

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.S0.020

耕作部件耦合仿生表面结构制备方法

贾洪雷^{1,2} 罗晓峰^{1,2} 王文君^{1,2} 张哲^{1,2} 郭明卓^{1,2} 庄健^{1,2}

(1. 吉林大学工程仿生教育部重点实验室, 长春 130025; 2. 吉林大学生物与农业工程学院, 长春 130025)

摘要: 针对农业机械耕作部件既要提高耐磨性又要保证强度的问题,提出了一种通过构建仿生表面结构和控制工艺来设计结构/材料二元耦合仿生表面结构的方法。采用球墨铸铁制备具有仿生表面结构的耕作部件使仿生表面由高硬度白口铁构成,从而兼顾部件的耐磨性和机械性能。试验结果表明,在铸造过程中,单纯通过仿生表面结构或局部设置小型冷铁的方法,部件仿生表面结构局部均未能形成白口铁组织,而上述两种方法的结合运用,可实现仿生表面结构的白口化。分析表明,仿生表面结构可限制熔体流动,设置冷铁可提高局部过冷度,两者结合可实现耦合仿生设计。显微硬度和划痕试验表明,耦合仿生表面结构具有较高的局部硬度,相比于芯部基体,其显微硬度值平均提高了35.71%,而形成相同宽度的划痕时,其所需载荷是芯部基体的1.16倍。水润湿性试验表明,耦合仿生表面结构与芯部基体水润湿性也存在一定的差异,相比于芯部基体,其接触角增大了14.91%。此方法适用于生成具有耐磨性能且高强度的耕作部件,在保证部件机械性能的同时,可提高耐磨性和降低土壤粘附。

关键词: 耕作部件; 耦合仿生; 表面结构; 耐磨

中图分类号: S220.6; TB17 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2016)S0-0130-06

Research on Coupling Bionics Surface Texture for Tillage Component

Jia Honglei^{1,2} Luo Xiaofeng^{1,2} Wang Wenjun^{1,2} Zhang Zhe^{1,2} Guo Mingzhuo^{1,2} Zhuang Jian^{1,2}

(1. Key Laboratory of Bionic Engineering, Ministry of Education, Jilin University, Changchun 130025, China

2. College of Biological and Agricultural Engineering, Jilin University, Changchun 130025, China)

Abstract: Tillage component wear is a serious concern in agricultural regions. There is a contradiction between the improved hardness of tillage component and weakened mechanical strength. In order to solve this problem, the paper introduced a structure and material coupling bionics surface texture that was acquired by structuring the bionics surface texture and controlling the processing of the cast. The test results showed that the single bionics surface texture or setting small chill did not produce the white iron structure, and via combining the two methods, the white iron structure was appeared. The analysis results indicated that bionics surface texture can limit the melting flow and setting small chill can enhance the part undercooling degree, realizing the design method of the coupling bionics surface texture. The micro hardness test results showed that coupling bionics surface texture has higher micro hardness and the average value was improved by 35.71% compared with the core matrix. The scratch test results showed that when forming the same width of scratches, it needed 1.16 times load for the core matrix. The wettability test results showed that the average contact angle of the coupling bionics surface texture was high, and the values were increased by 14.91% compared with the core matrix. The coupling bionics surface texture can be used to design the tillage component that possesses high wear resistance, high mechanical strength and low soil adhesion.

