

冷镦机棘爪部件的材料选取与性能分析

王宏伟¹, 单志航¹, 张立鑫¹, 吴相朝¹, 李明杰²

(1. 河北工程大学 机械与装备工程学院, 河北 邯郸 056038; 2. 河北国智机械装备制造有限公司, 河北 邯郸 057150)

摘要: 针对多工位冷镦机送料机构的棘爪部件易损坏的优化需求, 在采用 Cero 对棘轮机构建模的基础上, 采用 Workbench 静力学分析对原棘爪材料 60Si2MnA 钢、Cr12MoV 钢、20CrMnTi 钢以及 42CrMo 钢这 4 种备选材料在正常状态下的最大变形量、等效应力、摩擦应力以及静强度许用安全系数进行求解和对比分析。研究结果表明: Cr12MoV 钢更能满足送料机构棘爪的需求, 在正常工作的状态下, 能有效地减小棘爪的最大变形量和等效应力, 提高棘爪部件的寿命, 提高送料机构进料料长的精度。该优化创新设计目前已在多工位冷镦机上应用, 效果良好。

关键词: 多工位冷镦机; 棘爪; 选材; 静力学分析; 安全系数

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2024.01.023

中图分类号: TH164

文献标志码: A

文章编号: 1000-3940 (2024) 01-0182-08

Material selection and performance analysis on pawl parts of cold heading machine

Wang Hongwei¹, Shan Zhihang¹, Zhang Lixin¹, Wu Xiangchao¹, Li Mingjie²

(1. School of Mechanical and Equipment Engineering, Hebei University of Engineering, Handan 056038, China;

2. Hebei Guozhi Mechanical Equipment Manufacturing Co., Ltd., Handan 057150, China)

Abstract: In view of the optimization requirements of the easily damaged pawl parts for the feeding mechanism of multi-station cold heading machine, based on modeling of the ratchet mechanism by Cero, Workbench static analysis was used to solve and comparatively analyze the maximum deformation amount, equivalent stress, frictional stress and allowable safety factor of static strength of the original pawl material of 60Si2MnA steel, Cr12MoV steel, 20CrMnTi steel and 42CrMo steel under normal conditions. The research results show that Cr12MoV steel can better meet the needs of the pawl for the feeding mechanism. Under normal working conditions, it can effectively reduce the maximum deformation amount and equivalent stress of the pawl, increase the life of the pawl component, and improve the accuracy of the feeding material length for the feeding mechanism. The optimized and innovative design has been applied to the multi-station cold heading machine which achieves good results.

Key words: multi-station cold heading machine; pawl; material selection; static analysis; safety factor

多工位冷镦机主要是以冷冲压加工为主, 用于批量生产标准件、紧固件和异型件。与传统的切削加工相比, 冷镦加工有两个显著的优势: 冷镦产品的力学性能较好; 冷镦加工为少或无切削加工, 材料的利用率高^[1]。

送料机构是多工位冷镦机的关键机构之一, 该机构根据产品大小的需要, 传送一定长度的棒料, 并将其进行剪切分段, 将剪切后的棒料段送至冷镦的各个工位进行加工^[2]。对于产品而言, 其品质的一个重要指标是产品的质量, 而棒料段在送料机构完成剪切后, 棒料的质量大小就已经确定, 所以送料机构的精度决定了冷镦机成品质量的精度^[3]。为

了增强送料传递的平稳性、提高产品的精度, 送料传动中多采用棘轮机构, 该机构主要由摆杆、棘轮和棘爪等部分组成, 是一种单向间歇式运动机构。冷镦机每生产一个产品, 棘爪就会与棘轮发生一次碰撞, 这将会导致棘爪齿长时间地发生接触性疲劳损坏, 因此棘爪的优化问题日益突出。

滕欣艺^[4]对送料机构中送料料长偏差和对高速状态下棘轮机构间的碰撞力进行了研究, 得到了送料机构的送料料长曲线和高速运转下棘轮与棘爪之间的碰撞力曲线; Guo Q Z 等^[5]分析了棘轮机构的运动过程, 得到了棘轮棘爪功能参数的计算方法和设计公式; 侯升亮等^[6]运用 ADAMS 对棘轮棘爪离合器进行动力学仿真分析, 为棘爪的加工及修理中参数的控制提供了理论的依据; 赵红利等^[7]对某汽车的换挡棘爪断裂零件进行失效分析, 通过对失效棘爪的金相组织、硬度分布等进行分析, 提出将压

