

螺旋锥齿轮锻造工艺与碳排放模型研究

戴浩文^a,王安哲^{a,b},查光成^{a,b},孔凡新^{a,b}

(南京工程学院 a. 材料科学与工程学院; b. 江苏省先进结构材料与应用技术重点实验室,江苏 南京 211167)

摘要:针对螺旋锥齿轮的开式模锻工艺,系统研究锻压速度、模具预热温度、坯料温度以及摩擦系数4个工艺参数对成形过程中成型载荷及碳排放的影响,建立基于响应面法的碳排放二次回归模型,进行了仿真分析。结果表明,坯料温度对碳排放的影响最大,摩擦系数和模具预热温度影响次之,锻压速度对碳排放量几乎没有影响。

关键词:螺旋锥齿轮;刚塑性有限元法;响应面法;碳排放

中图分类号:TH16;X76 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2021)05-0078-04

Research on Forging Technology and Carbon Emission Model of Spiral Bevel Gear

DAI Haowen^a, WANG Anzhe^{a,b}, ZHA Guangcheng^{a,b}, KONG Fanxin^{a,b}

(a. School of Materials Science and Engineering, b. Key Laboratory of Advanced Structural Materials and Application Technology of Jiangsu Province, Nanjing Institute of Technology, Nanjing 211167, China)

Abstract: For the open-type forging process of spiral cone gear, systematic study of forging speed, mold preheating temperature, the effect of the four process parameters of the blank temperature and coefficient of friction on the forming load and carbon emissions during forming process, a secondary emission regression model of carbon emissions based on response surface methodology was established, simulated and analyzed. The results show that blank temperature has the greatest impact on carbon emissions, followed by the friction coefficient and die preheating temperature, while the forging speed has little effect on carbon emissions.

Keywords: spiral bevel gear; rigid-plastic finite element method; response surface method; carbon emissions

0 引言

国务院印发的《中国制造2025》中明确提出要将绿色发展的理念与制造业相结合,推动制造业绿色发展,使之成为21世纪经济可持续发展的主导形态,而以齿轮为代表的零部件更是制造业的基础与核心。在齿轮行业高速发展的大背景下,低碳制造逐渐成为发展趋势。因此优化工艺参数对于齿轮制造过程中的碳排放降低具有重要意义。

目前齿轮主要采用切削加工、模锻生产和辗环工艺等加工工艺生产。近几年,国内外针对切削制造的碳排放研究已有了很大进展,如方旭斌^[1]以传动齿轮为研究对象,考虑齿轮生产的整个流程,建立了碳排放模型,确定了齿轮切削加工时的碳排放主要来源。黄文良等^[2]针对铣削加工建立了模型并通过粒子算法优化得到低碳高效的工艺参数。KANT G等^[3]利用联合主成分分析法优化了工艺参数以获得最低能耗和最优的表面粗糙度。虽然齿轮切削加工碳排放模型的研究很多,但由于切削加工工艺本身的局限性,并不能真正符合绿色制造的理念。

相较而言,模锻工艺由于其具有材料消耗少、成型效

率高、材料质量好等优势,更符合低碳设计需求。目前,针对模锻工艺的碳排放研究主要集中在碳排放的测定与估算,未探讨相关工艺参数对碳排放的影响规律,例如:TONG Y F等^[4]以锻造过程的热处理环节为切入点,提出了一种动态聚类和分层式的优化组合,该方法可以减少加热时间,提高熔炉利用率。尹瑞雪等^[5-6]以齿轮锻造为例,建立了一般零件锻造全过程的碳排放量化模型,为生产实际提供了碳排放计算依据。

本文以螺旋锥齿轮的热模锻过程为例,将锻压速度、模具预热温度、坯料加热温度和摩擦系数作为优化变量,将最低的成型载荷和碳排放作为响应值,利用响应面法,建立碳排放优化模型,综合探究工艺参数对成型载荷和碳排放的影响。

1 分析方法

1.1 碳排放量计算

1) 下料工序

螺旋锥齿轮坯料采用剪切法下料,根据文献[7],下料工序产生的能耗及碳排放理论公式为

基金项目:江苏省高等学校自然科学基金面上项目(19KJB430021);江苏省委组织部“双创计划”人才专项;南京工程学院引进人才项目(YKJ201806)

