

doi:10.3969/j.issn.1003-7292.2010.02.010

高锰钢钻削用机夹式硬质合金刀具研究

杨 亮 阎长罡 许 立

(大连交通大学机械工程学院, 辽宁大连 116028)

摘 要 为克服传统的焊接固定式钻头的不易更换、工艺性差的缺点,设计开发了机械夹持式的硬质合金钻削群钻。利用遗传算法给出了基于最大生产率的钻削参数优化结果,并进行新型机夹式刀具的钻削高锰钢的试验研究,得出了机夹式刀具的设计是可行的结论。同时,采用新型刀具加工,切削力和扭矩都相应的有所下降,其中轴向力下降了 20% 左右,扭矩下降了 15% 左右,切削效率也就得到了提高。

关键词 硬质合金刀具; 机械夹持; 钻削; 实验研究

Study on Mechanically-clamped Cemented Carbide Cutting Tool for Drilling Hadfield Manganese Steel

Yang Liang Yan Changgang Xu Li

(School of Mechanical Engineering, Dalian Jiaotong University, Liaoning Dalian 116028, China)

ABSTRACT In order to overcome the shortcoming that the traditional welding stationary type drill bit is not easy to be replaced and has poor manufacturability, the mechanically-clamped cemented carbide multiface drill was developed. The optimization result of cutting parameter based on the greatest productivity is given by genetic algorithm, and the experimental study of drilling high manganese steel was carried on. The conclusion that the design of mechanically-clamped cutting tool is feasible is obtained. Cutting force and torque are decreased by using new cutting tool, wherein the axial force and efficiency are decreased 20% and 15%, respectively, so the cutting efficiency is improved.

KEY WORDS cemented carbide cutting tool; mechanically-clamped; drilling; experimental study

高锰钢的钻削加工是一个始终存在的技术难题,特别是钻削加工用的刀具,其磨损与破损现象极为严重。钻削刀具材料经历了高速钢、硬质合金、细晶粒硬质合金、涂层刀具等发展过程^[1],一些新的刀具材料的出现,如陶瓷刀具^[2-3]、立方氮化硼^[4]、金刚石刀具^[5]等,使得新材料刀具在难加工材料钻削加工中得到了一些实验性的成果。但是,从加工成本、加工精度、生产效率等方面考虑,硬质合金刀具仍然

是钻削高锰钢的首选刀具。诚然,在钻削加工中,硬质合金刀具常常发生后刀面与横刃磨损,甚至是崩刃和断裂,它直接影响到工件的加工质量,也影响到刀具的切削性能及其使用寿命等^[6-7]。特别是现在广泛使用的钎焊式硬质合金钻头,导致了磨损或破损后的刀具更换十分费时,大大降低了生产效率。本文以钻削加工 ZGMn13 高锰钢的实验为基础,开发出机械夹持式硬质合金钻削刀具,探讨这种刀具破损

基金资助:辽宁省教育厅科研项目(20060104,2009A126)

作者简介:杨亮(1975-),男,黑龙江省甘南县人,博士,大连交通大学机械工程学院讲师。主要从事精密、超精密加工技术、特种加工技术、数字化设计与制造技术等方面的研究。邮箱:yangliang3000@126.com

的形成过程及其主要变化规律,为提高刀具的切削性能和加工效率、提高加工质量奠定理论与实验基础。

1 刀具结构的分析及设计

由于高锰钢本身具有加工硬化这一特性,使得钻孔时只能用一道工序来完成孔的加工,所以钻头结构的分析与确定就显得尤为重要。刀具的结构形式是影响刀具切削性能与加工质量的重要因素之一。近年来,机夹式可转位刀具在机械加工当中应用越来越多。这是因为机械加固式避免了焊接工艺的影响和限制,有利于根据加工对象选择各种材料的刀片,切削刃空间位置相对刀体固定不变,节省了换刀、对刀等所需的辅助时间,提高了机床的利用率,而且可转位刀具的刀体可以重复使用,节约了费用。

在设计刀具时,应该本着结构简单、制造容易、换刀方便、刀具使用寿命长、刀片夹紧可靠的原则。考虑到加工工件是铸造毛坯,在钻削加工中容易产生刀具振动等情况,为避免刀杆悬伸过长和保证其有足够的刚度,刀杆工作长度根据孔深与排屑的最短距离确定,设计为 85 mm,刀杆工作部份直径应比刀片底边直径稍小,设计为 30 mm,这样既可使刀杆刚度及强度最好,又不影响切削效果。刀杆尾部按原刀具设计为莫氏锥度 4 号。为提高刀具的位置精度,防止扩孔钻在旋转过程中摆动造成扩孔偏差,要求刀体的工作部份与尾部的同轴度不大于 0.003 mm,刀具图如图 1 所示,其它尺寸采用表 1 的值。

