

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2020.08.006

气动灭火器电起动设计及关键部件强度分析*

何也能¹, 辛 喆^{2*}, 赵红利³, 杨 凯⁴, 余 舟⁵

(1. 浙江工业职业技术学院 交通学院, 浙江 绍兴 312000; 2. 中国农业大学 工学院, 北京 100083;

3. 中汽认证中心有限公司, 北京 100044; 4. 青岛市产品质量监督检验研究院, 山东 青岛 266000;

5. 吉利汽车研究院(宁波)有限公司, 浙江 宁波 315000)

摘要:针对风力灭火机不易通过人力旋转叶轮实现起动问题,对风力灭火机的电起动机构进行了研究,对其关键部件的强度进行了分析。在 Pro/E 中建立了风力灭火机起动机构三维实体模型,并用 ANSYS 软件的 Workbench 仿真平台进行了有限元法静力学分析;根据材料力学第四强度理论,对关键部件进行了强度校核;最后对新设计的风力灭火机电起动系统进行了试验,提出了一种针对选配汽油机设计相适应的电起动方案。研究表明:该电起动机构强度基本符合工作要求,可稳定起动所针对的较高功率风力灭火机。

关键词:手提式气动灭火器;电起动设计;减速机构;静力学分析

中图分类号:TH114;S776.294

文献标识码:A

文章编号:1001-4551(2020)08-0894-06

Design and strength analysis on components of electric starter towards pneumatic extinguisher

HE Ye-neng¹, XIN Zhe², ZHAO Hong-li³, YANG Kai⁴, YU Zhou⁵

(1. School of Jiaotong, Zhejiang Industry Polytechnic College, Shaoxing 312000, China; 2. College of Engineering, China

Agricultural University, Beijing 100083, China; 3. China Certification Center for Automotive Products Co., Ltd.,

Beijing 100044, China; 4. Qingdao Product Quality Supervision and Testing Research Center, Qingdao 266000,

China; 5. Geely Automotive Research Institute(Ningbo) Co., Ltd., Ningbo 315000, China)

Abstract: Aiming at the manual start of portable pneumatic extinguisher by rotating the impeller, the components of electric starter were designed. The strength of the key components were analyzed. In Pro/E, a three-dimensional entity model of the starting mechanism of the portable pneumatic extinguisher was established, the static analysis of the finite element method was carried out with the workbench simulation platform of ANSYS. The strength of key components was checked according to the fourth strength theory of material mechanics. The reliability verification of the new start system of the portable pneumatic extinguisher was tested. An electric starting scheme suitable for the optional gasoline engine was put forward. The results indicate that the strength of the electric starting mechanism basically meets the working requirements, and it can stably start the high-power portable pneumatic extinguisher.

Key words: portable pneumatic extinguisher; design of electric starter; reducing mechanism; static analysis

0 引言

目前,便携式风力灭火机已普遍应用于我国森林

草原火灾扑救^[1]。其喷出的气流可扑灭 A 类火灾(固体有机物燃烧火)中的低强度森林、草原地表火^[2],但对于更高强度的火灾,其灭火性能较有限^[3]。

收稿日期:2020-01-06

基金项目:浙江省公益技术应用研究计划项目(2016C31055)

作者简介:何也能(1989-),男,浙江绍兴人,硕士,主要从事发动机起动技术方面的研究。E-mail:h_y_n_1@163.com

通信联系人:辛喆,女,教授。E-mail:xinzhe@cau.edu.cn

风速高、风量大和质量轻是提高风力灭火机性能的可发展方向^[4]。便携式风力灭火机主要由离心风机和小型二冲程汽油机组成,因此,提高风力灭火机性能的重要途径包括优化风机结构^[5-7]、选配较高功率及轻量型的汽油机。通常,便携式风力灭火机用汽油机的功率为 3.5 kW~4.5 kW,通过人力拉动拉绳盘带动飞轮及曲轴旋转实现起动。其拉绳盘与汽油机飞轮组一体,结构简单紧凑。