收稿日期: 2023-07-24; 修订日期: 2023-10-26

作者简介: 王宏伟 (1971-), 男, 博士, 教授

E-mail: wanghw689@126.com

制工艺进行改变，弥补了这一缺陷。

综上，部分学者对棘轮部件进行了有限元分析和动力学分析，研究了高速运转下棘轮与棘爪之间的碰撞力；部分学者对棘爪断裂零件进行了失效分析，通过改进其材料的压制工艺减小了棘爪失效的几率，而对冷镦机棘爪部件进行优化的研究较少。为此，本文以 33B-6SL 型多工位螺母冷镦机为试验机，针对多工位冷镦机在实际生产过程中棘轮部件棘爪易损坏的问题，进行了运动分析和仿真分析，结合所需的工作需求和 4 种材料的性能对比，对材料的选取及性能问题进行研究，为企业现有的多工位冷镦机的棘爪部件的改进提供新的思路。

表 1 列出了 33B-6SL 型多工位螺母冷镦机的主要参数指标。33B-6SL 型多工位螺母冷镦机为六工位，最大锻压力可达 3300 kN，主滑块行程、生产速度、主马达功率等参数如表 1 所示。

表 1 33B-SL 型多工位螺母冷镦机参数

Table 1 Parameters of 33B-SL multi-station nut cold heading machine

参数	数值
最大切断直径/mm	Φ33
最大切断长度/mm	30
后冲顶出长度/mm	40
主滑块行程/mm	160
生产速度/(件·min ⁻¹)	60~90
最大锻压力/kN	3300
主马达功率/kW	110
主机器尺寸/(m×m×m)	5.7×3.6×2.4

1 棘轮机构的运动过程

常见的棘轮机构按啮合方式可分为内棘轮机构和外棘轮机构，根据棘轮机构的运动特点，一般棘轮为主动件，棘爪为从动件。多工位自动冷镦机一般采用外啮合单向棘轮机构，其中棘爪为主动件，棘轮为从动件，该结构通常由摆杆、棘轮、棘爪以及棘轮轴等部分组成，是一种单向间歇式运动机构。棘轮机构的结构如图 1 所示。

棘轮机构的运动过程如图 2 所示。其运动过程为：曲轴旋转带动输料摇杆摆动，并带动棘爪运动，使棘爪与棘轮啮合。在工作行程中，棘轮与棘爪啮合，棘爪带动棘轮转动，棘轮再带动输料齿轮传动。在非工作行程中，棘爪与棘轮脱开，只有棘爪摆动。棘轮机构将连续的摆动变为间歇的单向转动，从而实现线材的间歇进给。

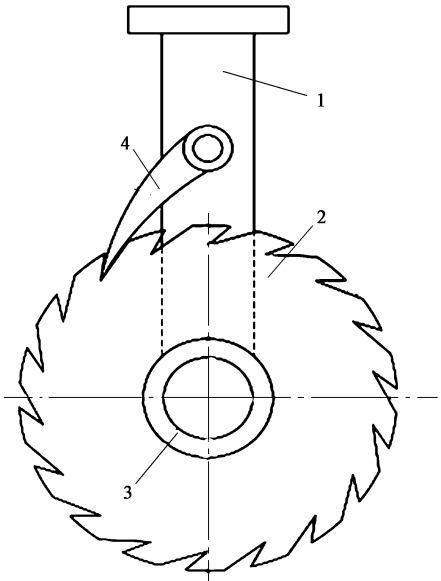


图 1 棘轮机构结构图

1. 摆杆 2. 棘轮 3. 棘轮轴 4. 棘爪
Fig. 1 Structure diagram of ratchet mechanism

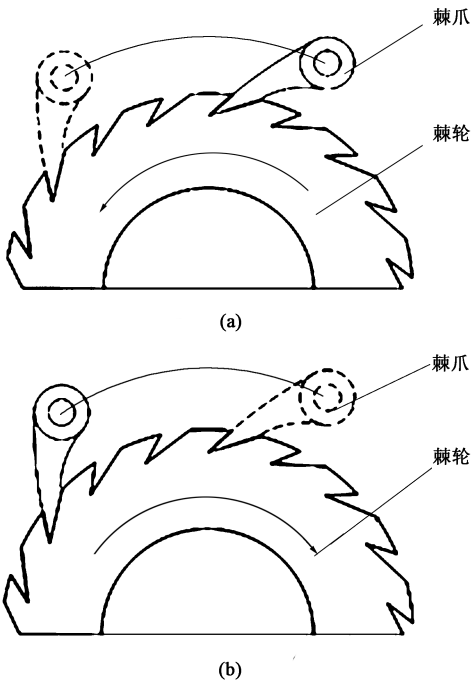


图 2 棘轮机构的运动过程

(a) 工作进程 (b) 非工作进程

Fig. 2 Motion processes of ratchet mechanism
(a) Working process (b) Non-working process

