

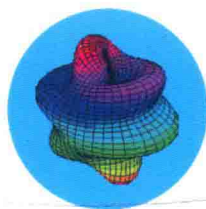


973、863、国家自然科学基金项目系列专著

自润滑复合材料 与高效重载滑动螺旋副

ZIRUNHUA FUHE CAILIAO YU
GAOXIAO ZHONGZAI HUADONG LUOXUANFU

周先辉 著



华中科技大学出版社
<http://www.hustp.com>

973、863、国家自然科学基金项目系列专著

自润滑复合材料 与高效重载滑动螺旋副

周先辉 著

华中科技大学出版社
中国·武汉

内 容 简 介

在阐述低速重载滑动面用自润滑复合材料的制备工艺及相关性能的基础上,本书对自润滑复合材料在螺旋面上的成形工艺、自润滑滑动螺旋副的工作性能及结构设计进行了相关论述。全书共7章,较详细地论述了高效重载滑动螺旋副构想,螺旋传动的效率与载荷分析,树脂基复合材料制备与摩擦学表征,CF-EP复合材料的制备及其干摩擦磨损性能,油润滑下CF-EP复合材料的摩擦磨损性能,复合材料螺母的制备及性能测试,最后对800 kN螺旋精压机用螺旋副的钢基体进行了结构与优化。

本书可供从事聚合物基自润滑复合材料研究和生产的科技人员参考,也可供大专院校材料加工工程、机械工程、材料科学与技术等领域本科生和研究生阅读。

图书在版编目(CIP)数据

自润滑复合材料与高效重载滑动螺旋副/周先辉著. —武汉:华中科技大学出版社,2015.10
ISBN 978-7-5680-1333-8

I. ①自… II. ①周… III. ①自润滑材料-联结件-研究 IV. ①TH131

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第263327号

自润滑复合材料与高效重载滑动螺旋副

周先辉 著

策划编辑:严育才

责任编辑:姚 幸

封面设计:范翠璇

责任校对:李 琴

责任监印:朱 玢

出版发行:华中科技大学出版社(中国·武汉)

武昌喻家山 邮编:430074 电话:(027)81321913

录 排:武汉楚海文化传播有限公司

印 刷:虎彩印艺股份有限公司

开 本:710mm×1000mm 1/16

印 张:11.5

字 数:245千字

版 次:2015年12月第1版第1次印刷

定 价:29.80元



华中出版

本书若有印装质量问题,请向出版社营销中心调换
全国免费服务热线:400-6679-118 竭诚为您服务
版权所有 侵权必究

前 言

制造技术是社会经济发展的基础,成形加工是制造技术的重要组成部分。20世纪末出现的一种基于交流伺服电动机的数字化重载机械驱动技术,将高新技术与传统机械技术相结合,对推动成形装备的更新换代具有不可估量的影响。工业发达国家对此技术十分重视,短短几年,其应用领域已经从注塑机发展到折弯机、机械压力机、数控回转头压力机、螺旋压力机等多种成形设备。

重载螺旋副是成形装备中应用广泛的关键部件,由于其摩擦损失大、传动效率低,使成形装备的性能进一步提高受到了严重制约。成形装备的新发展迫切需要一种效率高、承载能力强、动态性能好、结构简单、价格低廉的新型螺旋传动方式。

滑动摩擦副因承载力高、工作平稳可靠等优点而广泛用于各类重载设备中,导轨、轴承、螺旋副是此类摩擦副应用的典型代表。工作在重载下的滑动摩擦副不仅有着高的力学性能要求,更需良好的摩擦学性能,以降低驱动功率消耗,克服低速抖动与爬行。当其工作在低速工况下时,又因液体润滑油膜难以形成而更进一步提高了对材料摩擦学性能的要求。

笔者近年来在国家自然科学基金和广东省自然科学基金的资助下,针对常规滑动螺旋存在的问题开展了碳纤维增强聚合物基自润滑复合材料的研究,提出了一种新型自润滑重载滑动螺旋副。新型螺母以钢为基体,内螺纹衬层为碳纤维织物增强环氧自润滑复合材料。螺旋面摒弃传统的切削加工,而采用成形加工,同时形成润滑油道,兼有优良的减摩耐磨性能和高的承载能力。目前,虽然已有大量的关于自润滑复合材料摩擦学性能的研究报道,但针对这些自润滑材料在机械传动中的工程应用研究却很少,关于自润滑复合材料在滑动螺旋面上的应用研究国内外尚属空白,钢背-自润滑复合材料衬层新型螺母的开发,是对自润滑复合材料工程应用的有益尝试。

由于水平所限,文中不足甚至错误在所难免。将目前的研究成果汇集出版,希望能将其与同行分享,也欢迎读者对其中的不足之处给予指正。本书的出版得到了国家自然科学基金(51105211)的资助;同时,也得到了广东工业大学孙友松教授的大力支持和帮助,在此表示诚挚的感谢。