现有某航空用双气缸二冲程小型汽油机,功率近 13 kW,而重量仅约 4 kg,具有较高功率及轻量型的特点,可选配作为风力灭火机发动机,提高灭火性能。但该汽油机通过人力转动外部长桨叶进而起动,当其应用于风力灭火机时,由于风机叶轮在蜗壳内部,不易通过人力旋转叶轮实现起动。

针对该问题,笔者设计具有较大起动功率的电起动机构,同时由于起动机构强度不足则易发生损坏,用有限元法进行强度校核^[8]。

1 电起动方案设计

1.1 电起动总体方案确定

针对所选配汽油机的结构特点,并考虑蜗壳刚度、风机进风方式和起动机构重量等因素,笔者设计分离式电起动机构。该机构在起动前先与叶轮端接合;起动时带动叶轮,进而带动发动机曲轴旋转;起动后能自动中断转矩传递,并可完全脱开与叶轮端的接合。

为了提供较大的起动功率,减轻使用者起动时的劳动强度,笔者选用串励式直流电机提供起动转矩,其额定功率为 0.8 kW,额定电压为 12 V。由于通常电机转速较高,电起动机构需设计具有合适传动比的减速机构,以提供足够起动转矩,并使输出转速仍大于汽油机最低起动转速^[5],满足起动要求。为防止汽油机起动后高速旋转反带起动电机,起动传动机构还应包括单向离合机构。

电起动设计总体方案如图 1 所示。

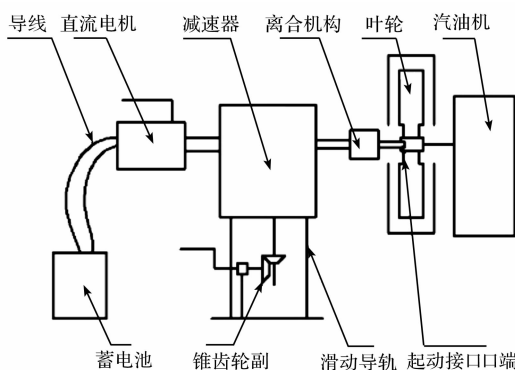


图 1 电起动设计总体方案

考虑整体机构重量,该电起动机构适宜放置在地面上进行起动,因此,通过锥齿轮副、螺杆及滑动导轨等组成高度调节机构,可使电起动机构适应不同高度的风力灭火机。

1.2 汽油机起动性能参数确定

反映汽油机起动性能的参数主要包括最低起动转速和起动阻转矩。通常在环境温度 0℃ 以上时,车用汽油机的最低起动转速约 20 r/min~50 r/min^[10]。由于该汽油机为二气缸化油器式,经咨询生产商,其建议起动转速大于 400 r/min 时起动较可靠,因此,笔者将该转速作为最低起动转速。

风力灭火机选配汽油机参数如表 1 所示。

表 1 风力灭火机选配汽油机参数

点火方式	气缸数	功率/kW	气缸直径/mm
蓄电池式	2	12.9	52
额定转速/ (r·min ⁻¹)	排量/mL	最低起动转速/ (r·min ⁻¹)	最大起动阻 转矩/(N·m)
7 500	170	400	16.4

发动机最大起动阻转矩主要包括发动机内部最大摩擦阻力矩、气缸空气压缩阻力矩和发动机运动部件惯性阻转矩^[11]。但风力灭火机配用汽油机的起动阻转矩除以上 3 类外,还包括叶轮惯性阻转矩和气动阻力矩。由于起动时转速较低,叶轮所受气动阻力矩基本可忽略。

根据发动机起动性能参数经验公式^[12]可计算发动机内部最大摩擦阻力矩、气缸空气压缩阻力矩和发动机运动部件惯性阻转矩,而叶轮惯性阻转矩则可由圆盘转动惯量近似计算。

