

磁粉性能对磁粉离合器特性影响分析研究

王 程^{1,2} 常思勤¹

1. 南京理工大学, 南京, 210094 2. 淮阴工学院, 淮安, 223003

摘要:研究了磁粉离合器转矩传递的工作机理,建立了磁粉离合器磁场场域的分析模型,重点分析研究了磁粉的磁性能和粒径对磁粉离合器转矩传递特性的影响关系,仿真结果与磁粉离合器实际工作特性相吻合。研究表明,通过提高磁粉材料磁性能、减小磁粉粒径可有效提高磁粉离合器转矩传递性能。

关键词:磁粉离合器;磁粉性能;磁场;仿真

中图分类号:U463.2

DOI:10.3969/j.issn.1004-132X.2012.02.004

Study on Effects of Magnetic Particle Properties on Performance of Magnetic Particle Clutch

Wang Cheng^{1,2} Chang Siqin¹

1. Nanjing University of Science and Technology, Nanjing, 210094

2. Huaiyin Institute of Technology, Huai'an, Jiangsu, 223003

Abstract: On the basis of studying the working mechanism of magnetic particle clutch in depth, a magnetic field analysis model of magnetic particle clutch was established herein. It gave a thorough analysis of the influence of magnetic particle property and diameter of the magnetic particles on the magnetic particle clutch torque—transferring characteristics. And the simulation results are consistent with the actual work properties of magnetic particle clutch. The results show that the development and application of the nanocrystalline soft magnetic alloy magnetic particle with high performance may raise torque—transferring characteristics of the magnetic particle clutch.

Key words: magnetic particle clutch; magnetic particle property; magnetic field; simulation

0 引言

磁粉离合器是通过励磁电流形成“磁粉链”来传递转矩的一种电磁离合器,除了具有一般电磁离合器体积小、结构紧凑、动作灵敏、消耗功率小、操作方便等优点外,还具有线性调节范围广、传递扭矩与滑差率无关、过载保护等优点,能有效提高

传动系工作性能,近年来,在工业控制领域得到了广泛的研究和运用。文献[1]对工作间隙磁粉的磁感应强度与单位面积剪切力的关系进行了分析,由于分析仅考虑了磁粉离合器的静特性,故与实际情况出入较大。文献[2]利用磁粉颗粒间的库仑定律建立了磁粉离合器的磁力关系,由于采用近似理论公式,故无法精确反映磁粉性能对磁粉离合器特性的影响关系。文献[3-4]在电磁场域数值计算分析理论的基础上,建立了磁粉离合器电磁

收稿日期:2011-02-28

基金项目:江苏省自然科学基金资助项目(BK2008414),淮安市科技支撑计划(工业)资助项目(HAG2010041)

效性可以满足日益增长的集装箱运量的飞速发展以及集装箱船舶的大型化发展趋势,同时其节能环保性能可以很好地应对当前能源危机,符合低碳经济的环保理念。

参考文献:

- [1] 彭传圣. 集装箱码头的自动化运转[J]. 港口装卸, 2003(2):1-6.
- [2] Cao Jinxin, Shi Qixin, Lee Der-Horong. A Decision Support Method for Truck Scheduling and Storage Allocation Problem at Container[J]. Tsinghua Science and Technology, 2008, 13(S1):211-216.
- [3] 交通节能网. 港口能源消耗的主要因素及节能建议[EB/OL]. (2008-01-08) [2011-02-15]. [http://](http://www.china-esi.com/pat/6587.html)

www.china-esi.com/pat/6587.html

- [4] 梁燕, 吴富生, 金建明. 立体轨道式自动化集装箱码头作业能耗分析[J]. 起重运输机械, 2010(11):1-6.
- [5] 碳排放计算公式[EB/OL]. [2011-02-15]. <http://trans.wenweipo.com/gb/paper.wenweipo.com/2010/01/03/NS1001030006.html>

(编辑 张 洋)

