

磁粉夹持正压力理论分析和实验研究

房连强,周燕飞

(南京航空航天大学 机电学院,江苏 南京 210016)

摘 要:采用磁粉柔性夹持某些整体结构件、异构件和薄壁件时,磁粉夹持正压力的大小影响着磁粉夹持效果。介绍了磁粉产生夹持力的基本原理,通过将磁粉颗粒简化为磁偶极子模型来分析处于磁场中的磁粉对工件产生的正压力,得出影响磁粉正压力的各种因素,通过实验验证理论分析结论的正确性。研究表明:磁粉的目数、磁导率和磁感应强度越大,磁粉对工件的夹持正压力越大。

关键词:磁粉;磁场;夹持;正压力

中图分类号:TG758;TH122 **文献标识码:**B **文章编号:**1671-5276(2021)01-0089-04

Theoretical Analysis and Experimental Research of Positive Pressure of Magnetic Powder Clamping

FANG Lianqiang, ZHOU Yanfei

(School of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: To solve the problems of low efficient clamping on integral structural parts and irregular parts and thin-wall parts in the process of machining, a design scheme of clamping workpiece by placing magnetic powder in magnetic field to generate clamping force was proposed with the introduction of the basic principle of magnetic powder to produce clamping force. By simplifying the magnetic powder particles to the magnetic dipole model, the positive pressure of magnetic powder for the workpiece in the magnetic field was analyzed, and the various factors influencing the positive pressure of magnetic powder were obtained as well. The experiment undertaken afterwards verified the correctness of theoretical analysis. The results show that the larger the mesh number, permeability and induction intensity of the magnetic powder are, and the greater the positive pressure of the magnetic powder on the workpiece is.

Keywords: magnetic powder; magnetic field; clamping; positive pressure

0 引言

对于一些整体结构件、异构件和薄壁件,由于其形状不规则,刚度相对较差,采用普通的夹持方式难以装夹。目前对于此类零件的加工通常采用增加辅助工艺夹持面或设计专用夹具,但这些方式通常会造成加工材料的浪费,使加工成本和工序增加,同时也延长了加工周期。

针对上述问题,文献[1]提出一种利用处于磁场中的磁粉来产生夹持力的柔性夹持方案。该方案是将工件置于磁粉中,通过励磁装置在工作区域产生磁场,使磁化后的磁粉对工件产生正压力,在加工过程中,磁粉与工件产生摩擦力阻碍其相对运动来实现夹持工件。

磁粉夹持适用性强,对整体结构件、异构件及薄壁件都能夹持。同时在薄壁件内外填充磁粉能够起到支撑作用,减小加工变形量^[2]。磁粉对工件的夹持正压力决定了夹持的效果,但磁粉内部的受力情况较为复杂,难以确定影响夹持正压力的因素。本文通过简化磁粉颗粒来定性分析影响磁粉对工件正压力的各种因素并加以实验验

证,为进一步提高磁粉夹持力提供理论依据。

1 磁粉受力分析

1.1 磁粉夹持力的产生

磁粉夹持的原理就是通过外加励磁装置产生磁场,使磁粉磁化后互相吸引对工件产生正压力。当工件在加工过程中产生相对运动趋势时,磁粉会与工件产生摩擦力来阻碍工件的相对运动,实现工件的夹持^[2-4]。图1为磁粉夹持系统的原理示意图。

