

文章编号:1000-582x(2001)03-0025-05

## 滚切修复喷焊齿轮的试验

李文贵, 陈远志

(重庆大学机械工程学院, 重庆 400044)

**摘要:**在40CrNi为基体材料的报废齿轮齿面喷焊镍基自溶性合金后通过几种滚刀滚切出正确齿形,对齿轮进行修复的对比实验,找出了滚刀的磨损规律,摸索出了用不涂层的加长滚刀并采用窜刀、对中等工艺措施及合适的切削用量能较好地滚切出喷焊齿轮齿形的方法。

**关键词:**喷焊齿轮;滚齿;齿轮齿形

**中图分类号:** TG 61<sup>+2</sup>

**文献标识码:** A

油田用游梁式抽油机的减速箱齿轮,工作环境恶劣,承受重载冲击,具有不间断连续工作、温度变化大等特点。齿轮工作齿面尤其是节圆附近产生了严重的点蚀破坏,有的点蚀深度达到了0.5 mm,导致大量齿轮报废。修复报废齿轮是减少损失、降低生产成本的有效途径。为此,作者在这方面做了一些较有成效的工作,首先将基体材料为40CrNi的报废齿轮齿面喷焊一层厚度为0.8~1 mm的镍基自溶性合金Ni35,熔点为1 040℃~1 060℃,硬度为HRC25~30,结合强度32~40 MPa,自身强度140~160 MPa,喷焊后齿面实测硬度为HB270~280。然后进行滚切试验研究。

喷焊后齿轮的滚切加工是修复报废齿轮这一新工艺的关键技术,由于喷焊齿轮的特殊性,滚齿过程中各相关因素与滚切普通齿轮有很大不同,国内外均未见这方面的报导,因而对此进行了一系列的探索和试验研究。通过对比试验,初步摸索出了滚切镍基喷焊齿轮的合理切削条件,滚刀的选择和使用方法,较好地解决了喷焊齿轮滚切加工的问题。按以上方法修复的齿轮经过一年的运行,效果较好,具有推广价值。

### 1 试验条件

#### 1.1 机床

YB3120 半自动高速滚齿机,带有后立柱液压顶尖及自动窜刀机构,主轴转速130~500 r/min,7种。

#### 1.2 工件

试件齿轮法向模数  $m_n = 4.5$ ,齿数  $z = 38$ ,螺旋角

$\beta = 27^\circ 12' 16''$ (左旋),分圆直径  $d = 192.268$  mm,齿宽60 mm,其基体材料及喷焊工艺参数如前所述。

#### 1.3 滚刀

A级精度的直槽单头齿轮滚刀,模数  $m_n = 4.5$ ,螺纹升角  $\lambda_0 = 3^\circ 33'$ ,前角  $\gamma_0 = 0^\circ$ ,内孔直径  $d_0 = 27$  mm,滚刀长度  $L = 85$  mm,由成都工具所物理涂层中心处理TiN涂层滚刀2把,复合涂层滚刀2把,未涂层普通滚刀2把。

#### 1.4 检验工具及测量部位

用10倍刻度放大镜来测量刀齿顶刃与侧刃交界处的转角磨损量VC、侧刃与被加工齿轮外圆接触的边界磨损量VN,刀齿侧刃的中部磨损量VB及刀齿顶刃磨损量VH。如图1所示。

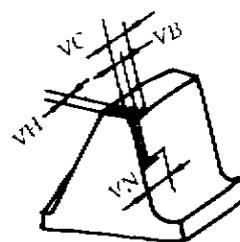


图1 滚刀齿磨损部位

### 2 试验过程

用右旋滚刀滚切左旋齿轮时,滚刀的初切部位、造型部位和相对位置如图2(图中滚刀在齿轮的后面)。其中  $2L_m$  是滚刀造型长度,  $(L_c - L_m)$  为粗切长度,安

• 收稿日期:2000-09-17

作者简介:李文贵(1945-)男,重庆人,副教授。主要从事金属切削、刀具设计、齿轮啮合及数控刀具等方面的研究。

装角为  $\psi = \beta \pm \lambda$  (滚刀与齿轮旋向相同取“-”,相反取“+”)。滚刀轴线与齿轮轴线交错的最短距离处为安装中心,刀齿编为0号,切入刀齿号为1,2,3……,切出刀齿号为0,-1,-2,-3……。

喷焊齿轮的外圆以孔为基准进行预加工,切除喷焊的不规则氧化表面和粘附的未熔化粉末,以减少边界擦伤。

试验用切削参数:切削速度  $v = 21.9 \text{ m/min}$ ,进给量  $f = 1.2 \text{ mm/r}$ ,切削深度  $a_p = 4 \text{ mm}$ ,切削液为30#机油。切完一个试件齿轮后检测滚刀刀齿磨损量,记录检测结果并描出磨损曲线。

