

DOI: 10.13228/j.boyuan.issn1006-6543.20220207

## 湿式离合器摩擦片表面油槽形式对带排扭矩及散热能力的影响

许成法<sup>1</sup>, 张坤<sup>2</sup>, 张登<sup>1</sup>, 张国洪<sup>1</sup>, 魏炳忱<sup>2</sup>, 胡铮<sup>3</sup>

(1. 杭州前进齿轮箱集团股份有限公司, 浙江 杭州 311203; 2. 中国科学院力学研究所 北京 100190; 3. 中国北方车辆研究所, 北京 100072)

**摘要:** 湿式离合器中的摩擦副在带排阶段, 由于润滑剂的粘性流体特性, 在摩擦副存在相对运动条件下会产生带排扭矩和能量损失, 这种现象严重影响使用寿命, 减少产品的安全性。针对这一问题, 基于 Navier-Stokes 方程, 采用有限元数值模拟仿真的方式, 设计分析了 12 种槽型共 24 个油槽方案探索降低带排扭矩和能量损失的方法, 结果表明螺旋槽与径向不通槽组合设计冷却效果好, 动摩擦因数高, 实验结果为摩擦片油槽设计提供了重要的参考依据, 具有重要的指导意义。

**关键词:** 湿式离合器摩擦片; 表面油槽; 带排扭矩; 散热能力

**文献标志码:** A **文章编号:** 1006-6543(2024)03-0054-06

## The investigation of effects of surface grooves on friction disc on drag torque and heat dissipation in wet clutches

XU Chengfa<sup>1</sup>, ZHANG Kun<sup>2</sup>, ZHANG Deng<sup>1</sup>, ZHANG Guohong<sup>1</sup>, WEI Bingzhen<sup>2</sup>,  
HU Zheng<sup>3</sup>

(1. Hangzhou Qianjin Gear Box Group Co., Ltd., Hangzhou 311203, China; 2. Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China; 3. North China Vehicle Research Institute, Beijing 100072, China)

**Abstract:** The friction pairs in wet clutches can cause drag torque and associated energy loss, when friction discs are not engaged, due to the viscous fluid nature of the lubricant subjected to relative motion between the friction pairs. This phenomenon is detrimental to the service life of wet clutches and causes concern of risk. In addressing this issue, based on the Navier-Stokes equation, a total of 12 groove designs with 24 configurations are designed and analyzed by means of finite element numerical simulation to explore the methods of reducing the drag torque and energy loss. The results show that the combination of spiral groove and radial non-slot design has good cooling effect and high dynamic friction coefficient. This paper provides an important reference for the design of friction pairs oil grooves, which is of great significance for guidance.

**Key words:** friction plate of wet clutch; oil groove on the surface; drag torque; heat dissipation capacity

湿式离合器是一种具有换挡平顺、工作寿命长等优点的换挡装置, 其被广泛应用于重载军用车辆、工程机械传动装置和乘用车自动变速器中<sup>[1-5]</sup>。湿式多片离合器是由若干摩擦片与对偶片相间组

成的, 在使用时由于需要润滑油降低离合器的温度, 故在摩擦片与对偶片分离状态时, 摩擦副间隙充满润滑油。

摩擦片和对偶片的组合是湿式离合器中扭矩、

**基金项目:** 国家国防科技工业局基础创新项目(237099000000170004)

**作者简介:** 许成法(1966—), 男, 正高级工程师, 主要研究方向为粉末冶金摩擦材料。

**收稿日期:** 2022-11-08

转速传递的核心组件。根据摩擦片和对偶片的相对运动状态,湿式离合器中的工作状态有三种,分别是带排状态、动态结合、连接状态<sup>[6-8]</sup>。在带排状态中,离合器的摩擦片与对偶片处于分离状态,由于主、从动端存在一定的转速差,根据流体力学基本方程可知,摩擦副间隙中的润滑油将产生剪切力,该剪力产生的扭矩为  $T = \iint_A dT = \mu\pi\omega(r_2^4 - r_1^4)/(2h)$ , 损耗功率为  $K = T\omega = \mu\pi\omega^2(r_2^4 - r_1^4)/(2h)$ 。这种由润滑油液的剪切作用产生的摩擦阻力矩,该转矩称为带排转矩。带排转矩的产生会引起能量的损失,表现为起离合器的功率下降,传动效率降低,同时会对润滑油液体产生加热作用,造成润滑油与摩擦副产品的温度升高,在高温下作业的摩擦副产品的磨损增加,降低摩擦副的使用寿命,并且由于摩擦副产品的磨损,换挡舒适性也大大降低,并对产品的可靠性产生不利影响。