周先辉于南阳理工学院

2015年4月

符 号 表

符 号	名 称	单 位	符 号	名 称	单 位
d	螺纹公称直径	mm	t	时间	s
P	螺距	mm	R	摩擦试环半径	mm
λ	螺旋升角	°	F_s	试环稳态载荷	N
m	螺纹线数	—	F_1	试环启动载荷	N
n	旋合圈数	—	n_s	试环稳态转速	n/min
h	牙厚	mm	n_1	试环启动转速	n/min
μ	摩擦因数	—	p_s	环境压力	MPa
μ_v	当量摩擦因数	—	$\bar{p}$	槽、台区内压力	MPa
φ	摩擦角	°	η	润滑油动力黏度	Pa·s
η	传动效率	—	$\bar{q}$	体积流量	—
β	螺旋面牙型斜角	°	$\widetilde{P_Q}$	槽、台区平均流量	—
F	轴向载荷	N	α	油槽螺旋角	°
B	螺母单边壁厚	mm	$\bar{b}_g$	槽宽系数	—
δ	螺纹变形量	N	$\bar{h}_g$	槽深系数	—
Q	试验螺旋副轴向载荷	N	v	滑块工作速度	mm/s
k_E	能容量系数	—	p	螺旋面工作压力	MPa
T_1	驱动力矩	N·m	T	力矩	N·m
k_T	驱动力矩的增大倍数	—	J	转动惯量	kg·m ²
G	刚度	N/mm	E	弹性模量	MPa

目 录

第 1 章 高效重载滑动螺旋副构想	(1)
1.1 数控重载驱动与新型滑动螺旋副	(1)
1.1.1 成形装备的新发展——伺服压力机	(1)
1.1.2 数控重载驱动技术	(2)
1.1.3 螺旋传动在伺服压力机中的地位及存在的问题	(5)
1.1.4 新型高效、重载、精密滑动螺旋副的构想及开发关键	(6)
1.2 重载传动件摩擦学性能改善途径	(7)
1.2.1 金属背衬自润滑层材料与工艺	(7)
1.2.2 自润滑材料整体成形	(10)
1.2.3 边界润滑摩擦面固体润滑涂层技术现状	(11)
1.3 环氧润滑耐磨涂层摩擦学性能影响因素与发展	(12)
1.3.1 涂层摩擦学性能影响因素	(13)
1.3.2 环氧润滑耐磨涂层有待解决的问题	(14)
1.3.3 织物增强的树脂基衬层	(15)
1.4 碳织物增强聚合物基自润滑材料摩擦学研究现状与发展	(16)
1.4.1 聚合物基体	(17)
1.4.2 组分改性	(19)
1.4.3 碳织物增强工艺及其对材料摩擦磨损性能的影响	(21)
1.4.4 摩擦磨损机理	(22)
第 2 章 螺旋传动效率与载荷分析	(25)
2.1 高效、重载、精密螺旋副实现途径分析	(25)
2.1.1 螺旋传动效率影响因素分析	(25)
2.1.2 螺旋升角与力能关系	(27)
2.1.3 高效、重载、精密滑动螺旋副实现途径	(28)
2.2 传动螺旋副螺纹轴向载荷分布计算	(30)
2.2.1 螺牙轴向载荷分布数学模型	(30)
2.2.2 系统弹簧组等效模型	(31)
2.2.3 等截面圆螺母螺纹载荷分布计算式	(33)
2.2.4 算例与验证	(35)
2.3 螺纹参数对螺纹轴向载荷分布的影响规律	(37)
2.3.1 力 F 的分布位置	(37)
2.3.2 螺纹圈数 n	(38)

2.3.3	螺母、螺杆材料的弹性模量比值 E_N/E_S	(39)
2.3.4	牙厚 h 与螺距 P	(40)
2.3.5	螺母壁厚 B	(40)
2.3.6	降低螺纹轴向载荷、提高分布均匀性的途径	(41)
第3章	树脂基复合材料制备与摩擦学表征	(43)
3.1	基体材料	(43)
3.1.1	基体材料的组分及其作用	(44)
3.1.2	基体材料的工艺性	(46)
3.1.3	高性能树脂基体	(47)
3.2	碳纤维及中间基材	(49)
3.2.1	碳纤维种类	(49)
3.2.2	中间基材	(50)
3.2.3	热塑性树脂用中间基材	(55)
3.3	聚合物基复合材料制备工艺	(56)
3.3.1	复合材料预浸料、预混料的制备	(57)
3.3.2	手糊成形	(65)
3.3.3	袋压成形	(66)
3.3.4	缠绕成形	(67)
3.3.5	拉挤成形	(68)
3.3.6	模压成形	(69)
3.3.7	树脂传递模塑	(70)
3.3.8	纤维增强热塑性聚合物(FRTP)成形技术	(71)
3.3.9	注射成形	(72)
3.4	聚合物复合材料摩擦学表征与摩擦磨损影响因素	(73)
3.4.1	摩擦学特性的表征	(73)
3.4.2	摩擦学过程的主要影响因素	(76)
3.4.3	聚合物复合材料摩擦磨损的影响因素	(78)
第4章	CF-EP 复合材料的制备及其干摩擦磨损性能	(82)
4.1	引言	(82)
4.2	材料制备及测试方法	(84)
4.2.1	原料和样品制备	(84)
4.2.2	性能测试及表面分析方法	(85)
4.2.3	复合材料试样制备参数	(86)
4.3	制备工艺对复合材料干摩擦磨损性能的影响	(87)
4.3.1	湿法及半干法工艺	(87)
4.3.2	纤维布的含胶量	(87)
4.3.3	固化剂	(89)