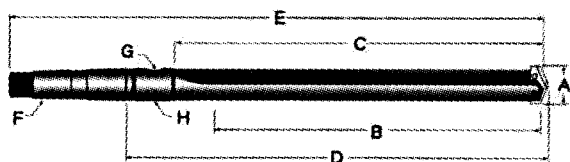


图 1 螺钉连接的机夹式钻头

表 1 机夹式钻头各部位尺寸或规格

部位	名称	尺寸或规格
A	刀片直径	31.5 mm
B	最大钻深	84.7 mm
C	刃长	114.3 mm
E	全长	273.8 mm
F	柄端锥度	莫氏 #4
G	管牙孔直径	1/8 英寸(约 3.2 mm)
H	油环	2T-3SRM

另外,采用此种连接方式需要注意的是由于钻削过程是半封闭的,钻头钻削部分温度较高,在加工高锰钢时可以达到 600 ℃ 以上,螺钉受热变形,连接容易松动,故采用带有锥度的沉头螺钉使刀片很好地夹紧在刀体上。根据经验,夹紧时宜加特殊性能的润滑油,否则油液干涸或生锈时,旋动螺钉会遇到困难。另外还要保证刀片和刀体充分接触,使得切削时产生的热量及时沿刀体排出,并通过刀体增强刀片的抗弯强度,这就需要在刀片上加工出一个凹型的定位槽来。刀片选用机夹不可转位刀片,刀片三维图如图 2 所示。

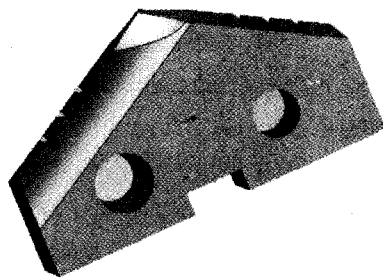


图 2 刀片的三维模型

2 钻削用量的优化选择

在钻削加工中,钻削用量选择的合理与否直接关系到被加工孔的质量、生产率和生产成本。本文运用现代钻削理论和最优化技术,建立钻削用量优化选择为数学模型,以是美国 MathWorks 公司出品的商业数学软件 MATLAB 为开发平台,利用其中的遗传算法工具箱进行钻削用量的优化。

在机械加工中,根据具体的加工要求可建立如下钻削用量优化的数学模型。

2.1 设计变量

钻削用量包括切削深度 α_p 、进给量 f 和切削速度 v 三要素,其中 α_p 为钻削孔径 d_w (或钻头直径 d_o) 的一半,即

$$\alpha_p = d_w/2 = d_o/2 \quad (1)$$

可见, α_p 没有选择的余地,完全由钻削孔径 d_w 来确定。这样,钻削用量优化变量只有 f 和 v 。

2.2 建立目标函数

选择钻削用量时,往往是在保证工件加工质量的前提下,力求达到提高经济效益的目标。目前在生产实际中常用的优化目标有最大生产率和最低生产成本两种,现分别建立其目标函数。

2.2.1 最大生产率目标函数

生产率常用单件工序工时 t_w 来表示,其计算公式为

$$t_w = t_d + t_p + t_c (t_d/T) \quad (2)$$

式中: t_w 为单孔加工的总时间; t_d 为单孔加工的机动时间; t_p 为准备时间,包括装卸工件、进刀和退刀的时间; t_c 为换刀时间,包括卸下磨损刀具和换上新刀的时间; T 为刀具耐用度。公式(2)中的机动时间 t_d 可由公式(3)确定

$$t_d = 10^{-3} \pi d_w L f^{-1} v^{-1} = A f^{-1} v^{-1} \quad (3)$$

式中: $A = 10^{-3} \pi d_w L$, L 为刀具进给行程,它是钻孔深度 L_z 与入切量 L_r 及超切量 L_c 之和。刀具耐用度 T 可由广义 Taylor 公式确定:

$$T = \frac{C_v^{\frac{1}{m}} d_w^{\frac{z}{m}} K_m^{\frac{1}{m}}}{60^{\frac{(1-m)}{m}} f^{\frac{z}{m}} v^{\frac{1}{m}}} = B f^{\frac{z}{m}} v^{\frac{1}{m}} \quad (4)$$