Key words: tillage component; coupling bionics; surface texture; wear resistance

收稿日期: 2016-07-22 修回日期: 2016-08-17

基金项目: “十二五”国家科技支撑计划项目(2014BAD06B03)、国家自然科学基金项目(51305158)和吉林省科技发展计划项目(20125027)

作者简介: 贾洪雷(1957—),男,教授,博士生导师,主要从事机械化保护性耕作技术及仿生智能机械研究,E-mail: jiah1@vip.163.com

通信作者: 庄健(1981—),男,高级工程师,博士,主要从事农业机械关键部件研究,E-mail: zhuangjian_2001@163.com

引言

土壤耕作是农业生产田间作业中最基本和最主要的形式,主要包括翻耕和深松等。农机耕作部件是土壤耕作机械实现其作业功能的关键部件,如犁铧、犁镜、深松铲尖和起垄铲壁等^[1-2]。

农机耕作部件直接与土壤接触,在土壤中工作时对土壤起到挤压、剪切和分离的作用,会受到来自土壤颗粒的冲击而导致磨损,同时又由于受到较大的应力会发生断裂,这两方面因素均会造成耕作部件失效,严重影响部件的使用寿命^[3-4]。因此延长耕作部件使用寿命应从提高耐磨性和保证机械强度两方面进行研究。

研究表明,材料的磨损是农机耕作部件失效的主要原因之一^[5-7]。为了提高耕作部件使用寿命,国内外学者针对耕作部件磨损失效的问题做了较多的研究。陈秉聪等^[8]分析了3种传统犁壁材料的化学成分、金相组织等,并进行了腐蚀性试验,表明白口犁镜材料比35号钢犁镜材料耐蚀性好和脱土性强。SALOKHE等^[9]将涂有陶瓷材料的圆形金属薄膜固定在圆形犁的两侧,取得了较好的减粘降阻和耐磨效果。上述研究虽提高了材料的耐磨性能,但由于其使用材料机械性能很低和耐冲击性能差^[10-12],在工作过程中很容易断裂,只适用于土壤条件较好的情况。ORLOWICZ等^[13]采用表面重熔-快速冷却方法制备白口-球墨复合铸铁材料,提高了材料的耐磨性;孙浩等^[14]在热轧态45号钢基体上采用激光熔凝处理,研究了激光熔凝硬化层的组织、硬度、磨粒磨损性能,结果表明经激光熔凝处理的试样耐磨粒磨损性能提高4.6倍;SEAH等^[15]采用在模具中放置铜片的方法获得白口-球墨复合铸铁材料,提高了材料的耐磨料磨损性能;高红霞等^[16]采用消失模铸渗工艺在铸钢犁铧表面制备WC颗粒增强钢基复合材料耐磨层,研究结果表明犁铧铸渗层的硬度是基体的1.7倍,耐磨性是基体的2.97倍;以上学者通过表面改性技术方法提高硬度改善了材料表面的耐磨性能。CECCARELLI等^[17]通过设置大型冷铁的方法得到了具有良好耐磨和耐冲击性能的局部激冷球墨铸铁材料。可见通过材料的梯度分布提高表面硬度和耐磨性,是兼顾耐磨性和机械强度提高部件寿命的有效途径。

近年来,仿生学的研究成果用于农机耕作部件也取得了良好的效果,主要集中在生物非光滑表面仿生结构耐磨性的研究^[18]。如汲文峰等^[19]发现鼯鼠在其爪趾轮廓形态与挖掘动作的配合下,实现极高的挖掘效率,同时其爪趾也具有较好的耐久性;李

建桥等^[20]在仿生表面结构改形和表面改性研究基础上,研制出具有减粘降阻功能的仿生犁壁,并具有较好的脱土性和耐磨性。ZHANG等^[21]通过研究鲨鱼非光滑表面的皮肤结构设计了仿生起垄铲铲壁,并进行了有限元仿真分析和土槽试验,表明该铲壁具有良好的减阻和耐磨性能。随着仿生学的兴起和应用,研究者发现生物的体表形貌、微观形态、体表结构和材料成分等对体表的耐磨性能具有耦合影响^[22]。

本文将仿生表面结构与材料特性相结合,通过构建仿生表面结构和控制工艺,使球墨铸铁部件仿生表面结构由高硬度白口铁构成,得到兼顾部件耐磨性和机械性能的耕作部件耦合仿生制备方法。

