

基于 DOE 下的成形磨齿磨削参数优化研究

迟明超

(南京高精齿轮集团有限公司 江苏 南京 210000)

摘要：利用试验设计研究了成形磨齿粗磨阶段粗糙度与磨削参数的关系，最后检验了模型，结果表明：通过优化磨削参数可以使成形磨齿粗磨阶段的齿面粗糙度提升，从而避免磨削烧伤，同时达到提升磨削效率、减少磨齿时间，实现降本增效的效果。

关键词：粗磨阶段；齿面粗糙度；磨削参数；磨削烧伤

0 引言

磨齿主要用于淬硬齿轮的精加工。由于磨齿能够纠正齿轮预加工及热处理造成的各项误差，因而加工精度较高，一般作为最终工序出现，决定轮齿的最终精度，从而影响轮齿的使用性能。在一般的齿轮加工过程中，磨齿的精度最高，且设备最昂贵，加工成本也最高，所以，针对该工序的提效尤为重要。但由于成形磨齿的自身特点，磨削过程中的烧伤现象一直是难题，有的企业采用保守的磨削参数，虽然能够避免磨削烧伤，但浪费了大量的时间，造成成本及效率难以控制。有的企业采用比较激进的磨削参数，虽然能够降低磨削时间，减少成本，但总会出现一定概率的磨削烧伤，造成产品报废的损失。所以，针对成形磨齿的粗磨阶段对磨削参数进行调整、试验，最终得出较优化的方案，避免磨削烧伤的同时，提升磨削效率达到 34.88%。

1 试验介绍

本次试验主要针对成形磨齿的粗磨阶段。一般来说，磨齿过程可以分为粗磨、半精磨、精磨 3 个阶段，但半精磨跟精磨一般都在法向 0.05mm 以内，而整个磨齿的余量除去半精磨跟精磨的余量，其余全部在粗磨阶段磨除，所以一般来说，粗磨的时间可以占总磨齿时间的 80% 以上，所以研究粗磨阶段能够快速提升整个磨削过程的效率。

本次试验所用砂轮为 3SG 的某品牌砂轮，磨削的齿轮材料为渗碳淬火钢：18CrNiMo7-6、20CrNi2Mo 等。

本次试验主要研究磨削的直接参数、法向切深、冲程速度和砂轮线速度，所以砂轮修正参数并没有进行研究，例如，砂轮修正的速比跟重叠比及修正进刀量都按之前的操作规范执行，并未进行更改，因为针对砂轮修正的速比跟重叠比，相关资料已经有较详细的介绍和研究。针对比切削容积 V_w 值，由于本次试验的齿轮不是单件

大批量产品，所以 V_w 为基本一致，并不能做到完全统一。在一定的比切削容积 V_w 值下，所磨削的齿面基本不会是一个齿面，应该是多个齿面。因此，每组试验能够得到多个粗糙度数值，应该利用质量管理工具选取一个数值来代表每次试验的结果，另外，多个粗糙度值应该有一定的规律（类似于多个数值的拟合成曲线后的斜率，由于试验时并未关注该点，所以本次试验并未研究该数值）。

2 试验设计

本试验设计详表见表 1。

3 试验结果

本次试验结果见表 2。

表 1 试验设计表

标准序	运行序	中心点	区组	V_c / (m/s)	切深 / mm	冲程速度 / (mm/min)
1	1	1	1	35	0.03	6000
7	2	0	1	30	0.025	5000
4	3	1	1	30	0.025	5000
5	4	0	1	30	0.025	5000
2	5	1	1	35	0.02	4000
6	6	0	1	25	0.03	4000
3	7	1	1	25	0.02	6000

表 2 试验结果

标准序	运行序	中心点	区组	V_c / (m/s)	切深 / mm	冲程速度 / (mm/min)	比切容积 V_w / (mm ³ /mm)	粗糙度 / μm
1	1	1	1	35	0.03	6000	777	1.74717
7	2	0	1	30	0.025	5000	623	1.44586
4	3	1	1	30	0.025	5000	623	1.37671
5	4	0	1	30	0.025	5000	623	1.42143
2	5	1	1	35	0.02	4000	648	1.3215
6	6	0	1	25	0.03	4000	726	1.28533
3	7	1	1	25	0.02	6000	646	1.20213

4 试验结果分析

利用数据分析，该次试验结果分析如图 1 所示。图 1 所示的粗糙度标准化效应的 Pareto 图直观地表现出了各因子对响应影响的显著性大小，砂轮线速度影响最大，切深次之，冲程速度影响最小。

