

DOI: 10.3969/j.issn.0254-0150.2016.12.012

## 热处理工艺对45<sup>#</sup>钢抗苜蓿草粉磨损性能的影响\*

黄晓鹏<sup>1,2</sup> 万芳新<sup>2</sup> 吴劲锋<sup>2</sup> 黄建龙<sup>3</sup> 崔磊<sup>1</sup>

(1. 甘肃省机械工程学会 甘肃兰州 730030; 2. 甘肃农业大学工学院 甘肃兰州 730070;  
3. 兰州理工大学机电学院 甘肃兰州 730050)

**摘要:** 苜蓿草粉对环模系统的磨粒磨损是造成饲料制粒机关键部件失效的主要原因。为提高环模系统关键部件材料的抗磨粒磨损性能,采用不同热处理工艺对45<sup>#</sup>钢热处理,在磨粒磨损试验机上考察其抗苜蓿草粉的磨损行为,用金相显微镜对试样的金相组织进行分析研究,用扫描电镜对试样摩擦表面的磨损形貌进行观察研究。结果表明:经淬火处理后45<sup>#</sup>钢的磨损主要表现为显微切削和机械抛光,未见明显的塑性疲劳;当材料的硬度提升至一定值时,通过硬度与韧度的合理配合可获得较好的抗植物磨料磨损性能;相对于常温淬火,45<sup>#</sup>钢亚温淬火后抗植物磨料磨损性能明显提升。

**关键词:** 45<sup>#</sup>钢; 热处理工艺; 苜蓿草粉; 磨粒磨损

**中图分类号:** S817.12; TH117.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 0254-0150(2016)12-057-05

## Friction and Wear Behavior of 45 Steel at Different Heat Treatment Process with Alfalfa Powder

HUANG Xiaopeng<sup>1,2</sup> WAN FangXin<sup>2</sup> WU Jingfeng<sup>2</sup> HUANG Jianlong<sup>3</sup> CUI Lei<sup>1</sup>

(1. Gansu Mechanical Engineering Society, Lanzhou Gansu 730030, China; 2. School of Engineering, Gansu Agricultural University, Lanzhou Gansu 730070, China; 3. School of Mechanical and Electrical Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou Gansu 730050, China)

**Abstract:** Abrasive wear of alfalfa powder on the circular mould system is the main cause of the key parts failing on feed pellet machine. To improve the abrasive wear resistance of the key parts of circular mould system, the heat treatment of 45 steel was carried out by using different heat treatment process. The friction and wear behavior of 45 steel against alfalfa powder was studied on the abrasive wear test machine, the microstructure of the sample was analyzed by using metallographic microscope, and the worn surface morphology was observed by using scanning electron microscope (SEM). The results show that the abrasive wear of quenched 45 steel is dominated by micro-cutting wear and mechanical polishing, while plastic fatigue wear is not obvious. The wear resistance of 45 steel against alfalfa powder can be improved through rational matching of hardness and ductility when its hardness reaches certain value, meanwhile the subcritical quenching technique can obviously improve the wear resistance of 45 steel against plant abrasive compared with quenching.

**Keywords:** 45 steel; heat treatment process; alfalfa powder; abrasive wear

环模制粒成型技术是目前国际上制粒成型技术领域的主流技术,主要应用于生物质燃料、饲料加工、能源等行业<sup>[1]</sup>。环模制粒技术的核心设备是环模制粒机,其关键部件为环模和压辊。在实际生产中,环模

的主要失效形式为磨损和疲劳断裂,尤以磨损最为严重<sup>[1]</sup>。为了提高环模的使用寿命和生产率,必须从环模制粒系统结构设计、环模材料及其热处理工艺、制粒成型工艺等方面进行系统的研究。目前环模选用的材料通常为3Cr13、4Cr13、9SiCr等。45<sup>#</sup>钢是一种中等强度的中碳钢,广泛应用于农业机械及农副产品加工机械中。研究热处理工艺对45<sup>#</sup>钢抗植物磨料磨损的影响,确定适宜的热处理工艺参数,对于寻求环模替代材料,降低加工制造成本,具有重要的实际应用价值。

