

斜撑离合器楔块线切割工艺优化及变质层分析

严宏志 王祎维 张诗颖 赵聪 刘志辉

(中南大学机电工程学院,长沙 410012)

文 摘 对目前国内 PCE 型斜撑离合器楔块制造工艺进行概述。为制造高质量的斜撑离合器楔块,提出了一种以慢走丝线切割为核心的楔块加工工艺,采用正交方法对线切割电参数进行了匹配实验,采用扫描电镜对线切割试样表面进行分析。实验结果表明,影响线切割表面粗糙度的因素顺序为脉宽、休止时间、伺服倍率、起始电压,线切割表面存在结构疏松、含 Cu 和 Zn 元素、厚度约为 15~20 μm 的变质层。

关键词 PCE 型离合器,制造工艺,线切割,变质层

中图分类号:TH162

DOI:10.3969/j.issn.1007-2330.2015.06.013

Optimization of WEDM Technology and Metamorphic Layer Analysis of PCE Clutch Sprag

YAN Hongzhi WANG Yiwei ZHANG Shiyong ZHAO Cong LIU Zhihui

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Central South University, Changsha 410012)

Abstract The manufacturing process of PCE(positive continuous engagement) type sprag clutch in China nowadays was summarized. In order to manufacture high-quality sprag clutch, a processing technology of sprags based on the WEDM-LS(low speed wire cut electrical discharge machining) was proposed. Adopting orthogonal method to experiment on wire cutting electrical parameters and analysizing surfaces of wire cutting sample with scanning electron microscope. The result shows that the sequence of factors effecting the surface roughness is pulse width, stop time, the servo ratio and the initial voltage, and there is a loose structure on the metamorphic layer, which contains Cu and Zn and with the thickness of about 15 to 20 μm .

Key words PCE type clutch, Manufacturing process, WEDM, Metamorphic layer

0 引言

PCE 型(强制连续约束)离合器相对滚珠式离合器具有承载能力大、运行速度高、质量轻的超越离合器。楔块是该种离合器的关键零件,其性能将直接影响离合器的使用寿命。

楔块形状复杂,几何精度、耐磨和抗疲劳性能要求高,加工难度大。我国目前还没有成熟的 PCB 斜撑离合器楔块的制造工艺,直接约束了该种斜撑离合器的应用。

楔块的制造现有的方法包括挤压成形法和线切割方法。由于斜撑离合器楔块的制造属于敏感技术,

因此国外很少有关于楔块制造的文献,国内虽有科研机构研究斜撑离合器,但都主要研究其工作原理、动力学模型等方面^[1-5],辛选荣和单堃堃对楔块挤压法进行了研究,采用挤压成形工艺制造楔块,研究结果表明,由于受到非均匀摩擦影响,挤压楔块沿轴向方向存在弯曲缺陷,此外,挤压后楔块还需进行热处理,由此产生热变形难以在后续加工中消除^[6]。杨振蓉对热处理后线切割楔块进行了研究,并通过后期的渗氮、气相沉积等方法来提高楔块表面质量,以提高离合器的使用寿命^[7]。

本文对线切割工艺进行了实验优化,并对线切割

收稿日期:2015-08-15

基金项目:湖南省创新平台与人才计划项目(2015JC3007);国家重点基础研究项目(2011CB706800-G);教育部博士点基金项目(20120162110004)

作者简介:严宏志,1964 年出生,教授,博士生导师,研究方向为机电装配监控理论与技术、高速高精度数字制造理论与技术。E-mail:yhzcusu@163.com

宇航材料工艺 <http://www.yhclgy.com> 2015 年 第 6 期

产生的变质层进行分析,为楔块高效率、高质量加工提供了依据。

1 PCE 型离合器工艺设计

PCE 超越离合器楔块的三维和二维结构图如图 1、图 2 所示,楔块的横截面由多段圆弧曲线组成,且楔块的两端均有不规则凹槽,结构复杂,用单一工艺方法难以完成其制造。同时,楔块为动力和运动传递零件,要求制造精度高、机械性能好。此外,一个离合器由几十个楔块组成,为了保障离合器运行的平稳性和长寿命需求,几十个楔块之间有“一套差”约束,即组成离合器的所有楔块的高度方向尺寸差应控制在 $8\ \mu\text{m}$ 内^[8]。由此给其制造技术带来了更高的要求。