4.4	复合材料组分对干摩擦磨损性能的影响	(90)
4.4.1	MoS ₂ 、石墨与 PTFE 单组分	(90)
4.4.2	MoS ₂ 与石墨组分分配比	(92)
4.4.3	黏结树脂	(93)
4.5	复合材料干摩擦磨损机理	(93)
4.5.1	纯 CF-EP 复合材料	(93)
4.5.2	MoS ₂ 、石墨与 PTFE 单组分改性 CF-EP 复合材料	(95)
4.5.3	MoS ₂ 、石墨与 PTFE 共同改性的 CF-EP 复合材料	(97)
4.5.4	含胶量低的 CF-EP 复合材料	(99)
4.6	CF-EP 复合材料制备中常见缺陷及防治	(99)
4.6.1	气泡	(99)
4.6.2	分层	(100)
4.6.3	固化不良	(100)
第 5 章	油润滑下 CF-EP 复合材料的摩擦磨损性能	(101)
5.1	无油槽浸油润滑下 CF-EP 复合材料摩擦磨损性能	(101)
5.1.1	测试条件	(101)
5.1.2	不同稳态载荷下的摩擦特性	(102)
5.1.3	启动载荷的影响	(103)
5.1.4	速度对摩擦因数的影响	(104)
5.1.5	碳织物的影响	(105)
5.2	油润滑下 CF-EP 复合材料摩擦磨损机理分析	(106)
5.2.1	磨损表面形貌分析	(106)
5.2.2	摩擦接触模型分析	(108)
5.3	环面油槽设计	(109)
5.3.1	环面对数螺线油槽结构	(110)
5.3.2	螺线油槽表面的抽运作用	(111)
5.3.3	油槽承载能力	(113)
5.3.4	试环油槽尺寸优化	(114)
5.4	环面油槽润滑对复合材料摩擦磨损性能的影响	(116)
5.4.1	斜向直线油槽对摩擦因数的影响	(116)
5.4.2	对数螺线油槽对摩擦因数的影响	(118)
5.4.3	对数螺线油槽复合材料摩擦因数与速度的关系	(119)
5.4.4	摩擦磨损分析	(121)
第 6 章	复合材料螺母的制备及性能测试	(123)
6.1	碳纤维增强复合材料螺母的制备	(123)
6.2	螺旋传动效率测试系统	(126)
6.2.1	测试装置设计	(126)

6.2.2	效率测试原理	(127)
6.2.3	测试螺纹基本参数	(128)
6.2.4	测力传感器的选择	(129)
6.2.5	测试基本参数设定	(129)
6.3	CF-EP 复合材料螺母-钢质螺杆效率测试	(129)
6.3.1	四种工况下的 F_x-t 特性	(130)
6.3.2	螺母力矩随载荷的变化	(131)
6.3.3	摩擦因数随载荷的变化	(133)
6.3.4	螺旋副的传动效率	(135)
第 7 章	精密螺旋压力机用螺旋副结构与优化	(136)
7.1	螺旋压力机概述	(136)
7.1.1	螺旋压力机发展简史	(137)
7.1.2	几种典型的螺旋压力机	(137)
7.1.3	螺旋压力机的发展	(140)
7.2	螺旋副结构设计	(141)
7.2.1	主要工作参数	(141)
7.2.2	螺旋副设计计算	(142)
7.3	衬层螺旋副对传动系统的影响	(145)
7.3.1	传动效率	(145)
7.3.2	驱动力矩	(146)
7.4	螺旋副有限元分析	(147)
7.4.1	模型及网格划分	(148)
7.4.2	建立接触对	(148)
7.4.3	施加载荷、边界条件和求解	(149)
7.4.4	后处理	(149)
7.5	螺母结构优化	(151)
7.5.1	等截面铜、钢圆螺母螺纹载荷分布对比	(152)
7.5.2	钢螺母结构对螺纹载荷分布的影响	(154)
7.5.3	改善钢基螺母螺纹轴向载荷分布的优化结构	(156)
附录 A	800 kN CNC 精密螺旋压力机电动机力矩计算	(158)
附录 B	试环油槽尺寸优化分析 MATLAB 程序	(161)
附录 C	螺旋副效率测试装配设计	(164)
参考文献		(165)

