.4	评定设备/规格标准 .....	212
8.5	展望 .....	217
	致谢 .....	219
	参考文献 .....	219
9	硫载体添加剂 .....	223
9.1	引言 .....	223
9.2	历史 .....	223
9.3	化学性质 .....	227
9.4	性质与特性 .....	233
9.5	在相关应用领域的性能数据比较 .....	238
9.6	制造和市场营销 .....	244
9.7	展望 .....	245
9.8	趋势 .....	245
9.9	中期趋势 .....	246
	参考文献 .....	247

### (四) 黏度控制添加剂

10	烯烃共聚物黏度指数改进剂 .....	251
10.1	引言 .....	251
10.2	烯烃共聚物的分类 .....	251
10.3	化学 .....	251
10.4	制造工艺 .....	254
10.5	性能和特性 .....	257



10.6	制造商, 销售商等方面的问题	272
	参考文献	277
<b>11</b>	<b>聚甲基丙烯酸酯黏度指数改进剂和降凝剂</b>	<b>281</b>
11.1	历史发展	281
11.2	化学性质	283
11.3	特性和性能特点	287
11.4	制造商、销售商和经济效益	296
11.5	展望与趋势	298
	参考文献	300
<b>12</b>	<b>降凝剂</b>	<b>302</b>
12.1	引言	302
12.2	流体力学和倾点抑制剂的作用机制	302
12.3	降凝剂化学	304
12.4	降凝剂性能测试	306
12.5	降凝剂选择的原则	308
12.6	降凝剂的稳定性	312
12.7	润滑剂应用	313
	参考文献	314

## (五) 其他类添加剂

<b>13</b>	<b>黏附剂和防雾剂</b>	<b>319</b>
13.1	引言	319
13.2	实验装置的安装、实验过程及实验对象	320
13.3	黏附性润滑剂在拉伸(吸取)过程中的黏弹效应	322
13.4	理论模型	323
13.5	与理论对比: 含 0.025% PIB 的实验结果讨论	326
13.6	开放式虹吸管测量润滑流体的黏附性	330
13.7	结论	332
	致谢	332
	参考文献	332
<b>14</b>	<b>密封膨胀添加剂</b>	<b>333</b>
14.1	引言	333
14.2	1935 ~ 1960 年间的液压油/密封膨胀添加剂	334
14.3	1961 ~ 1980 年间的液压油/密封膨胀添加剂	334
14.4	1981 ~ 2000 年间的液压油/密封膨胀添加剂	335
14.5	2001 ~ 2007 年间的液压油/密封膨胀添加剂	335
14.6	发展趋势	336
14.7	工业用油	336
14.8	密封膨胀添加剂的困境	336
14.9	成本效益	337

14.10	生产制造	337
14.11	总结	338
<b>15</b>	<b>金属加工液杀菌剂</b>	<b>339</b>
15.1	引言	339
15.2	微生物生长	339
15.3	适于细菌生长的环境	340
15.4	设计、维护和监控	341
15.5	困难和挑战	341
15.6	微生物污染测试	342
15.7	微生物处理方案	343
15.8	微生物控制的未来	349
	参考文献	349
<b>16</b>	<b>润滑油表面活性剂</b>	<b>351</b>
16.1	引言	351
16.2	表面活性剂的结构	351
16.3	表面活性剂的溶解度	353
16.4	表面活性剂的有序聚集体	354
16.5	表面活性剂在润滑油中的作用	356
16.6	表面活性剂的增溶作用	356
16.7	表面活性剂的边界润滑性质	358
16.8	结论	367
	参考文献	368
<b>17</b>	<b>腐蚀抑制剂和防锈剂</b>	<b>370</b>
17.1	引言	370
17.2	腐蚀抑制剂类型	372
17.3	腐蚀抑制剂的作用机理	374
17.4	常见腐蚀抑制剂	375
17.5	腐蚀的测试方法	383
17.6	未来的需求	389
	参考文献	390
<b>18</b>	<b>可生物衍生和生物降解的润滑油添加剂</b>	<b>394</b>
18.1	引言	394
18.2	发展历史	395
18.3	植物基油品	397
18.4	油品类型和性能	397
18.5	复合剂	397
18.6	清净剂	399
18.7	分散剂	399
18.8	防腐剂/防锈剂	399
18.9	抗氧剂	399
18.10	抗磨剂	401