式中: $B = 60^{\frac{(1-m)}{m}} C_v^{\frac{1}{m}} d_w^{\frac{z}{m}} K_m^{\frac{1}{m}}$, C_v 为与工件材料和工作状态有关的系数; m, z, y 为与 T, d_w 和 f 对应的指数,可以由金属切削原理^[8]等书籍或手册查得;为切削速度修正系数。这样,原目标函数可整理为:

$$t_w = t_p + A f^{-1} v^{-1} + \frac{A t_c}{B} f^{\frac{(z-1)}{m}} v^{\frac{(1-m)}{m}} \quad (5)$$

2.2.2 最低生产成本目标函数

生产成本可以用单件工序成本 C 来表示,其计算公式为:

$$C = k_1 t_d + k_1 t_p + k_1 t_c (t_d/T) + k_2 (t_d/T) \quad (6)$$

式中: k_1 为该工序单位时间内所分担的总开支; k_2 为每次刃磨钻头的费用。因此,上述目标函数可整理为:

$$C = k_1 t_p + k_1 A f^{-1} v^{-1} + \frac{A}{B} (k_1 t_c + k_2) f^{\frac{(z-1)}{m}} v^{\frac{(1-m)}{m}} \quad (7)$$

一般,在正常生产条件下选择生产成本作为钻削用量的优化目标,但在完成紧急任务或提高生产率对成本影响不大的情况下,也可选择生产率作为钻削用量的优化目标。所以,上述两种目标函数可以写成如下统一表达式:

$$C_x = E + F f^{-1} v^{-1} + G f^{\frac{(z-1)}{m}} v^{\frac{(1-m)}{m}} \quad (8)$$

式中的 E, F, G 均为常数,具体定义如下:当 C_x 表示单件工序工时 t_w 时, $E = t_p, F = A, G = A t_c/B$; 当 C_x 表示单工序成本 C 时, $E = k_1 t_p, F = k_1 A, G = A/B(k_1 t_c + k_2)$ 。

2.3 约束条件

钻削用量优化选择的约束条件主要有以下几方面。

2.3.1 机床功率约束

钻削时的钻削功率不得超过机床有效功率

$$P = 2Mv/d_w \leq P_{\max} \eta \quad (9)$$

式中: P 为钻削功率, M 为钻削扭矩, $M = 9.81 C_m d_w^x f^y K_m$, 其中 C_m, x, y, K_m 为系数,可以由切削手册^[9]获得。 P_{\max} 为机床电机最大功率; η 为机床传动效率,一般取 0.75~0.85。故上述约束函数可写为

$$P = 19.62 C_m d_w^{(x-1)} f^y K_m v \leq P_{\max} \eta \quad (10)$$

2.3.2 机床主轴扭矩约束

钻削时产生的扭矩 M 必须小于或等于机床主轴系统所能传递的扭矩 M_s :

$$M = 9.81 M_s C_m d_w^x f^y K_m \leq M_s \quad (11)$$

其中, M_s 是一个与机床主轴转速有关的常数,可由机床说明书查得。

2.3.3 机床主轴转速约束

所选切削速度 v 必须在机床所能提供的最小转速 n_{\min} 和最大转速 n_{\max} 之间,即:

$$\frac{\pi d_w n_{\min}}{1000} \leq v \leq \frac{\pi d_w n_{\max}}{1000} \quad (12)$$

2.3.4 机床进给量约束

所选进给量 f 必须位于机床所能提供的最小进给量 f_{\min} 和最大进给量 f_{\max} 之间,即:

$$f_{\min} \leq f \leq f_{\max} \quad (13)$$

2.3.5 钻头耐用度约束

由广义 Taylor 公式确定的钻头耐用度不得小于预先选定的合理刀具耐用度 T , 即:

$$T = \frac{C_v^{\frac{1}{m}} \cdot d_w^{\frac{z}{m}} \cdot K_m^{\frac{1}{m}}}{60^{\frac{(1-m)}{m}} \cdot f^{\frac{z}{m}} \cdot v^{\frac{1}{m}}} = B f^{\frac{z}{m}} v^{\frac{1}{m}} \geq T_c \quad (14)$$

2.4 数学模型

将上述目标函数和约束条件规格化,便可得到如下钻削用量优化选择的数学模型。求优选变量 $X = [x_1, x_2]T = [f, v]T$

$$\min f(x) = E + F x_1^{-1} x_2^{-1} + G x_1^{\frac{(z-1)}{m}} x_2^{\frac{(1-m)}{m}} \quad (15)$$

