



斛兵博士文丛

Hubing Doctor Thesis Collection



颗粒介质摩擦界面 及其润滑效应

FRICITION AND LUBRICATION EFFECTS
OF PARTICULATE INTERFACE

王 伟/著 刘 焜/导师



合肥工业大学出版社
HEFEI UNIVERSITY OF TECHNOLOGY PRESS

颗粒介质摩擦界面及其 润滑效应

王 伟 著 导师 刘 焜

合肥工业大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

颗粒介质摩擦界面及其润滑效应/王伟著. —合肥:合肥工业大学出版社, 2016. 7

ISBN 978 - 7 - 5650 - 2841 - 0

I. ①颗… II. ①王… III. ①颗粒物质—介质—摩擦—研究
IV. ①0552.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 143005 号

颗粒介质摩擦界面及其润滑效应

王伟 著 刘焜 导师 责任编辑 权怡 责任校对 刘露

出版	合肥工业大学出版社	版次	2016 年 7 月第 1 版
地址	合肥市屯溪路 193 号	印次	2016 年 7 月第 1 次印刷
邮编	230009	开本	710 毫米×1010 毫米 1/16
电话	编校中心:0551-62903210	印张	9.5
	市场营销部:0551-62903198	字数	155 千字
网址	www.hfutpress.com.cn	印刷	安徽联众印刷有限公司
E-mail	hfutpress@163.com	发行	全国新华书店

ISBN 978 - 7 - 5650 - 2841 - 0

定价: 28.00 元

如果有影响阅读的印装质量问题,请与出版社市场营销部联系调换。

序 言

摩擦界面的固体颗粒一直以来都是摩擦学者们的兴趣点,它的破坏作用得到了人们较多的关注,并形成了比较成熟的磨粒磨损理论。在1984年Godet第一次提出第三体颗粒物质的良性作用之后,1995年以“三体摩擦学”为主题的第22届Leeds-Lyon会议上,颗粒介质润滑被提出并成为讨论的热点之一,成为适应特殊工况的一种润滑方案。其中最引人关注的是,美国学者Heshmat实现了综合高性能涡轮增压发动机技术(IHPTET)要求的600℃以上的持续颗粒介质润滑。将早期的应用探索和试验研究看作是颗粒介质润滑发展的第一阶段,人们开始在实践中凭经验尝试运用颗粒介质润滑,特别是在机械传动领域的探索,并逐步唤起人们对颗粒介质润滑归类的认同和理论研究的重视。

近20年来,伴随着工业界对极端环境润滑的需要,颗粒介质润滑的发展更加方兴未艾。一些学者利用销盘、端面等摩擦试验机或自制试验设备,进一步探讨了颗粒介质润滑的颗粒碰撞、导入方式、界面黏附、黏滑、自补偿等现象。也有学者用颗粒介质润滑磨削、铣削以及压铸件的拔模,不但实现了更好的切削性能和提高了加工质量,还省去了大量污染环境的切削液的使用。可以认为,近20年的研究成果代表着颗粒介质润滑发展的第二个重要阶段,应用场合从传动拓展到切削、压铸、塑性成形等制造领域。在实验研究逐步细化和多样化的同时,基于连续和非连续力学方法的数学模型大量涌现,构建了流态和非流态颗粒介质润滑理论的主体。

2008年英国机械学会摩擦学期刊出版了*Granular Lubrication*专辑,以及2010年颗粒介质润滑专著*Tribology of Interface Layers*的出版,标志着颗粒介质润滑发展到了新的高度。尽管前景广阔,但该方向的发展仍处于起步阶段,正如摩擦学著名学者温诗铸院士在2004年指出:颗粒(粉体)摩擦