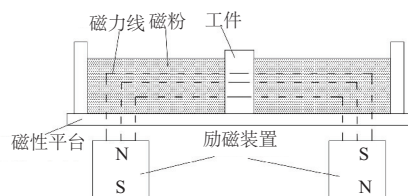


图1 磁粉夹持原理示意图

1.2 理想状态下相邻磁粉颗粒的受力分析

根据摩擦力 $f = \mu F_N$ 可知,要提高摩擦力就要提高磁粉对工件的正压力,因此需要对磁粉的受力情况进行分析。由于磁粉颗粒比较微小,形状可能略有差异,磁粉内部可能存在不规则排列。为了简化计算,可以将磁粉颗粒都看作是完全相同的球体颗粒,磁粉内部紧密排列无缺陷。考虑在以上理想状态下处于磁场强度为 H 的均匀磁场中的磁粉颗粒,将单个磁化后的磁粉颗粒视为一个点磁偶极子^[5-6],每个磁偶极子都有一个强度为 mWb 的正负磁极,正负磁极之间的距离为 d ,且磁极连线与磁场方向一致。如图2所示考虑两个相邻的磁偶极子 O_1 和 O_2 , O_1 正负极 A 、 B 和 O_2 正负极 C 、 D 均受到力的作用。

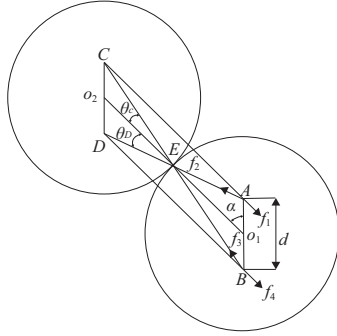


图2 磁场中相邻磁粉颗粒的受力图

E 表示磁粉颗粒 O_1 和 O_2 的接触点, $\alpha = \angle AO_1 O_2$, $O_1 O_2 = 2r = AC = BD$ 。根据磁场的库伦定律^[7]:

A 和 C 之间的斥力:

$$f_1 = \frac{m^2}{16\pi\mu_0 r^2} \quad (1)$$

A 和 D 之间的吸引力:

$$f_2 = \frac{m^2}{16\pi\mu_0 [r^2 + (d/2)^2 - rdcos\alpha]} \quad (2)$$

B 和 C 之间的吸引力:

$$f_3 = \frac{m^2}{16\pi\mu_0 [r^2 + (d/2)^2 + rdcos\alpha]} \quad (3)$$

B 和 D 之间的排斥力:

$$f_4 = \frac{m^2}{16\pi\mu_0 r^2} \quad (4)$$

根据

$$\overline{CO_2^2} = \overline{EO_2^2} + \overline{EC_2^2} - 2\overline{EO_2} \times \overline{EC} \cos\theta_C \quad (5)$$

$$EC = EB = \sqrt{r^2 + (d/2)^2 - 2r(d/2)\cos(\pi - \alpha)} \quad (6)$$

可以得到

$$\cos\theta_C = \frac{r + (d/2)\cos\alpha}{\sqrt{r^2 + (d/2)^2 + rdcos\alpha}} \quad (7)$$

类似地,也可以得到

$$\cos\theta_D = \frac{r - (d/2)\cos\alpha}{\sqrt{r^2 + (d/2)^2 - rdcos\alpha}} \quad (8)$$

设 P 为接触点 E 处的压力, φ 为 P 与 $O_1 O_2$ 之间的角度。可以得到 P 的法向分量:

$$P\cos\varphi = -(f_1 + f_4) + f_2\cos\theta_D + f_3\cos\theta_C = \frac{m^2}{16\pi\mu_0} \left\{ [r - (d/2)\cos\alpha][r^2 + (d/2)^2 - rdcos\alpha]^{-\frac{3}{2}} + [r + (d/2)\cos\alpha][r^2 + (d/2)^2 + rdcos\alpha]^{-\frac{3}{2}} \right\} \quad (9)$$

P 的切向分量为:

$$P\sin\varphi = f_3\sin\theta_C - f_2\sin\theta_D = \frac{m^2}{16\pi\mu_0} \cdot \frac{d}{2} \sin\alpha \left\{ [r^2 + (d/2)^2 + rdcos\alpha]^{-\frac{3}{2}} - [r^2 + (d/2)^2 - rdcos\alpha]^{-\frac{3}{2}} \right\} \quad (10)$$

其中: $\sin\theta_C = \frac{1}{2} \sin\alpha / \sqrt{r^2 + (d/2)^2 + rdcos\alpha}$;