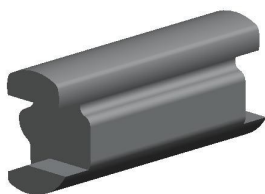


图 1 楔块三维结构

Fig. 1 Three-dimensional structure of the sprag

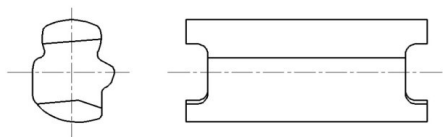


图 2 楔块二维结构

Fig. 2 Two-dimensional structure of the sprag

考虑线切割可在热处理后加工、无宏观变形、工艺简单等特点,同时为了保障楔块组满足“一套差”和加工表面质量要求,本文提出一种以线切割为核心的楔块加工工艺路线:(1)矩形毛坯下料→(2)精铣四边→(3)数控铣削楔块两端的凹槽→(4)热处理→(5)压机上平整化压制→(6)磨削两平面→(7)数控线切割各楔块→(8)去毛刺抛光→(9)表面处理→完成。以下主要对 1~7 工序进行分析。

(1)矩形坯料线切割下料,获得如图 3 所示的矩形坯料。坯料的材料为 GCr15 钢。

(2)在卧式加工中心对矩形坯料的四边(即 A、B、C、D 四面)进行粗铣、精铣、磨削,并将长宽误差控制在 IT5 以内。

(3)对矩形坯料的上下两平面(即 E、F 面)进行铣削,并在两平面上都留 $0.25\ \text{mm}$ 余量。

(4)如图 4 所示为坯料 E 面,阴影部分为楔块凹槽待加工部分,虚线为待加工楔块所处位置,通过编制数控铣削程序,在坯料 E 面上铣削离合器楔块两

端的凹槽,铣削过程采用粗铣与精铣相结合的方式,切削到零件尺寸,加工完成后再用同样的方式加工另一面(F 面)的弹簧槽。在加工时要注意铣削深度(零件上凹槽的深度)应加上步骤 3 中所留下的 $0.25\ \text{mm}$ 余量,图 5 为坯料 F 面。对弹簧槽的连续铣削为满足楔块的“一套差”约束提供了保障。

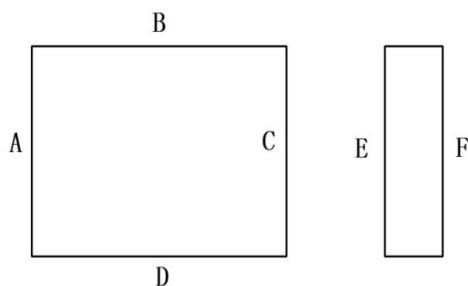


图 3 矩形坯料

Fig. 3 Rectangular blanks

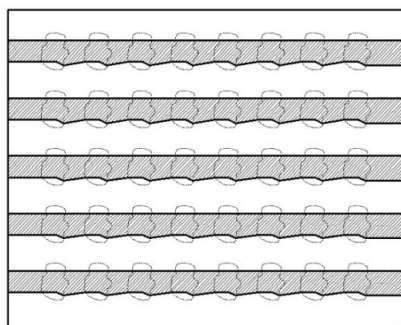


图 4 坯料 E 面

Fig. 4 E blank surface

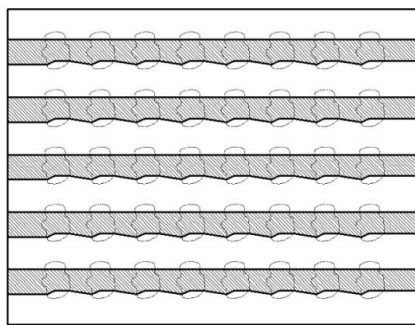


图 5 坯料 F 面

Fig. 5 F blank surface

(5)对已初加工的坯料进行热处理,坯料淬火温度为 840°C ,淬火后先在盐水中冷却至 400°C 左右,以出水时工件表面不发白为最适宜,然后迅速转入油中冷却,使其缓慢冷却,减少淬火应力。工件在油中冷却至 150°C 左右,迅速进行回火,回火温度为 180°C 左右。热处理完成后的样件如图 6 所示。使用硬度测量仪测得其硬度,多次测量求平均值后得到其硬度为 $56.7\ \text{HRC}$ 。