减少带排扭矩的方法很多,其中比较容易实现的是在摩擦片上设计油槽对润滑油进行导流,这种导流作用将改变摩擦片表面润滑油的分布与流动规律,良好的油槽设计,可以减少润滑油剪切力,从而达到减少带排扭矩的作用,降低离合器产品的温度,提高离合器的使用寿命与产品可靠性。

实验利用有限元模拟仿真的方法,对不同的油槽设计方案开展数值仿真研究,得到了关于不同设计的优劣评价,为摩擦片油槽设计提供了有效的参考依据。

## 1 理论分析与有限元模型

### 1.1 理论分析

在摩擦片与对偶片的相对转动中,由于产生的压力并不大,可以近似假设润滑油为不可压缩液体,但润滑油的质量不可忽略,需要考虑液体的运动粘度,即粘度与密度的比值。

对于不可压缩液体的运动,需要采用纳维-斯托克斯(Navier-Stokes)方程(简称N-S方程)进行描述,在圆柱坐标下,N-S方程为<sup>[9]</sup>:

$$\begin{cases} -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial r} + F_r + \frac{\mu}{\rho} \left( \frac{\partial^2 V_r}{\partial r^2} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 V_r}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 V_r}{\partial z^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial V_r}{\partial r} - \frac{2}{r^2} \frac{\partial V_\varphi}{\partial \varphi} - \frac{V_r}{r^2} \right) \\ = \frac{\partial V_r}{\partial t} + V_r \frac{\partial V_r}{\partial r} + \frac{V_\varphi}{r} \frac{\partial V_r}{\partial \varphi} + V_z \frac{\partial V_r}{\partial z} - \frac{V_\varphi^2}{r} \\ -\frac{1}{\rho r} \frac{\partial P}{\partial \varphi} + F_\varphi + \frac{\mu}{\rho} \left( \frac{\partial^2 V_\varphi}{\partial r^2} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 V_\varphi}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 V_\varphi}{\partial z^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial V_\varphi}{\partial r} - \frac{2}{r^2} \frac{\partial V_r}{\partial \varphi} - \frac{V_\varphi}{r^2} \right) \end{cases} \quad (1)$$

其中,  $r, \varphi, z$  分别为圆柱坐标的径向、周向和垂直方向的坐标;  $V_r, V_\varphi, V_z$  分别为润滑油在三个坐标方向上的流速;  $F_r, F_\varphi, F_z$  分别为润滑油在三个坐标方向上所受外力;  $P$  为摩擦副间的压强;  $\mu, \rho$  分别为润滑油的粘度与密度;  $t$  为时间。

另外,在圆柱坐标下,流体连续方程为

$$\frac{\partial P}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial(\rho r V_r)}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial(\rho V_\varphi)}{\partial \varphi} + \frac{\partial(\rho V_z)}{\partial z} = 0 \quad (2)$$

上述的N-S方程反映了摩擦片与对偶片之间的润滑油粘性流体流动的基本流体力学规律,可以用来计算和衡量不同的油槽结构对剪切力的影响,进而确定不同油槽结构的带排损失。

但由于带油槽摩擦片设计结构复杂,无法直接通过对N-S方程求解得到理论解,只能采用数值模拟方式<sup>[10-12]</sup>,即有限元方法对N-S方程在给定的设计结构上进行求解,并根据有限元结果对油槽设计进行进一步的优化<sup>[13-15]</sup>。

### 1.2 有限元模型

湿式多片离合器的典型结构如图1所示,对湿式摩擦片空损带排过程进行有限元数值仿真分析需要构建三维建模,结合实际结构设计(见图2),确定实际模型中待分析液体、固体、气体和高温的能量区域等。本项目针对12种槽型共24个方案进行分析(详细结构设计方案见表3),不同槽型对应不同的几何模型和分析模型。