2 棘爪部件选用材料

多工位冷镦机送料机构的棘轮机构不同于常见的棘轮机构，它的棘爪为主动件，棘轮为从动件，

而且其工作时棘爪与棘轮啮合频繁,所以材料的选择应符合其特殊的工作状态。

材料的选取主要以棘爪部件能够正常安全工作为主要目标。在棘爪部件正常工作时带动棘轮绕棘轮轴快速旋转,棘轮与棘爪也是频繁碰撞和接触性摩擦,所以材料必须具有一定的强度和抗变形能力;考虑到多工位冷镦机的复杂工作环境,材料还必须有一定的耐腐蚀能力。42CrMo 钢具有高强度、高韧性、高耐磨性等特点^[8],与该合金钢成分相似的高碳高合金莱氏模具钢 Cr12MoV 和 20CrMnTi,同样具有以上特性,他们常被用作各种高精度、寿命长的冷作模具、刃具和量具^[9]。Xing Z X 等^[10]采用自行研制的多功能微磁仪对 Cr12MoV 钢进行了硬度重复性试验;潘成刚等^[11]使用 TD (TOYOTA Diffusion) 技术对 Cr12MoV 钢进行了不同的盐浴处理,研究了 Cr12MoV 钢在中性盐浴处理后的硬度、耐磨性以及耐腐蚀性,结果表明,处理后材料的硬度、耐磨性以及耐腐蚀性均有显著提高。Chala A 等^[12]采用交流阻抗谱,研究了 42CrMo 钢等离子渗氮后在盐酸溶液中的腐蚀行为;王龙等^[13]采用多功能摩擦磨损试验机,研究分析了 20CrMnTi 钢齿轮磨削表面的摩擦磨损性能。

上述 3 种材料符合多工位冷镦机棘爪部件的相关需求,所以选取 42CrMo 钢、Cr12MoV 钢以及 20CrMnTi 钢作为棘爪部件的备选材料,其与原材料 60Si2MnA 钢和 45 钢(棘轮)的属性参数如表 2 所示。

表 2 4 种材料的材料属性

Table 2 Material properties of four kinds of materials

材料	密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	弹性模量/ GPa	泊松比	屈服强度/ MPa	热膨胀系数/ ($\times 10^{-6} \text{ K}$)
45 钢	7890	2.09	0.269	335	11.7
60Si2MnA 钢	7740	2.06	0.290	1225	12.6
Cr12MoV 钢	7850	2.18	0.280	650	10.4
20CrMnTi 钢	7800	2.07	0.250	835	12.6
42CrMo 钢	7850	2.12	0.280	930	12.4

3 棘轮机构的仿真与校核

3.1 棘轮机构的模型简化

在不影响计算结果的前提下,当有限元分析的对象结构比较复杂,但分析的目标又不是这些复杂结构件的应力与变形,而是整个结构的特性时,可

以利用相对简单的模型对这些复杂结构进行等效处理^[14]。根据送料机构的整体结构,简化并绘制棘轮机构。依据棘轮部件和棘爪部件的二维图纸,如图 3 所示,使用 Cero 绘制棘轮机构装置装配图,得到棘爪与棘轮轮齿啮合时两个部件的相对位置,其棘轮机构的三维简化模型如图 4 所示。