第 1 章 高效重载滑动螺旋副构想

滑动摩擦副因承载力高、工作平稳可靠等优点而广泛用于各类重载设备中,导轨、轴承、螺旋副是此类摩擦副应用的典型代表。滑动导轨因易与其他导轨技术(如磁浮)形成复合型精密导轨而备受关注,球面滑动轴承(关节轴承)已成为许多装备中不可或缺的关键零部件,重载螺旋副更是许多重型装备中的关键部件。工作在重载下的滑动摩擦副不仅要求有高的力学性能要求,更需良好的摩擦学性能,以降低驱动功率消耗,克服低速抖动与爬行。而当其工作在低速工况下时,又因液体润滑油膜难以形成而更进一步提高了对材料摩擦学性能的要求。如何获得高承载能力、低摩擦因数和耐磨性优良的新型滑动摩擦副成为各类重载设备的关键技术问题。

1.1 数控重载驱动与新型滑动螺旋副

1.1.1 成形装备的新发展——伺服压力机

压力机械与金属切削设备相比,其伺服化、数字化的开发进程落后数十年。20 世纪 90 年代中期,伺服压力机问世,日本各著名的压力机制造厂商,如 AIDA、KOMATSU、AMINO、ENOMOTO 等公司均投入大量人力物力进行开发,并推出了商品化的产品。AIDA 公司将其开发的这种新型压力机称为“第三代压力机”,认为这一产品的问世具有划时代的意义^[1]。KOMATSU 公司将伺服压力机称为具有柔性的压力机,图 1-1 所示为该公司 1998 年的 HCP3000,2001 年的 H2F/H4F 系列和 2002 年的 H1F 系列伺服压力机产品。



图 1-1 KOMATSU CNC 伺服压力机系列产品

AMINO 公司开发的世界上最大的伺服压力机——25000 kN 机械连杆伺服压力机,在 2005 年 3 月,同时获得了日本第 17 届中小企业优秀新技术奖、新制品奖、优秀奖、技术经营特别奖等几项大奖,这也是日本和世界上首次对伺服压力机进行奖励^[2]。欧洲一些压力机厂商也加入大型伺服压力机开发行列,如德国 SCHULER 公司在 2007 年北京国际机床展(CIMT07)上推出了 2500~6300 kN 的伺服压力机系列产品^[3]。

采用 CNC(计算机数字控制)装置的伺服压力机,可以对滑块的位置、速度、输出力进行控制,同一台设备可以根据工艺需要采用不同的滑块运动曲线^[4](见图 1-2),设备柔性化程度大大提高。随着其在汽车零件、电子零件等高精度、难成形零件加工领域中的应用日益广泛,并由于其优良的节能性,伺服压力机显示出了其他压力机所无法比拟的优越性^[2,5-8]。通过对滑块输出力的控制,汽车制造中高强度钢板、铝合金板材的大型覆盖件的精密成形成为可能;通过控制压力机滑块运动轨迹,可数倍地提高模具寿命、改善压力机的工作环境、降低噪声和振动(25000 kN 机械连杆伺服压力机的噪声仅为 75 dB^[2]),为拓展新的成形加工工艺和模具制造方法提供了广阔前景;通过简化传动环节,省去飞轮、离合器及采用能量回收等技术,大大提高了传动效率,节省了能量。日本 ENOMOTO 公司开发的基于这一技术的螺旋压力机节能可达 50%^[9],而 AMINO 公司声称所开发的伺服压力机较油压机节能 2/3^[2],小松 AMERICA 曾进行过 3000 kN 机械压力机连续工作功耗对比试验,结果证明伺服压力机节能 32%~42%^[10]。

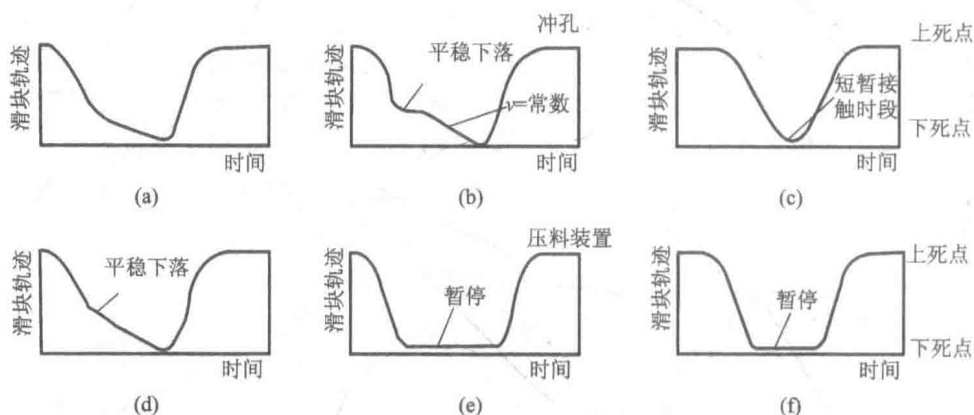


图 1-2 压力机理想的滑块运动轨迹^[4]