1.3 电机可换向电路设计

为了使电起动机构不仅能起动该类右旋式汽油发动机,同时也能通过电路转换起动左旋式汽油发动机,笔者对所选用起动性较好的串励式直流电机电路进行可换向设计。

由于串励直流电机的励磁绕组(定子)和电枢绕组(转子)串联,不能通过外部正负极反接的方法直接改变电机旋向。串励直流电机的反转可采用励磁绕组反接或者电枢绕组反接来实现。由于该电机的励磁绕组末端搭铁,且励磁绕组末端的剩余空间较小,此处采用电枢绕组反接法。

串励式直流电机电路图如图 2 所示。

图 2 中,a、b、c 和 d 分别表示 4 个电刷。改接电路时,用组合开关将接线端 1 和 2 相连,3 和 4 相连,图中电枢电流方向向上,电机正转;反之当将接线端 2 和 4 相连,1 和 3 相连,图中电枢电流方向向下,电机反转。

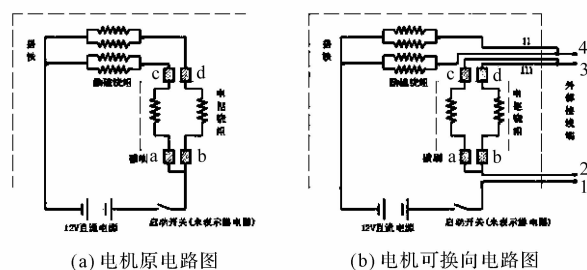


图 2 串励式直流电机电路图

1—电源正极接线端;2—a、b 电刷总线接线端;3—c 和 d 端的电刷导线合并接线(m 线)的接线端;4—c 和 d 处的电刷架连接端并接线(n 线)的接线端

1.4 减速机构设计

由于对减速机构的结构尺寸无特殊要求,传动方式选择为单级圆柱齿轮传动。传动比的选择原则是使起动机构在最大功率时的转速(经减速后)略高于汽油机的最低起动转速。为保证可靠起动,笔者选择传动比为 3:1,以最大起动阻转矩为载荷条件,应用理论公式进行强度校核。

减速机构零件的主要设计参数如表 2 所示。

表 2 减速机构零件的主要设计参数

设计参数	设计值
模数	3
主动齿轮齿数	12
从动齿轮齿数	36
齿宽	30
输入轴轴径	10
输出轴最小轴径	15

减速机构剖面图如图 3 所示。

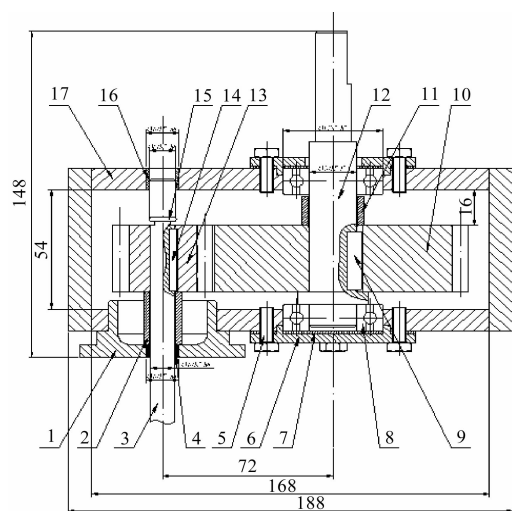


图 3 减速机构剖面图

1—电机端盖;2—轴套;3—输入轴;4—铜套;5—螺栓;6—轴承盖;7—垫片;8—滚动轴承;9—从动轴键;10—从动齿轮;11—轴套;12—输出轴;13—主动齿轮;14—主动轴键;15—卡环;16—铜套;17—箱体

1.5 单向离合机构设计

为防止起动后汽油机反带电机,该电起动方案中包含有单向离合机构。由于单向轴承具有尺寸标准化、结构紧凑、型式多样和适用性广的特点^[13],笔者通过选配合适的单向轴承,来设计电起动单向离合机构;选择轴承内径为 30 mm 的 CSK PP 型号楔块式单向轴承(PP 表示轴承内外圈均带键槽),其传递转矩很大,可靠性高;同时配用深沟球轴承,以提高单向离合器刚度,延长单向轴承寿命。