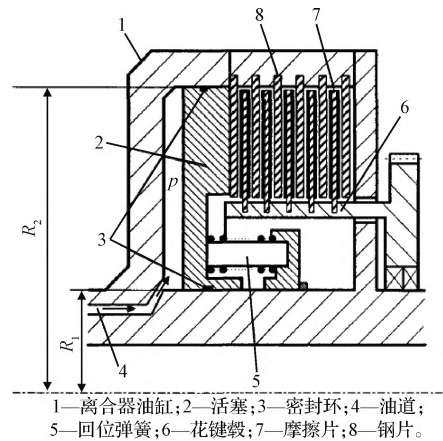


图1 湿式多片离合器结构示意图

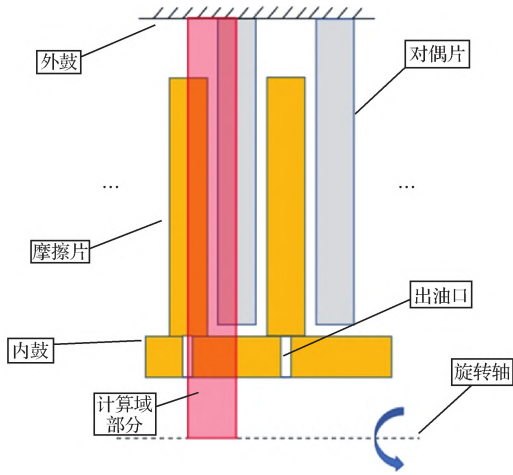


图2 摩擦片工作原理图

基本参数设定包括湍流模型的选择,两相流物质设定(包括随温度变化的密度、定压比热、热传导率、粘性等),工质表如表1所示,还需设定两相流交叉表面张力系数,给定旋转坐标系和转速等。

表1 润滑油工质参数

温度/°C	273	313	353	393
D 密度/(kg·m <sup>-3</sup> )	899	876	852	829
C <sub>p</sub> 比热/(J·kg <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> )	1 796	1 955	2 161	2 307
导热系数/(w·m <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> )	0.148	0.144	0.138	0.135
粘度/(kg·m <sup>-1</sup> ·s <sup>-1</sup> )	1.026	0.084 24	0.024 38	0.008 671 34

边界条件设定包括入口的流量的计算和设定,摩擦片表面能量设定,旋转坐标系附着设定,气液附着角度设定,对偶片表面能量设定,气液附着角度设定,出口设定,一些附加壁面设定等。

## 2 结构设计方案

为控制变速机构中功率损失,在摩擦性能满足要求的前提下应尽可能降低摩擦片空损带排、提高耐热性能。降低带排扭矩的一个重要解决途径是通过优化摩擦片表面沟槽结构减小冷却油液的剪切力矩。为此,应用流场仿真分析软件建立了摩擦片的典型沟槽状态(螺旋槽+径向平行槽)和各改进方案(变油槽形式:双圆弧槽、螺旋槽+径向斜槽等,变设计尺寸:不同螺距、不同槽宽等)的仿真分析模型,通过分析摩擦片在典型带排转速、较高带排转

速下形成的带排扭矩,完成改进方案优选,为摩擦片表面沟槽设计提供依据。

经过相关分析,在摩擦带尺寸不变和摩擦面积基本不变的前提下,通过改变油槽形式(双圆弧槽、螺旋槽+径向斜槽等)、改变结构尺寸(不同螺距、不同槽宽、不同等分数等)等方式初步拟定了油槽优化方案,见表2。

表2 不同油槽形式分析方案

方案标号	表面沟槽特征	典型尺寸	摩擦面积/mm <sup>2</sup>
A	螺旋槽+径向平行槽	螺距3 8组径向平行槽	11 243
B	螺旋槽+斜槽	螺距3 6组顺时针斜槽	11 550
C	螺旋槽+斜槽	螺距5 6组逆时针斜槽	11 613.4
D	螺旋槽+斜槽	螺距5 6组顺时针斜槽	11 610
E	双圆弧槽	36等分,槽宽 1.8	11 406
F	双圆弧槽	48等分,槽宽 1.5	11 581