(a) 冷挤压;(b) 深拉伸;(c) 锻压;(d) 落料;(e) 拉深;(f) 压印

1.1.2 数控重载驱动技术

1. 驱动装置

驱动装置是所有机械装备的核心,它提供装备所需动力并实现所需的运动。成形装备的传动形式通常有机械传动和液压传动两种。机械传动具有价格低廉、结构

简单、工作可靠、生产率高等优点,在成形装备中得到了广泛应用。液压传动具有功率大、压力、速度、位移均可控的特点,因而在成形装备中也得到了广泛应用。在高性能的系统中,则采用液压伺服驱动技术,如数控液压机、数控液压折弯机、数控回转头压力机、注塑机、压铸机等。与机械传动相比,这种系统有许多优点,但其生产效率一般比较低,而且能耗大、效率低,可靠性差、故障率高,油液泄漏易造成环境污染且易引发火灾,控制系统复杂,机构庞大等。

长期以来,电动机调速和控制主要依赖直流电动机,由于调速设备价格高和结构复杂,只有轧钢机等少数要求较高的设备才采用电动机调速,一般成形设备的控制则比较简单,均采用普通交流异步电动机,速度、压力等参数不能动态调节。与液压系统相比,机械传动的成形装备最大的问题是其运动参数固定,调节困难。多年来,人们一直希望能增加机械成形装备的柔性,使设备的工艺参数能得到方便的调节,以便实现工艺参数优化,提高工作性能。

20世纪70年代以来,电力电子、电机、变频控制、计算机控制以及其他相关技术得到飞跃发展。20世纪末,出现了一种基于交流伺服电动机的数字化重载机械驱动技术,它以计算机控制的交流伺服电动机为动力,通过螺旋、曲柄连杆、肘杆或其他机构将电动机的旋转运动转换为滑块所需的直线运动。将其作为成形装备的主传动,不但可以大大提高设备的智能化水平、可靠性和使用性能,还可简化机械结构和设备调试安装工作,降低能耗,减轻重量,减少油液对环境的污染。它是高新技术与传统机械技术的结合,对于推动成形装备的更新换代具有不可估量的影响。工业发达国家对此技术十分重视,短短几年,其应用领域已经从注塑机发展到折弯机、机械压力机、数控回转头压力机、螺旋压力机等多种成形设备。

数控重载机械驱动系统是指基于交流伺服电动机和机械传动技术的、用于成形装备主传动的数控系统,它包括计算机控制系统、交流伺服驱动系统、变频控制系统、机械传动装置(曲柄连杆、肘杆、齿轮等)、储能装置等,其核心是重载交流伺服电动机及其控制系统。长期以来,重载伺服驱动场合均采用直流电动机,它具有调速范围广、性能好等优点,但其结构具有机械换向和电刷这一致命弱点,限制了它的进一步广泛应用。近年来,随着电力电子技术的发展、计算机控制技术以及现代控制理论的应用,交流调速技术飞速发展,在成本上更有竞争力,交流调速系统的优势日益明显。20世纪90年代初,交流永磁步电动机在国内外得到普遍重视,90年代末已将其应用于成形装备,尤其是锻压机械中。由于同步电动机比较容易实现电气制动,能储存制动能量,这对于间歇工作的成形装备具有十分重要的意义。它不但可以节能,而且对电网的影响较小。永磁同步电动机最大的问题是价格高昂,异步电动机虽价格低廉,但控制却相对复杂。目前实际应用中,异步电动机在较大型设备中用较多,而同步电动机则多用于中小型设备。

2. 常用传动方式

伺服电动机仅能提供一种可控的旋转运动,成形装备所需的常常是直线运动,这

中间必须有转换机构,目前采用的有螺旋机构、曲柄连杆机构、肘杆机构等。

螺旋副可以方便地将电动机的转动转换为直线运动,并具有一定的增力作用,且行程不固定,调节方便,配以伺服控制,可以达到很高的位置精度。图 1-3 所示为日本小松公司双点伺服螺旋式压力机的传动系统。两台伺服电动机通过同步传动带减速,驱动滚珠丝杠使滑块上下运动。滑块上的传感器提供反馈信号,组成闭环控制系统。由于螺旋传动比(导程)一定,电动机必须有较大的调速比,方可达到空行程快速和工作行程慢速的要求。在实际应用中,有时还必须采用双电动机驱动。出于对运动精度和传动效率的考虑,目前在数控重载机械驱动技术中广泛采用滚珠丝杠。而滚珠丝杠承载能力有限,价格高昂,妨碍了其在成形装备中的进一步推广。