苜蓿草粉是环模制粒机生产苜蓿草颗粒的原料,它是一种植物磨料,对环模材料的磨损从本质上来讲是

\* 基金项目: 国家自然科学基金项目(51065001); 甘肃省自然科学基金项目(1506RJZA138)。

收稿日期: 2016-02-18

作者简介: 黄晓鹏(1975—),男,博士,教授,研究方向为农业机械装备与材料摩擦磨损。E-mail: huangxp@gsau.edu.cn.

通信作者: 吴劲锋(1962—),男,博士,教授,研究方向为农产品加工。E-mail: wujf@gsau.edu.cn.

一种软磨料磨损。目前国内外对于软磨料磨损的研究相对较少<sup>[2-5]</sup>。国内外学者对于植物软磨料磨损的研究基本集中于具体机器部件或其所用材料的磨损机制方面<sup>[6-12]</sup>，通过热处理方式来提高环模材料抗植物磨料磨损性能的研究相对较少<sup>[13-17]</sup>。本文作者利用三体湿砂橡胶轮磨损试验机模拟环模制粒机工况，以苜蓿草粉作为典型植物磨料，制备不同热处理工艺的 45# 钢试样，通过考察材料的硬度、金相组织、磨损失重以及磨损表面形貌，考察热处理工艺对 45# 抗植

物磨料磨损性能的影响，并揭示其磨损机制。

## 1 实验部分

### 1.1 试验材料与试验设备

试验设备主要包括牧草粉碎机、粒度为 6 mm 的标准分级筛、电热鼓风干燥箱、洛氏硬度计、冲击试验机，Neophot-21 型光学金相显微镜、MLS-225 型湿砂橡胶轮式磨损试验机、岛津分析天平（精度 0.1 mg）的、JSM-5600LV 型扫描电镜（SEM）。磨料磨损试验机示意图如图 1 所示。

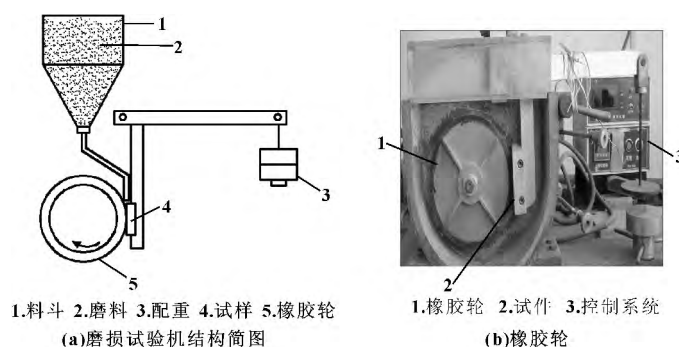


图 1 磨料磨损试验机

Fig 1 Abrasive wear testing machine (a) structure diagram of wear testing machine; (b) rubber wheel

磨料与试样的制备：植物磨料选择苜蓿草粉，粒度为 6 mm，含水率为 6%（质量分数），磨料特性参数为 17.39% 粗蛋白，7.56% 水分，25.06% 粗纤维，8.98% 粗灰分<sup>[11]</sup>。磨料制备过程<sup>[1,15]</sup>如下：原料选择甘农三号紫花苜蓿，自然风干后由牧草粉碎机粉碎，利用标准分级筛筛取 6 mm 粒度的草粉；将粉碎后的草粉放至电热鼓风干燥箱内干燥 8 h，预设温度