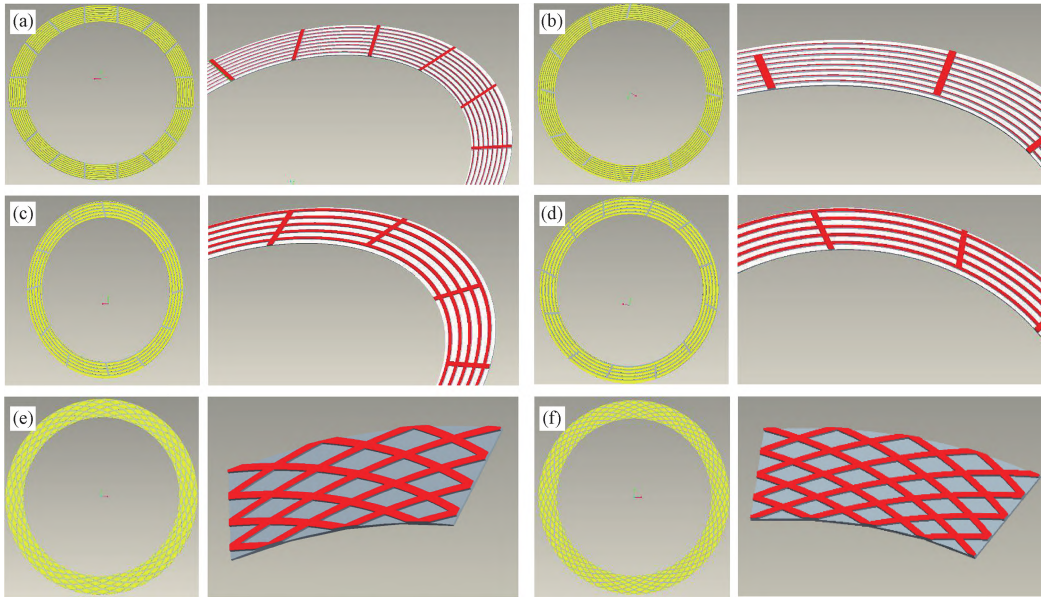
摩擦片表面沟槽形式和流体分析域如图3所示。

在现有的离合器带排扭矩理论计算模型中,仅能考虑较单一的表面沟槽形式,如径向槽、双圆弧槽或环形槽,对典型的螺旋槽+径向槽无法准确估量,为此,构建了摩擦片带排扭矩三维流场仿真分析模型,完成多种沟槽形式摩擦片的带排扭矩对比分析。

由于螺旋槽不可以进行周期性简化,因此,对包含螺旋槽特征的摩擦片采用整体建模,对双圆弧槽摩擦片采用周期性对称结构建模。建立摩擦片带排扭矩流场仿真分析模型,摩擦片带排扭矩流场仿真有限元模型如图4~7所示。在FLUENT流场分析软件中进行了流场仿真分析。

## 3 数值模拟结果及分析

对多种表面沟槽方案的摩擦片,进行了转速2 200、3 000 r/min等多种工况下的带排扭矩仿真计算,并对结果进行了对比分析,见表3。



(a) 方案A; (b) 方案B; (c) 方案C; (d) 方案D; (e) 方案E; (f) 方案F。

图3 不同方案的摩擦片表面沟槽形式和流体分析域

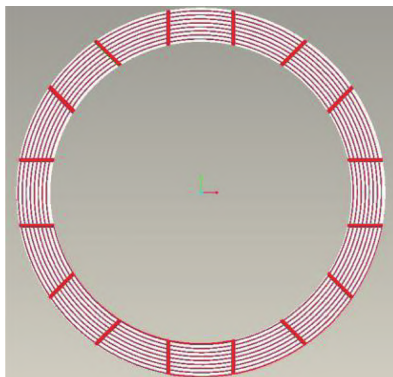


图4 螺旋槽摩擦片整体流场仿真模型

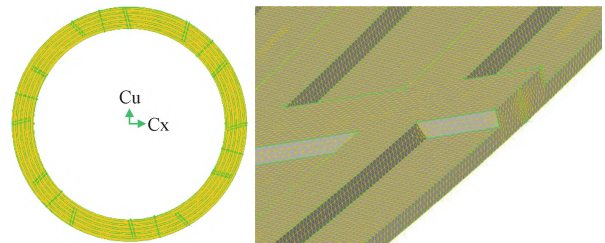
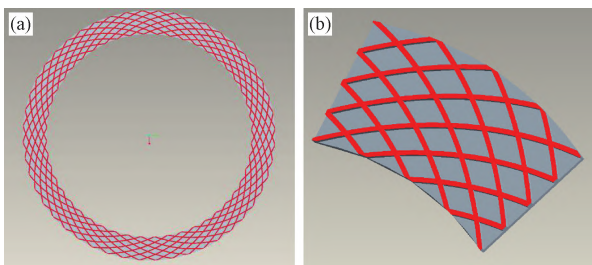