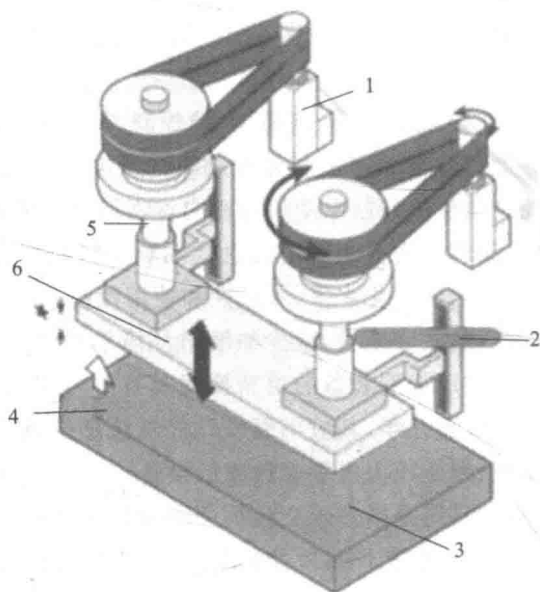


图 1-3 小松公司双点伺服螺旋式压力机传动原理图

1—伺服电动机;2—直线传感器;3—衬垫;

4—负荷;5—滚珠丝杠;6—滑块

图 1-4 所示为村田公司数控回转头压力机伺服驱动系统。伺服电动机通过齿轮减速带动曲轴旋转,再通过连杆带动滑块上下运动,位移传感器提供反馈信号。恒速驱动的曲柄连杆机构的运动曲线为正弦曲线,滑块在靠近下死点时,速度自动降低,增力比加大,因而可降低对电动机的调速比要求。在伺服驱动条件下,滑块的运动曲线可以在正弦曲线的基础上任意修正,实现最佳工艺条件。

与曲柄连杆机构相比,肘杆机构具有优良的特性曲线和更大的增力比,更适合于压力机工作,但结构稍复杂,行程相对较小。图 1-5(a)所示为日本小松 H2F 双点伺服压力机传动原理。两台伺服电动机通过传动带减速,带动滚珠丝杠运动,再通过肘杆机构带动滑块上下运动。该系统不仅有位移传感器,还有压力传感器以反馈压力信号。该设备实际上采用了“带—螺旋—肘杆”混合传动形式。

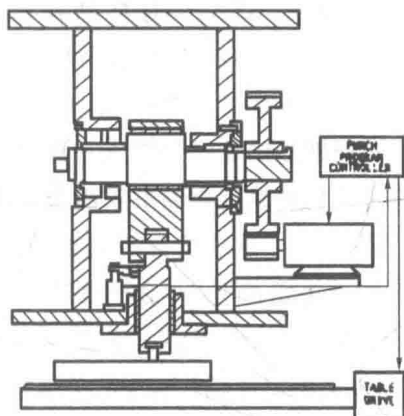


图 1-4 村田公司数控回转头压力机伺服驱动系统

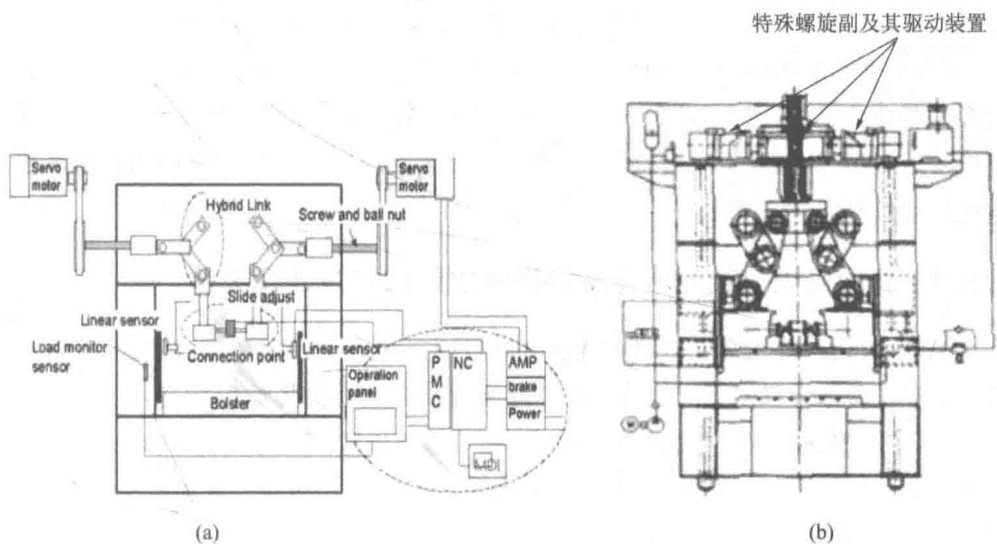


图 1-5 小松公司 H2F 双点伺服压力机中的混合传动形式

(a) KOMATSU H2F; (b) AMINO

1.1.3 螺旋传动在伺服压力机中的地位及存在的问题

螺旋传动可以直接将回转运动转换成压力机所需的直线运动。螺旋传动用于伺服驱动压力机,不仅可以大大简化传动链,提高机械传动效率,而且,采用螺旋传动方案的柔性运动压力机有其独特的优势^[11]。与曲柄连杆、肘杆、多杆、凸轮机构等传动方案相比,螺旋传动能实现等增力比,能使压力机运转平稳,同时,由于斜面效应,滑块在工作行程的各个位置均能实现等公称压力,滑块的有效工作行程大大高于采用其他传动方案压力机滑块的有效工作行程。因此螺旋传动驱动方式在柔性运动压力