1 材料和方法

1.1 结构/材料二元耦合仿生表面结构

生物体表面结构广泛应用于农业机械耕作部件,且在工作过程中起到良好的效果^[22]。有研究表明,鼯鼠爪趾的表面轮廓曲线呈凸状,如图1所示^[19],其表面轮廓结构能使爪趾尖端更易入土,且具有良好的抗土壤颗粒磨损性能^[19,23]。

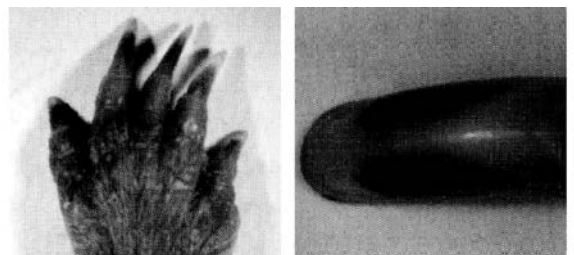


图1 鼯鼠爪趾

Fig. 1 Claw of mole rat

本文基于鼯鼠爪趾的表面轮廓结构,设计了一种仿生表面结构,单元体半径为 R ,相邻间隔为 B ,凸起高度为 H ,仿生表面结构通过球墨铸铁材料浇铸而成,图2所示为本文设计的结构/材料二元耦合仿生表面结构。数字和字母用来区分不同处理部位:1和2为仿生表面结构,3和4为正常表面结构。

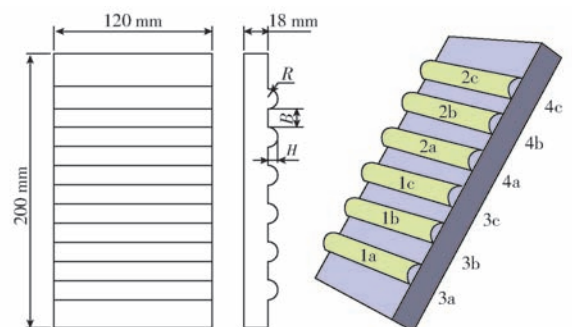


图2 结构/材料耦合仿生表面结构

Fig. 2 Structure/material coupling bionics surface structure

1.2 试验样品的制备

为研究结构、材料二耦元对耦合仿生表面结构的性能影响,设计了对比试验。试验样品设计如表1所示。

表1 对比试验样品类型
Tab.1 Sample type of contrast test

编号	仿生表面结构	冷铁
T1	有	无设置
T2	有	设置
T3	无	无设置
T4	无	设置
T0		

注:编号 T0 为试样芯部基体样品。

试验采用砂型铸造成型,材料成分选择工业生产中的 QT450-10 球墨铸铁成分,为了提高表面白口化的敏感性,将原料中硅铁的含量由 2.5% 提高到 3.1%^[24],球化剂为稀土镁合金,如表2所示。采用电磁感应炉进行熔炼。砂型铸造时,在铸模中构建仿生表面结构单元体,如图2所示,半径 R 为 5 mm,相邻间距 B 为 8 mm,凸起高度 H 为 4 mm,且在模型 2a、2b、2c、3a、3b、3c 处的型砂中设置冷铁(铜片),铜片尺寸为 120 mm × 10 mm × 5 mm,图3所示为试样的铸造成型过程。