(6) 热处理完后测量工件的平面度,并在压力机上进行压制矫正,使平面度在 ± 0.01 内。

(7) 磨削整形后的坯料,去掉之前铣削留下的 0.25 mm 的余量。

(8) 采用线切割慢走丝的加工方法将楔块切割下来,坯料装夹时,应注意线切割的基准与铣削弹簧槽的基准重合。

(9) 将线切割后的楔块进行表面抛光,并通过渗氮、气相沉积等方法对其表面进行强化,以提高楔块的表面硬度。

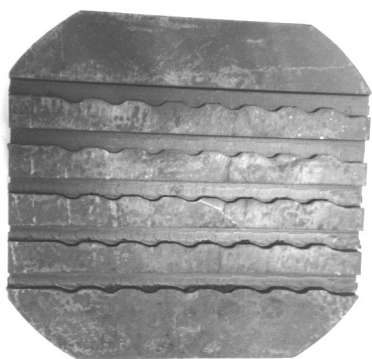


图6 热处理后的样件

Fig. 6 Sample after heat treatment

2 线切割工艺参数优化试验

采用慢走丝线切割机床、编制线切割程序加工各楔块,本实验所采用的线切割机床为台湾庆鸿GA360S,并采用“割一修三”的切割方式。如图7所示为在坯料E面上进行线切割的路径,其中阴影部分为楔块的凹槽,粗实线为线切割路径。线切割的金属丝从坯料左端切入、做顺时针切割,在即将切割完成一个楔块时,进行逆时针切割,并保证不切断楔块与坯料的连接,在反复粗加工3次后进行一次精加工,并将楔块从坯料上切割下来。完成第一块楔块的切割后,开始以同样的方式切割下一块,至到完成最左边一个的切割。下一行的楔块的切割按照同样的

方法进行。由此将楔块从坯料上切割下来。坯料装夹时,应注意线切割的基准与铣削弹簧槽的基准重合。

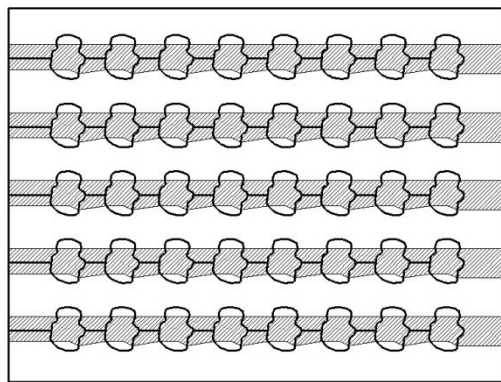


图7 线切割路径图

Fig. 7 Path of WEDM

为了获得低粗糙度切割表面,对线切割参数进行匹配实现。这些参数包括:起始电压、脉高、休止时间、伺服倍率。

线切割后的楔块样件如图8所示。根据常用的加工参数值范围,对起始电压、脉宽、休止时间、伺服倍率各取四个不同的值,利用正交实验方法进行十六次实验,正交实验因素、水平及结果如表1所示。

根据实验结果,楔块的“一套差”控制在 $8\text{ }\mu\text{m}$ 内,满足制造要求,在本次试验中主要分析电参数对于加工表面粗糙度的影响。正交试验极差分析结果如表2所示,其中 $K_{1i} \sim K_{4i}$ 为在 i 因素下4个水平所对应的试样指标之和, k 值的大小反映不同因素对于实验结果的影响。

从表2可得到获得影响表面粗糙度的因素顺序为脉宽、休止时间、伺服倍率、起始电压,最低表面粗糙度的最优线切割参数组合为:起始电压 85 V 、脉宽 $0.5\text{ }\mu\text{m}$ 、休止时间12倍、伺服倍率15。