机中占据重要的地位,有着广泛的应用^[2,3,9,10]。此外,为获得更大的增力比,制造更大吨位的压力机,电动机—减速—螺旋—肘杆的混合传动形式成为首选^[3],KOMATSU 公司的 H2F 及 AMINO 公司的大吨位双点伺服压力机传动系统中均采用了这一形式,图 1-5 表示了其传动原理。

鉴于伺服传动的要求,目前螺旋传动的伺服压力机多采用滚珠丝杠,如折弯机、压铸机、注塑机等。由于滚珠丝杠和螺母均需采用高合金钢制造,生产工艺复杂、生产流程长、成本高、价格高;此外,用于重载设备的滚珠丝杠的使用寿命普遍偏短,承载能力较弱,且不能承受大的冲击负荷^[12,13],这严重制约了它在数字化重载机械驱动技术中的推广应用。因此,开发低成本、高效、重载、精密的螺旋副成了在成形装备中进一步推广应用交流伺服电动机驱动亟待解决的关键技术难题之一^[3,9]。

解决该问题的出路之一是开发重载滚动丝杠,例如日本 NSK 公司生产了直径达 140 mm 的重载滚动丝杠系列产品^[13],但由于结构、工艺等方面的原因,目前尚难以得到普遍应用;其次是开发新型高效重载精密滑动螺旋副,如日本 AMINO 公司 25000 kN 机械连杆伺服压力机,对应较大的输出力和耐用性要求,采用了特殊螺旋副及其驱动装置(见图 1-5(b)),经过材质选择、表面处理、润滑剂挑选等多方面的研究以及近 10 年的现场生产考验,可以确保连续无故障工作,同时,驱动螺杆磨耗少,整机传动效率高达 75%^[2]。

1.1.4 新型高效、重载、精密滑动螺旋副的构想及开发关键

滑动、滚动与静压螺旋是螺旋传动中典型的三种形式(见图 1-6),目前用于压力机中均存在着一定程度上的缺陷。滑动螺旋传动是最初的传动形式,但在低速重载条件下,接触螺旋面常处于边界润滑状态,螺母磨损严重,摩擦因数较高,总传动效率仅为 0.3~0.4^[14,15],而且传动不稳定,易出现低速爬行和颤动。滚动摩擦因数仅为滑动摩擦因数的 2% 左右,滚珠丝杠自出现至今 60 多年来得到了飞速发展,广泛应用于高精度传动中^[16],但其在成本、载荷能力、使用寿命等方面的缺陷严重制约了它在数字化重载机械驱动技术中的推广应用^[9,10]。尽管美、日等国致力于研究滚珠丝杠副,但由于结构、工艺等方面的原因,目前尚难以在压力机上得到普遍应用。静压螺旋利用高压油将螺杆和螺母隔离,可形成良好的润滑。其传动效率可高达 99%,动态性能好,无爬行,但结构复杂,价格高昂,需特殊的液压系统,只适合用于一些有高精度、高效率要求的场合。德国采用该系统的螺旋压力机,仅液压系统的价格就占了设备造价的 10%^[10],且液压系统本身还耗能。限于成本和可靠性,该技术难以普遍推广应用。与滚动、静压螺旋副相比,滑动螺旋副是提高螺旋传动承载能力、降低成本的有效途径,而目前普通的钢-铜滑动螺旋副难以满足伺服压力机不断发展的要求,开发新型高效、重载、精密滑动螺旋副对伺服压力机的

发展具有重要的现实意义。

新型滑动螺旋副的开发需解决好以下四个关键问题。

(1) 新配对材料的开发 开发新的适合在重载条件下工作的摩擦材料,使其减摩耐磨性能优于目前重载滑动螺旋副常用的铜-钢配副,以降低螺母磨损、减小摩擦、提高传动效率。