单向离合器剖面图如图 4 所示。

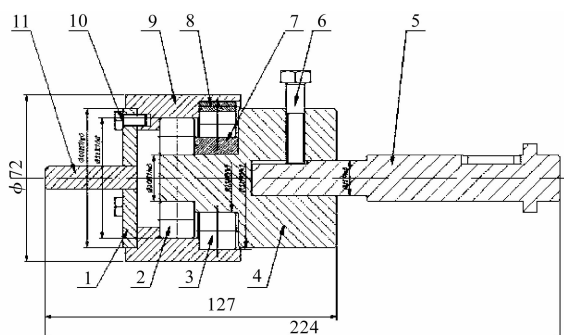


图 4 单向离合器剖面图

1—圆盘;2—滚动轴承;3—单向轴承;4—传动中间轴;5—减速箱输出轴;6—固定螺栓;7—内圈键;8—外圈键;9—轴套;10—螺栓;11—外六角起动机

1.6 蓄电池选配和高度调节机构设计

按用途分类,铅酸蓄电池有起动型、牵引型和固定用型等。一般情况下,铅酸蓄电池放电电流不宜超过 1C-rate(瞬间放电电流为电池容量数值的一倍);瞬间能输出电流最大的电池类型为起动型,瞬间电流可达到自身电池容量的 5 倍以上。笔者选择的蓄电池为起动型蓄电池,电压为 12 V,额定容量为 14 Ah。

为了增强设备通用性,使其能起动不同高度的风力灭火机,还需要设计高度调节机构,机构主要包括锥齿轮副、滑动导轨、螺杆、高度调节操作杆、轴承和底座等。

2 电起动关键部件有限元分析

由于电起动机构受力情况较复杂,适合应用有限元法进行强度校核。笔者先选择在 Pro/E 中建立起动机构三维实体模型后,再导入 ANSYS 软件的 Workbench 仿真平台,应用有限元法进行静力学分析^[14-15]。

2.1 关键部件三维实体模型建立

由于电起动机构中的零件主要承受起动力矩作用,应用 Pro/E 所建立的三维实体模型包括减

速箱中的主动齿轮、从动齿轮、输入轴、输出轴和传动键,以及单向离合机构中的中间传动轴、轴套、传动键、单向轴承、固定螺栓、圆盘和起动外六角头等。

电起动机构的动力输入轴即为电机电枢轴,动力输出轴与风机叶轮连接。由于电起动机构所输出的起动转矩是通过外六角起动头,与叶轮上的内六角孔啮合而传递,笔者也建立叶轮上的内六角孔连接件三维实体模型,以便添加约束条件。

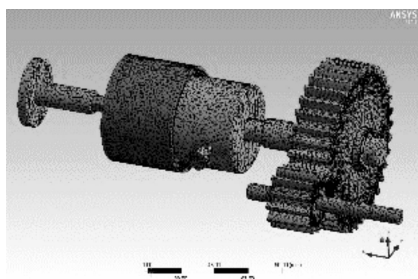
单向离合机构包含的滚动轴承、单向轴承为标准件,此处不对其进行强度模拟分析。为进行其他非标准传动零件的强度分析,需要进行整体求解域计算,因此笔者选择建立简化的滚动轴承、单向轴承模型(附键槽的实体)。

笔者在 Pro/E 中建立所需进行强度分析的全部实体模型并装配,再将装配模型导入 Workbench 静力学分析模块。在静力学分析模块中,先定义材料属性;在 DM 建模工具中,将起动机构零件材料均设置为普通结构钢,其默认屈服强度为 250 MPa。