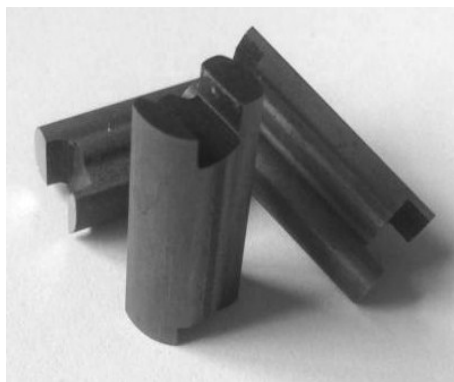


图8 线切割后的楔块样件

Fig. 8 Sprag sample after WEDM

表 1 正交实验因素、水平及结果

Tab. 1 Orthogonal experimental factors, level and results

试验	因素				工艺指标			
	起始电压 /V	脉宽 / μs	休止时间 /倍	伺服倍率	实际加工速度 / $\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$	实际伺服电压 /V	表面粗糙度 / μm	楔块高度方向 尺寸/mm
1	85	3	8	10	16.5	68.5	2.050	9.602
2	85	2	10	15	14.4	65.5	1.972	9.598
3	85	1	12	20	11.5	62	1.503	9.600
4	85	0.5	15	25	18.5	63.3	0.742	9.596
5	90	3	10	20	25.0	75	2.265	9.600
6	90	2	8	25	27.0	70	2.070	9.604
7	90	1	15	10	6.0	62	2.519	9.601
8	90	0.5	12	15	14.0	68.3	0.488	9.597
9	95	3	12	25	27.9	70	2.324	9.604
10	95	2	15	20	15.0	63.7	2.285	9.603
11	95	1	8	15	12.6	65.7	1.484	9.597
12	95	0.5	10	10	11.0	72	1.074	9.602
13	100	3	15	15	17.5	71.7	2.343	9.598
14	100	2	12	10	13.2	77.7	1.972	9.597
15	100	1	10	25	17.8	62.3	1.582	9.600
16	100	0.5	8	20	26.6	77.7	0.874	9.602

表 2 极差分析结果

Tab. 2 Range analysis results

项目	起始电压/V	脉宽/ μs	休止时间/倍	伺服倍率
K_{1i}	6.267	8.982	6.478	7.615
K_{2i}	7.342	8.299	6.893	6.287
K_{3i}	7.167	7.088	6.287	6.927
K_{4i}	6.771	3.178	7.889	6.718

3 楔块变质层分析

零件的使用寿命不仅与基体的强韧性有关,而且与其表面的组织结构密切相关。

在线切割的瞬时高温和工作液快速冷却作用下,零件表面经线切割后会形成变质层,使表面组织结构发生变化,并产生显微裂纹等,由此影响零件的表面质量和后续表面处理^[9]。

3.1 变质层的微观形貌与成分

将试样端面经过镶样、碾磨和抛光后用浓度为4%的硝酸酒精溶液腐蚀20 s,通过扫描电子显微镜对楔块的端面进行观察,端面的观察结果如图9所示。

在图9中,右侧为镶样组织,左侧为楔块基体,中间部分为线切割产生的变质层,厚度约为15~20 μm 。变质层材质疏松,基体和变质层有明显分界、结合不紧密。样品基体、变质层能谱成分扫描结果如图10所示。

μm ,变质层材质疏松,基体和变质层有明显分界、结合不紧密。样品基体、变质层能谱成分扫描结果如图10所示。

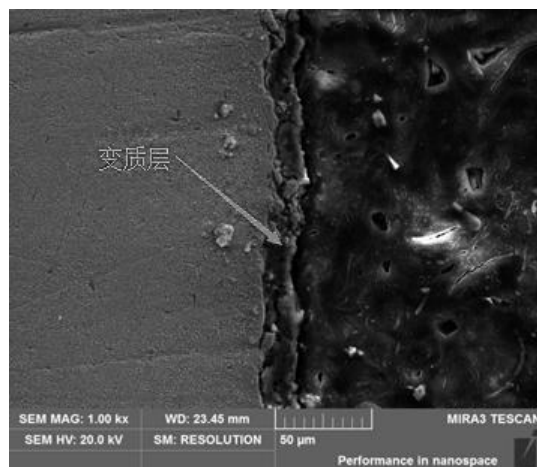
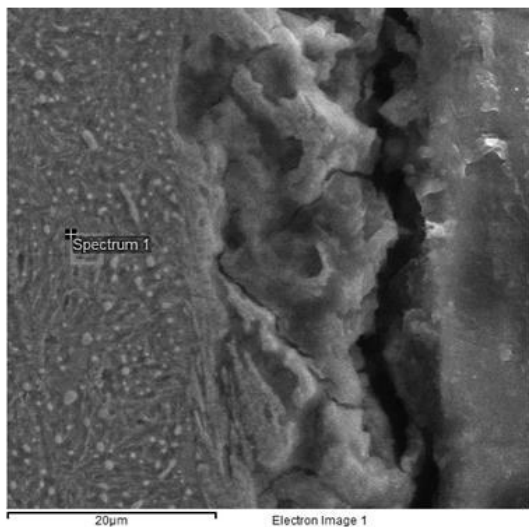