2.1 用普通滚刀滚切齿轮

按以上的试验条件及参数,切完试件齿轮后所测滚刀刀齿各部位磨损量列于表1,磨损曲线如图3所示。

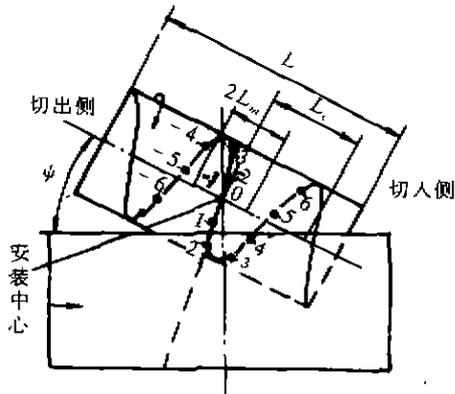


图2 切削部位

示。

实验中滚刀齿上出现有明显的粘刀和刀瘤现象,工件加工面上有刀瘤划痕。

2.2 用TiN涂层滚刀滚切齿轮

滚切完一个试件齿轮后,滚刀齿各部位磨损量列于表2,磨损曲线如图4所示。试验中,涂层滚刀的粘刀和刀瘤比未涂层滚刀要小,工件齿面上的刀瘤划痕也较浅,但滚刀齿侧面边界犁沟明显,扩展较快。

2.3 用复合涂层滚刀滚切齿轮

切完一个试件齿轮后滚刀各部位的磨损量列于表3,磨损曲线如图5所示。

试验中,其粘刀和刀瘤现象与TiN涂层滚刀无多大差别,工件齿面上划痕不明显,但滚刀齿侧面边界擦伤犁沟明显。

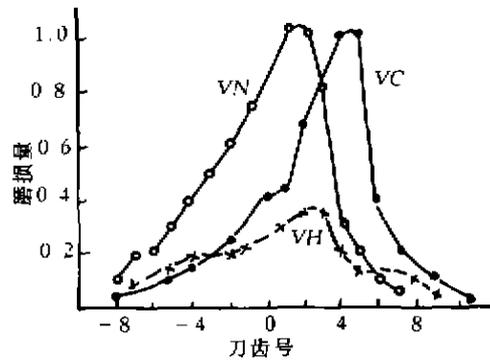


图3 普通滚刀磨损曲线

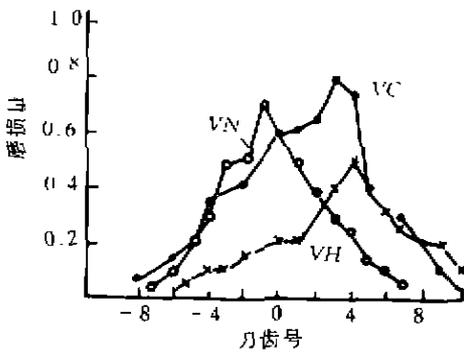


图4 TiN涂层滚刀磨损曲线

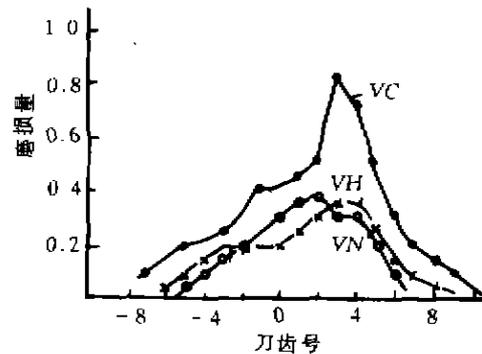


图5 复合涂层滚刀磨损曲线

表1 普通滚刀磨损值(mm)

齿号	-9	-8	-7	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
转角 VC	0.05	0.05	0.1	0.1	0.12	0.15	0.2	0.3	0.35	0.4	0.4	0.7	0.7	1.0	1.0	0.4	0.2	0.15	0.1
中部 VB			0.05	0.05	0.1	0.1	0.2	0.2	0.25	0.35	0.3	0.3	0.25	0.2	0.2	0.15	0.15	0.1	0.1
边界 VN		0.1	0.2	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	1.1	1.0	0.8	0.3	0.2	0.1	0.1		
顶刃 VH	0.1	0.1	0.12	0.15	0.15	0.2	0.2	0.2	0.25	0.25	0.3	0.35	0.35	0.2	0.2	0.15	0.15	0.1	0.1