105 °C，干燥完毕且磨料温度降至室温后进行配水实验，调配出含水率为 6% 的植物磨料，最后将磨料存贮于黑塑料袋里防止水分挥发。金属试样选择 45# 钢，规格为 57 mm × 25.5 mm × 6 mm。首先，对试样进行预处理，工艺方案为 840 °C 保温，30 min 水淬，550 °C 回火后水冷；然后对所有试样进行淬火处理。4 种试样的热处理工艺方案如表 1 所示。

表 1 45# 钢热处理工艺方案

Table 1 The heat treatment parameters of 45 Steel

No.	Austenitic temperature $\theta/^\circ\text{C}$	Austenitic time $t/\text{min}$	Quenching medium	Tempering temperature $\theta/^\circ\text{C}$	Tempering time $t/\text{h}$
A	830	5 ~ 6	Water	200	2
B	810	5 ~ 6	Water	200	2
C	790	5 ~ 6	Water	200	2
D	770	5 ~ 6	Water	200	2

### 1.2 试验方法与步骤

利用洛氏硬度计测定试样硬度，利用冲击试验机测定试样冲击韧度，每种热处理工艺方案取 5 件试样测定，求取均值。利用金相显微镜观察试样的微观金相组织结构。

在湿砂橡胶轮式磨损试验机上进行苜蓿草粉对 45# 钢试样的磨料磨损试验，试验条件为室温 20 ~ 25

°C，载荷 70 N，转速 181 r/min，每 3 000 m 一个磨程，共 5 个磨程，总滑动距离为 15 000 m。每次磨损试验前后试样均浸入丙酮溶液进行超声清洗，干燥后用分析天平称取试样质量，试验前后试样质量之差即为磨损失重。每一试验条件进行 3 次试验，磨损失重取其平均值。利用扫描电镜（SEM）观察磨损试样表面形貌，分析植物磨料对经不同热处理工艺处理

45#钢的磨损机制<sup>[1,15]</sup>。

## 2 结果与讨论

### 2.1 机械性能

表2给出了不同热处理试样的硬度和冲击韧度值,可以看出,随着奥氏体化温度的升高,试样的硬度逐渐增加,但是相应冲击韧度则有所下降。

表2 试样的硬度和冲击韧度

Table 2 The hardness and impact toughness of samples

No.	Hardness	Impact toughness $\sigma/(N \cdot m)$
A	HRC53.75	5.7
B	HRC53.08	5.7
C	HRC52.50	6.1
D	HRC50.67	6.9

### 2.2 金相组织分析

4种热处理试样的金相组织如图2所示。可以看出,经淬火处理的45#钢,其金相组织主要为回火马氏体和少量铁素体,并伴有一些残余奥氏体。回火马氏

体是过饱和的 $\alpha$ 固溶体和未脱离母体的碳化物质点组成的混合物,这种碳化物是极其细小的 $\epsilon$ -碳化物,具有针状特征,仍是一种亚稳态组织。回火马氏体具有较高的硬度和耐磨性,由于内应力有所降低,因此韧度也有所提高,回火后所得的性能在很大程度上取决于淬火所得的马氏体的性能<sup>[11]</sup>。在各种淬火马氏体中,低碳马氏体的硬度和强度较低,但具有良好的塑性和韧度,优点在于应变疲劳寿命高,缺点在于抗切削能力差。高碳马氏体正好相反,其具有很高的硬度,抗切削能力强,但塑性和韧度极低。中碳马氏体强度和塑性位于两者之间,具有较好的综合性能,因此可以在一定磨损条件下获得最佳的耐磨性<sup>[11]</sup>。

观察图2还可以发现,随着淬火温度的降低,组织结构中铁素体的含量有逐渐增多的趋势。铁素体的力学性能特点为强度和硬度低,但能够提高基体的塑性,此外,随着淬火温度降低,组织晶粒明显细化,可以增强基体的韧度。因此,随着试样A、B、C、D中铁素体含量逐渐增多,试样的硬度有所下降,而塑性和韧度则依次提高<sup>[11]</sup>。