18.11	抗泡剂	402
18.12	黏度改进剂/降凝剂	402
	参考文献	402

## (六) 添加剂的应用

<b>19</b>	<b>添加剂在曲轴箱润滑油中的应用</b>	405
19.1	引言	405
19.2	清净剂	405
19.3	分散剂	410
19.4	抗磨剂	418
19.5	抗氧化剂	423
19.6	黏度改进剂	431
19.7	降凝剂	434
19.8	泡沫抑制剂/抗泡剂	434
	参考文献	435
<b>20</b>	<b>工业润滑剂添加剂的应用</b>	436
20.1	引言	436
20.2	添加剂历史	436
20.3	添加剂的功能	438
20.4	添加剂的类型	441
20.5	染料	442
20.6	杀菌剂	443
20.7	表面活性剂	443
20.8	缓蚀剂	443
20.9	食品级添加剂	443
20.10	磁盘驱动添加剂	443
20.11	滑脂添加剂	443
20.12	生物降解润滑油添加剂	444
20.13	添加剂化学	444
20.14	工业应用	446
20.15	小结和结论	448
	致谢	448
	参考文献	449
<b>21</b>	<b>食品级润滑剂添加剂的应用</b>	452
21.1	引言	452
21.2	添加剂	455
	参考文献	461
<b>22</b>	<b>用于磁盘驱动行业的润滑剂</b>	462
22.1	引言	462
22.2	磁记录盘片润滑剂	463

22.3	主轴电机润滑剂	482
22.4	结束语和展望	510
	致谢	510
	参考文献	511
<b>23</b>	<b>润滑脂添加剂的应用</b>	<b>515</b>
23.1	引言	515
23.2	全球润滑脂使用情况	516
23.3	润滑脂生产	516
23.4	润滑脂组成及性能	518
23.5	润滑脂稠化剂	520
23.6	抗氧化剂	523
23.7	摩擦与磨损	524
23.8	极压抗磨剂	525
23.9	防锈防腐剂	526
23.10	环境友好润滑脂	527
23.11	小结	528
23.12	个别添加剂和润滑脂皂的影响	528
	说明	533
	致谢	533
	参考文献	533

## (七) 添加剂及其发展趋势

<b>24</b>	<b>工业润滑剂添加剂的发展趋势</b>	<b>537</b>
24.1	引言	537
24.2	循环用油和涡轮机油添加剂	537
24.3	液压油添加剂	540
24.4	齿轮油添加剂	544
24.5	压缩机油用添加剂	549
24.6	润滑脂添加剂	550
	参考文献	555
<b>25</b>	<b>航空航天用添加剂长期发展趋势</b>	<b>559</b>
25.1	航空航天应用的特殊要求	559
25.2	为什么需要添加剂	559
25.3	添加剂的作用机理	560
25.4	航天用添加剂	562
25.5	液压液用添加剂	563
25.6	燃气轮机油用添加剂	564
25.7	未来发展趋势	564
	参考文献	565

<b>26</b>	<b>润滑油添加剂的生态要求</b> .....	567
26.1	生物润滑油.....	567
26.2	使用生物润滑剂的驱动因素.....	568
26.3	生物润滑油用基础油.....	574
26.4	生物润滑油用添加剂.....	577
26.5	总结.....	580
	参考文献.....	581

## (八) 方法和术语

<b>27</b>	<b>添加剂/润滑剂标准测试方法和一些产品规范概述</b> .....	587
27.1	标准测试方法和规范概要.....	587
27.2	缩写词.....	603
	致谢.....	603
<b>28</b>	<b>润滑剂工业相关术语及缩写词</b> .....	604
28.1	术语和缩写词.....	604
28.2	一些美国联邦供应(链)缩写词 .....	628
<b>29</b>	<b>润滑油/添加剂的互联网资源</b> .....	629
29.1	字母顺序列表.....	629
29.2	网络列表分类.....	654