表2 TiN涂层滚刀磨损值(mm)

齿号	-7	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
转角 VC	0.1	0.15	0.2	0.35	0.4	0.4	0.5	0.6	0.6	0.7	0.8	0.7	0.4	0.3	0.3	0.2	0.1	
中部 VB	0.1	0.15	0.15	0.2	0.2	0.25	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.15	0.15	0.1	0.1			
边界 VN	0.1	0.1	0.2	0.3	0.4	0.4	0.7	0.6	1.5	0.21	0.3	0.25	0.15	0.1	0.1			
顶刃 VH			0.05	0.1	0.1	0.15	0.15	0.2	0.2	0.3	0.4	0.5	0.4	0.3	0.25	0.2	0.2	0.1

表3 复合涂层滚刀磨损值(mm)

齿号	-8	-7	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
转角 VC		0.1	0.15	0.2	0.2	0.25	0.3	0.4	0.4	0.41	0.5	0.8	0.7	0.5	0.3	0.2	0.15	0.1	
中部 VB			0.1	0.1	0.15	0.15	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.1	0.1	0.1				
边界 VN				0.1	0.1	0.15	0.2	0.2	0.3	0.35	0.35	0.3	0.3	0.2	0.1				
顶刃 VH		0.05	0.05	0.1	0.15	0.15	0.2	0.2	0.2	0.25	0.3	0.35	0.35	0.25	0.15	0.1	0.1		

试验中,3种滚刀曾以  $v=33.7$  m/min 和  $v=53.4$  m/min 各切削 30 min,发现滚刀磨损值增大很快,测得 VC=1.4~1.8 mm,顶刃 VH=1.5 mm 左右,且使粗切部位中有几个刀齿很快就失去切削能力,并有卷刃、缺口现象发生。

试验还发现:如果喷焊齿轮的外圆不经过预加工切除氧化皮表面和未熔化粉末,滚刀刀齿侧面的边界犁沟会迅速增大,其深度可达 0.5 mm,造成滚刀无法重磨导致报废。

### 3 试验分析与对策

齿轮齿面喷焊的镍基自溶性合金,虽硬度不高(HV270~280),但镍在铁素体中固溶形成奥氏体钢,使喷焊层韧性提高,硬质点增多,导热性差,粘刀及加工硬化现象严重,切削加工性差<sup>[1]</sup>,属难加工材料。根据分析及查阅有关资料,喷焊镍基自溶性合金的齿面的加工性为 0.4~0.35 左右。故本试验无论用涂层或非涂层滚刀加工时,滚刀的磨损都比加工一般齿轮大,切削中刀瘤现象严重,即使用 PVD 法的 TiN 涂层和复合涂层的滚刀,也因被喷焊层的硬质点和刀瘤擦伤,后刀面形成明显的耕犁痕迹,是加工喷焊齿轮最突出的问题。针对以上问题,采取了以下解决办法:

#### 3.1 采用加长滚刀以便于窜刀

如图 2 所示,滚刀切入端刀齿长度为  $L_C$ ,切除齿廓上大部分余量,仅有少部分余量由滚刀造型长度  $2L_m$  内的刀齿切除,包络成齿形。故滚刀切入端刀齿磨损很大,尤其是顶刃与侧刃交界处的磨损量  $V_C$  比其它部位大得多,因为该处齿廓主要承担喷焊表面的粗切削;而切除端刀齿磨损较小。

按滚切齿轮时的包络原理,滚刀左右两侧有效啮合线在其轴向的投影长度:

$$2L_m = 2\text{tg}\beta_{b0}(\sqrt{r_{a0}^2 - r_0^2\cos^2\alpha_s} - r_0\sin\alpha_s)$$

式中:  $\beta_{b0}$ —滚刀基圆螺旋角;

$$\sin\beta_{b0} = \cos\lambda_0\cos\alpha_n$$

$\alpha_s$ —滚刀端面压力角;

$$\text{tg}\alpha_s = \text{tg}\alpha_n/\sin\lambda_0$$

$r_{a0}$ 、 $r_0$ —滚刀顶圆半径、分圆半径。

滚刀切至全齿高时,切入过程中其应有长度近似为:

$$L_C = \frac{\sqrt{(2r_a - h)h}}{\cos\Psi}$$

式中:  $r_a$ 、 $h$ —被切齿轮的顶圆半径及全齿高;

$\Psi$ —安装角。

滚刀理论上的最小长度应为  $L_m + L_C$ ,加上边牙长度,以及为使刀齿磨损均匀的轴向窜刀长度、两端轴台等,一般滚刀长度取为  $(4-5)\pi m$ 。当被切齿轮模数及螺旋角特别大时,应加大滚刀长度。因为如果滚刀长度不够,将使刀齿边牙负荷加重而导致损坏。