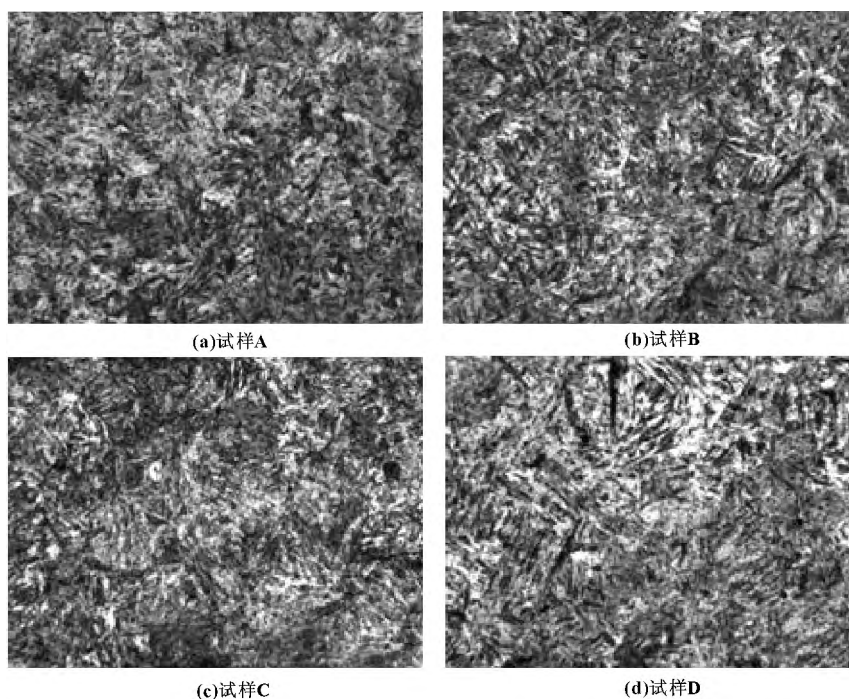


图2 不同热处理工艺的金相组织

Fig 2 Metallographic structures under different heat treatment

### 2.3 磨损性能分析

图3示出了不同试样的磨损质量损失。结合图3(a)和表2分析可以看出,4种试样的耐磨性与其硬度及冲击韧度并无明显的相关性,试样A硬度最

高,其累积磨损失重却最大,试样D硬度最低,但其磨损失重却最小。这是由于材料的耐磨性非其固有特性,它与硬度有一定关系,一般情况下,硬度越大,耐磨性越好,但是除了硬度,材料耐磨性还与其

韧度、金相组织及表面状态等因素有关。虽然试样 D 的硬度最低，但其冲击韧度最大，说明材料硬度提升

至一定值时，通过硬度与韧度的合理配合可获得较好的抗植物磨料磨损性能。

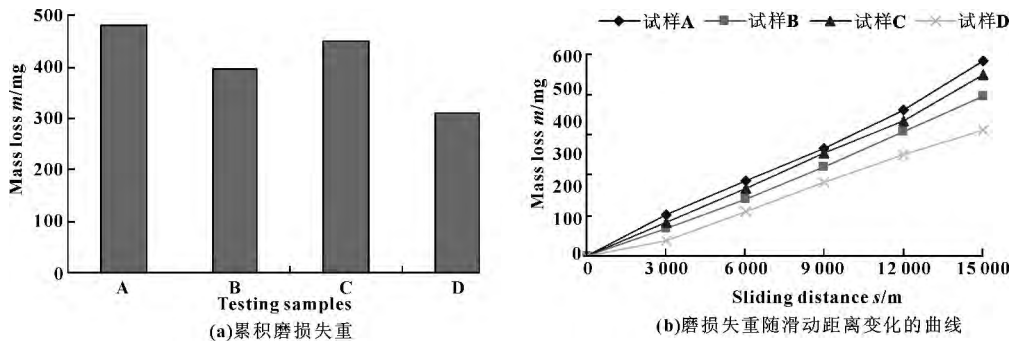


图 3 试样累计磨损失重及磨损失重随滑动距离变化的曲线

Fig 3 Total wear mass loss of samples ( a ) and variation of wear mass loss with sliding distance ( b )