学是研究颗粒物质的密集、流动和与界面的交互作用,从摩擦学角度来看该研究尚属空白。

本书作者及其同事在国家自然科学基金(项目号:50775060)的支持下,对颗粒流润滑从理论和试验的角度开展了系统的研究,开发了多种特殊的试验装置,并完成了系统的试验;引入了离散单元法来构建仿真的分析模型,有利于开展对大量颗粒体的行为分析,更适合选定的研究对象。利用该方法解决了颗粒介质摩擦界面的力学分析难题,确定并量化了密集颗粒体-表面摩擦系统中影响力链的因素,探索并描述了力链在颗粒体-表面摩擦过程中的构型及其演变的规律;确定了力链在非受限颗粒体-表面摩擦过程中的作用和机理,实现了颗粒单体、颗粒体系、表面的输入因素和摩擦体系宏观摩擦学特性的关联。

本书的研究成果和研究方法具有一定的普适性,不仅仅可以应用于颗粒流润滑,对其他颗粒介质界面的应用和研究工作同样有较强的参考价值,因此是一项优秀的基础研究工作。但是,也应该看到,迄今的研究工作对了解颗粒流润滑机理起到了积极的作用,但还没有获得质的突破,还不能准确的预测和控制它的摩擦学特性,理论研究的滞后也阻碍了其在工程上的推广和使用。由于颗粒流独特的性质,使得该问题非常复杂,同时也有待新的突破。希望作者或其他研究者能够知难而上、砥砺前行,为人们更深入的理解颗粒介质摩擦界面这一广泛存在的对象而努力。

刘 焜

2015 年 12 月 8 日

摘要

颗粒物质在自然界广泛存在,颗粒尺度在 $1\text{ }\mu\text{m}\sim 10^4\text{ m}$ 的物质都可称为颗粒物质。颗粒流润滑是将固体材料以颗粒(粉末)状态直接导入摩擦副,使摩擦间隙中处于充满固体颗粒状态,利用颗粒的摩擦、变形、碰撞、挤压和滑滚等微观运动,减少做相对运动的两个表面的接触,保护表面免于损伤。颗粒流润滑状态下,摩擦间隙中以固体颗粒作为润滑介质,可以实现低摩擦系数、宽温度范围、有冷却、长寿命、可补充等性能特点,是一种新的介质润滑理论与方法,具有较大的理论价值和应用前景。

本书利用端面摩擦试验机和石墨颗粒对颗粒流润滑开展的试验研究证明,颗粒在与摩擦副表面间没有任何附着措施时也可以动态进入摩擦副,但颗粒进入摩擦副的量和均匀性不好控制,且介入性受到颗粒物性、摩擦副设计和工况等的影响。在与粉末冶金铜合金材料、石墨涂层、自润滑复合材料三种润滑方式的对比研究中,发现颗粒流润滑方式可以实现很好的润滑,它的摩擦系数与固体润滑膜、自润滑材料的特性相当。这是由于颗粒在一定条件下具有流动性,并且可以实现颗粒层的自修复和补偿。颗粒润滑的效果与颗粒本身的性质以及摩擦副的载荷、转速等也有很大关系。同时,基于雾化方案及流化方案构建了相应的试验平台,试验证明石墨颗粒和压缩空气的混合流能进入摩擦副中,实现了良好的减摩作用。

基于离散单元法建立摩擦过程中颗粒物质塑性行为的理论研究模型,对颗粒破坏过程进行了模拟。考察了摩擦副工况(粗糙度、速度和间隙)和颗粒强度对颗粒破坏的影响,确定了影响颗粒破坏的因素和相应的参数范围,以期对颗粒的破坏做出准确的预测。

在研制的双筒颗粒流润滑试验装置开展的试验表明,摩擦表面的结构和颗粒介质本身会对颗粒流的摩擦特性产生重要影响。当颗粒物质的粒度

和表面结构的尺寸接近时,两者的互相影响会比较大,颗粒物质内部的剪切和滑移行为比较明显。当表面结构的尺寸远远小于颗粒尺寸时,容易产生颗粒物质整体在摩擦表面的滑动。摩擦间隙中颗粒填充量的多少也会对摩擦力产生明显影响,在不考虑其他问题时,颗粒填充量增加会增大摩擦力。摩擦间隙中颗粒流的动态流动和分布也有一定的规律,对该问题还需要进一步探讨。