第一作者简介:戴浩文(1998—),男,江苏泰州人,本科,研究方向为材料成型及控制工程。

$$C_1 = KE_1 = \pi \frac{d^3}{4} \lambda \sigma_b K \quad (1)$$

式中: E_1 表示下料工序的能耗, J; d 表示坯料初始直径, mm; λ 表示塑性材料系数; σ_b 表示坯料抗拉强度; C_1 表示下料工序碳排放当量, kgCO₂e; K 表示电力能源碳排放系数, 2018 年电能碳排放系数^[8]为 2.235×10^{-7} kgCO₂e/J。

2) 锻前加热工序

坯料加热过程中所吸收的能量可以通过热容公式计算得到:

$$C_2 = KE_2 = mK \int_{T_0}^{T_1} C(T) dT \quad (2)$$

式中: E_2 表示锻前加热工序能耗, J; m 表示坯料质量, g; T_1 表示加热后的温度, °C; T_0 表示室温, °C; $C(T)$ 表示温度为 T 时的热容, kJ/(g · °C)。

3) 模锻工序

锻造工序碳排放量计算公式如下:

$$C_3 = KE_3 \quad (3)$$

式中: E_3 为模锻工序能耗, 该值不需计算, 只需利用 Origin 软件将锻造过程的载荷-行程曲线积分, 积分结果即为 E_3 。

4) 切边工序

由于零件连皮和飞边厚度较小, 加工硬化带来的设备载荷增大对能量消耗影响较小, 故不考虑冲切速度对结果的影响。设备所做功可以按照冲压的冲裁力与飞边连皮厚度的乘积计算公式进行计算。同时为减少计算量, 本文采用简化公式, 假设冲裁力不发生改变, 飞边厚度按照一半进行计算, 则碳排放量计算公式为

$$C_4 = KE_4 = 0.001kC\tau \frac{t^2}{2} K \quad (4)$$

式中: E_4 表示冲孔切飞边总能量, J; k 为系数, 一般取值 1.3; C 表示飞边或连皮的周长, mm; τ 表示材料抗剪强度, MPa; t 表示飞边或连皮厚度, mm。

5) 后续机加工工序

计算切削加工能耗时, 考虑到本文重点是探究成形工艺参数对碳排放量的影响, 为方便计算, 本文只讨论工件本身的切削体积损失而不考虑切削加工时的切削参数, 则该工序的能耗理论公式如下:

$$C_5 = KE_5 = kV\mu_1 K \quad (5)$$

式中: E_5 表示机加工工序能耗, J; k 表示修正系数, 取值为 2.78×10^{-7} ; V 表示工件的去除体积, mm³; μ_1 表示切削比能耗, 即单位时间内去除单位体积所消耗的能量, W · s/mm³, 一般取值为 2~9, 本文取为 6。

6) 制造过程总碳排放量计算

根据上文公式, 可以建立螺旋锥齿轮零件制造过程总的碳排放量计算公式:

$$C = \sum_{i=1}^5 C_i \quad (6)$$

1.2 有限元模拟

本文所研究的螺旋锥齿轮锻件材料选用 20CrMnTi, 在 Deform 软件中对应的美式牌号为 AISI-4120 [70-2200F(20-1200C)]。齿轮几何参数如表 1 所示。

表 1 螺旋锥齿轮几何参数

模数 m/mm	齿数 Z_2	齿宽 b/mm	螺旋角 $\Sigma/(\circ)$	齿顶圆直径 d/mm	面锥角 $\Phi_e/(\circ)$	根锥角 $\Phi_f/(\circ)$
5	36	30	35	178.92	62.94	57.17

对该齿轮进行工艺分析与计算后, 确定齿轮的坯料、上模以及下模的尺寸, 其中坯料选用直径为 70 mm、长度为 145 mm 的棒料。

将坯料、上模、下模的 STL 文件导入至 Deform 软件中进行有限元模拟, 装配后的几何装配模型如图 1(a) 所示。在 Deform 软件前处理界面中, 定义坯料为刚塑性体, 划分 120 000 个网格, 最小单元格尺寸为 1.16 mm, 上下模均定义为刚体, 坯料温度选择 1 100 °C、模具温度选择 250 °C、锻压速度选择 75 mm/s, 坯料与上下模之间的摩擦类型均为剪切摩擦, 摩擦系数选择 0.3, 坯料与上下模之间的热交换系数设定为 $11 \text{ W} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{K})^{-1}$ 。