由图 3 ( b ) 可以看出，4 种试样的磨损失重与滑动距离均呈线性规律增长，A、B、C 3 种试样的磨损失重变化曲线较为相近，在磨损最后阶段有增大的趋势，而试样 D 磨损失重在整体磨损过程中明显小于其他 3 种试样，且随着滑动距离的增加，磨损率有

下降的趋势。

### 2.4 磨损形貌分析

图 4 为 4 种热处理工艺试样磨损表面形貌的 SEM 图片。

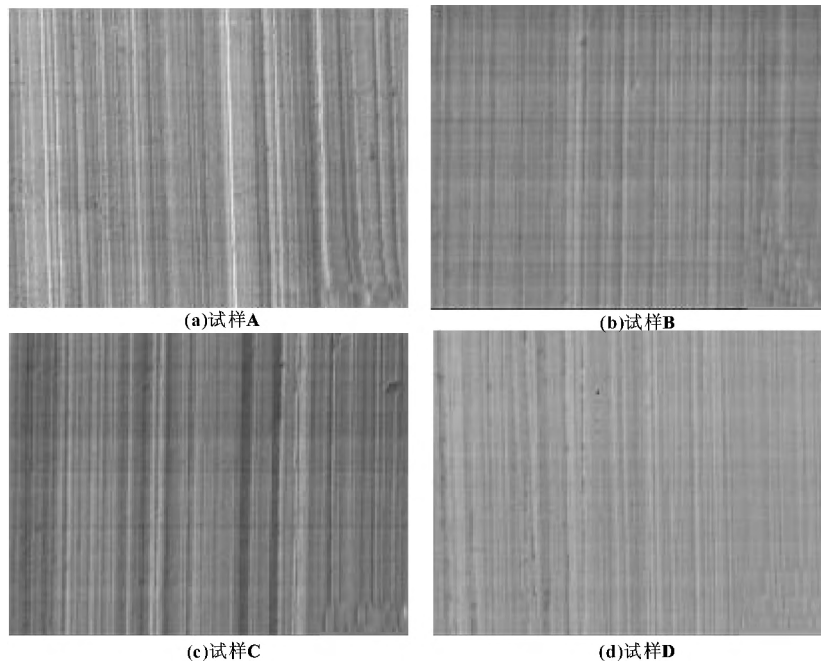


图 4 不同热处理工艺试样的磨损表面形貌图

Fig 4 Worn surface micrographs of the samples under different heat treatment

可以看出，4 种磨损表面形貌特征相似，试样的磨痕深度、材料损失与图 3 给出的磨损失重的结果相一致，即试样 D 的磨痕最浅最细，其磨损失重相应

也最小。4 种试样的磨损机制主要为机械抛光和显微切削，犁沟明显，基本没有出现疲劳剥落现象。在苜蓿草粉在对金属材料的磨损过程中，金属试样承受植

物软磨料作用的法向力和切向摩擦力, 由于外加有负载, 磨料被压缩为具有一定硬度和黏聚能力的团状物, 沿着金属表面滑动。此时, 植物磨料对金属试样的作用类似机械加工中普通切削和磨削深度极小时的情况, 磨料处于游离状态, 无法形成连续而稳定的切削, 磨料对金属表面仅产生间断的抛光作用, 因此材料表面只是以机械抛光的形式去除金属, 整个作用过程不会产生裂纹<sup>[15]</sup>。尽管植物磨料的硬度(HV10~20)远低于普通金属材料, 使磨损过程中机械抛光产生的一次性磨损量很少, 但在植物磨料连续不断的长时间作用下, 金属表面的累积磨损量也是不可忽视的。对比磨损失效后的环模实物, 其倒角处出现明显的抛光痕迹, 印证了这一磨损机制所起的作用。