图6 螺旋槽整体模型网格



(a) 整体流场; (b) 1/12模型。

图5 双圆弧油槽摩擦片周期性流场仿真模型

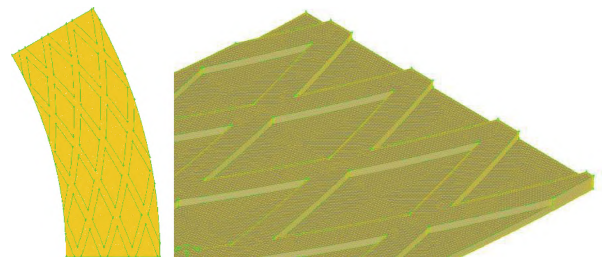


图7 双圆弧槽周期性模型网格

表3 不同表面沟槽方案的带排扭矩分析结果

	方案A	方案B	方案C	方案d	方案E	方案F
转速/(r·min <sup>-1</sup> )	螺旋槽螺距3	螺旋槽螺距3	螺旋槽螺距5	螺旋槽螺距5	双圆弧槽	双圆弧槽
	径向平行槽	6组斜槽	6组逆时针斜槽	6组顺时针斜槽	36等分,槽宽1.8	48等分,槽宽1.5
2 200	1.781 9	1.735 7	1.614 1	1.416 5	1.454 9	1.498 9
3 000	2.641 0	2.584 4	2.574 2	2.289 6	2.375 6	2.477 9
4 000	3.868 7	3.952 1	5.252 5	3.715 6	3.634 6	3.769 1

根据图8各种表面沟槽方案的带排扭矩对比分析,采用双圆弧槽或改变螺旋槽螺距及径向槽倾角可以改变摩擦片带排扭矩。根据仿真结果,双圆弧槽(36等分)和螺旋槽(加斜槽)均表现出较好的带排特性,但表面沟槽同时还会影响到摩擦性能以及散热冷却表现,应综合以上三方面因素完成最后方案确定。

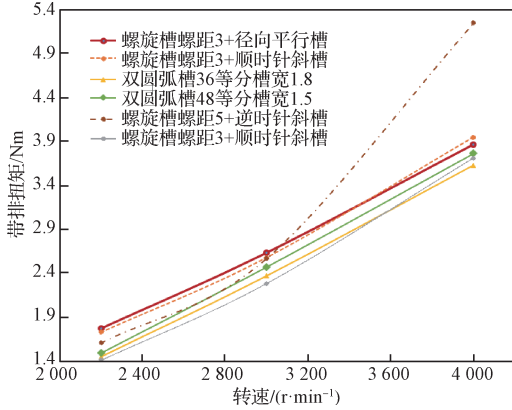


图8 各方案带排扭矩对比分析图

基于螺旋槽+径向通槽的槽型,对三种不同槽形截面的空损扭矩和油槽换热能力进行了定性对比分析,结果见表4。

表4 不同槽型截面的扭矩与换热能力对比

	转速/ (r·min <sup>-1</sup> )	扭矩/Nm	油槽换热能力/W
三角形截面槽	1 729.1	-1.495 988 96	1 327.959 6
梯形截面槽	1 729.1	-1.154 914 48	1 297.832 5
圆弧底截面槽	1 729.1	-1.285 472 4	1 383.168 7

根据分析结果,在典型转速条件下,梯形截面槽的带排扭矩最小,但是换热能力略低。进一步,以螺旋槽为研究对象,分析径向通槽和径向不通槽的影响,结果如图9~12所示。

由表5径向通槽和径向不通槽表面动压和表面对流换热系数的仿真结果可知,相比于螺旋槽与径向通槽组合,螺旋槽与径向不通槽组合的冷却效果好,动摩擦因数高。表面换热系数达到了235.74 W/m<sup>2</sup>·K。