## (一) 沉积物控制添加剂

---





# 1 抗氧化剂

*Jun Dong and Cyril A. Migdal*

## 1.1 引言

早在全面理解碳氢化合物(烃)的氧化机理前, 研究者们就已逐渐认识到有些油品具有更好的抗氧化性能。这种差异最终被证实是由于存在天然抗氧化剂, 与原料或炼制技术有关。人们发现一些天然的抗氧化剂中含有硫或氮官能团, 因此, 某些使油品具有特殊性质的添加剂, 如含硫化学物质能够提供额外的抗氧化稳定性并不令人感到惊奇。继含硫添加剂能提供氧化稳定性这一发现之后, 人们发现苯酚也具有同样的性质, 这就促进了硫酚的发展。有些胺和金属磷化物或硫化物也被证实能提供氧化稳定性, 这在目前的润滑油抗氧化剂方面的专利和文献中有大量报道。润滑油失效的一个主要原因是发生氧化降解, 因此, 目前生产的润滑油中至少添加一种抗氧化剂来提高其氧化安定性或有增强其他性能的功效。润滑油最重要的一个方面就是要求其具有良好的氧化安定性。

润滑油氧化后产生的物质, 不仅降低了其使用性能, 还缩短了其使用寿命, 同时对使用的润滑部件也会造成磨损。暴露在氧气和受热条件下的碳氢化合物将加速氧化过程, 特别是在有铁、铜、镍等金属存在的情况下, 油品更易氧化。如内燃机随着金属部件摩擦产生的热量是突出的氧化催化剂, 使内燃机成为一个极好的促进氧化过程的化学反应器, 因此发动机油可能比其他润滑油更容易氧化。然而任何暴露在空气和热中的润滑油最后都要被氧化。抗氧化剂是保护润滑油免受氧化变质的关键添加剂, 它能满足润滑油在发动机和工业用油中的苛刻要求。

目前已开发出不少有效的抗氧化添加剂, 并且在发动机油、自动传送液、齿轮油、汽轮机油、压缩机油、润滑脂、液压液和金属加工液中得到广泛使用。目前用到的油溶性有机化合物和有机金属类抗氧化剂主要有以下几类:

- (1) 硫化物;
- (2) 硫氮化合物;
- (3) 磷化合物;
- (4) 硫磷化合物;
- (5) 芳胺化合物;
- (6) 屏蔽(受阻)酚化合物;
- (7) 有机铜化合物;
- (8) 硼化合物;
- (9) 其他有机金属化合物。

## 1.2 硫化物

使用抗氧化剂来抑制油品的氧化追溯到 19 世纪初期。文献中所记述的最早发明之一是将矿物油和硫元素一起加热, 产生一种无氧化的油<sup>[1]</sup>, 然而这种方法的主要缺点是硫化油对铜的高腐蚀性。随后开发的硫化脂肪油如硫化鲸油既具有抗氧化性能又具有抗腐蚀性能<sup>[2]</sup>,

同样地, 硫化萘烯类和聚丁烯也被用来制备类似功能的添加剂<sup>[3-5]</sup>, 石蜡也被用来制备硫化物<sup>[6-9]</sup>。图 1.1 所示是几种硫化物的理论结构。它们实际的化学结构可能很复杂, 图示为简化结构。