针对机械工程中的典型摩擦学研究对象——斜面滑块摩擦副和滑动轴承,基于非连续介质力学的离散单元法建立非流态颗粒流润滑的理论研究模型。通过研究颗粒层动态特性、摩擦副工况、颗粒体物理特性等,探讨了它们对承载分布、摩擦系数等的影响。同时以颗粒和多体接触点为对象,考察颗粒流润滑中平均接触力、力链、体功、接触摩擦功和颗粒总动能的微观特性,揭示了颗粒流润滑宏观和微观特性之间的联系。

关键词:颗粒流润滑 摩擦系数 离散元 配位数 接触模型 平均接触力

Abstract

Granular matter is widely existed in nature, and it scales from $1\text{ }\mu\text{m}$ to 10^4 m . The granular lubrication means that the solid particles are directly put into the interface of tribopairs and abound in it. By utilizing friction, deformation, collision, crash, slide and rolling of these solid particles, the direct contact of two moving surfaces are minimized, and so the damage of surfaces are avoided. Granular lubrication can be used in key equipments to lubricate their important tribopairs, which can achieve low friction coefficient, wide temperature adaptation, long life and compensable granular lubrication or solid-gas lubrication. This is a kind of lubrication method and well worth further research and development.

The tribological characteristics of granular lubrication which uses micro particles have been investigated based on plane contact tribotester. The results show that the continuous supply of particles formed the solid lubrication film. But it is difficult to control the amount and the ability of particles entrancing into the clearance. The experiments have been carried out to compare the tribological property of surfaces lubricated with copper alloy particles, bonded graphite film and PTFE three layer self lubrication material, the results demonstrate that the friction coefficient, temperature characteristics are similar. Granular lubrication has the properties of longer life and self-replenishment because they can flow in the clearance. The results also show that granular lubrication characteristics are related with particle's physical properties and running state of rubbing surfaces. Furthermore, both fluidized and atomized experimental devices are constructed. Through conducting friction and wear experiments on this

machine, it testified that particles play an important role on lubrication.

A model is established and the breakage process of the particle is simulated with discrete element method. This model can be used to simulate the plastic behaviors of the particles in clearance between rubbing surfaces. The surface topography, moving speed, clearance and internal bonding strength of particle are studied to reveal the reason of particle breakage and how much effect they have. This work is trying to give the mathematical model to predict the damage of particles.

The experiments performed on bicircular granular lubrication equipment show the effects of surface texture and dimension of particles. While the scale of surface texture is close to particle diameter, the interaction between them is obvious and the shear and slide among granular matter are strong. While the scale of surface texture is much smaller than particle diameter, the whole particles will slide along surface. The amount of particles added in clearance takes obvious effect on tribology characteristics. The rule of the dynamic flow and distribution of granular matter needs further research.

Aiming at the slider plane tribopairs and slide bearing which are typical tribological objects in mechanical engineering, the non-fluidized granular lubrication model is proposed based on discontinuous mechanics. By the discrete element simulation, the dynamic characteristics of particle film, running state of tribopair and particle physical properties have been investigated to reveal their effects on load capacity, load profile and friction coefficient. At the same time, taking particles and contact point as object, the micro-properties including average contact force, body energy, contact friction energy and particle kinetic energy of particle flow lubrication are studied. In the meantime, connections between micro property of granular and macro tribopair have been discussed.