作者简介:梁 燕,女,1982年生。上海交通大学机械与动力工程学院博士后研究人员,上海振华重工(集团)股份有限公司陆上重工设计院工程师。主要研究方向为生产系统仿真与优化,集装箱码头调度、仿真与优化。吴富生,男,1975年生。上海振华重工(集团)股份有限公司海上重工设计院高级工程师。叶 军,男,1967年生。上海振华重工(集团)股份有限公司电气开发事业部高级工程师。

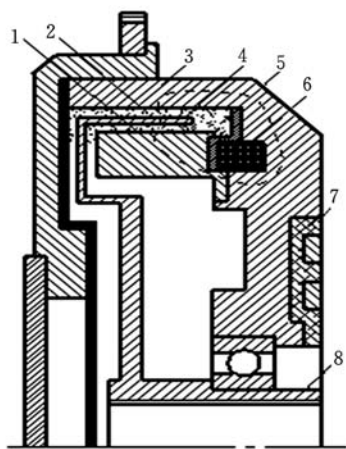
场仿真分析模型,完成了试验验证,并以此为基础研究确定了磁粉离合器磁路材料和电磁结构参数对磁粉离合器转矩传递性能的影响关系。

磁粉作为磁粉离合器传递转矩的工作介质,其性能是影响磁粉离合器工作特性的重要因素之一。笔者在前人研究成果的基础上,对磁粉离合器磁粉材料进行了系统研究,分析了磁粉性能参数对磁粉离合器性能的影响,探索通过提高磁粉材料软磁性来提高磁粉离合器性能的工作途径。

1 磁粉离合器工作原理及机理分析

1.1 磁粉离合器工作原理

磁粉离合器基本结构如图1所示,主要由主动件、从动件、磁粉、励磁线圈等部件组成。当励磁线圈断电时,主动件旋转,磁粉在离心力的作用下紧压在主动件工作表面上,与从动件没有接触,磁粉离合器主动件、从动件处于分离状态;当励磁线圈通入直流电时,磁粉在励磁线圈产生的磁场的作用下连接成“磁粉链”,离合器依靠磁粉自身的结合力及磁粉与主动件和从动件工作表面之间的摩擦力实现转矩的传递。



1. 磁路 2. 工作间隙 3. 主动件 4. 从动件
5. 磁粉 6. 励磁线圈 7. 滑环 8. 输出轴

图1 磁粉离合器结构示意图

1.2 转矩传递工作机理

磁粉离合器传递转矩的大小由工作面半径、工作面面积、工作气隙大小、磁粉性能等因素确定。磁粉离合器通电后,磁极对磁粉形成的电磁力为

$$F = SB^2 / (2\mu) = SBH / 2 \quad (1)$$

式中, S 为垂直于磁通的工作间隙总截面面积(工作面面积), m^2 ; B 为工作间隙中的磁感应强度, T ; H 为工作间隙中的磁场强度, A/m ; μ 为磁粉磁导率。

设磁粉间的摩擦因数为 f ,有效工作面积系数为 λ ,工作间隙数目为 m ,工作面半径为 r ,则传递转矩为

$$T = m\lambda frSBH / 2 \quad (2)$$

在磁粉离合器基本结构不变的情况下,参数 λ 、 f 、 S 、 r 基本保持不变,取 $K = \lambda frS / 2$,则式(2)可进一步简化为

$$T = mKBH \quad (3)$$

由磁路欧姆定律知

$$U = NI = JA = \Phi(R_0 + R_1) \quad (4)$$

式中, U 为激磁磁势; N 为线圈匝数; I 为激磁电流, A ; J 为励磁电流密度, A/mm^2 ; A 为励磁线圈断面面积, mm^2 ; Φ 为磁粉间隙的总磁通量; R_0 为工作间隙磁粉磁阻; R_1 为磁路磁阻。

忽略边路漏磁,此时

$$\Phi = BS \quad (5)$$

又有

$$R_0 = L_0 / (\mu S) \quad (6)$$

式中, L_0 为磁粉间隙长度。

由式(3)~式(6)可知,磁粉离合器基本结构参数固定后,磁粉的磁性能决定着磁粉离合器的转矩传递性能。

2 磁粉基本性能

2.1 磁性能

磁粉的磁性能与磁粉离合器工作特性密切相关,为保证磁粉离合器具有强的转矩传递能力和小的剩余空转转矩,要求磁粉具有大的磁感应强度和磁导率,小的矫顽力和剩磁。

材料化学成分是决定磁粉磁性能的首要因素,研究表明,在铁中加入适量的镍可以增大磁粉的磁导率和磁感应强度,减小矫顽力;加入适量钴可以使合金获得大的磁感应强度^[5]。