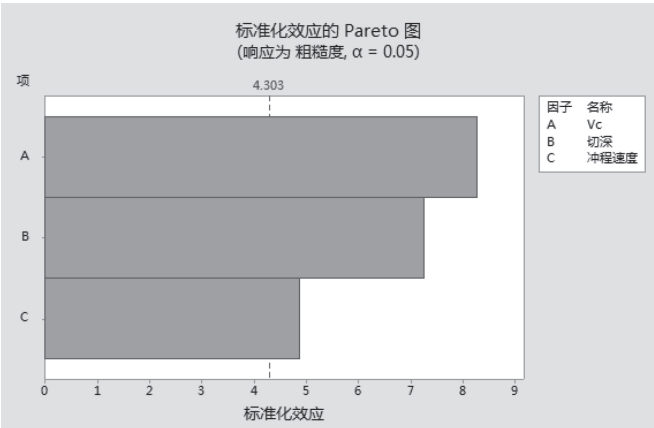


图 1 粗糙度的 Pareto 图

利用质量工具对参数进行优化，如图 2 和表 3 所示。

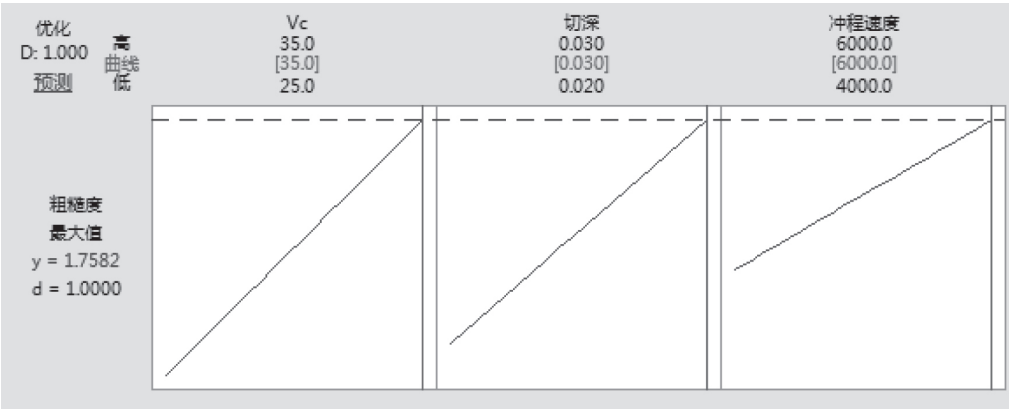


图 2 粗糙度目标最大值的各因子响应优化器参数优化图

表 3 粗糙度目标最大值的各因子的响应优化器参数优化表

多响应预测				
变量	设置			
$V_c/(m/s)$	35			
切深/mm	0.03			
冲程速度/(mm/min)	6000			

响应	拟合值	拟合值标准误差	95% 置信区间	95% 预测区间
粗糙度/ μm	1.7582	0.0327	(1.6542, 1.8621)	(1.6068, 1.9095)

可以看出，如果取粗糙度值最高，各因子的取值有所区别。

5 验证试验

从上面分析得到了各因子的取值。按照该取值进行磨齿试验连续试验 8 次，结果如下：粗糙度值分别为

1.7581、1.805407、1.72742、1.787、1.7732、1.76111、1.739657、1.735742，并对试验齿轮进行酸洗试验，并未有磨削烧伤产生；且经过验证，磨削参数优化后磨削时间比之前的磨削时间缩短了 34.88%；在一台设备固定切削参数后，跟踪产品磨齿一个月，未出现磨削烧伤。

图 3 所示为按照优化参数粗磨的试验齿轮部分实物图。

6 结语

使用实验设计方法来优化成形磨齿粗磨阶段的磨削参数，不仅缩短了生产时间，而且产品的质量也得到了保证。通过此试验，



图 3 按照优化参数粗磨后的实物图得到以下结论：

(1) 通过利用实验设计，确定了影响粗磨阶段齿轮粗糙度的显著性因子，并分析各因子对粗糙度的影响，可为齿轮成形磨削参数制定提供理论依据。

(2) 本次试验最终的参数使用的 V_w 值仍然为 700 左右，而粗糙度基本都在 1.5 以上，所以后期的试验当中，已经将 V_w 值逐步提升到 1200，其他修正参数未改变，经过跟踪，由于粗糙度降低很少，同样未产生磨削烧伤，在保证磨削质量的前提下，减少了砂轮修正次数近 42%，同样砂轮寿命也相应地得到了提升，成本再次下降。