Keywords: Granular Flow Lubrication; Friction Coefficient; Discrete Element Method; Coordinate Number; Contact Model; Average Contact Force

目 录

摘 要	(001)
第 1 章 绪 论	(001)
1.1 颗粒流润滑界定	(002)
1.2 工程应用探索	(005)
1.2.1 高温发动机中的颗粒流润滑	(005)
1.2.2 在磨削加工中的应用	(007)
1.2.3 在铸造加工中的应用	(007)
1.2.4 在内燃机中的应用探索	(008)
1.2.5 颗粒流润滑的其他应用	(008)
1.3 理论研究和仿真研究进展	(009)
1.3.1 摩擦间隙中颗粒流行为和颗粒接触模型	(010)
1.3.2 类流体润滑理论	(011)
1.3.3 碰撞动理学理论	(013)
1.3.4 基于非连续介质力学的颗粒流润滑理论	(013)
1.4 研究内容和方法	(014)
1.4.1 课题来源	(014)
1.4.2 论文的内容安排	(014)
第 2 章 颗粒流润滑与传统固体润滑的对比试验研究	(016)
2.1 引言	(016)
2.2 试验设备及实验方案	(016)
2.2.1 试验设备	(016)
2.2.2 实验材料	(018)

2.2.3	试验方案	(018)
2.2.4	实验步骤	(018)
2.3	试验结果与讨论	(021)
2.3.1	验证颗粒的介入性	(021)
2.3.2	颗粒流润滑与其他几种润滑方式的比较	(022)
2.3.3	不同物性的颗粒对润滑特性的影响分析	(024)
2.3.4	粒径对颗粒流润滑特性影响	(025)
2.3.5	载荷对颗粒层破坏的影响	(026)
2.3.6	转速对颗粒层破坏的影响	(027)
2.3.7	工况对颗粒流润滑影响的状态图	(029)
2.4	本章小结	(030)
第3章	气体输送颗粒实现润滑的装置研究	(031)
3.1	引言	(031)
3.2	试验方案的确定	(031)
3.2.1	雾化方案	(031)
3.2.2	流化方案	(032)
3.3	基于雾化方案构建的试验装置和试验研究	(033)
3.3.1	机械部分	(033)
3.3.2	颗粒雾化装置	(034)
3.3.3	试验条件	(035)
3.3.4	试验结果分析	(035)
3.4	基于流化方案构建的试验装置	(036)
3.4.1	颗粒流供应装置	(036)
3.4.2	机械部分	(037)
3.4.3	检验试验装置的可行性	(039)
3.4.4	环块摩擦副在石墨颗粒流润滑状态下的摩擦磨损特性	(042)
3.5	本章小结	(045)

第 4 章 摩擦过程中颗粒物质微观塑性行为研究	(046)
4.1 引言	(046)
4.2 颗粒流润滑仿真模型的建立	(047)
4.2.1 基本颗粒的生成	(047)
4.2.2 离散单元法基本计算原理	(048)
4.2.3 摩擦副物理模型的建立	(050)
4.2.4 主要参数的确定	(051)
4.3 颗粒破坏过程	(055)
4.4 颗粒破坏对各参数的影响分析	(056)
4.5 摩擦副工况对颗粒破坏的影响	(058)
4.5.1 不同粗糙度对颗粒破坏的影响	(058)
4.5.2 上表面运动速度对颗粒破坏的影响	(061)
4.5.3 摩擦副间隙对颗粒破坏的影响	(063)
4.6 颗粒内部黏接强度对颗粒破坏的影响	(066)
4.6.1 不同黏接强度时颗粒的破坏过程	(067)
4.6.2 不同黏接强度时颗粒破坏对各参数的影响	(068)
4.7 本章小结	(069)
第 5 章 环形间隙中颗粒物质动态特性的试验研究	(071)
5.1 引言	(071)
5.2 试验装置的构建	(072)
5.3 表面结构的影响	(073)
5.3.1 光滑表面的试验结果	(074)
5.3.2 浅槽表面的试验结果	(074)
5.3.3 深槽表面的试验结果	(075)
5.3.4 对比分析	(075)
5.4 颗粒填充量的影响	(077)
5.4.1 较少颗粒的情况	(077)
5.4.2 较多颗粒的情况	(078)