成型后的等效应力如图 1(b) 所示。最大等效应力为 632 MPa, 远低于材料的抗拉强度, 因此零件可以安全成型, 不会产生缺陷。

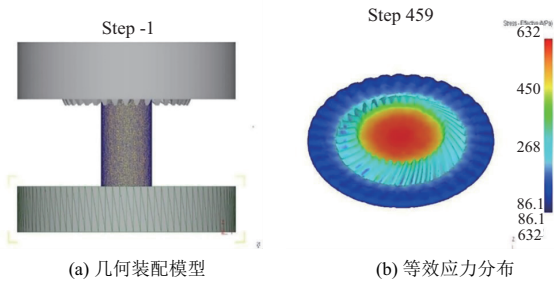


图 1 有限元模拟

1.3 响应面法

1) 试验方案设计

本文利用响应面法中的 Box-Behnken Design (BBD) 实验。试验因素和水平见表 2。其中, 变量因子 A、B、C、D 分别代表锻压速度、模具预热温度、毛坯加热温度和摩擦系数。

表 2 响应面法试验因素和水平

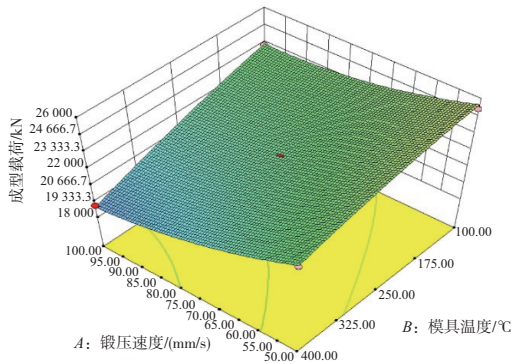
水平	试验因素			
	A/(mm/s)	B/°C	C/°C	D
-1	50	100	1 000	0.1
0	75	250	1 100	0.3
1	100	400	1 200	0.5

2 成型载荷与碳排放分析

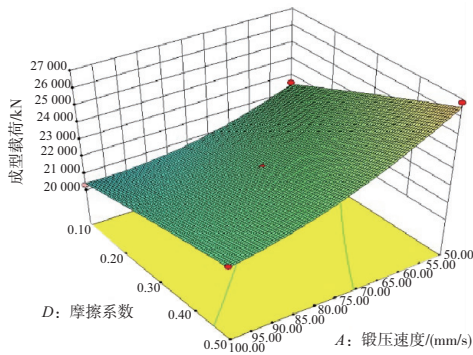
2.1 成型载荷响应面分析

均方差越大的因素代表对响应值的影响越大, 观察可知双因素交互作用对成型载荷的影响因素显著程度顺序为 $AD > AB > CD > AC > BD > BC$ 。图 2 是 AD 和 AB 因素交互

作用对成型载荷影响的响应曲面图。观察可知成型载荷与摩擦系数呈正相关,这是因为摩擦系数越大,模具与毛坯之间的摩擦力越大,导致成型力急剧增大;模具温度的升高降低了金属的变形抗力,使载荷急剧降低;在设定的速度范围内,锻压速度越快,成型载荷呈现先快速降低后缓慢降低最后趋于水平的现象。