磁粉松装密度是影响磁粉磁性能的另一因素,磁粉松装密度愈大,其颗粒间的空气间隙愈小,其磁感应强度和磁导率就愈大,磁粉离合器转矩传递能力就越强、越稳定。文献[6]研究分析了磁粉填充密度对磁粉磁性能的影响关系。研究结果表明,磁粉磁感应强度随磁粉填充密度的增加而增大,磁粉相对实材密度与相对实材磁感应强度之间呈近似比例关系。

2.2 磁粉粒径及其配比

磁粉粒径及其比对离合器转矩传递性能有着较大的影响。文献[7]研究报道了磁粉离合器磁粉粒径与传递转矩的关系。研究表明,受运转离心力影响,磁粉粒径过大,会削弱磁粉离合器转矩传递能力;磁粉粒径过小,磁粉离合器工作间隙中连接的磁粉颗粒就会过多,使磁粉离合器转矩传递性能不稳定,磁粉的平均粒径一般按其工作间隙的1/16来确定。文献[8]对磁粉 00Cr13NiMo 进行

了配比试验研究。结果显示,粒径配比方法对磁粉松装密度和磁性能产生一定的影响,采用正三角法配比可使磁粉获得最佳的磁性能,从而提高磁粉离合器转矩传递性能。

2.3 流动性

磁粉流动性对离合器转矩传递性能也有着较大的影响。通常采用标准漏斗法^[9]测定磁粉流动性。磁粉流动性越好,磁粉离合器转矩传递响应越快,转矩传递稳定性也越好,磁粉离合器表现出来的转矩传递性能就越好^[10]。磁粉流动性与磁粉的球形度密切相关,球形度越高,磁粉流动性就越好,有利于提高磁粉离合器的快速响应性,磁粉球形度高还有助于减小磁粉与工作面间的摩擦,减少磨损,形成稳定的转矩传递“磁粉链”,提升磁粉离合器转矩传递能力和稳定性。目前使用较多的是椭球形磁粉,国外磁粉产品粉体的 70% 呈土豆状,30% 呈球形。

2.4 耐久性

磁粉耐久性是指磁粉在磁粉离合器台架试验中磁粉离合器力矩降至初始值 70% 所用时间。耐久性越好,磁粉离合器转矩传递稳定性就越好。

磁粉离合器是靠磁粉间电磁力形成的摩擦力来传递转矩的一种磁力机械产品。在滑差运行工况下,磁粉间产生滑动摩擦损耗,因此,磁粉耐磨性要好,以保证磁粉离合器在长时间的滑差工作状态下稳定运行。滑动摩擦同时产生功率损耗热量,因此,磁粉要有一定的耐热性,要求磁粉在 500~600℃ 的高温下无明显氧化,不烧结成团,并且其磁性能在温度变化范围内必须不改变,即具有良好的热稳定性,以保持离合器的性能稳定。

3 仿真设计

3.1 分析方法

以麦克斯韦方程为理论基础的磁场设计计算是磁粉离合器设计工作的核心,常用方法有磁路法和场域法。磁路法是现有磁力驱动机构和设备普遍使用的工程设计方法,较成熟,但精度不高,只能用于近似设计。场域法是综合考虑磁阻、漏磁、边缘效应、涡流损失等因素的影响,对磁场进行精细分析的一种方法,但计算方法较复杂,多采用数值法求解,其中最具代表性的是有限元法数值计算方法。