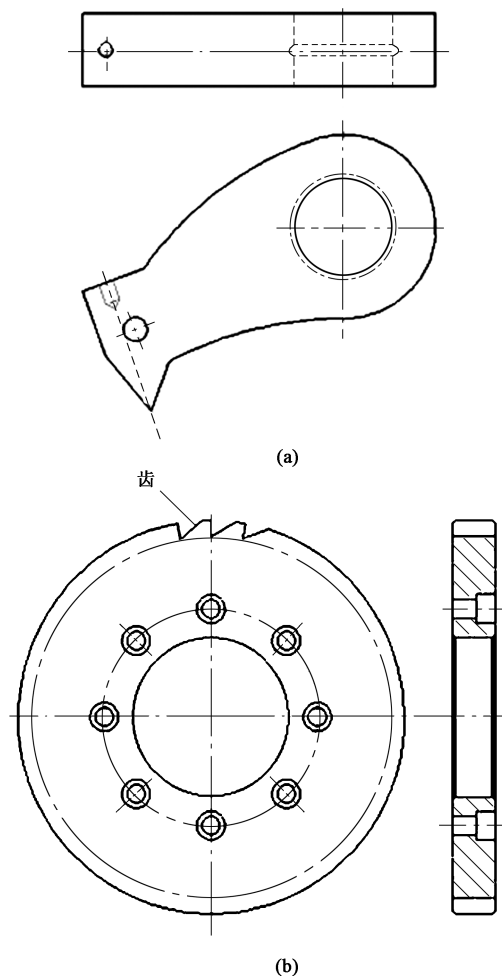


图 3 棘轮机构二维图纸

(a) 棘爪 (b) 棘轮

Fig. 3 Two-dimensional drawings of ratchet mechanism

(a) Pawl (b) Ratchet

3.2 网格划分和接触设置

对整个棘轮机构采用四面体网格进行划分,网格大小设为 8 mm,并在棘轮和棘爪啮合的位置建立一个参考坐标系,根据几何体尺寸调整中的影响区域来进一步划分网格,以参考坐标系为球心,球体半径设为 25 mm,网格大小设为 3 mm,划分后的单元数为 39109、节点数为 61199,网格划分情况如图 5 所示。

棘轮机构中棘轮与棘爪相互啮合,其接触面采用摩擦接触,接触类型为 Frictional,摩擦因数设定

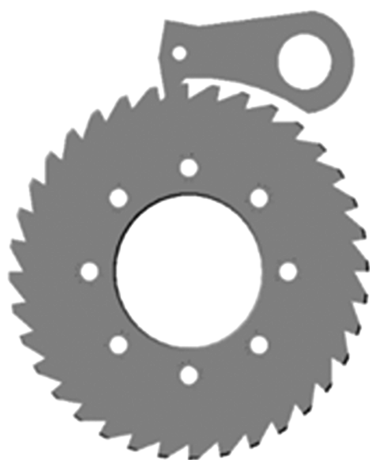


图4 棘轮机构简化模型

Fig. 4 Simplified model of ratchet mechanism

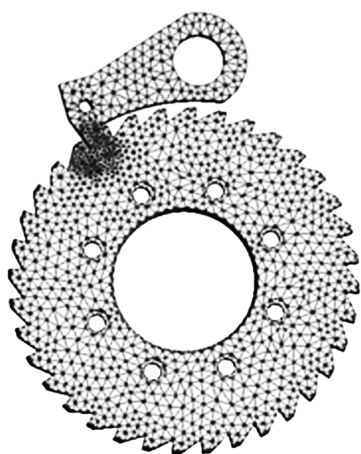


图5 棘轮机构网格划分

Fig. 5 Grid division of ratchet mechanism

为0.2, 设置棘轮为接触几何体, 棘爪为目标几何体。棘轮在工作过程中间断旋转, 以此来带动输料齿轮转动, 进行原料剪切, 故在 ANSYS Workbench 中采用回转的方式, 使棘轮可以逆时针旋转。

3.3 约束与载荷设定

施加载荷与约束时, 应该结合实际的工作状态。正常的工作状态为动力从棘爪输入, 使棘爪与棘轮啮合传动。当棘爪与棘轮轮齿啮合时, 此时棘轮与棘爪间的接触力最大, 可达 852 N。由牛顿第二定律可知, 棘爪与棘轮轮齿啮合时, 棘轮给棘爪一个反作用力。所以可以在棘爪中心表面施加固定约束, 在棘轮中心表面添加旋转连接副, 已知正常工作下旋转一圈需要 30 s, 所以旋转速度设置为 $0.21 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

3.4 建立棘轮机构接触应力数学模型

棘轮棘爪的约束在 ANSYS Workbench 中被定义为接触力。接触力有两种定义方法, 一种接触算法

以回归方程为定义基础, 另一种以碰撞函数为定义基础^[15]。在棘轮棘爪的实际运行过程中存在啮合碰撞, 因此选择第2种定义方法对棘轮棘爪间的接触力进行定义。

碰撞函数的表达式为:

$$F = \begin{cases} 0, & q > q_0 \\ k_t(q_0 - q)^e - c\left(\frac{dq}{dt}\right)g(q, q_0 - d, 1, q_0, 0), & q \leq q_0 \end{cases} \quad (1)$$