5.4.3 对比分析	(079)
5.5 对实验的综合分析(误差分析)	(079)
5.6 本章小结	(080)
第6章 颗粒流润滑宏微观特性的理论研究	(081)
6.1 引言	(081)
6.2 针对斜面滑块摩擦副的颗粒流润滑仿真研究	(082)
6.2.1 物理模型	(082)
6.2.2 理论模型的数值计算	(083)
6.2.3 滑块运动和形位参数对颗粒流润滑特性的影响规律	(084)
6.2.4 滑块曲面形状因素对颗粒流润滑特性的影响	(088)
6.2.5 颗粒物质摩擦系数对颗粒流润滑影响的仿真分析	(094)
6.2.6 颗粒物质切变模量对颗粒流润滑影响的仿真分析	(098)
6.2.7 颗粒物质粒度对颗粒流润滑影响的仿真分析	(100)
6.3 针对滑动轴承的颗粒流润滑仿真研究	(103)
6.3.1 物理模型	(103)
6.3.2 颗粒流润滑轴承起动到稳定的动态过程研究	(104)
6.3.3 转速变化对滑动轴承颗粒流润滑的影响	(111)
6.3.4 颗粒物质摩擦系数的影响	(116)
6.3.5 颗粒物质弹性模量的影响	(120)
6.4 本章小结	(125)
第7章 总结和展望	(127)
7.1 全文总结	(127)
7.2 主要创新点	(128)
7.3 研究展望	(129)
参考文献	(130)
致谢	(140)

第1章 绪论

航空领域、冶金设备、绝热发动机、压铸模具等特殊环境提出了许多润滑问题,如从常温到 1000℃ 以上高温的宽温润滑问题。

一般石油系润滑油最高使用温度为 250℃,合成系润滑油最高使用温度为 350℃,如果在更高的温度下使用时,它们会出现冒烟甚至闪火的现象^[1]。

由此,固体润滑成为解决 350℃ 以上润滑的重要手段^[2-5](图 1-1)。

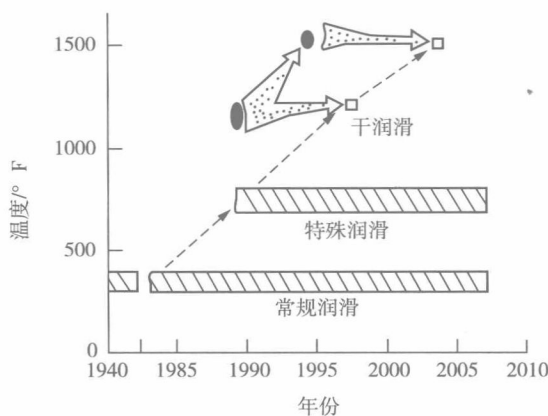


图 1-1 润滑剂的适用温度环境^[6]

按照经济合作与发展组织(OECD)制定的摩擦学名词术语,固体润滑的定义是:能保护相对运动表面免于损伤并减少其摩擦与磨损而使用的任何固体粉末或薄膜。在固体润滑过程中,固体润滑剂和周围介质要与摩擦表面发生物理、化学反应生成固体润滑膜,降低摩擦磨损。

我国科学家经过自 20 世纪 60 年代初结合国家“两弹一星”任务要求开展固体润滑材料研究以来,已先后发展了多种材料和润滑应用,如物理气相沉积润滑薄膜、黏结固体润滑涂层、金属基高温耐磨自润滑复合材料、聚合

物自润滑复合材料、纳米尺度润滑材料等,为国家航天航空、兵器、船舶及核技术领域解决了一系列具有特殊意义的润滑和磨损技术难题。目前固体润滑剂已在许多机械产品中应用,可在许多特殊、严酷工况条件下如高温、高负荷、超低温、超高真空、强氧化或还原气氛、强辐射等环境条件下有效地润滑,简化润滑维修,成为航天、航空与原子能工业发展所必不可少的技术。