(a) AB交互作用

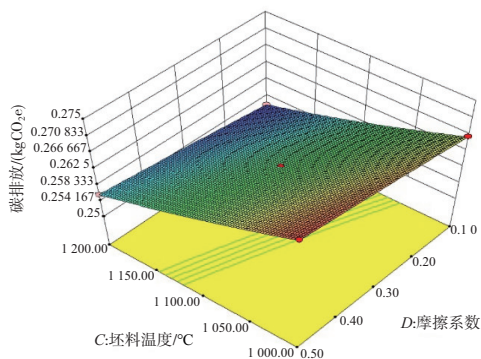


(b) AD交互作用

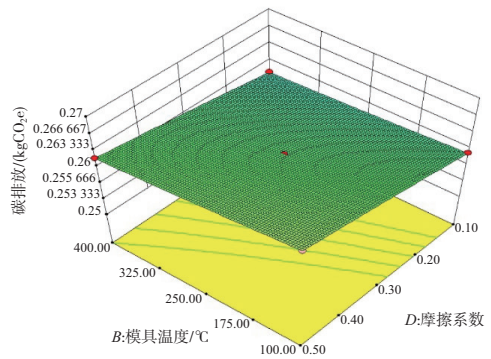
图2 交互项对成型载荷影响的响应曲面图

2.2 碳排放响应面分析

观察均方差可知双因素交互作用对碳排放影响程度大小顺序为 $BD > CD > AC > AB > AD > BC$ 。图3是 CD 和 AB 交互项对碳排放影响的响应曲面图。由图可知,碳排放量随着模具预热温度的升高而减少,随着摩擦系数的升高而增加。同时发现响应曲面的等高线曲率较大,说明模具预热温度与摩擦系数的交互作用十分明显。



(a) CD交互作用



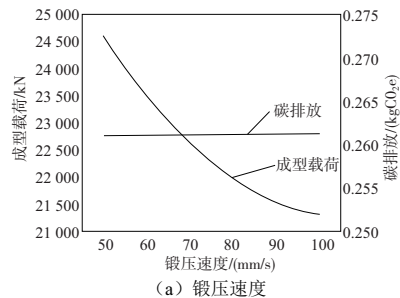
(b) BD交互作用

图3 交互项对碳排放影响的响应曲面图

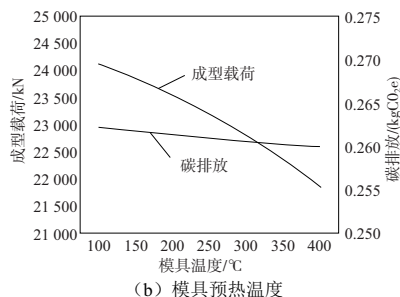
3 仿真模拟与工艺优化

在实际生产中,为了尽可能地减少能耗,提高企业效率,需要降低成型载荷与碳排放。利用 Design-expert 软件,将成型载荷响应值与碳排放设定目标为最小值,得到预测的最佳工艺参数组合为:锻压速度为 66.95 mm/s、模具预热温度为 371.14 °C、坯料加热温度为 1 194.78 °C、摩擦系数为 0.11,此时的成型载荷为 17 424.2 kN,碳排放为 0.252 0 kg。

根据预测的最佳参数组合,再次利用 Deform 软件进行仿真模拟,得到的成型载荷为 16 683 kN,碳排放量为 0.249 6 kg。实际模拟结果与预测值误差较小,说明该模型预测可靠性较高。同时对比 4 个因素单独对成型载荷和碳排放的影响程度(图4),发现锻压速度对成型载荷影响显著,对碳排放却几乎没有影响;坯料加热温度对于成型载荷与碳排放的影响程度一致;摩擦系数、模具温度和坯料温度对载荷和碳排放的影响规律相同,但是影响程度不同,尤其体现在模具温度上。



(a) 锻压速度



(b) 模具预热温度

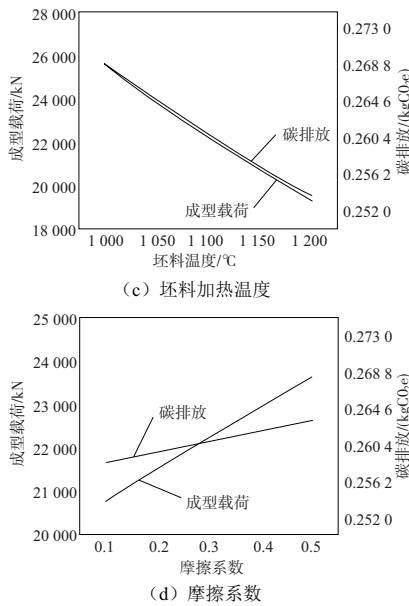


图4 单因素对成型载荷和碳排放的影响规律

因此,综合考虑4个工艺参数对载荷和碳排放不同的影响程度,为了达到最低的碳排放量与成型载荷,在加工生产时锻压速度应在压力机合理范围内尽可能高,坯料加热温度应在规定范围内尽可能大,摩擦系数应尽可能小,而模具预热温度对成型载荷的权重更高,这在设计模具时应该更多地考量。