当 $f(x)$ 为单件工序工时, $E = t_p, F = A, G = A t_c/B$,

$$A = 10^{-3} \pi d_w L, B = 60^{\frac{(1-m)}{m}} C_v^{\frac{1}{m}} d_w^{\frac{z}{m}} K_m^{\frac{1}{m}};$$

当 $f(x)$ 为单件工序成本时, $E = k_1 t_p, F = k_1 A, G = A/B(k_1 t_c + k_2)$ 。同时,满足约束条件如下:

$$g_1(x) = 1 - 19.62 C_m d_w^{(x-1)} x_1^y K_m x_2 v / P_{\max} \eta \geq 0; \quad (16)$$

$$g_2(x) = 1 - 9.81 C_m d_w^x x_1^y K_m / M_s \geq 0; \quad (17)$$

$$g_3(x) = 1 - \frac{\pi d_w n_{\min}}{1000 x_2} \geq 0; \quad (18)$$

$$g_4(x) = 1 - \frac{x_1}{f_{\max}} \geq 0; \quad (19)$$

$$g_5(x) = 1 - \frac{T}{B} x_1^{\frac{1}{m}} x_2^{\frac{1}{m}} \geq 0 \quad (20)$$

工件材料是高锰钢, 尺寸是 100 mm×100 mm, 钻削深度为 10 mm, 选择最大生产率优化, 优化结果显示及优化过程如图 3、图 4, 得到的进给量和切削速度 (转化为主轴转速) 的最优解为 0.070 mm/r 和 319.86 r/min。

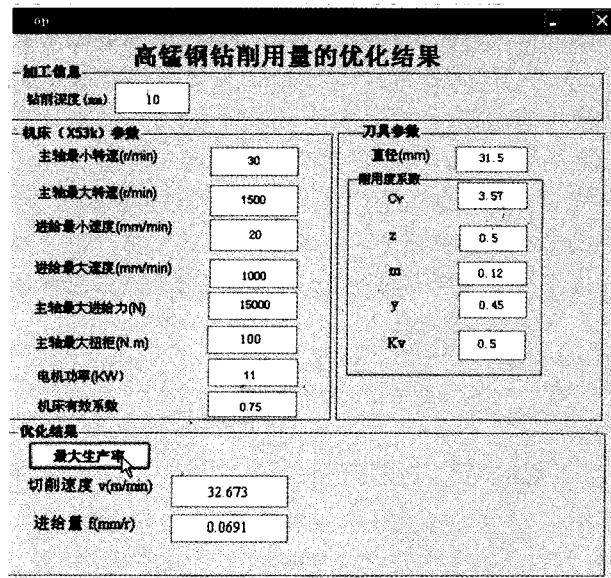


图 3 高锰钢钻削用量优化界面

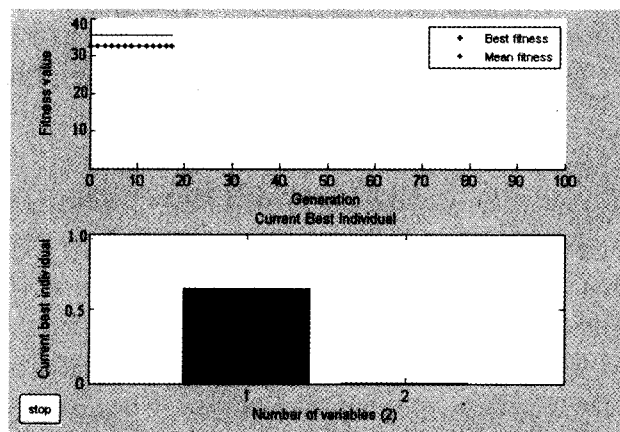


图 4 钻削用量的优化过程

3 实验设备与条件

实验设备: HASS VF5 立式数控加工中心、工具显微镜、钻削力和扭矩测量系统 (该系统由 YDZ-II 01W 压电钻削测力仪、YE5850 电荷放大器、PCI-9118DG/L 数据采集卡和计算机组成。信号采样用

PCI-9118DG/L 型数据集卡, 数据采集是采用大连理工大学机械工程学院传感测控研究所开发的钻削动态测试系统 (DFMSD)。整个钻削过程均不加冷却液, 为干式切削。