滚切齿轮时,滚刀在切削长度  $(L_m + L_C)$  内,由于各刀齿切削位置不同,切削负荷不同,其磨损程度相差很大。由图 3~5 的磨损曲线可知,在  $L_C$  内有一个磨损最大的刀齿,它两边的刀齿磨损逐渐减小。为了充分利用滚刀上所有刀齿,在切完一定数量齿轮后将滚刀轴向窜移,以改变刀齿切削位置,使其各刀齿磨损均匀,延长滚刀使用寿命。

1) 窜移方向 试验表明,右旋滚刀滚切左旋齿轮时,滚刀齿磨损最严重的是滚刀粗切部分的右侧齿面,即齿轮的旋入方向,故滚刀窜移方向应是从滚刀精切齿部位  $L_m$  朝粗切齿部位  $L_C$  窜移,如图 6(a) 所示。当用右旋滚刀滚切右旋齿轮时,滚刀窜移方向如图 6(b) 所示。

2) 窜移量 如图2所示,滚刀切削部分长度为  $L_m + L_c$ , 则其窜移范围为  $L - (L_m + L_c)$ 。窜移量与齿轮模数、螺旋角、材料加工性及滚刀磨损量、磨损状态等因素有关,常按试验或经验确定,从几分之一毫米到10多毫米不等。每次最小窜移量:

直槽滚刀:  $\Delta L = \pi m_n / (z_k \cos \lambda_0)$

螺旋槽滚刀:  $\Delta L = \pi m_n \cos \lambda_0 / z_k$

$z_k$ —滚刀容屑槽数<sup>[2]</sup>。

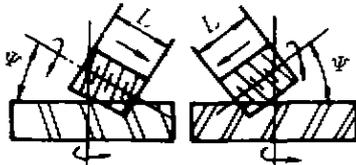


图6 滚刀的窜移方向

3.2 滚刀齿的对中

滚切喷焊齿轮表面时,采用试滚观察法对中,即按滚刀刀痕在齿槽两侧对称情况调整滚刀轴向位置,达到齿槽两侧刀痕对称时,再开始正常滚齿。

经试验得知,当刀齿与齿槽未对中时,滚刀齿单面切削,将影响齿面能否保持喷焊层,其轴向冲击力使刀架沿其导轨产生0.5~1mm左右的弹性窜移,机床产生异常振动,滚刀侧刃擦伤痕迹在齿轮旋入方向侧,从滚刀齿廓沿容屑槽方向发展到底,如图7所示;涂层也被迅速擦掉,同时齿轮齿顶产生了明显的挤压斑痕。

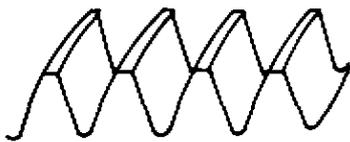


图7 擦伤痕迹

3.3 滚齿切削参数

1) 滚削速度  $v$  与工艺系统刚性,齿轮模数及材料加工性有关,可按图8选择<sup>[3]</sup>。由图可知,当  $m_n = 4.5$ ,加工性为0.35~0.4时,  $v \leq 20$  m/min。

2) 切削深度  $a_p$  因喷焊层厚度约为0.2~1mm,各齿不均,表面上还有未熔化的硬质点和氧化皮,故切削深度不能太小,否则滚刀磨损加快;但太大了又不能达到齿形要求。作者按测量喷焊齿轮弦齿厚为准来确定滚切余量:先车削喷焊齿轮外圆;以外圆为基准,随机检查喷焊齿轮5~6个齿的法向固定弦齿厚。如图9所示,实线为喷焊齿轮齿形,  $S_1$  为所测的5~6个齿的固定弦齿厚的最小值;虚线表示要求的理论齿形,其固定弦齿厚为  $S$ ;由图可得:

$$a_p = \frac{s_1 - s}{2 \operatorname{tg} a_n}$$

式中:  $S = S_0 \cos^2 a_n$

$S_0$ —齿轮分圆齿厚:

$$S_0 = \frac{\pi m_n}{2} + 2Xm_n \operatorname{tg} a_n$$

$X$ —变位系数<sup>[4]</sup>。

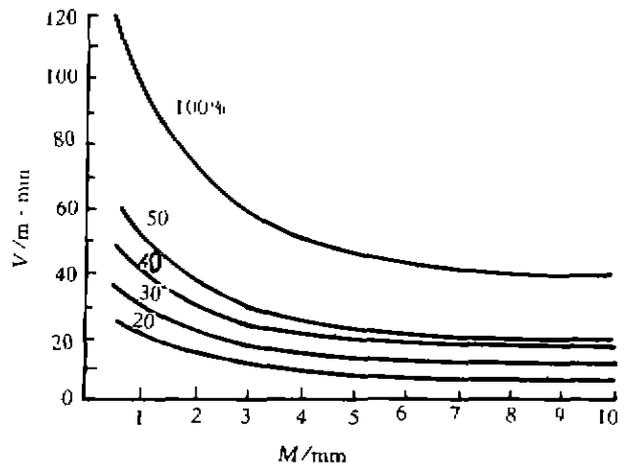


图8 按加工性及模数  $M$  选择切削速度

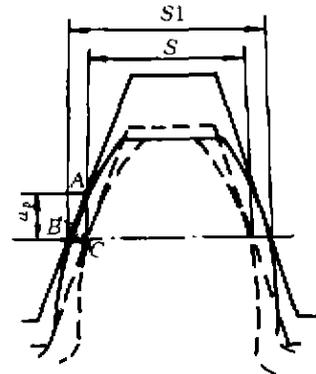


图9 固定弦齿厚与切削深度

当  $a_n = 20^\circ$  时,  $a_p \approx 1.37(S_1 - S)$ 。可按其大小一次切完;或二次切完(第1次切  $0.7a_p$ , 第2次切  $0.3a_p$ )。

3) 滚齿进给量  $f$  因滚切的是镍基自溶性合金,加工硬化现象严重,故进给量不宜太小,否则刀齿在硬化层上滑过,耐用度会显著下降。根据有关资料及试验摸索,按表4选取。

表4 切削参数

模数 $mm$	粗滚		精滚	
	$v(m/min)$	$f(mm/r)$	$v(m/min)$	$f(mm/r)$
$\leq 10$	20~25	1.5~2	18~20	0.8~1.5

### 3.4 液齿切削液

加工镍基自溶性合金喷焊齿轮,因其粘性大,导热性差,工作侧后角小,挤压摩擦大,使切削温度升至很高,滚刀磨损加快。为减少以上不利因素,应选用具有良好散热性能及润滑性能的切削液,宜采用机油、煤油、柴油所组成的混合油。

## 4 结论

1) 滚切喷焊齿轮前其外圆应采用车削或乱齿滚切法预加工,以切除表面氧化皮及未熔化的粉末;

2) 滚刀齿应相对喷焊齿轮齿槽对中;

3) 用加长滚刀并采用定时窜刀法;

4) 用涂层滚刀虽可减少粘刀现象和刀瘤高度,但

耐用度提高不显著。可用普通高速钢滚刀而不必涂层;

5) 建议滚切速度  $v \leq 22 \text{ m/min}$ ;  $f = 0.8 \sim 1.2 \text{ mm/r}$ ; 先测量公法线或齿厚,再确定  $a_p$  的大小;选用的切削液应兼顾冷却和润滑效果,建议采用混合油。

### 参考文献:

- [1] 韩荣第,于启勋. 难加工材料切削加工[M]. 北京:机械工业出版社. 1996.
- [2] 四川省机械工业局. 复杂刀具的使用、重磨与检验[M]. 北京:机械工业出版社. 1983.
- [3] 齿轮手册编委会. 齿轮手册(下册)[M]. 北京:机械工业出版社. 1990.
- [4] 北京业余机械学院工人班. 齿轮原理与制造[M]. 北京:科技出版社. 1973.

## Experimental Study of Hobbing Spray-welding Gear

LI Wen-gui, CHEN Yuan-zi

(College of Mechanical Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

**Abstract:** After self-dissolvable nickel-base alloy spray-welded on the surface of scrapped gear of which 40CrNi is base metal is obtained. Using non-coating lengthen hob, moving the hob in axial, aligning the hob and adopting suitable cutting conditions, the better methods of hobbing spray-welding gear profile are found out.

**Key words:** spray-welding gear; hobbing gear; gear profile

(责任编辑 成孝义)

·下期论文摘要预告·

## 基于粗糙集理论的内燃机故障诊断专家系统

曹长修, 孙颖楷, 曹龙汉, 张邦礼

(重庆大学 自动化学院, 重庆 400044)

**摘要:** 在故障诊断专家系统的基础上,引入粗糙集理论,并以信息系统属性值表为主要工具,对专家系统中的规则进行约简并剔除不必要的属性,揭示了故障诊断信息中内在的冗余性,降低了故障诊断专家系统构成的复杂性,并建立了简化后的决策规则。

**关键词:** 粗糙集; 内燃机; 故障诊断; 专家系统