表2 仿生表面结构化学成分含量

Tab.2 Chemical composition content of bionics surface structure

原料成分	生铁	钢料	硅铁	球化剂
质量分数/%	88.0	7.7	3.1	1.2

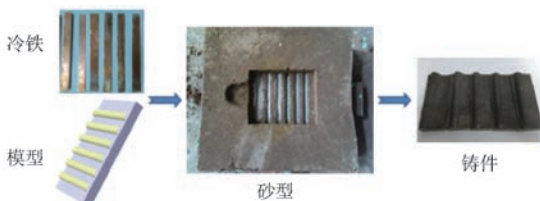


图3 结构/材料耦合仿生表面结构的铸造过程

Fig.3 Casting process of structure/material coupling bionics surface structure

1.3 试验样品的处理

结构/材料耦合仿生表面结构试样铸造成型后,采用线切割技术截取试样铸件得到5种单元体样品:T1样品(仅仿生表面结构)、T2样品(有仿生表面结构和设置冷铁)、T3样品(正常表面)、T4样品(仅设置冷铁)和T0样品(芯部基体)。这些材料经研磨、抛光,用体积分数为4%的硝酸酒精进行腐蚀制成标准金相样品。采用德国 ZEISS 公司 Ste REO Discovery V12 研究级全自动体视显微镜观察分析金

相样品的显微组织结构。采用维氏数字显微硬度计(HXD-1000型)测量金相样品各部位的显微硬度,加载压力 4.9 N,压力保持时间 20 s。采用纳米压痕仪(Triboindenter Plus型, HYSITRON 公司,美国)进行力学性能试验。采用德国 Dataphysics 公司 OCA20 型视频光学接触角测量仪分析样品表面的水润湿性能。

2 结果与分析

2.1 微观组织结构

图4为5种试验样品的显微组织。图4a为样品T0(芯部基体)的显微组织,可以看出基体组织石墨球化均匀充分,形态圆整,满足球墨铸铁基本的形貌特征;图4b为样品T1(仅仿生表面结构)的显微组织,明显看到石墨变大开花现象;图4c为样品T4(仅设置冷铁)的显微组织,可以看出铜片的设置对表面显微结构产生了一定的影响,从石墨开花到石墨蠕化,以及有渗碳体状的碳化物析出;图4d为样品T3(正常表面)的显微组织,可以看出该组织石墨球化比较充分,与样品T0显微组织相似,基本满足球墨铸铁基本形貌特征;图4e为样品T2(有仿生表面结构和设置冷铁)的显微组织,可以看出具有渗碳体等碳化物金相组织中存在明显的白口组织。

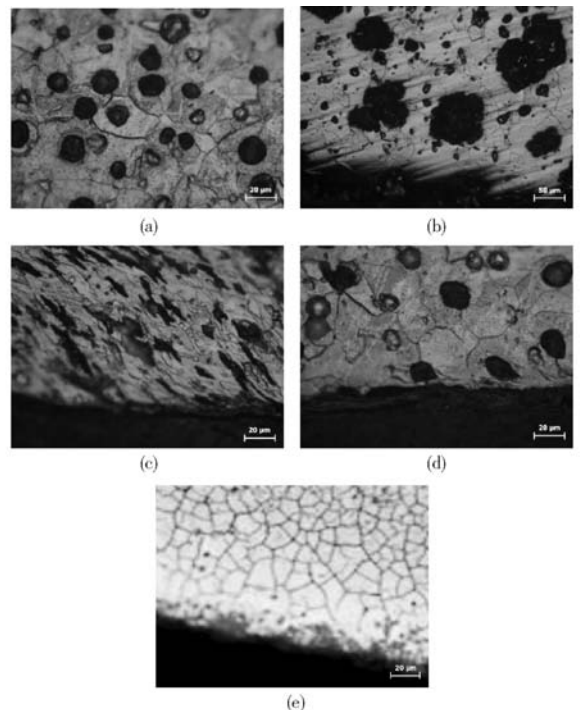


图4 样品的微观组织结构

Fig.4 Microstructure of sample

在样品的浇铸过程中,由于仿生表面结构处对熔体的流动具有一定的限制和阻碍作用,同时较大的局部曲率会导致耦合仿生表面结构处熔体加速放热,导致过冷度的增加^[25]。图5所示为各样品在浇