$\sin\theta_D = \frac{1}{2} \sin\alpha / \sqrt{r^2 + (d/2)^2 - rdcos\alpha}$ 。

令 $M = md$, 由磁偶极子的极距 $d \ll r$, 则:

$$P\cos\varphi \cong \frac{M^2(-3 + 15\cos^2\alpha)}{64\pi\mu_0 r^4} \quad (11)$$

$$P\sin\varphi \cong \frac{-3M^2\sin\alpha\cos\alpha}{32\pi\mu_0 r^4} \quad (12)$$

图3显示了相邻磁粉颗粒所施加的力随颗粒边缘的变化,从图中可以看出磁场方向上磁粉颗粒产生吸引力,磁场垂直方向上磁粉颗粒产生斥力,磁粉在均匀磁场中被磁化,其磁化强度

$$I = \chi H \quad (13)$$

其中 χ 为磁化率。

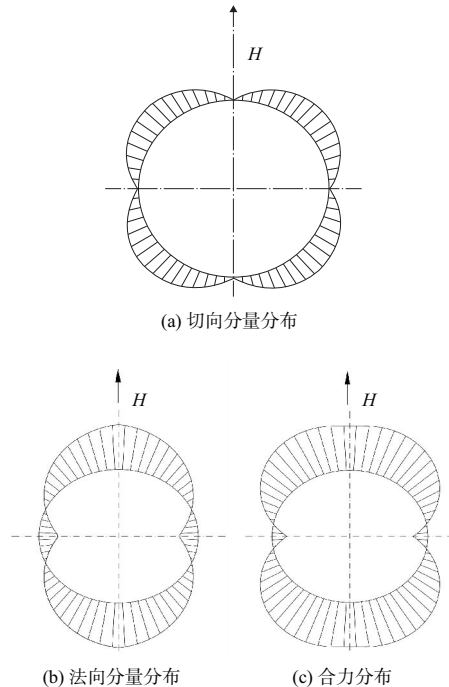


图3 球形磁粉颗粒受力分布图

由磁偶极子的磁矩

$$M = \frac{4}{3}\pi r^3, I = \frac{4}{3}\pi r^3 \chi H \quad (14)$$

可以得到:

$$P \cos \varphi \cong \frac{\pi r^2 \chi^2 H^2}{12 \mu_0} (5 \cos^2 \alpha - 1) \quad (15)$$

$$P \sin \varphi \cong \frac{-\pi r^2 \chi^2 H^2}{6 \mu_0} \sin \alpha \cos \alpha \quad (16)$$

1.3 磁粉的宏观应力分析

如图4所示将球形磁粉简化为一个球体; I 、 II 、 III 为其主应力轴; E 为磁粉颗粒表面与另一颗粒的接触点; α_I 为主应力轴 I 与 OE 之间的夹角; OE' 为 OE 在 II 、 III 平面的投影; β 为轴 III 与 OE' 之间的夹角。

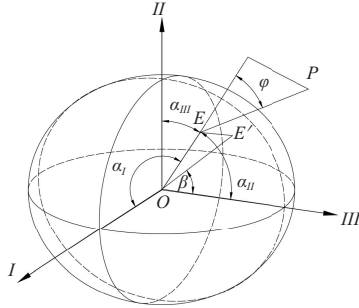


图4 球体模型示意图

磁场方向与 I 轴重合,则由相邻磁粉颗粒在方向 $(\alpha_I, \alpha_{II}, \alpha_{III})$ 上任一点 E 处所施加的力 Q 为:

$$Q_I \cong (P \cos \varphi) \cos \alpha_I - (P \sin \varphi) \sin \alpha_I = \frac{\pi r^2 \chi^2 H^2}{12 \mu_0} \cos \alpha_I (3 \cos \alpha_I + 1) \quad (17)$$

$$Q_{II} \cong [(P \cos \varphi) \sin \alpha_{II} + (P \sin \varphi) \cos \alpha_{II}] \cos \beta = \frac{\pi r^2 \chi^2 H^2}{12 \mu_0} \cos \alpha_{II} (3 \cos^2 \alpha_{II} - 1) \quad (18)$$

$$Q_{III} \cong \frac{\pi r^2 \chi^2 H^2}{12 \mu_0} \cos \alpha_{III} (3 \cos 2 \alpha_{III} - 1) \quad (19)$$