吴劲锋<sup>[11]</sup>的研究表明, 植物磨料在与未经热处理的45#钢相互作用时, 由于植物磨料的挤压成型特性, 在外载下会形成具有一定硬度的“不可压缩的团”。“不可压缩的团”在沿试样表面滑动时会产生显微切削而形成犁沟, 同时在外力的作用下, “不可压缩的团”在材料表面还会产生压入擦痕。擦痕两侧堆积的材料会发生塑性变形, 最终因反复塑变和塑性耗尽而脱落<sup>[11]</sup>。对45#钢进行淬火处理后, 材料硬度得到显著提高, 虽然磨损过程仍然形成了显微切削和犁沟, 导致表面材料的损失和塑性变形, 但形成的犁削沟槽相比未经淬火处理的试样明显细而浅。切削初始阶段, 由于试样具有较好的塑性和韧度, 试样表面主要产生塑性变形, 避免了直接切削而产生犁沟, 因此磨损量降低。由于材料受到反复挤压, 在塑性和韧度作用下, 磨痕材料先是被犁起, 再次受到挤压时在塑性作用下, 被犁起的犁沟有可能得到重新弥合, 形成新的基体表面<sup>[11]</sup>。由于淬火后的45#钢可获得较好的塑性和韧度, 试样可在较长时间内抵抗这种变形, 使其耐磨性得到显著提高。但是, 在磨料反复挤压摩擦作用下, 被犁起材料最终会形成疲劳剥落。图4所示的4种试样磨损表面未见明显反复塑变的疲劳剥落现象, 主要是因为还没有达到材料的疲劳极限<sup>[18]</sup>。由此可见, 通过淬火工艺显著提高了45#钢抵抗微观切削和塑变疲劳的能力。

结合金相组织分析, 对于4种工艺方案, 随着试样中铁素体含量的增加, 材料的硬度依次减小, 韧度依次增加, 而韧度的增加, 可减小“不可压缩的团”压入材料表面的法向力, 从而减弱显微切削作用, 抑制犁沟的形成。综合分析可知, 试样D具有最好的耐磨性能。因此, 淬火后的45#钢, 当其硬度达到一定值时, 实现硬度、塑性及韧度的合理配合是提高材料抗苜蓿草粉植物磨料磨损性能的有效途径。

### 3 结论

(1) 苜蓿草粉植物磨料对经淬火的45#钢的磨损机制主要以机械抛光和显微切削为主。淬火工艺可减小苜蓿草粉磨粒对45#钢的显微切削作用, 形成的犁沟细而浅, 基本未见疲劳剥落现象, 说明磨损过程塑变疲劳磨损不明显。

(2) 经淬火的45#钢的耐磨性与其硬度及冲击韧度并无明显的相关性, 当材料的硬度提升至一定值时, 获得硬度与韧度的合理配合可获得较好的抗植物磨料磨损性能。

(3) 研究的B、C、D3种试样为亚温淬火, 相较试样A的常温淬火, 可获得更好的抗植物磨料磨损性能。综合分析可得, 45#钢抗苜蓿草粉植物磨料磨损的最佳热处理工艺为: 预处理, 840℃水淬, 保温30min, 550℃回火后水冷; 亚温淬火, 770℃水淬, 加热5~6min, 200℃回火2h。