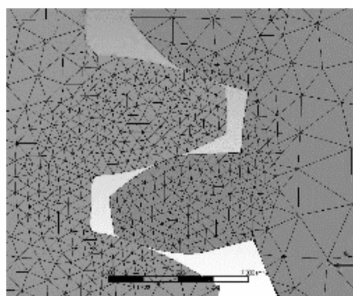
2.2 接触定义和网格划分

由于电起动机构存在多个零件接触,需要确定每个部件之间的相互关系,笔者将齿轮啮合设为摩擦接触,摩擦系数设置为 0.1,其余零件之间的接触均定义为线性接触。

电起动机构计算网格如图 5 所示。



(a) 起动机构整体网格



(b) 齿轮啮合区域网格

图5 电起动机构计算网格

网格划分方式采用自动划分网格,将全局网格尺寸设置为 3 mm。齿轮啮合面附近的网格通过接触尺寸(contact sizing)定义尺寸为 0.5 mm,以提高接触面网格质量,且尽量使接触处的节点对齐;

输入轴、输出轴与键,键与齿轮之间也通过接触网格定义,笔者设置接触尺寸为 2 mm,使互相接触零件在接触面上的网格节点对齐,网格总数约 3.1×10^5 个。

2.3 施加载荷和约束

划分网格后,需要定义求解模型的载荷和约束。载荷和约束是计算模型的边界条件,以所选单元自由度的形式来定义。

电起动机构所施加的载荷和约束示意图如图 6 所示。

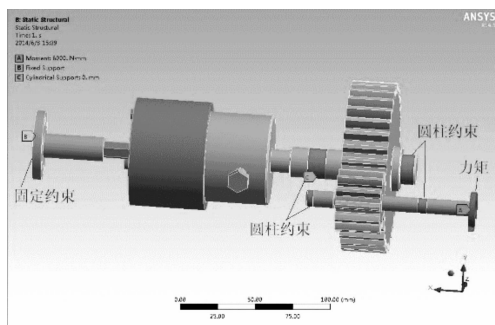


图6 电起动机构施加载荷及约束示意图

电起动机构实际由电枢轴上的电枢绕组提供起动转矩。根据设计要求,笔者对输入轴(即电枢轴)模型进行简化,在模型的圆端面施加力矩载荷,以作为起动转矩(其值等于前文所计算的最大起动阻转矩);

约束条件包括在输入轴和输出轴上的 4 个轴承接触面,分别施加圆柱约束(径向和轴向固定,切向自由),以及在叶轮上内六角孔连接件的端面处施加固定约束。

2.4 计算结果分析

由于所分析的电起动机构零件为塑性材料,可依据材料力学第四强度理论进行分析^[16]。ANSYS 静力学的分析结果可显示等效应力,即为根据第四强度理论推导出的屈服准则值,通常等效应力值至少应小于材料的屈服应力。

减速箱输出轴键槽同时受到挤压载荷和剪切载荷的作用。

设剪切载荷为 F ,挤压载荷为 T ,其断面发生在剪切交界面,对输出轴键槽进行的受力分析如图 7 所示。

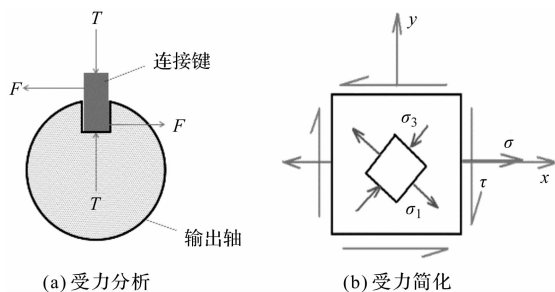


图 7 输出轴键槽受力分析

在二向应力状态下的主应力解析解为:

$$\begin{cases} \sigma_{\max} = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} + \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2} \\ \sigma_{\min} = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} - \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2} \end{cases} \quad (1)$$

式中: $\sigma_{\max}$ —主应力最大值; $\sigma_{\min}$ —主应力最小值; σ_x —水平方向应力; σ_y —垂直方向应力; τ_{xy} —剪切应力。