式中: F 为棘轮与棘爪之间的接触力; k_t 为材料的刚度系数; q_0 为棘轮棘爪在产生碰撞前的初始距离; q 为棘轮棘爪在运动过程中的实际距离; e 为接触力指数; c 为棘轮棘爪间的最大阻尼系数; dq/dt 为棘轮棘爪的位置距离随时间 t 的变化率; d 为碰撞时的切入深度; $g(\cdot)$ 为两物体运动接触时在某一时刻的距离, 可能为 q , $q_0 - d$, 1 , q_0 或 0 。

对接触力函数进行设置时, 需要确定刚度系数、阻尼系数与接触力系数等参数。其中, 阻尼系数与接触力系数可以根据使用环境及材料特性确定, 物体的刚度系数可根据式(2)求得:

$$k_t = \frac{4}{3}r^{\frac{1}{2}}E \quad (2)$$

式中: r 为等效半径; E 为合成弹性模量。

其中:

$$\frac{1}{r} = \frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \quad (3)$$

$$\frac{1}{E} = \frac{(1 - v_1^2)}{E_1} + \frac{(1 - v_2^2)}{E_2} \quad (4)$$

式中: r_1 、 r_2 分别为两个接触体(棘爪、棘轮)的碰撞半径; v_1 、 v_2 分别为两个接触体的泊松比; E_1 、 E_2 分别为两个接触体的弹性模量。

3.5 结果分析

前处理完成后, 对其进行求解, 以棘爪的材料 60Si2MnA 钢为例, 求解得到棘爪的最大变形量、等效应力和摩擦应力, 如图6所示。

由图6a可知, 棘爪的最大形变处在棘爪的齿顶, 最大变形量为 0.143960 mm; 由图6b可以看出, 等效应力主要分布在棘爪的上表面和下表面, 最大等效应力在棘爪齿根, 最大等效应力为 229.21 MPa; 由图6c中可以看出, 摩擦应力主要集中在棘轮齿顶, 最大摩擦应力为 93.887 MPa。4种材料的棘爪部件的最大变形量、最大等效应力和摩擦应力如表3所示, 其折线图如图7所示。