但是,当前获得成功的固体润滑方式也有自身的技术缺点,制约着它们更广泛的使用,如自润滑复合材料的摩擦系数不够低、机械性能不够高、无冷却作用^[7];固-液二相润滑受液相的制约,适用的温度仍然局限于 $-60^{\circ}\text{C}\sim+350^{\circ}\text{C}$ ^[1],且固相的团聚与沉积往往还带来副作用;固体润滑膜的寿命相对较短,膜破坏后无法修复和重建^[8]。

近年来,直接将固体润滑剂干粉或者其他种类的微小颗粒持续不断的导入摩擦副,实现润滑的方式开始引起人们的重视^[9-11]。由于可以持续不断的导入,使其具有了补充和修复的功能;当用压缩气体导入颗粒时,可以利用流动气体散热和特种气氛保护摩擦界面。

1.1 颗粒流润滑界定

颗粒态在自然界广泛存在,颗粒尺度为 $1\text{ }\mu\text{m}\sim 10^4\text{ m}$ 的物质都可称为颗粒物质,所以沙石、浮冰、矿石、粮食以及药品都是颗粒物质,在日常生活中遇到的交通流、人流、散态物料输送、雪崩和泥石流都属于颗粒流。

颗粒材料是大量离散固体粒子的聚集。颗粒流指的就是颗粒材料在外力作用和内部应力状况变化时发生的类似于流体的运动状态^[12,13]。一般地讲,颗粒的间隙充满气体或液体物质,因此,严格说,颗粒流是多相流。但是,如果粒子是密堆积的或比间隙流体稠密得多,则描述流动时可以忽略间隙流体效应(非流态化),颗粒材料流通常指这种狭义上说的颗粒流动^[12]。当摩擦间隙中存在大量的颗粒态固体物质发挥润滑介质作用时,借鉴颗粒学中的颗粒流概念定义其为颗粒流润滑可以较好地体现其润滑机理的内涵。

颗粒流润滑是将固体材料以颗粒(粉末)状态直接导入摩擦副,使摩擦

间隙中处于充满固体颗粒状态,利用微小颗粒的摩擦、变形、碰撞、挤压和滑滚等微观运动,减少做相对运动的两表面的接触,保护表面免于损伤。几乎所有种类的固体粉末都可以根据实际情况选择作为颗粒介质,包括与固体润滑材料不同的高剪切强度、高硬度的固体材料。

颗粒流润滑属于多相介质润滑中的气固润滑类(如图1-2所示)。气固润滑根据流态的不同,可以分为流态化和非流态化两种。流态化的气固润滑是气体主导的润滑,理论上以气固两相流体力学为基础。颗粒流润滑主要针对非流态化的气固润滑,固体颗粒在润滑过程中占主导作用,基于非连续介质力学的散体力学更加适合作为它的理论基础。