(2) 新型螺旋副的制备工艺 将新型配对材料用于滑动螺旋面上,制备出满足重载工况的新型滑动螺旋副。

(3) 螺旋面润滑油道的设计与实现 设计能有效提高重载螺旋面流体润滑效果的润滑油道,并在新材料成形滑动螺旋面的制备工艺中,综合考虑润滑油道的成形工艺。

(4) 改进螺母结构 使各圈螺纹均匀受载,实现磨损均衡,提高承载能力及使用寿命。

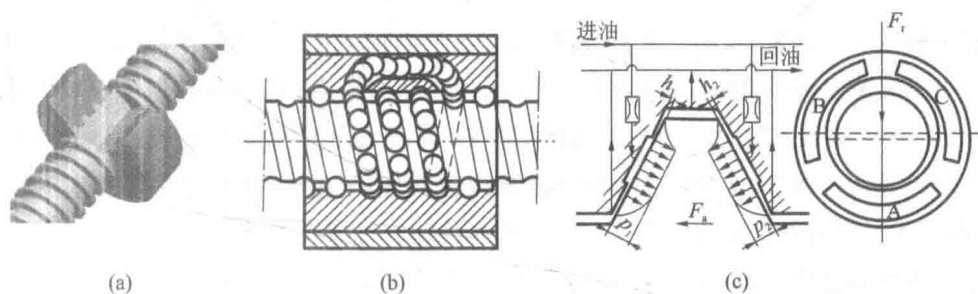


图 1-6 三种典型的螺旋传动形式

(a) 普通滑动螺旋副; (b) 滚珠丝杠副; (c) 静压螺旋副

1.2 重载传动件摩擦学性能改善途径

提高传动效率是新型滑动螺旋副开发的关键所在,为此,必须寻找适合于螺旋面的润滑技术,使新型滑动螺旋副在重载下的减摩耐磨性能优于目前常用的钢-铜配副。当前,固体润滑技术、各种减摩耐磨材料的发展及流体润滑理论等为重载滑动螺旋面摩擦学性能的改善提供了许多有益的借鉴。

1.2.1 金属背衬自润滑层材料与工艺

用于重载传动件上的自润滑层成形工艺目前主要有:黏涂、粉末冶金、弹性金属塑料瓦及工作面上镶嵌固体润滑材料等。

1. 黏涂法

黏涂法成形固体润滑涂层不仅工艺简单,施工不受温度、湿度等外界环境条件限

制,而且能在较低温度下涂覆于各种不同的材料上,避免被涂零件的热应力与变形,其应用日益广泛^[17]。环氧润滑耐磨涂层以其独有的优势在该领域内占据主要地位。20 世纪 70 年代,联邦德国 Waldrich Coburg 的 Hans Schmidt 塑料加工厂推出

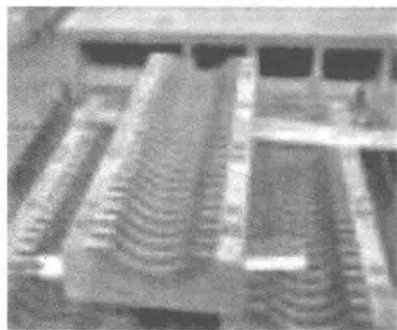


图 1-7 蜗母条涂层

SKC-3 环氧涂层,在重型和超重型机床的导轨、蜗杆齿条的齿面、镶条、压板、液压活塞等零件上都获得了成功的应用^[18]。1975 年,我国引进该技术,开始研制和推广应用润滑耐磨涂层材料,产品有广州机床研究所的 HNT 型、FT 型、JKC 型和北京第一机床厂的含氟耐磨涂层材料,在重型机床传动蜗母条(见图 1-7)和导轨上取得了良好的应用效果^[19-23]。目前,铁路

领域设备部件的润滑,电机转子轴、液压缸等在零件的快速修复,发动机活塞、轴承、球形万向联轴器等众多滑动摩擦副零件表面均可见采用该方法形成的自润滑涂层^[24-28],采用黏结型固体润滑涂层在航天领域也已经解决了许多润滑难题^[17]。开发新的涂层材料,提高其冲击强度、抗压强度和 pv 值,进一步改进涂层成分、优化配比以降低摩擦因数、提高耐磨性,优化涂层厚度和涂层结构,完善与开发新的涂层工艺、实现固/液润滑相互促进是提高新一代环氧润滑涂层工作性能的重要途径^[29]。

2. 粉末冶金工艺

粉末冶金工艺成形自润滑层常用锡青铜粉末^[30,31]、锡青铜纤维、锡青铜网^[32]等烧结形成多孔或蜂窝状多孔青铜基体结构^[33,34](见图 1-8),然后在低真空下浸渍或者涂覆减摩材料如 PTFE、 MoS_2 等固体润滑剂,或固体润滑剂与青铜粉一起烧结^[30,35]。典型代表有:中国科学院兰州化学物理研究所张招柱等人研究了由该工艺制得的钢背衬多孔青铜复合材料的摩擦学性能^[35],测得钢背衬多孔青铜-(PTFE+Pb)复合材料在干摩擦条件下与 45 钢对磨时摩擦因数为 0.07,极限 pv 值为 $8.82 \text{ MPa} \cdot \text{m/s}$,油润滑条件下 pv 值为 $120 \sim 135 \text{ MPa} \cdot \text{m/s}$;以色列 Holon 工学院 L. Rapoport 等人在 fullerene-like(IF)纳米粒子润滑油对多孔青铜复合材料摩擦学性能的影响方面做了一系列研究^[36-39],实验表明:IF- WS_2 纳米粒子浸入多孔青铜中的微孔后,可比普通油润滑条件下的摩擦因数小 30%~50%,摩擦因数可达 0.005^[36]。综合已有研究可知,粉末冶金工艺成形的涂层结合强度高、力学性能较好,常用于零件外表面上固体润滑层的成形。但用于内表面时,需采用剖分式模压烧结,工艺较复杂,且破坏了基体的整体性结构。