3.2 磁粉离合器分析模型

3.2.1 几何模型

磁粉离合器为典型的轴对称结构,为减少分析计算过程中的工作量,将三维问题简化为二维问题

来解决,同时根据磁粉离合器的具体特征,对其分析模型作必要的简化处理,建立的磁粉离合器主要磁路二维有限元几何分析模型如图 2 所示。

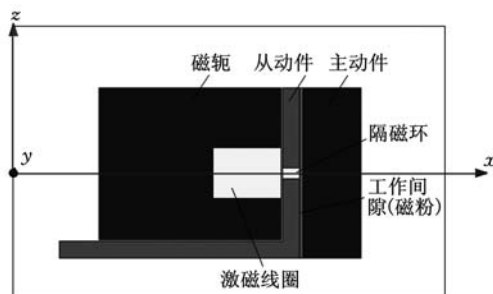


图 2 二维几何模型

3.2.2 材料属性

主动件、从动件、磁轭构成磁粉离合器磁路,材料为 10 号低碳钢。

磁粉离合器工作介质(磁粉)中,铁钴镍磁粉、铬不锈钢磁粉有着优良的磁性能、耐热性和耐磨性,得到普遍应用。近年来,国内外关于纳米晶软磁材料的研究已取得了突破性成果,研究表明,铁基纳米晶软磁合金具有高饱和磁感应强度、高磁导率、高热稳定性、小矫顽力等十分优异的软磁材料性能^[11-12]。综合考虑,选用粒径为 30 μm 、40 μm 、50 μm 三种不同规格的 00Cr13NiMo、铁钴镍、铁基纳米晶软磁合金三种磁粉。忽略磁粉粒径对磁性能的影响,三种磁粉的 $B-H$ 曲线如图 3 所示。铁基纳米晶软磁合金磁粉 $B-H$ 曲线根据其所对应的实材材料磁特性按一定比例关系获得,铁钴镍、00Cr13NiMo 磁粉 $B-H$ 曲线通过试验获得^[5,8]。

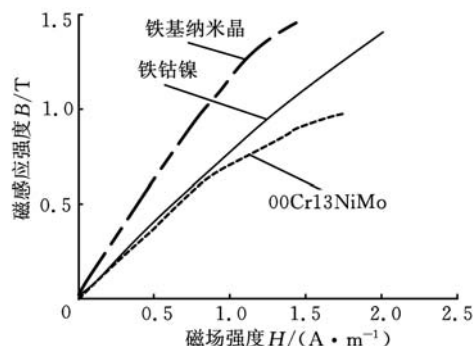


图 3 磁粉 $B-H$ 曲线

3.2.3 边界条件和激励源

边界条件应用自然边界和诺依曼边界;激励源线圈绕组端口面积为 100 mm^2 ,激磁电流密度 J 为 0~3 A/mm^2 。

3.2.4 网格划分

网格剖分采用金字塔型剖分设置,在对求解参数和求解域网格能量误差进行设置后,利用系统自适应剖分技术自动求解剖分网格。

3.2.5 仿真结果与分析

图4给出了采用不同磁粉材料的磁粉离合器特性仿真曲线。从图4可以看出,铁基纳米晶磁粉离合器转矩传递容量最大,00Cr13NiMo磁粉离合器转矩传递容量最小。铁钴镍磁粉离合器有着较宽的线性工作区间。00Cr13NiMo磁粉离合器转矩传递特性曲线在工作区间内明显分为非线性区、线性区、饱和区三段,这是由00Cr13NiMo磁粉较小的饱和磁感应强度引起的。当激励电流密度 J 为 $2.5\text{A}/\text{mm}^2$ 时,00Cr13NiMo磁粉达到饱和,磁粉磁导率下降,磁路磁阻增大,工作间隙中的磁感应强度 B 随 J 的增大而增大的趋势减缓,出现图4中00Cr13NiMo磁粉离合器转矩传递特性曲线的饱和区,与实际工作情况相吻合。