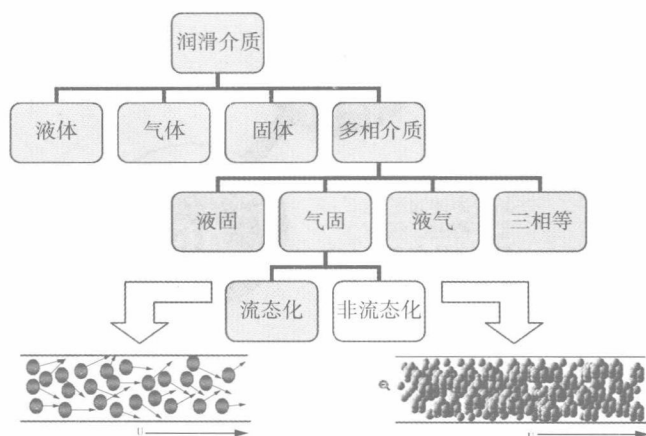


图 1-2 颗粒流润滑的界定

有多种将颗粒导入摩擦副间隙的方式。国标^[14]中定义了喷粉润滑(Gasentrained lubrication:用气体将固体润滑剂吹入摩擦面的润滑方式)、粉浴润滑(Dusting bath lubricaiton:使摩擦副处于飞扬固体润滑剂粉末空间的润滑方式)、转移膜润滑(Transfer film lubrication:利用固体润滑的压制物的磨损产物转移到摩擦面上起润滑作用的润滑方法)。这些导入方式同样适用于颗粒流润滑。

颗粒流所属的气固两相润滑具有自身的特点,它与自润滑材料及固体润滑涂层的优缺点对比如图1-3所示。相对而言,它的优点在于:首先,它具有传统固体润滑低摩擦、宽温度范围、无油、耐特种环境等特点;

其次,干颗粒导入时的载体——空气或特种气体可以实现摩擦副冷却的效果;再次,因为颗粒的可补充性,可能实现类似流体润滑的长寿命的颗粒流润滑;最后,利用润滑中颗粒相种类或成分的调整,可以适应润滑状态的改变,也可能实现磨损表面的修复和再生。颗粒流润滑的主要缺点在于:首先,可能需要粉、气输送装置,增加了系统的复杂度;其次,在开放式系统中,需要控制粉的弥漫污染问题;再次,必要时需要采取特殊措施增加粉的导入性。

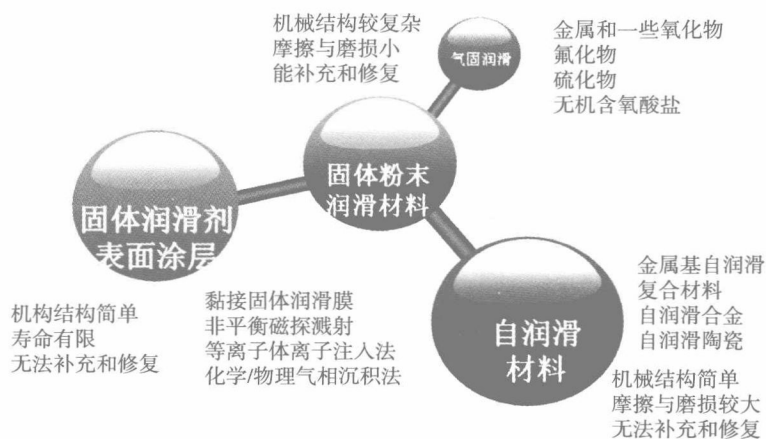


图 1-3 气固润滑、自润滑材料、固体润滑涂层的对比

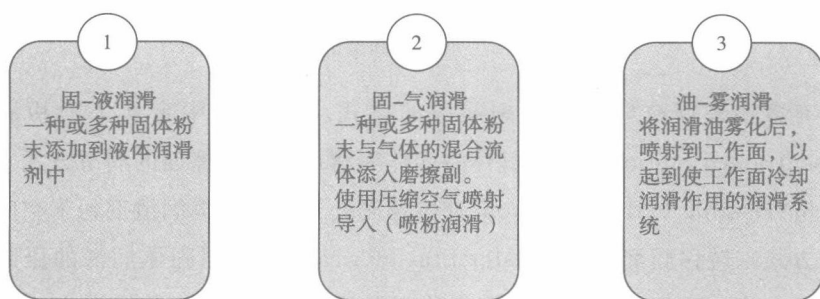


图 1-4 两相润滑

多相介质润滑是近年来比较热门的摩擦学研究领域,也取得了很大成功。气-固润滑与固-液、油-雾等润滑方式一样属于多相介质润滑,不同点是两相的组成不同。固-液和油-雾润滑已经在工业上大量应用,气-固润滑的