(3) 本次试验中，针对磨削时的功率也作了相关研究，表明利用优化后的参数能够相应地降低磨削时的机床功率，分析原因应该这是由于提升了切削速度，砂轮微观上每个砂砾的切削量减少，也同样可以解释为何提升切削速度后的齿面粗糙度反而可以提升，同样粗糙度的降低速度也比之前大大减小，所以提升了 V_w 值，仍能

保证粗糙度较大,更加不易出现磨削烧伤。

(4) 冲程速度的提升有利于避免磨齿阶段的磨削烧伤,这个结论已经被证实,《成形磨齿工艺参数对磨削温度的影响规律及试验研究》也提及该观点,但提升切削速度(即砂轮的线速度),一般认为会增加磨削烧伤的风险,但该次试验是结合冲程速度等一起进行参数优化,同时《齿轮制造工艺手册》中提到增加磨削烧伤风险的原因主要是速度太高可能会产生振动,且推荐的磨削速度为 25 ~ 35 m/s,所以本次试验在参考该推荐值的同时考虑了砂轮的性能和磨齿机的允许范围,将磨削速度定为 35m/s,得到了较好的效果。

(5) 磨齿时间计算,根据经验及部分规范,磨齿的切削时间为 Y :

$$Y=(B/\cos\beta+10)\times N/v_w(\text{精})\times n(\text{精})+(B/\cos\beta+10)\times N/v_w(\text{半})\times n(\text{半})+(B/\cos\beta+10)\times N/v_w(\text{粗})\times(n(\text{粗})+2)+2\times(n(\text{粗})/8+2)+2+a_p(\text{径$$

$$\text{向粗})\times B/\cos\beta\times N\times n(\text{粗})/V_w(\text{粗})\times 0.3+a_p(\text{径向半})\times B/\cos\beta\times N\times n(\text{半})/V_w(\text{半})\times 0.3+a_p(\text{径向精})\times B/\cos\beta\times N\times n(\text{精})/V_w(\text{精})\times 0.3$$

式中, B 为齿宽; β 为螺旋角; N 为齿数; V_w 为冲程速度; n 为冲程次数; a_p 为切深; v_w 为比切削容积。

$$n(\text{粗})=\text{向上取整}((\text{磨齿余量}-a_p(\text{法向精})\times n(\text{精})-a_p(\text{法向半})\times n(\text{半}))/a_p(\text{法向粗}))+2$$

参考文献:

- [1] 胡海峰. 成形磨齿工艺参数对磨削温度的影响规律及试验研究 [D]. 洛阳: 河南科技大学, 2015.
- [2] 孙超鸿. 内齿珩轮强力珩齿珩削力特性分析及实验研究 [D]. 合肥: 合肥工业大学, 2018.

作者简介: 迟明超(1985.09-), 男, 汉族, 山东日照人, 本科, 研究方向: 齿轮箱传动件成形及加工研究。

(上接第 27 页)

支撑架托辊架内外侧高度,让皮带长度一致,从而达到平衡胶带各侧受力的效果。当运输装置需变化调整状态时,不断带动中间支架上下移动,里侧升高、外侧降低,解决了交叉巷道皮带搭接运输的相互干扰的难题,实现了一体化运输。

参考文献:

- [1] 张志伟. 永磁直驱电动滚筒冷却系统的设计与研究. 中国机械. 2019 (11), 8-9.
- [2] DT II (A) 型带式输送机设计手册 (第 2 版). 北京: 冶金工业出版社. 2013.
- [3] 李金亮, 曾繁杰. 煤矿井下长距离平面转弯带式输送机设计计算. 煤矿机械. 2021 (11).
- [4] 刘海波. 曲线带式输送机稳定性控制措施. 煤矿机械, 2021 (11).

- [5] 邬建雄. 一种快速拆装自固定带式输送机的研制 [J]. 中国新技术新产品, 2021(18):89-93. DOI:10.13612/j.cnki.cntp.2021.18.029.
- [6] 朱君. 大倾角上运深槽可伸缩带式输送机的设计与应用 [J]. 山东工业技术, 2015(02):95. DOI:10.16640/j.cnki.37-1222/t.2015.02.051.
- [7] 赵世旭. DSJ100/100/3×200 型顺槽带式输送机的研制 [J]. 山西焦煤科技, 2014, 38(06):11-13.
- [8] 任惠英, 许让斌. 新型伸缩带式输送机的研发和结构设计 [J]. 煤矿现代化, 2011(03):54-55. DOI:10.13606/j.cnki.37-1205/td.2011.03.030.

作者简介: 张斌(1976.02-), 男, 汉族, 河北邯郸人, 大专, 助理工程师, 研究方向: 带式输送机、耙斗装岩机、绞车等煤矿产品的设计与制作。