实验用钻头: $\Phi 31.5$ 机夹式硬质合金钻头。

试件材料: 300 mm×100 mm×10 mm 水韧处理 ZGMn13 高锰钢, 表面经过铣削加工。

切削用量: 采用优化以后的数值, 取主轴转速 $n = 340$ r/min, 进给量 $f = 0.07$ mm/r。

切削方式: 干切削, 通孔。

实验条件: 室温 20 °C。

实验装置实物图如图 5 所示。

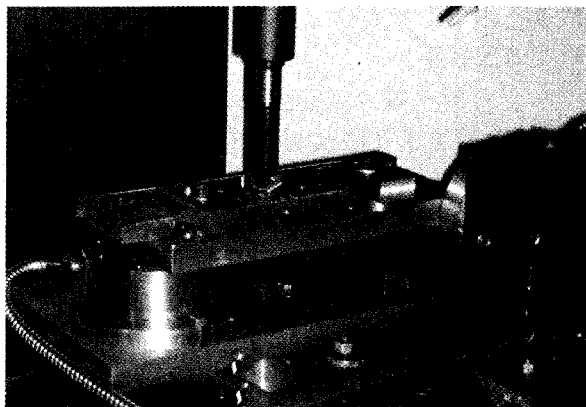


图 5 实验装置实物图

4 刀具优选的实验研究

4.1 基于刀具破损形式的材料优选试验

根据资料分析, 在众多硬质合金牌号中选出 3 种材料 YG6、YG6A、YG8 进行钻削实验分析对比。通过工具显微镜对刀具在钻削过程中出现的破损区域进行观察比较, 并分析刀具破损的机理。考察指标为: 在相同切削速度、相同钻削条件和相同被加工材料的实验条件下, 刀具在经过连续钻削后, 选出出现不同程度的破损的刀具。通过对破损区域大小的直观比较, 优选出适合钻削加工高锰钢的刀具材料。

通过对所选 3 种刀具破损形貌的图片 (如图 6) 测量出 3 种刀片破损区域的大小, 测量结果见表 2。结果表明: YG8 破损区域小, YG6、YG6A 刀具则出



图 6 刀具破损区域的形貌图

现较大面积的破损。

表 2 刀具破损区域大小测量结果

硬质合金牌号	破损面积/mm ²
YG6	22.15
YG6A	19.34
YG8	15.64

4.2 基于钻削力与扭矩的刀具几何参数优选试验

群钻的几何参数选择不当时,首先会发生刀具破损,所以,优化刀具几何参数的第一个约束条件是刀具不发生初期破损,第二个约束条件是刀具磨损率最低。本文所使用的硬质合金群钻几何参数对刀具的破损、磨损影响比较复杂,参数之间的交互作用及取值范围难以预先确定,所以实验中采用单因素法搜索其最优值。

本实验重点探讨群钻的内刃前角(负刃带+正前角)、内刃锋角和圆弧刀半径对刀具耐用度的影响。采用正交试验 $L_9(3^4)$ 正交表。选择内刃前角、内刃

锋角和圆弧刀半径作为正交实验的三个因素,每个因素选取三个水平因素。实验指标取钻削过程产生的钻削力和扭矩,因素水平表如表 3。

表 3 因素水平表

水平	内刃前角/(°)	内刃锋角/(°)	圆弧刀半径/mm
1	-5	120	2
2	0	130	2.5
3	5	140	3

实验数据采用极差分析法,如表 4 所示。其中 K_1 、 K_2 、 K_3 为各列的 1、2、3 水平相对应的实验结果之和,极差 ΔK 为各列算得的 $K_1/3$ 、 $K_2/3$ 、 $K_3/3$ 中极大值与极小值之差,由极差大小可以看出,对于新型硬质合金群钻,内刃前角、内刃锋角和圆弧刀半径都是影响钻头耐用度的主要因素,其中内刃锋角影响最大,圆弧刀半径影响最小。由 K_1 、 K_2 、 K_3 的大小可以看出较优水平为:内刃前角为 -5° 、内刃锋角为 130° 、圆弧刀半径为 2.5 mm。