图 9 线切割试样端面形貌

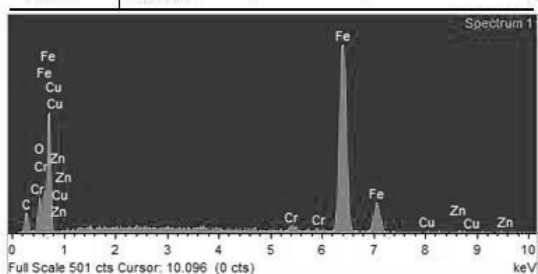
Fig. 9 End surface morphology of WEDM sample

由图10可知,变质层相对于基体的铜、锌含量显著升高,这是由于线切割金属丝(主要含量为铜、锌)在与试样表面的放电、材料去除过程中固溶到样品表面形成。

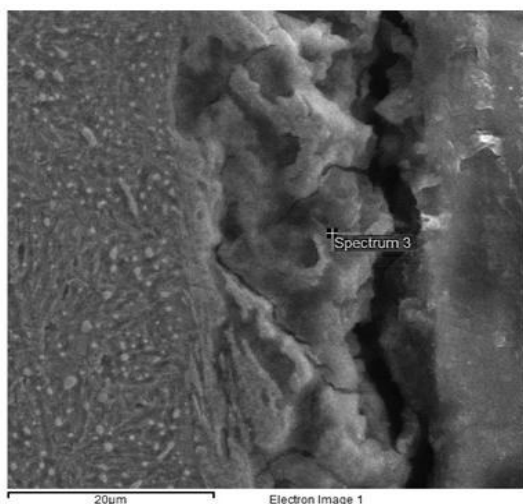
从垂直于试样表面的角度进行观测,其表面如图11所示。由图可见,线切割表面是一种各向异性的类蜂窝状组织,存在细小孔洞。



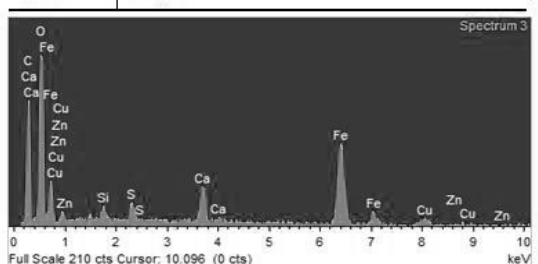
Element [Ⓢ]	Weight% [Ⓢ]	Atomic% [Ⓢ]	Ⓢ	Ⓢ
C K [Ⓢ]	14.82 [Ⓢ]	39.94 [Ⓢ]	Ⓢ	Ⓢ
O K [Ⓢ]	7.41 [Ⓢ]	15.00 [Ⓢ]	Ⓢ	Ⓢ
Cr K [Ⓢ]	1.02 [Ⓢ]	0.64 [Ⓢ]	Ⓢ	Ⓢ
Fe K [Ⓢ]	76.17 [Ⓢ]	44.14 [Ⓢ]	Ⓢ	Ⓢ
Cu K [Ⓢ]	-0.09 [Ⓢ]	-0.05 [Ⓢ]	Ⓢ	Ⓢ
Zn K [Ⓢ]	0.66 [Ⓢ]	0.33 [Ⓢ]	Ⓢ	Ⓢ
Totals [Ⓢ]	100.00 [Ⓢ]	Ⓢ	Ⓢ	Ⓢ



(a) 基体成分



Element [Ⓢ]	Weight% [Ⓢ]	Atomic% [Ⓢ]	Ⓢ	Ⓢ
C K [Ⓢ]	18.09 [Ⓢ]	38.79 [Ⓢ]	Ⓢ	Ⓢ
O K [Ⓢ]	19.95 [Ⓢ]	32.11 [Ⓢ]	Ⓢ	Ⓢ
Si K [Ⓢ]	0.37 [Ⓢ]	0.34 [Ⓢ]	Ⓢ	Ⓢ
S K [Ⓢ]	0.78 [Ⓢ]	0.63 [Ⓢ]	Ⓢ	Ⓢ
Ca K [Ⓢ]	1.80 [Ⓢ]	1.16 [Ⓢ]	Ⓢ	Ⓢ
Fe K [Ⓢ]	56.56 [Ⓢ]	25.99 [Ⓢ]	Ⓢ	Ⓢ
Cu K [Ⓢ]	1.68 [Ⓢ]	0.68 [Ⓢ]	Ⓢ	Ⓢ
Zn K [Ⓢ]	0.76 [Ⓢ]	0.3 [Ⓢ]	Ⓢ	Ⓢ
Totals [Ⓢ]	100.00 [Ⓢ]	Ⓢ	Ⓢ	Ⓢ