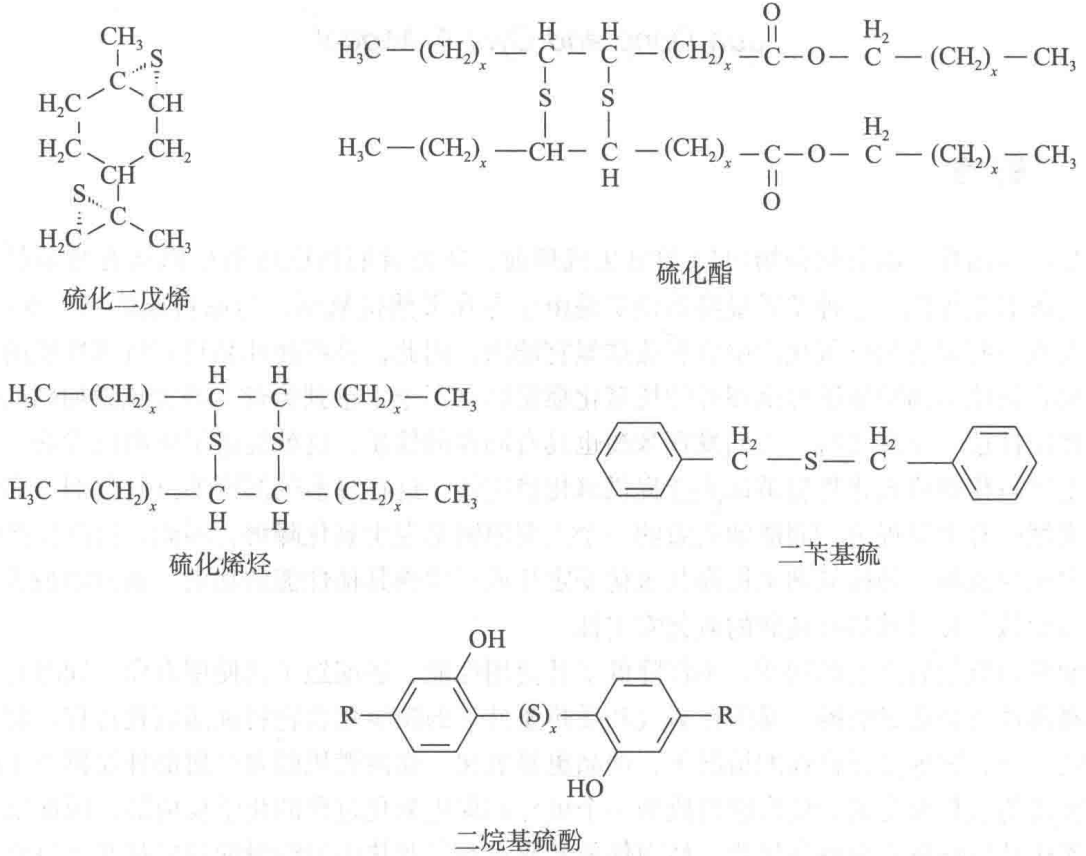


图 1.1 硫桥类抗氧化剂

芳香族硫化物是另一类被用于抑制氧化和腐蚀的添加剂。一些简单的含硫芳香族化合物包括二苄基硫醚和二甲苄基二硫化物; 更复杂的一些类似化合物是烷基酚硫化物<sup>[10-15]</sup>。烷基酚, 如单或二丁基、戊基或辛基酚与硫或二氯化硫反应, 生成单硫或二硫化物, 图 1.1 所示为其结构, 如苄基硫醚是酚的烷基侧链碳通过硫连接形成芳香族硫化物, 烷基苯酚硫化物是硫直接连接到芳环上的碳原子。通常, 烷基苯酚硫化物型的结构在润滑油中具有更好的抗氧化性能, 单或双的二烷基二苄基硫化物与  $C_{10} \sim C_{18}$  的  $\alpha$ -烯烃在三氯化铝催化剂的存在下反应得到的硫化物是优良的高温抗氧化剂, 特别适合合成基础油如氢化聚  $\alpha$ -烯烃、双酯、多元醇酯<sup>[15]</sup>。也可用金属对烷基酚硫化物中的羟基进行处理, 生成油溶性的金属酚盐, 这些金属酚盐起到了清净剂和抗氧化剂的双重作用。

一种杂环结构的多功能的抗氧极压添加剂 (EP) 是通过硫化降冰片烯、5-乙烯基降冰片烯、二聚环戊二烯, 或甲基环戊二烯二聚体制备的<sup>[16]</sup>。杂环化合物, 如正烷基 2-噻唑啉二硫化物与二烷基二硫代磷酸锌 (ZDDP) 一起使用, 在实验室发动机试验中具有优异的抗氧化性<sup>[17]</sup>。 $\beta$ -硫代二烷醇衍生的含硫化合物和含氧化合物是自动传动液极好的抗氧化剂<sup>[18]</sup>。使用价廉的芳硫基化合物和羰基化合物, 通过一步缩合反应制备的高收率二氢苯并噻吩化合