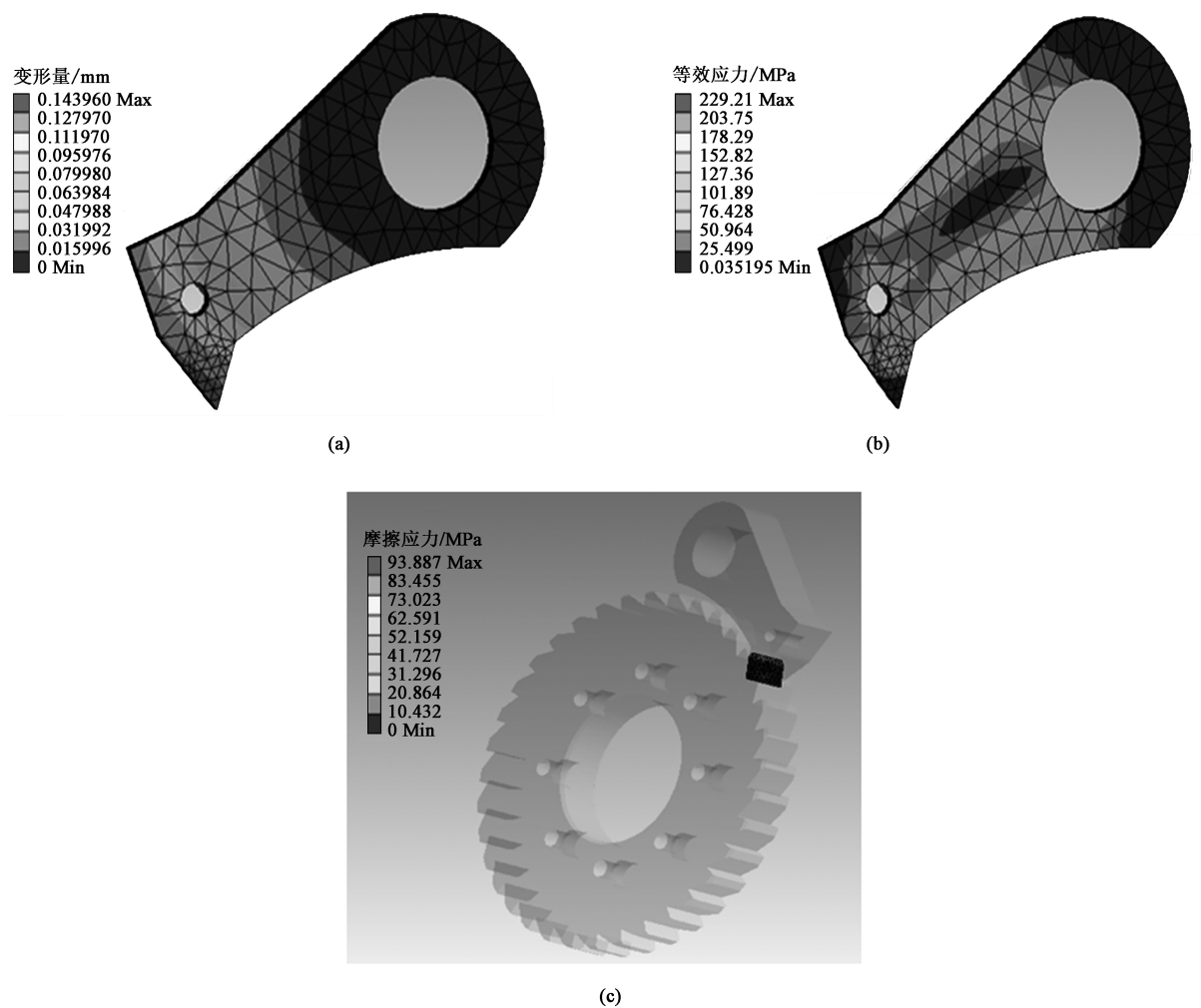


图 6 棘轮机构静力分析图

(a) 棘爪变形量分布 (b) 棘爪等效应力分布 (c) 摩擦应力分布

Fig. 6 Static analysis diagrams of ratchet mechanism

(a) Deformation amount distribution of pawl (b) Equivalent stress distribution of pawl
(c) Friction stress distribution

表 3 4 种材料静力分析结果对比

Table 3 Comparison of static analysis results for four kinds of materials

材料	最大变形量/ mm	最大等效应力/ MPa	最大摩擦应力/ MPa
60Si2MnA 钢	0.14396	229.21	93.887
Cr12MoV 钢	0.13264	201.43	94.296
20CrMnTi 钢	0.14374	240.08	94.386
42CrMo 钢	0.14329	234.45	95.153

4 种棘爪材料的最大变形量对比如图 7a 所示, Cr12MoV 钢的最大变形量最小, 为 0.13264 mm, 其余 3 种材料的最大变形量非常接近, 最大相差 0.00067 mm。最大变形量最大的 60Si2MnA 钢与最

大变形量最小的 Cr12MoV 钢之间相差 0.01132 mm。4 种棘爪材料的最大等效应力对比如图 7b 所示, Cr12MoV 钢的最大等效应力最小, 为 201.43 MPa, 其次为 60Si2MnA 钢和 42CrMo 钢, 最大等效应力分别为 229.21 和 234.45 MPa, 最大等效应力最大的是 20CrMnTi 钢, 为 240.08 MPa, 与最大等效应力最小的 Cr12MoV 钢相差 38.65 MPa。4 种棘爪材料的最大摩擦应力对比如图 7c 所示, 60Si2MnA 钢受到的最大摩擦应力最小, 为 93.887 MPa, 其次为 Cr12MoV 钢的 94.296 MPa, 然后分别为 20CrMnTi 钢的 94.386 MPa 和 42CrMo 钢的 95.135 MPa。最大摩擦应力最大的 42CrMo 钢和最小的 60Si2MnA 钢之间相差了 1.248 MPa。