(b) 变质层成分

图 10 样品不同位置成分的能谱扫描结果

Fig. 10 EDS scan results of sample at different locations

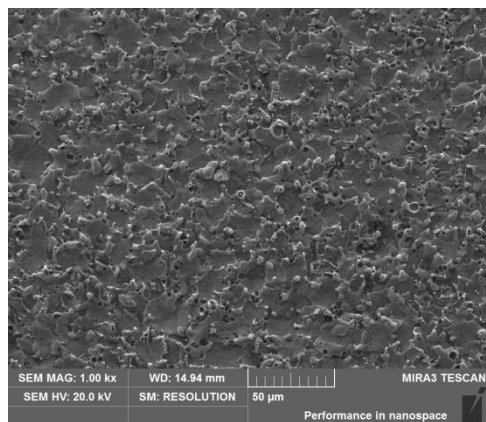


图 11 线切割试样表面形貌

Fig. 11 Surface morphology of WEDM sample

3.2 变质层的显微硬度

采用显微硬度计分别对样件的带变质层的表面硬度及基体(磨除变质层后)表面硬度进行测量。

多次测量结果见表 3,求平均值后得到基体显微硬度为 636.599 HV,求平均值后得到变质层表面显微硬度为 784.682HV。可以看出未磨除变质层表面的显微硬度高于基体的显微硬度,这可能是因为在脉冲电流的作用下,GCr15 钢的组织发生马氏体转变,使得其显微硬度提高,由此使表面脆性增强,也使表面与基体之间产生性能突变^[10]。

由上述测试可知,变质层的成分与基体不同、变质层为疏松组织且与基体结合不紧密。这些特点应

在后续表面强化处理中加以考虑。

表 3 楔块基体和变质层显微硬测量结果

Tab.3 Microhardness measurements of matrix and metamorphic layer

编号	基体显微硬度	变质层显微硬度
1	704.73	874.00
2	650.54	799.65
3	602.37	765.99
4	625.76	799.65
5	676.82	734.40
6	559.36	734.40

4 结论

(1)提出了一种以慢走丝线切割为核心的多工序楔块加工工艺,一套差可控制在 8 μm 范围内。

(2)采用正交实验法对线切割工艺参数进行优化匹配,获得了一组可获得较低表面粗糙度的线切割电参数。

(3)对线切割楔块试样的变质层进行了分析,发现变质层中混有线切割金属丝的元素,且变质层为疏松结构、与基体结合不紧密,可对楔块后续表面处理产生影响。

参考文献

[1] 曲秀全,陆念力,戴恒震.一种新型楔块式低副单向超越离合器[J].机械工程学报,2004,40(1):195-198

[2] Chesney D R, Kremer J M. Generalized equations for sprag one-way clutch analysis and design[J]. Proceedings of the 1998 SAE International Congress & Exposition, 1998, 14(2):173-184

[3] WILLIAMS F C, TIPPING D, HENRY T A. An improved sprag clutch[C]. 1975 World Congress on the Theory of Machines and Mechanics, 4th, University of Newcastle upon Tyne, England, 1975:593-598

[4] 杨兵. 高速强制连续约束型航空离合器接触特性及疲劳寿命分析[D]. 长沙:中南大学,2011

[5] Zahara Erwie, Kao Yi Tung. A hybridized approach to optimal tolerance synthesis of clutch assembly[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2002, 17(1):261-268

[6] 单堃堃. 高速钢楔块紧密成形技术研发及其碳化物分布状况[D]. 洛阳:河南科技大学,2012

[7] 杨振蓉. 高速斜撑离合器设计、试验技术研究[D]. 上海:上海交通大学,2008

[8] 张再德. 航空发动机高速附件传动系统研究和设计[D]. 南京:南京航空航天大学,2007

[9] 李永根. 模具钢线切割加工表面变质层的后处理[J]. 航空工艺技术. 1996(01):34-36

[10] 杨清. 脉冲电流对 GCr15 钢组织及性能的影响[D]. 长春:吉林大学,2013

(编辑 任涛)