4 结语

1)建立了螺旋锥齿轮零件制造加工过程的碳排放量化模型,包括加工生产过程中的下料、锻前热处理、锻造、切边和后续机加工的能耗。该模型可以为螺旋锥齿轮的锻造过程产生的碳排放量提供理论依据。

2)螺旋锥齿轮开式模锻加工工艺中各个工艺参数对成型载荷的影响程度顺序为坯料加热温度>模具预热温度>锻压速度>摩擦系数;对碳排放的影响程度顺序为坯料加热温度>摩擦系数>模具预热温度>锻压速度。锻压速度与模具预热温度对碳排放量影响不大,但对成型载荷的影响显著,在模具设计和设备选择时应当充分考虑模具预热温度。

4)基于响应面法得到的优化工艺参数为:锻压速度为66.95 mm/s、模具预热温度为371.14℃、坯料加热温度为1194.78℃、摩擦系数为0.11。

参考文献:

[1] 方旭斌. 零件生产过程碳足迹核算模型及其应用[D]. 杭州: 浙江理工大学,2018.
 [2] 黄文良,邓朝晖,吕黎曙,等. 面向低碳高效的铣削工艺参数优化及应用[J]. 机械制造与自动化,2019,48(3):12-16.
 [3] KANT G, SANGWAN K S. Prediction and optimization of machining parameters for minimizing power consumption and surface roughness in machining [J]. Journal of Cleaner Production,2014,83:151-164.
 [4] TONG Y F, LI J W, LI S, et al. Research on energy-saving production scheduling based on a clustering algorithm for a forging enterprise[J]. Sustainability,2016,8(2):136.
 [5] 尹瑞雪. 普通机械零件制造过程工艺碳排放估算[J]. 机械工程师,2018(4):8-11.
 [6] 尹瑞雪,曹华军,李洪丞. 基于函数化描述的机械制造工艺碳排放特性及其影响[J]. 计算机集成制造系统,2014,20(9):2127-2133.
 [7] 刘赣华,钱锦年,张振铎,等. 从动螺旋锥齿轮双锥辊辗压成形工艺参数优化[J]. 锻压技术,2017,42(10):81-85.
 [8] 国家统计局能源统计司. 中国能源统计年鉴-2018[M]. 北京:中国统计出版社,2019.

收稿日期:2020-09-08

(上接第77页)

表2 三种动力介质使用成本的对比 单位:元/年

对比内容	动力介质		
	链传动	平带传动	V带传动
材料每套成本	98	130	320
材料使用成本	3	82	40
维护成本	478	2 640	2 640
电量损耗	111	277	332
设备损耗总成本	592	2 999	3 012

5 结语

综上所述,在缠绕式包装设备中,链传动机构的优势尤为明显,适应众多场合且成本较低。同时,也验证了实用新型设备“链传动薄膜缠绕式包装机”创新的正确性。当然,平带传动机构与V带传动机构也有其可取之处,在

两轴中心距离大、传动比大的场合就很合适。同类型的缠绕式包装设备均可依据文中计算方式对比动力介质,选择合适的传动方式。

参考文献:

[1] 闻邦椿. 机械设计手册(第2卷)[M]. 5版. 北京:机械工业出版社,2010.
 [2] 王惠霖. 链条疲劳寿命的计算方法[J]. 石油矿场机械,1981,10(3):1-8.
 [3] 丁彬. 新编机械设计知识百科[M]. 北京:中国科技文化出版社,2000.
 [4] 张黎骅,郑严. 新编机械设计手册[M]. 北京:人民邮电出版社,2008:307-310.
 [5] 于惠力,魏波,李佳阳. 机械设计与材料选择及分析[M]. 北京:机械工业出版社,2019:101-113.
 [6] 杨宗栋,曹助家. 普通V带传动的预期寿命[J]. 东北重型机械学院学报,1989,13(4):56-63.

收稿日期:2020-09-16