上面的力所引起的主应力:

$$\sigma_I^M = \frac{r \Lambda}{2 \pi} \oint Q_I \cos \alpha_I d\Omega = \frac{r \Lambda}{2 \pi} \frac{\pi r^2 \chi^2 H^2}{12 \mu_0} \cdot 8 \int_0^{\frac{\pi}{2}} \int_0^{\frac{\pi}{2}} (3 \cos^2 \alpha_I + 1) \cos^2 \alpha_I \sin \alpha_I d\alpha_I d\beta = \frac{7 \pi \chi^2 H^2}{45 \mu_0} \quad (20)$$

$$\sigma_{II}^M = \sigma_{III}^M = \frac{r \Lambda}{2 \pi} \oint Q_{II} \cos \alpha_{II} d\Omega = \frac{r \Lambda}{2 \pi} \frac{\pi r^2 \chi^2 H^2}{12 \mu_0} \cdot 8 \int_0^{\frac{\pi}{2}} \cos^2 \beta d\beta \int_0^{\frac{\pi}{2}} (3 \cos^2 \alpha_I - 1) \sin^2 \alpha_I d\alpha_I = \frac{-\pi \chi^2 H^2}{192 \mu_0} \quad (21)$$

式(20)、式(21)只包含与一磁粉颗粒直接接触颗粒的作用力,还要考虑非直接接触颗粒的作用力。在球体中心建立一立体角 $d\Omega$,其包含 $N dv$ 个磁粉颗粒,在 $d\Omega$ 里所有的磁粉颗粒所施加法向力:

$$P_v = \int N dv \cdot P_v = \int_{2\pi} N P_v \cdot R^2 dR d\Omega = \frac{N \cdot M^2 (-3 + 15 \cos^2 \alpha)}{8 \pi \mu_0 r} d\Omega \quad (22)$$

所施加的切向力:

$$P_T = \int N dv \cdot P_T = \int_{2\pi} N P_T \cdot R^2 dR d\Omega = \int_{2\pi} N P_T \cdot R^2 dR d\Omega = \frac{-3 N \cdot M^2 \sin \alpha \cos \alpha}{4 \pi \mu_0 r} d\Omega \quad (23)$$

其中: $P_v = P \cos \varphi$; $P_T = P \sin \varphi$ 。

上述力要转化为在一个磁粉颗粒周围相邻颗粒的力。在一个磁粉颗粒周围其他颗粒的数量为 $2\Lambda/N$,则在一个颗粒立体角 $d\Omega$ 接触的数量为 $(2\Lambda/N) \times (d\Omega/4\pi)$,因此式(22)、式(23)要除以这个因子才能转化为周围颗粒的力。

法向力:

$$P_{v'} = \frac{n \cdot 4 \pi}{2 \Lambda \cdot d\Omega} \times \frac{NM^2 (-3 + 15 \cos^2 \alpha)}{8 \pi \mu_0 r} d\Omega = \frac{N^2 M^2 (-3 + 15 \cos^2 \alpha)}{4 \mu_0 r \Lambda} \quad (24)$$

切向力:

$$P_{T'} = \frac{N}{2 \Lambda} \cdot \frac{4 \pi}{d\Omega} \cdot \frac{-3 NM^2 \sin \alpha \cos \alpha}{4 \pi \mu_0 r} d\Omega = \frac{-3 N^2 M^2 \sin \alpha \cos \alpha}{2 \mu_0 r \Lambda} \quad (25)$$

将 $P_{v'}$ 与 P_v 相比即一磁粉颗粒受到的总法向力与一磁粉颗粒受到周围另一磁粉颗粒对其产生的法向力之比,得到由一磁粉颗粒产生并作用到所有磁粉颗粒上产生的转化因子:

$$\frac{P_{v'}}{P_v} = \frac{16 \pi r^3 N^2}{\Lambda} = \frac{9 (1 - p)^2}{\pi \lambda} \quad (26)$$