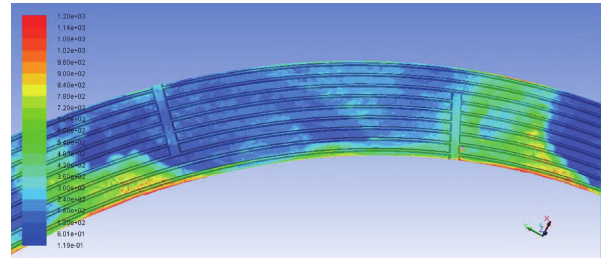


图9 RPM1100径向不通槽摩擦片表面对流换热系数

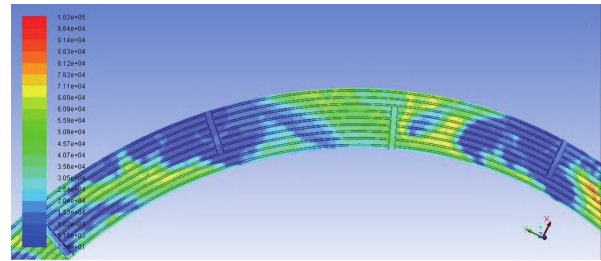


图10 RPM1100径向不通槽摩擦片表面动压

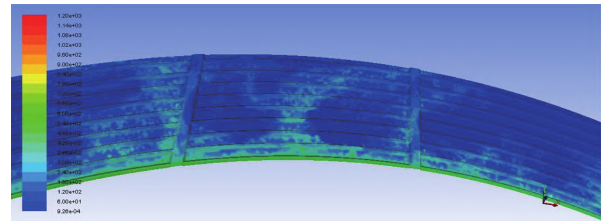


图11 RPM1100径向通槽摩擦片表面对流换热系数

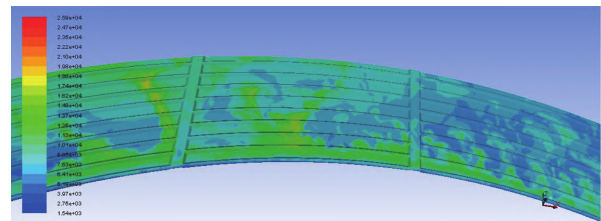


图12 RPM1100径向通槽摩擦片表面动压

表5 摩擦片(径向通槽和径向不通槽)的仿真结果

转速/(r·min <sup>-1</sup> )	全通道扭矩/Nm	面积/m <sup>2</sup>	全通道热流率/W	底部表面换热系数/(w·m <sup>-2</sup> ·K <sup>-1</sup> )	顶部表面换热系数/(w·m <sup>-2</sup> ·K <sup>-1</sup> )	沟槽表面换热系数/(w·m <sup>-2</sup> ·K <sup>-1</sup> )	表面换热系数/(w·m <sup>-2</sup> ·K <sup>-1</sup> )	备注
1 100	0.108	0.038	1 483.85	582.77	226.62	100.63	121.88	通槽
1 100	0.329	0.039	2 847.01	991.28	172.36	226.77	235.74	不通槽