设:

$$\sigma_x = \sigma, \sigma_y = 0, \tau_{xy} = \tau \quad (2)$$

则可得到最大主应力和最小主应力为:

$$\begin{aligned} \sigma_1 &= \frac{\sigma}{2} + \sqrt{\left(\frac{\sigma}{2}\right)^2 + \tau} \\ \sigma_2 &= 0 \\ \sigma_3 &= \frac{\sigma}{2} - \sqrt{\left(\frac{\sigma}{2}\right)^2 + \tau} \end{aligned} \quad (3)$$

式中: $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ —3 个主应力。

依据第四强度理论,笔者开展如下校核:

$$\sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]} \leq \sigma_3 \quad (4)$$

式中: σ_3 —剪切界面的应力极值。

将式(3)代入式(4)中可得:

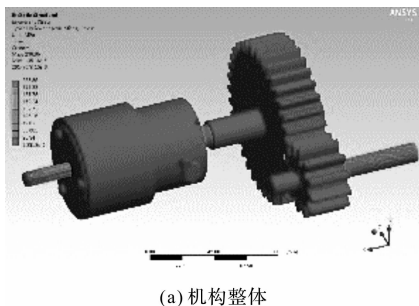
$$\sqrt{\sigma^2 + 3\tau^2} \leq [\sigma] \quad (5)$$

式中: $[\sigma]$ —材料允许应力。

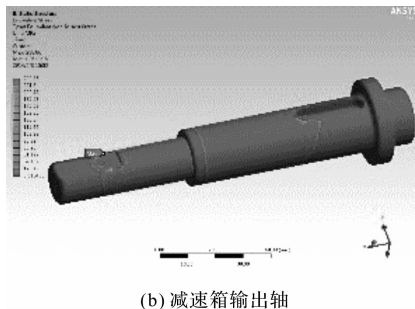
电起动机构的等效力图如图 8 所示。

通过计算显示,处于输出轴外端的槽面应力值最大,其等效力值为 239 MPa,小于材料的屈服应力。

根据求解结果可知,电起动机构关键零部件的强度符合起动工作要求。



(a) 机构整体



(b) 减速箱输出轴

图 8 电起动机构的等效力图

3 实验及结果分析

为验证电起动机构起动的可靠性,笔者对该风力灭火机进行电起动试验。试验测试仪器包括光电式非接触转速表和功率表。

起动试验过程中,笔者测量了电起动机构的死起动转速(未接通点火电路时带动负载转速)和死起动转矩。

电起动机构的起动试验图如图 9 所示。

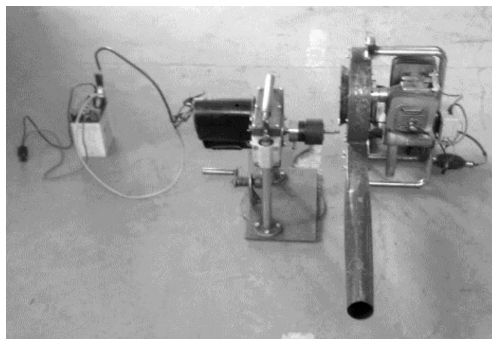


图 9 电起动机构起动试验图

由于单向离合器的中间轴与电机之间为齿轮传动,为测量电起动机构的输出转速,起动前笔者先在中间传动轴上贴反射条,通过光电转速表测量电起动机构的输出转速,用功率表测输出功率,并计算应力,即:

$$T = 9550 \frac{P}{N} \quad (6)$$

$$\tau = \frac{T}{W_p} \quad (7)$$

式中: T —转矩, $N \cdot m$; N —转速, r/min ; P —功率, kW ;

W_p —扭转截面系数, $W_p = \frac{\pi d^3}{16}$; d —旋转轴的直径, m 。

起动前,笔者断开汽油机点火电路,将电起动机构的外六角头与风机叶轮内六角孔接合后,测量电起动机构的死起动转速和功率,并计算对应的应力。

死起动工况下,第 2 s、4 s、6 s 时的电起动机的转速、功率和应力如表 3 所示。

表 3 死起动工况下电起动机的转速、功率和应力

参数	参数值		
时间/s	2	4	6
转速/(r · min ⁻¹)	415	422	418
转矩/(N · m)	149.6	147.1	148.5
应力/MPa	225.8	222.1	224.2