其中 p 为磁粉的空隙率,且有

$$N \cdot \frac{4 \pi r^3}{3} = 1 - p \quad (27)$$

磁粉的宏观应力可以用磁粉颗粒由周围一个磁粉颗粒引起的主应力即式(20)、式(21)乘以转化因子得到:

$$\sigma_I^M = \frac{7 \pi \chi^2 H^2}{45 \mu_0} \times \frac{9 (1 - p)^2}{\pi \lambda} = \frac{7 (1 - p)^2 \chi^2 B^2}{5 \mu_0^3 (1 + \chi)^2} \quad (28)$$

$$\sigma_{II}^M = \sigma_{III}^M = \frac{\pi^2 \chi^2 H^2}{192 \mu_0} \times \frac{9 (1 - p)^2}{\pi \lambda} = \frac{-3 \pi (1 - p)^2 \chi^2 B^2}{64 \mu_0^3 (1 + \chi)^2} \quad (29)$$

σ_I^M 是磁粉在磁场方向上的应力,决定了磁粉对工件的正压力。所以由式(28)可以看出磁粉对工件的正压力有以下结论:

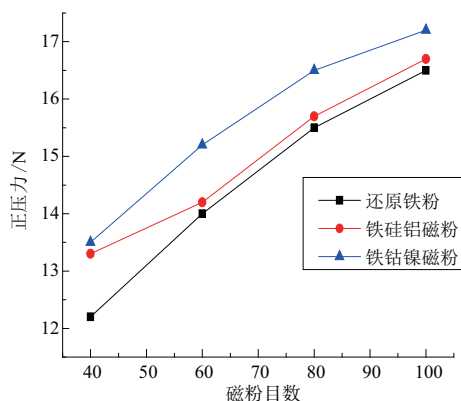
1) 磁粉对工件的正压力与磁粉的空隙率有关,磁粉空隙率越小,磁粉对工件的正压力越大。由于粉末的目数越大,空隙率越小^[8],所以磁粉的目数越大,磁粉对工件的正压力越大。

2) 磁粉的磁化率越大,磁粉对工件的正压力越大。

3) 磁感应强度越大,磁粉对工件的正压力越大。

2 实验验证

本文将磁粉颗粒简化为磁偶极子后分析其在磁场方向上的应力影响因素,为了验证以上结论的正确性,本文使用自制的励磁装置产生磁场,使用RFP薄膜式压力传感器来测量磁场方向上磁粉对工件的正压力,其测量面积为 78.5 mm^2 。测试在不同磁粉目数和种类及不同磁感应强度下的磁粉正压力,测试结果如图5所示。

图5 $B=0.5\text{ T}$ 时不同磁粉目数的磁粉正压力

如图5所示使用磁化率为50~80的还原铁粉、磁化率为90~120的铁硅铝磁粉^[9]和磁化率为200~260的铁钴镍磁粉在磁感应强度为0.5 T的环境下进行测试,结果表明随着磁粉目数的增加,磁粉对工件的正压力不断增大。同时,在同等条件下,磁化率越大,磁粉对工件的正压力越大。如图6所示,使用100目的铁钴镍磁粉在不同的磁感应强度下进行测试,结果表明随着磁感应强度的增加,磁粉对工件的正压力不断增大。