#### 参考文献

- [1] 黄晓鹏. 环模制粒机成型工艺及关键部件磨损机理研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2012.
- [2] RICHARDSON R C D. The wear of materials by relatively soft abrasives[J]. *Wear*, 1968, 11: 244-274.
- [3] RICHARDSON R L D. The wear of metal by hard abrasive[J]. *Wear*, 1967, 10: 291-309.
- [4] WANG N. Transformation of soft-abrasive wear into hard-abrasive wear under the effect of frictional heat[J]. *Tribology Transactions*, 1989, 32: 84-90.
- [5] RABINOWICZ E. The wear of hard surface by relatively soft abrasives[J]. *Wear of Materials*, 1983, 8: 12-17.
- [6] 赵博彦, 徐克明, 田志兴. 磨粉机轧辊失效机理及提高使用寿命的途径[J]. *沈阳工业大学学报*, 1987, 9(2): 25-37. ZHAO B Y, XU K M, TIAN Z X. Analysis of failure mechanism flour grinding rollers and an investigation of improving its service life[J]. *Journal of Shenyang Polytechnic University*, 1987, 9(2): 25-37.
- [7] 包那日那, 刘伟峰, 曹玉, 等. 粉碎机锤片磨损机理分析及粉碎性能试验研究[J]. *农机化研究*, 2011, 33(11): 153-156. BAO N R N, LIU W F, CAO Y, et al. The study on mill hammer wear mechanisms and experimental validation of crushing capability[J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2011, 33(11): 153-156.
- [8] 黄晓鹏, 黄建龙, 吴劲锋, 等. 苜蓿草粉对金属材料磨损表面的分形维数计算[J]. *润滑与密封*, 2010, 35(1): 22-24. HUANG X P, HUANG J L, WU J F, et al. Calculation of fractal dimension of worn surface of metal materials by alfalfa powder[J]. *Lubrication Engineering*, 2010, 35(1): 22-24.

(下转第67页)

封原理,建立了坐封力和工作压差作用下的接触压力的数值计算模型,确定了密封性能与胶筒的结构参数和工作参数之间的关系。

(2) 通过引入可靠性系数,确立了利用悬挂式胶筒的密封面接触压力判断其密封性的准则。

(3) 通过 ABAQUS 软件建立了悬挂式封隔器胶筒的有限元模型,模拟了在初封和坐封状态时胶筒的 Mises 应力和密封面的接触压力分布,并与数值计算结果进行对比,结果表明,两者计算的密封面接触压力在数值和分布形状上具有较好的一致性,证明了建立的理论模型的有效性。