根据表 3 试验结果表明:该电起动机构极限工况下的最大应力平均值在 224.0 MPa 左右,与有限元分析结果接近,且小于材料的屈服应力。

由此可见,该电起动机构可稳定起动所针对的较高功率风力灭火机,且结构强度基本符合工作要求。

4 结束语

针对高性能风力灭火机选配某款较高功率汽油机时存在的问题,笔者设计了电起动总体方案、电机可换向电路、减速机构和单向离合机构:

(1) 该电起动机构具有与所选汽油机相匹配的起动特性,在起动后可自动中断转矩传递,适用于不同汽油机旋向的风力灭火机;

(2) 建立了电起动机构三维实体模型,对电起动机构关键部件进行了有限元法分析,结果表明,关键传动部件强度符合工作要求;

(3) 进行了电起动机构的起动可靠性试验,结果表明,机构关键部件的最大应力平均值在 224.0 MPa 左右,小于材料的屈服应力,该电起动机构可靠、稳定。

参考文献 (References):

[1] 张绍全,俞国胜. 便携式风力灭火机的研究与发展[J]. 林业机械与土木工程,2012,40(6):8-10.
[2] 吕敬群,孟庆良. 风力灭火机具研究概述[J]. 森林防火,

2008,96(1):40-42.
[3] 李攀旭,王顺喜,何 鹏. 我国草原森林风力灭火机问题探讨[J]. 林业实用技术,2007(12):42-43.
[4] 宋兴关. 6SB-A 型手提式风力灭火机的研制[J]. 林业机械与木工设备,2002,30(2):16-17.
[5] 蒋梅胜,李 恒,李林书,等. 基于 CFD-DEM 耦合法的灭火机风筒优化与试验[J]. 农业工程学报,2015,31(8):104-111.
[6] 辛 喆,李钊婧,王顺喜,等. 便携式风力灭火机的数值优化设计[J]. 农业工程学报,2011,27(9):33-37.
[7] 方 墨,俞国胜,褚双磊,等. 基于 CFD 软件的轴流式风力灭火机叶轮性能模拟研究[J]. 林业机械与木工设备,2010,38(5):18-21.
[8] MAO K. Gear tooth contact analysis and its application in the reduction of fatigue wear[J]. Wear,2006,262(11):1281-1288.
[9] 王可义,陈凌钢,王彦伟. 发动机电力起动系统设计因素探讨[J]. 内燃机与动力装置,2012,127(1):13-18.
[10] 马 旗,李元新,赵培山,等. 电起动马达的选型及应用[J]. 内燃机与动力装置,2008,108(6):37-40.
[11] 张玲玲,张小印. 汽车起动机性能要求的确定方法[J]. 汽车电器,2000(3):6-7.
[12] 张立梅,程 勇,吴 波,等. SD195 型柴油机曲轴旋转不均匀度的研究[J]. 小型内燃机,1990(4):6-8.
[13] 朱春梅,朱自成,孔庆堂. 楔块式超越离合器的特点及其应用[J]. 机电国际市场,2002(11):7-8.
[14] 周 钊. 基于 ANSYS Workbench 的直齿轮接触分析[J]. 湖北汽车工业学院学报,2011,25(4):77-80.
[15] 云永琥,塔静宁,胡 泓. 基于有限元法的塑料齿轮动态啮合接触分析[J]. 机械设计与研究,2018,34(6):87-90.
[16] 苟文选. 材料力学[M]. 西安:西北工业大学出版社,2005.

[编辑:冯黎雅]

本文引用格式:

何也能,辛 喆,赵红利,等. 气动灭火器电起动设计及关键部件强度分析[J]. 机电工程,2020,37(8):894-899.
HE Ye-neng, XIN Zhe, ZHAO Hong-li, et al. Design and strength analysis on components of electric starter towards pneumatic extinguisher[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2020,37(8):894-899.
《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>