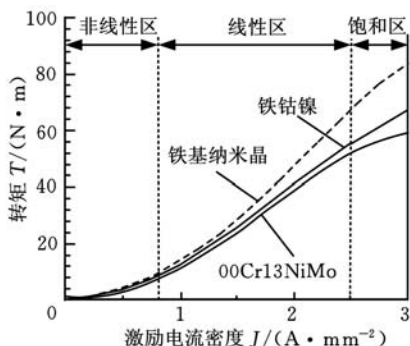


图4 不同磁粉材料磁粉离合器特性比较

图5给出了磁粉粒径分别为 $30\mu\text{m}$ 、 $40\mu\text{m}$ 和 $50\mu\text{m}$ 的铁钴镍磁粉离合器转矩传递特性仿真曲线。从图5可以看出,磁粉粒径越小,磁粉离合器传递转矩就越大。随着粒径的减小,磁粉在工作过程中所受离心力减小,使磁粉离合器转矩传递特性更稳定,适应于高转速的运转条件。但是,磁粉粒径也不能无限制地减小,因为过小的磁粉粒径会引起过小的工作间隙,从而影响磁粉在工作间隙中的流动。

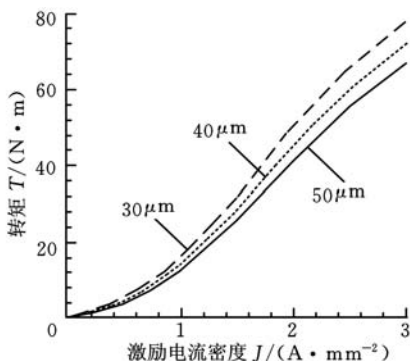


图5 不同磁粉粒径的铁钴镍磁粉离合器特性比较

4 结论

(1)磁粉的磁性能与磁粉离合器特性密切相

关。提高磁粉材料磁性能是提升磁粉离合器转矩传递性能的一种有效手段。纳米晶软磁合金材料与其他软磁材料的性能相比,有着更为优异的综合磁性能^[12]。仿真分析结果表明,采用高性能纳米晶软磁合金磁粉可显著提高磁粉离合器特性。

(2)磁粉粒径对离合器转矩传递性能有着较大的影响。减小磁粉粒径是提升磁粉离合器转矩传递性能的一种有效手段,但磁粉粒径也不能无限制地减小,要综合考虑磁粉粒径对工作间隙尺寸的影响以及磁粉粒径在工作间隙中的流动性等问题。

参考文献:

- [1] 高连兴,林孝先,鲁楠,等.磁粉制动器加载性能的实验研究[J].沈阳农业大学学报,1994,25(4):448-453.
- [2] 黄和妙,王善坡,李德军.磁粉离合器工作机理的探讨[J].山东工业大学学报,1995,25(3):207-213.
- [3] 王程,常思勤.磁粉离合器转矩特性分析与优化[J].农业机械学报,2011,42(10):35-38.
- [4] 周云波,常思勤.磁粉离合器仿真分析研究[J].中国机械工程,2010,21(10):1149-1152.
- [5] 刘湘涟,何火生.铁-钴-镍软磁合金粉末的研制[J].湖南冶金,1995(6):11-14.
- [6] 吴菊清,李祥萍,包伟芳,等.磁粉离合器磁粉特性及其相关参数的关系[J].上海有色金属,1999,20(2):51-56.
- [7] 第一机械工业部情报研究所.磁粉离合器译文集[M].北京:第一机械工业部情报所,1975.
- [8] 吴菊清,陈乃文,陈仕骏,等.00Cr13NiMo不锈钢球形磁粉的基本性能及其应用[J].机械工程材料,1982(4):28-32.
- [9] 中华人民共和国冶金工业部.GB1482-84,金属粉末流动性的测定标准漏斗法(霍尔流速计)[S].北京:中国标准出版社,1984.
- [10] 吴菊清,陈仕骏.铬不锈钢磁粉的基本性能及其应用现状[J].机械工程材料,1990(4):21-23.
- [11] Grössinger R, Sassik H, Holzer D, et al. Magnetic Characterization of Soft Magnetic Materials Experiments and Analysis[J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2003, 254/255: 7-13.
- [12] 陆伟,严彪.铁基纳米晶软磁合金的研究[J].材料科学与工程学报,2004,22(3):461-465.

(编辑 张 洋)

作者简介:王 程,男,1979年生。南京理工大学机械工程学院博士研究生,淮阴工学院交通工程学院讲师。主要研究方向为车辆动力装置设计、仿真及优化技术。常思勤,男,1954年生。南京理工大学机械工程学院教授、博士研究生导师。