## 4 结论

(1)油槽具有散热功能,油槽为冷却油提供通道,当摩擦副接合时,冷却油经过油槽与摩擦表面

进行热交换,使摩擦表面快速冷却。在一定冷却油量条件下,槽型对冷却效果有很大差别。

(2)螺旋槽与径向槽组合,综合螺旋槽和径向槽的优点,摩擦因数高,冷却散热快,是一种适合高

负荷摩擦装置中摩擦片槽形。螺旋槽与不通径向槽组合,冷却油由内径向槽引入,经一段螺旋槽冷却后,再由外径向槽排出,形成油束强制冷却,冷却效果好,动摩擦因数高。

#### 参考文献:

- [ 1 ] 王欢,崔露兴,葛帅帅,等.湿式离合器温度场仿真分析及沟槽结构优化研究[J/OL].机械科学与技术,1-7[2024-04-09].<https://doi.org/10.13433/j.cnki.1003-8728.20240019>.
- [ 2 ] 蒋凯,李华,陈思,等.湿式摩擦离合器多目标优化设计[J].机械传动,2023,47(05):57.
- [ 3 ] 张迎东.高功率密度湿式摩擦离合器结构优化设计与接合特性研究[D].长沙:中南大学,2022.
- [ 4 ] 韩旭鑫,吴娜,王习文,等.湿式离合器摩擦副摩擦特性机理探究[J].汽车科技,2022(04):84.
- [ 5 ] 赵二辉,邵波,乔妙杰,等.湿式离合器局部润滑与摩擦特性的温升影响研究[J/OL].摩擦学学报,1-18[2024-04-09].<https://doi.org/10.16078/j.tribology.2023049>.
- [ 6 ] 韩旭鑫,吴娜,王习文,等.湿式离合器摩擦副摩擦特性机理探究[J].汽车科技,2022,(04):84.
- [ 7 ] 刘磊.湿式摩擦离合器流场分析及带排转矩特性研究[D].哈尔滨:哈尔滨工程大学,2021.
- [ 8 ] 项昌乐,章颖莹,刘辉.高转速差车用湿式离合器带排转矩特性研究[J].机械工程学报,2013,49(20):71.
- [ 9 ] 傅志红,郭鹏程,刘祥环.电动汽车高速减速器润滑仿真分析与试验[J].重庆理工大学学报(自然科学),2021,35(01):1.
- [ 10 ] Patir N, Cheng H. Application of average flow model to lubrication between rough sliding surfaces[J]. Journal of Tribology, 1979, 101(2):229.
- [ 11 ] Gao H, Barber G. Engagement of a Rough, Lubricated and Grooved Disk Clutch with a Porous Deformable Paper-Based Friction Material[J]. Tribology Transactions, 2002, 45(4):464.
- [ 12 ] 何佩芸,苏楚奇.湿式离合器摩擦片油槽传热特性的仿真分析[J].武汉理工大学学报(交通科学与工程版),2017,41(01):174.
- [ 13 ] Berger E, Saoleghi F, Krousgrill C. 表面粗糙可渗透带油槽的湿式离合器接合过程分析和数学模型[J].传动技术,2015, 029(003):28.
- [ 14 ] 张琳,张源盛,魏超,等.高速湿式离合器欠约束摩擦副表面油槽参数优化设计[J/OL].武汉科技大学学报,1-9[2024-04-09].<http://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1608.n.20231204.1612.002.html>.
- [ 15 ] 刘磊.湿式摩擦离合器流场分析及带排转矩特性研究[D].哈尔滨:哈尔滨工程大学,2021.

#### · 国外信息 ·

### 2024年金属注射成形、陶瓷和硬质合金国际研讨会在美国罗列市举办

2024年金属注射成形、陶瓷和硬质合金国际研讨会在美国北卡罗来纳州罗列市召开,来自10个国家的70多个公司的105名代表参加了这次会议。这次研讨会第一个报告的题目是:环境、社会和公司治理与可持续性,主讲人是Kymera有限公司的Barton White,Barton White的报告内容包括了奖励结构和社会服务,强调了可以衡量的目标和安全。这次研讨会共发表了25个技术报告,这些技术报告的内容涉及与金属注射成形相关的材料、工艺、测试、模具加工和烧结等领域的最新技术。近30个公司以桌面展览的形式展出了产品或服务,很多参展企业在工艺与产品创新发布会上展示了最新成就。在研讨会召开期间还安排了一个招待会,并组织去Kymera有限公司参观。美国金属注射成形协会向5名参加研讨会的学生颁发了奖品,这些学生获奖者分别是:法国雷奥本矿业大学的Margarete Hufnagl、美国宾夕法尼亚州立大学的Ian Wietecha-Reiman、西班牙卡斯蒂利亚拉曼查大学的Juan Jimenez Alumbros、美国路易斯维尔大学的Fatou Ndiaye和美国弗吉尼亚理工大学的Kaustubh Deshmukh。这些学生不仅有机会聆听最前沿的科学报告,与这个领域的专家学者交流,在金属注射成形行业亮明观点,还将在各自所在的学校介绍其开展的工作。摘译自美国金属粉末工业联合会网站<https://www.mpi.org/News/FocusPM/TabId/979/ArtMID/3883/ArticleID/932/MIM2024-Fosters-Innovation.aspx> 2024-03-01/

(孙世杰)