铸时的热传导示意图。从图中可以看出,与正常表面(图 5a)相比,有仿生表面结构(图 5b)的熔体流动时会受一定的阻力,同时较大的局部曲率会影响熔体的放热速度,从而样品 T1 显微组织出现了石墨变大开花的现象,但不足以使仿生表面结构处发生白口化;如图 5c 所示,在表面设置小型冷铁会提高表面局部过冷度,虽平滑表面并不会对熔体的流动起到阻碍作用,热传导也不会产生明显的限制,但小型冷铁能使表面结构进一步提高局部过冷度,会对石墨的球化产生显著的影响,使样品 T4 的显微组织形成局部的石墨蠕化;如图 5d 所示,耦合仿生表面结构的样品 T2 在铸造过程中,仿生表面结构会限制熔体的流动和热交换,同时冷铁会提供过冷度,使仿生表面结构局部产生更高的过冷度,使该单元体表面发生局部的白口化,形成高硬度耐磨的白口铁。

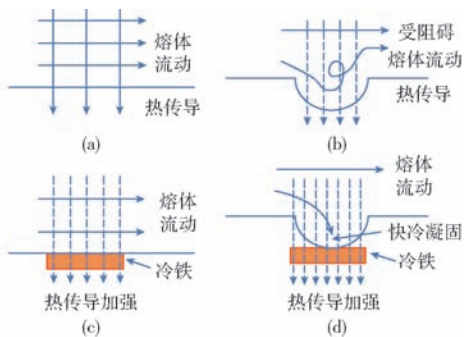


图 5 热传导示意图

Fig. 5 Schematic diagram of heat conduction

2.2 显微硬度

图 6 为各单元体样品横截面各部分的显微硬度分布,由图可见,显微硬度呈梯度变化,随着距离表面深度的增加,显微硬度总体趋势逐渐变小。根据显微硬度变化规律,横截面可以分为 3 个区域:表层区(0~2000 μm)、过渡区(2000~4000 μm)、芯部基体区(大于 4000 μm)。

芯部基体(T0)的显微硬度约为 HV280,而样品 T3(正常表面)所对应的显微硬度变化值很接近芯部基体(T0)。仅仿生表面结构的样品(T1)在表面有一个过渡层,紧接着硬度达到最大值,然后随着与表面的距离增加硬度逐渐下降到稳定值。仅设置冷铁的样品(T4)在表面有较高的硬度,然后随着远离表面的距离增加硬度逐渐下降到稳定值。有仿生表面结构且设置冷铁的样品(T2)在表层区的硬度最高,比芯部基体样品(T1)平均提高了 35.71%,随着与表面的距离增加硬度逐渐下降到稳定值。

试验结果表明,通过构建仿生表面结构和设置冷铁设计的结构/材料二元耦合仿生表面结构样品(T2),由于生成了白口铁组织,其表面硬度最高,而仅仿生表面结构(T1)或仅设置冷铁(T4)的样品也