4 种材料的最大等效应力均要小于对应材料的

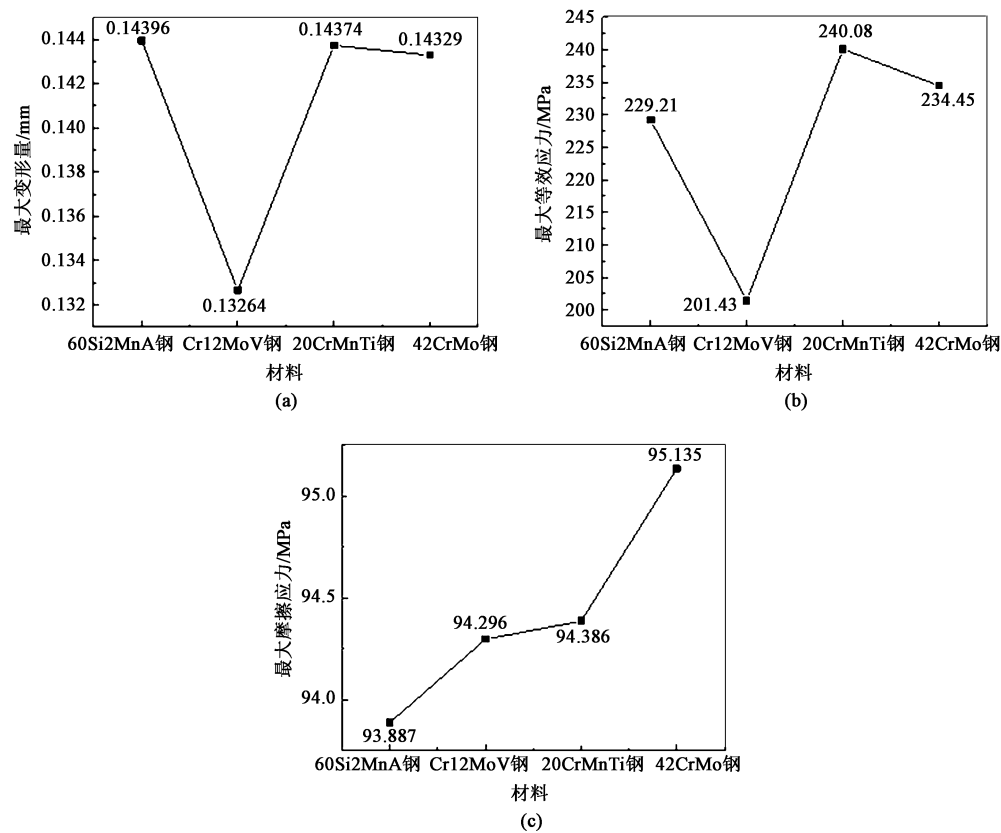


图 7 4 种材料棘轮机构的静力分析折线图

(a) 最大变形量 (b) 最大等效应力 (c) 最大摩擦应力

Fig. 7 Static analysis line charts of ratchet mechanism for four kinds of materials

(a) Maximum deformation amount (b) Maximum equivalent stress (c) Maximum friction stress

屈服强度。通过上述对比可知，当棘爪材料为 Cr12MoV 钢时，棘爪和棘轮的最大变形量和最大等效应力均较小。这就表明在正常工作时，棘爪选用 Cr12MoV 钢材质会有更小的变形量。对于处于不间断工作的精密部件，变形量是一个非常重要的指标，变形量太大，部件极有可能在运行过程中发生失衡。Cr12MoV 钢的最大等效应力也较小，可降低正常工作时材料的损伤风险，给部件带来更大的安全保障。

3.6 静强度许用安全系数

材料特性会影响安全系数，安全系数也是衡量材料是否合适的标准之一。静强度许用安全系数公式为：

$$n = R_{el} / \sigma \tag{5}$$

式中： n 为静强度许用安全系数； R_{el} 为屈服强度； σ 为最大等效应力。

根据式 (5) 分别计算 4 种材料的静强度许用安全系数，计算结果如表 4 所示，4 种材料的静强度许用安全系数折线图如图 8 所示。

表 4 4 种材料的静强度许用安全系数对比

Table 4 Comparison of allowable safety factor of static strength for four kinds of materials

材料	60Si2MnA 钢	Cr12MoV 钢	20CrMnTi 钢	42CrMo 钢
数值	5.34	3.23	3.47	3.97

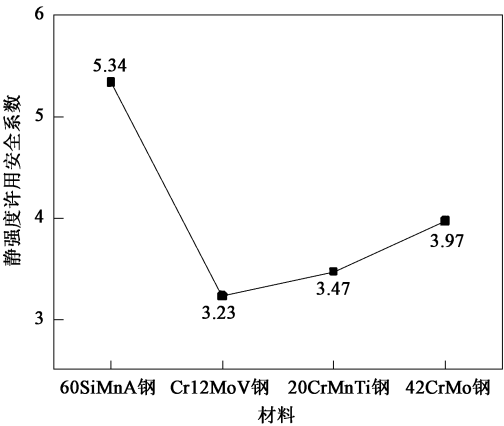


图 8 4 种材料静强度许用安全系数折线图

Fig. 8 Allowable safety factor of static strength line chart for four kinds of materials

3.7 对比分析

通过上述的分析结果可以得到 4 种材料的性能对比表,如表 5 所示。

棘爪材料需要具备高强度、高硬度、耐磨性以及耐腐蚀性。从静力学分析结果看,60Si2MnA 钢的最大变形量较大,20CrMnTi 钢的最大等效应

力较大,42CrMo 钢的最大摩擦应力较大;从静强度许用安全系数结果看,60Si2MnA 钢的静强度许用安全系数较高,其他 3 种材料的静强度许用安全系数均在 3.5 左右;从材料本身性能分析,Cr12MoV 钢和 42CrMo 钢的密度较大,同体积下质量较高。