表 4 实验计划及极差分析表

实验号	内刃前角/(°)	内刃锋角/(°)	圆弧刀半径/mm	水平	实验指标	
					轴向力/N	扭矩/N·m
1	-5	120	2	1	8 135	73.5
2	-5	130	2.5	2	8 029	70.4
3	-5	140	3	3	8 096	71.3
4	0	120	2.5	3	8 178	73.9
5	0	130	3	1	8 086	71.7
6	0	140	2	2	8 110	71.2
7	5	120	3	2	8 230	74.3
8	5	130	2	3	8 116	73.6
9	5	140	2.5	1	8 159	73.8
$K_1/3$	8 087	8 181	8 120			
	71.7	73.9	72.8			
$K_2/3$	8 125	8 077	8 112			
	72.3	71.9	71.6			
$K_3/3$	8 168	8 122	8 137			
	73.9	72.1	72.4			
ΔK	81	104	25			
	2.2	2.0	1.2			

4.3 基于钻削力与扭矩的刀具性能对比实验

在相同切削速度、相同钻型和相同被加工材料的实验条件下,各取一把新型机夹式硬质合金群钻和焊接式硬质合金双平面钻头各进行刀具寿命对比实验,每把钻头依次钻 3 个孔,实验所得数据(轴向力和扭矩)列于表 5。发现机夹式硬质合金群钻与焊接式硬质合金双平面钻头相比,轴向力降低 20%

左右,扭矩下降 15%左右。

5 结论

对新型硬质合金群钻进行了刀具结构的分析与改进、切削用量优化、刀具材质优选和刀具几何参数优化的实验研究。通过实验分析和研究,可以得到以下结论:

表 5 性能对比实验结果

钻型	实验次序	实验指标	
		轴向力/N	扭矩/N·m
机夹式硬质合金群钻	第一个孔	8 203	73.2
	第二个孔	8 786	81.7
	第三个孔	9 354	89.6
焊接式硬质合金钻头	第一个孔	9 886	82.6
	第二个孔	10 843	92.8
	第三个孔	11 220	98.6

1) 在钻削 ZGMn13 高锰钢时,刀具结构选择机夹式是可行的;在这种刀具结构下钻削加工的最佳切削用量为:主轴转速为 340 r/min,进给量为 0.07 mm/r,切削速度应在 30~40 m/min 之间;

2) 刀具的主要磨损形式为后刀面磨损和横刃磨损,主要的破损形式是主切削刃崩刃和刀尖断裂;钻削效果要比工厂用的硬质合金双平面钻头要好,轴向力降低 20%左右,扭矩下降 15%左右,能够达到预期的减少崩刃的目的,也具备群钻所特有的优点。

参考文献

- [1] 吴希让.新型刀具材料在钻削技术上的应用[J].刀具技术,1995,30(3):38-40
 - [2] 胥锴,刘徽平,杨天雪.陶瓷刀具材料及其发展前景[J].稀有金属与硬质合金,2009,37(1):56-60
 - [3] 谢国如,张福豹.氮化硅陶瓷刀具在超硬材料加工中的应用[J].工具技术,2008,42(1):84-86
 - [4] Liu K, Li Y, Li X P, Rahman M. Ultra Precision Cutting of Tungsten Carbide in Ductile Mode Using CBN Tools[J]. Nanotechnology and Precision Engineering.2004,2(3): 234-241
 - [5] 靳晓丽,袁军堂,张永刚.钎焊金刚石刀具钻削新型复合板试验[J].机械工程师,2004(4):18-19
 - [6] 于凤云,孙洪江.浅析钻削加工刀具损伤[J].煤矿机械,2003(3):49-51
 - [7] 韩杜泉,胡喜兰.基于切削 ZGMn13 钢的 TiN 涂层硬质合金刀具的磨损破损研究[J].煤矿机械,2005,(1):21-23
 - [8] 张幼祺.金属切削理论[M].航空工业出版社,1988
 - [9] 上海市金属切削技术协会.金属切削手册[M].上海科学技术出版社,2003
- (2010-01-12 收稿;2010-03-01 修回)

超大型锌熔炉

锌熔法回收废残硬质合金工艺具有成本较低、质量较好的特点,但传统锌熔炉的单产量小、能耗高、锌残留量较大、设备维修保养难度大。株洲迪远硬质合金工业炉有限公司与美方合作采用专利技术,在工作原理和设备结构等方面对锌熔炉做了创新性的改进,成功研发了 ZMF500 型(500 kg/炉)和 ZMF1000 型两种规格的超大型锌熔炉。该炉不仅提高了产能和产品质量,还大幅度降低了能耗。单台产能 280 吨/年以上,锌残留量低于 0.01%(质量分数),锌的循环利用率超过 98.5%,能耗不足 3.0 kW·h/kg;设备自动化程度高、清洁度高、运行稳定可靠。

(卢国普供稿)