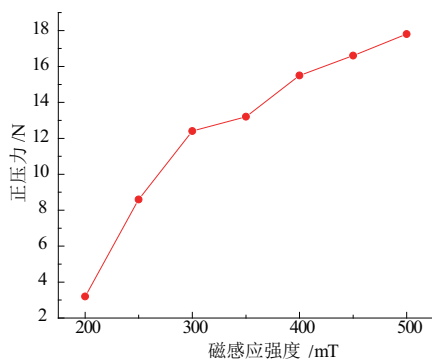


图6 铁钴镍磁粉在不同磁感应强度下的磁粉正压力

3 结语

本文将磁粉颗粒简化为磁偶极子模型,通过理论推导出磁粉对工件的正压力与磁粉的目数、磁粉的磁化率和磁感应强度的关系:1)磁粉的目数越大,正压力越大;2)磁粉的磁化率越大,正压力越大;3)磁感应强度越大,正压力越大。通过实验测试验证了理论分析结论的正确性,明确了影响磁粉夹持力的因素,可以作为磁粉夹持系统设计的参考。

参考文献:

- [1] CHEN K K, TIAN Y, SHAN L, et al. Transient response of sheared magnetic powder excite DGnetic field and its comparison with ER and MR fluids [J]. Smart Materials and Structures, 2013, 22(9): 097001.
- [2] 蒯雪娇. 基于导磁粉末的夹持系统的夹持力控制技术研究 [D]. 南京:南京航空航天大学, 2014.
- [3] 刘刚, 柯映林. 纸基蜂窝芯零件高速铣削固持系统设计 [J]. 中国机械工程, 2006, 17(2): 196-200.
- [4] 唐建宁, 周燕飞. 磁粉夹持系统磁场的有限元分析 [J]. 中国机械工程, 2010, 21(3): 285-288.
- [5] 何济洲, 缪贵玲. 两个磁偶极子间的相互作用 [J]. 南昌大学学报(工科版), 1996, 18(3): 96-98.
- [6] 陶旺斌, 宋凯. 标准环形试块的漏磁场和磁粉受力分析 [J]. 无损检测, 2007, 29(6): 322-325, 344.
- [7] 吕宽州, 马俊兴. 用分子电流观点推导磁库仑定律 [J]. 河南科学, 2002, 20(4): 339-341.
- [8] 杨冬霞. 针叶树材细胞裂解机理及超细木粉制备方法的研究 [D]. 哈尔滨:东北林业大学, 2013.
- [9] 高建波. FeSiAl 磁粉芯的制备工艺与软磁性能研究 [D]. 广州:华南理工大学, 2016.

收稿日期:2019-12-23

(上接第84页)

3 结语

以数控技术专业核心课程——“典型零件数控铣削工艺与编程”为例,分析传统课程教学存在的问题,从课程教学内容、教学模式、教学组织与教学策略等方面进行了教学探索。选择数控专业2017级、2018级共3个班实施课程教学改革,经后续专业综合实践课程——典型零件数字化设计与制造课程教学反馈得知,3个班学生能够综合应用本门课程所学的知识和技能解决实际问题,其数字化平台使用能力大大强于其他班级学生。实践证明,课程教学改革成效显著,其思路和方法可为实践类课程的教学改革提供参考和借鉴。

参考文献:

- [1] 蔡泽寰, 肖兆武, 蔡保. 高职制造类专业人才培养要素优化探

析——基于“中国制造2025”视域 [J]. 中国高教研究, 2017(2): 106-110.

- [2] 周兰菊, 曹晔. 智能制造背景下高职制造业创新人才培养实践与探索 [J]. 职教论坛, 2016(22): 64-68.
- [3] 赵猛, 成建峰. 高职院校项目化教学法实施存在的问题及对策 [J]. 辽宁高职学报, 2020, 22(3): 40-42, 108.
- [4] 高淑红. 胡格教学模式: 高职课堂教学生态的重构 [J]. 职业技术教育, 2017, 38(2): 39-42.
- [5] 赵之晔, 岳梦园. 数字化教学平台对高职教育人才培养模式的影响研究——基于制造类现代学徒制模式 [J]. 湖北农机化, 2020(3): 173-174.
- [6] 杜连森. 技能人才培养的课程重构: 知识+技能+素养 [J]. 职教论坛, 2017(34): 26-30.
- [7] 李静, 赵善庆. 关于高职院校人才培养质量提高的深度思考 [J]. 继续教育研究, 2018(1): 98-104.

收稿日期:2020-07-07