表 5 4 种材料性能对比

Table 5 Performance comparison for four kinds of materials

材料	密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	弹性模量/ GPa	泊松比	屈服强度/ MPa	热膨胀系数/ ($\times 10^{-6} \text{ K}$)	最大变形量/ mm	最大等效应力/ MPa	最大摩擦应力/ MPa	安全 系数
60Si2MnA 钢	7740	2.06	0.29	1225	12.6	0.14396	229.21	93.887	5.34
Cr12MoV 钢	7850	2.18	0.28	650	10.4	0.13264	201.43	94.296	3.23
20CrMnTi 钢	7800	2.07	0.25	835	12.6	0.14374	240.08	94.386	3.47
42CrMo 钢	7850	2.12	0.28	930	12.4	0.14329	234.45	95.135	3.97

综上,仿真数据显示,Cr12MoV 钢材料的变形量和等效应力较小,Cr12MoV 钢材料在正常工作状态下会减小接触性疲劳损坏,从而延长棘爪部件的使用寿命,静强度许用安全系数也能完全达到部件稳定运行的要求,所以,考虑使用 Cr12MoV 钢材料作为送料机构棘爪部件的制作材料。图 9 为 Cr12MoV 钢棘爪部件工作状态实物图,图 10 为多工位自动冷镦机工作状态下的实物图。

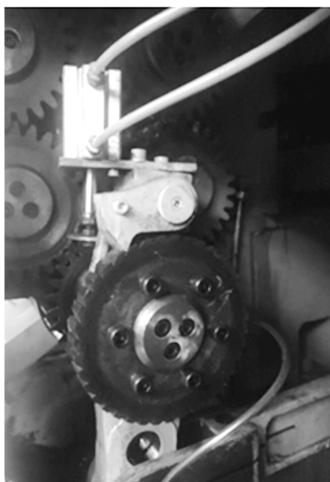


图 9 棘爪部件实物图

Fig. 9 Physical diagram of pawl parts

4 结论

(1) 基于 Workbench 分别对 4 种材料的棘轮机构进行了静力学分析,得到了 4 种材料的最大变形量、最大等效应力和最大摩擦应力等关键参数,并计算了 4 种材料的静强度许用安全系数。

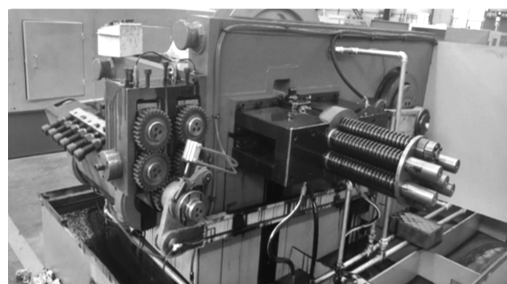


图 10 冷镦机实物图

Fig. 10 Physical diagram of cold heading machine

(2) 比较上述性能参数,结合材料各自属性,在满足棘爪部件正常工作的前提下,综合考虑使用 Cr12MoV 钢代替 60Si2MnA 钢作为棘爪的制作材料。

(3) 与原材料 60Si2MnA 钢相比,使用 Cr12MoV 钢作为棘爪的制作材料,最大变形量减少了 7.86%,最大等效应力减少了 12.12%,增加了棘爪部件的强度,并且延长了棘爪部件的使用寿命。

参考文献:

- [1] 童晋方,冯治国,江玉莲,等. TB9 钛合金芯杆冷镦成形模拟及实验研究 [J]. 锻压技术, 2023, 48 (8): 32-40.
Tong J F, Feng Z G, Jiang Y L, et al. Simulation and experimental study on cold extrusion forming of TB9 titanium alloy rod [J]. Forging & Stamping Technology, 2023, 48 (8): 32-40.
- [2] 吴丽霞,杨元军. 一种自动冷镦机半成品送料系统 [J]. 锻压装备与制造技术, 2014, 49 (2): 45-46.
Wu L X, Yang Y J. A semi-finished product feeding system for automatic cold heading machine [J]. China Metalforming Equipment & Manufacturing Technology, 2014, 49 (2): 45-46.
- [3] 叶畅,朱昊,汪木兰,等. 基于 STM32 的冷镦机智能送料机构控制系统研制 [J]. 机床与液压, 2016, 44 (11): 58-60, 65.

(下转第 201 页)