#### 参考文献

- 【1】朱晓荣. 封隔器设计基础[M]. 北京: 中国石化出版社 2012: 4.
- 【2】仝少凯. 压缩式封隔器胶筒力学性能分析[J]. 石油矿场机械 2012 41(12): 1-7.  
TONG S K. Mechanical properties analysis of compressed packing rubber during axial compressing [J]. Oil Field Equipment, 2012 41(12): 1-7.
- 【3】李旭 袁益华. 压缩式封隔器胶筒变形阶段力学分析[J]. 石油矿场机械 2007 36(10): 17-19.  
LI X, DOU Y H. Mechanical analysis of compressed parking during axial compressing [J]. Oil Field Equipment, 2007, 36(10): 17-19.
- 【4】练章华 乐彬 宋周成 等. 封隔器坐封过程有限元模拟分析[J]. 石油机械 2007 35(9): 19-21.  
LIAN Z H, YUE B, SONG Z C, et al. Finite-element simulation analysis of the setting process of packer [J]. China Petroleum Machinery 2007 35(9): 19-21.
- 【5】FREYER R, HUSE A. Swelling packer for zonal isolation in open hole screen completions [R]. SPE 78312 2002.
- 【6】AL-HIDDABI S A, PERVEZ T, QAMAR S Z, et al. Analytical model of elastomer seal performance in oil wells [J]. Applied Mathematical Modelling 2015 39(10/11): 2836-2848.
- 【7】BIELSA J M, CANALES M, MARTINEZ F J, et al. Application of finite element simulations for data reduction of experimental friction tests on rubber metal contacts [J]. Tribology International 2010 43(4): 785-795.
- 【8】周先军 平利 季公明. 封隔器胶筒接触应力分布有限元计算[J]. 钻采工艺 2002 25(4): 51-52.  
ZHOU X J, PING L, JI G M. Finite element calculation of the contact stress on the sealing runner of the packer [J]. Drilling & Production Technology 2002 25(4): 51-52.
- 【9】李晓芳 杨晓翔 王洪涛. 封隔器胶筒接触应力的有限元分析[J]. 润滑与密封 2005 30(5): 90-92.  
LI X F, YANG X X, WANG H T. Finite element analysis of the contact stress of the sealing rubber of the packer [J]. Lubrication Engineering 2005 30(5): 90-92.
- 【10】王海兰 牟利江 刘清友. 井下封隔器胶筒橡胶材料力学性能试验研究[J]. 石油矿场机械 2006 35(3): 57-59.  
WANG H L, GU L J, LIU Q Y. Mechanic performance experiment research to the rubber material of down hole packer [J]. Oil Field Equipment 2006 35(3): 57-59.
- 【9】吴劲锋 黄建龙 张维国 等. 苜蓿草粉对金属材料磨损性能的影响[J]. 摩擦学学报 2007 27(1): 88-90.  
WU J F, HUANG J L, ZHANG W G, et al. Friction and wear behavior of the metals by alfalfa powder [J]. Tribology 2007 27(1): 88-90.
- 【10】霍丽丽 侯书林 田宜水. 生物质固体燃料成型机压辊磨损失效分析[J]. 农业工程学报 2010 27(7): 103-106.  
HUO L L, HOU S L, TIAN Y S. Wear failure analysis on roller assembly of biomass pellet mill [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering 2010 27(7): 103-106.
- 【11】吴劲锋. 制粒环模磨损失效机理研究及优化设计[D]. 兰州: 兰州理工大学 2008.
- 【12】关凯书 张美华. 颗粒饲料机压模的磨损失效分析及耐磨材料研究[J]. 润滑与密封 1995 20(5): 49-54.  
GUAN K S, ZHANG M H. Failure analysis and anti-wear materials study of the pressing dies of the fodder pellet mill [J]. Lubrication Engineering 1995 20(5): 49-54.
- 【13】张炜 吴劲锋 马国军 等. 苜蓿草粉对金属材料的磨料磨损试验[J]. 农业机械学报 2009 40(11): 63-67.  
ZHANG W, WU J F, MA G J, et al. Experiment of metal materials abrasive wear for alfalfa powder [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery 2009 40(11): 63-67.
- 【14】张炜 吴劲锋 黄晓鹏 等. 农业纤维物料对 9SiCr 钢磨损性能的影响[J]. 材料热处理学报 2010 31(10): 105-109.  
ZHANG W, WU J F, HUANG X P, et al. Friction and wear behavior of 9 SiCr steel by agricultural fibrous materials [J]. Transactions of Materials and Heat Treatment 2010 31(10): 105-109.
- 【15】黄晓鹏 吴劲锋 万芳新 等. 环模材料抗植物磨料磨损激光淬火工艺参数优化[J]. 材料科学与工程学报 2014 32(2): 206-210.  
HUANG X P, WU J F, WAN F X, et al. Process parameter optimization of laser quenching to circular mould material against plant abrasive [J]. Journal of Materials Science and Engineering 2014 32(2): 206-210.
- 【16】HUANG X P, WU J F, WAN F X, et al. Friction and wear behavior of 9sicr steel under different treatment with plant abrasive [J]. Advanced Materials Research 2012 562/563/564: 318-321.
- 【17】YANG C J, HUANG X P, WU J F, et al. Friction and wear behavior of 45# steel with different plant abrasive [J]. Applied Mechanics and Materials 2013 712/713/714/715: 74-77.
- 【18】邵荷生 张清. 金属的磨料磨损与耐磨材料[M]. 北京: 机械工业出版社, 1988.

(上接第 61 页)