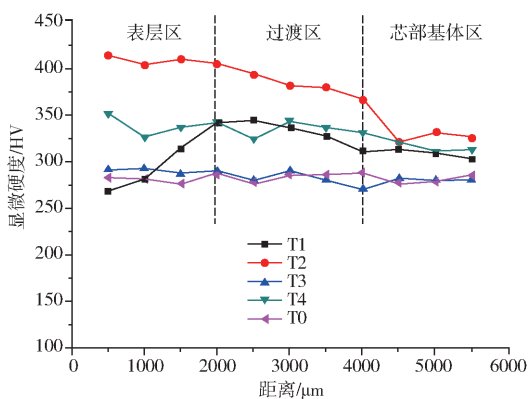


图 6 样品的显微硬度变化曲线

Fig. 6 Changing curves of micro hardness of sample

提高了表面的局部过冷度,其表面硬度较基体也有所变化。正常表面样品(T3)及芯部基体样品(T0)的表面硬度最低。

2.3 力学性能

划痕试验设定划痕宽度为 100 μm ,考察 5 种试验样品形成同一宽度所需的载荷。图 7a 所示为芯部基体样品在划痕宽度为 100 μm 时的显微结构图。

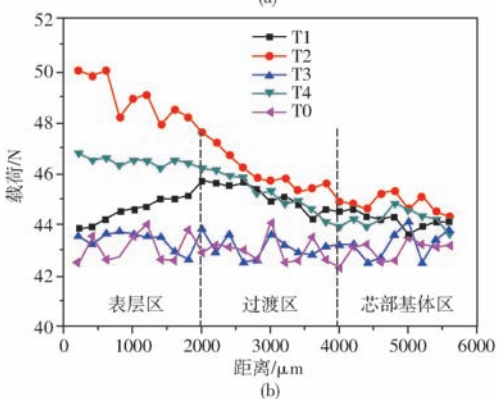
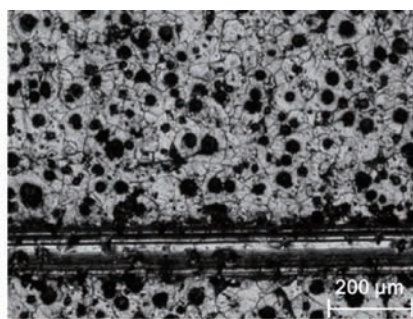


图 7 划痕过程中载荷变化

Fig. 7 Tendency of loading in scratch process

在划痕试验的过程中,样品 T0(芯部基体)和样品 T3(正常表面)的载荷比较稳定,在 43 N 左右;而样品 T1(仅仿生表面结构)的载荷波动较大,在距离表面附近载荷较小,随着与表面距离越大载荷慢慢增大,到达最大值 45.8 N,然后缓慢减小,最后趋于稳定;样品 T4(仅设置冷铁)的表层区附近所需载荷较大,随着与表面距离越大载荷缓慢减小,最后趋于

稳定。样品 T2(有仿生表面结构且设置冷铁)形成同宽度所需的载荷最大,在表层区其所需载荷是样品 T0(芯部基体)的 1.16 倍,随着与表面距离的增大所需载荷逐渐变小,最终趋于稳定。在距离表面大于 4 000 μm 时,各样品所需载荷基本趋于稳定,其载荷大小基本一致。

试验结果表明,通过构建仿生表面结构和设置冷铁设计的结构/材料二元耦合仿生表面结构样品(T2),由于其表面硬度最高,形成相同宽度的划痕时所受载荷最大。而仅仿生表面结构(T1)或仅设置冷铁(T4)的样品其表面硬度较基体也有所变大,所以形成相同宽度的划痕时所受载荷也较基体大。正常表面样品(T3)及芯部基体样品(T0)的表面所需载荷最小。5 种样品在距离表面大于 4 000 μm 时,由于受表面结构影响较少,所以稳定值基本一致。

2.4 表面润湿性

分别对 5 种试验样品进行研磨,最后一次研磨采用 1 000 目砂纸,抛光后用蒸馏水清洗再吹干,进行样品与蒸馏水的接触角测量。

5 种试验样品与蒸馏水的接触角如图 8 所示,图 8e 为 T2 样品的接触角(102.5 ± 1.1) $^\circ$,其接触角最大,图 8a 为 T0 样品的接触角(89.2 ± 1.5) $^\circ$,其接触角最小。其它样品的接触角大小如下:图 8b 为 T1 样品(93.2 ± 1.0) $^\circ$,图 8c 为 T4 样品(95.7 ± 1.4) $^\circ$,图 8d 为 T3 样品(90.1 ± 1.1) $^\circ$ 。

5 种试验样品中,接触角最大的是 T2 样品,最小的是 T0 样品,说明单元体结构的金相组织不同会影响其表面的润湿性。T2 样品的主要成分为白口铁组织,相比于 T0 样品的球墨铸铁组织其接触角增大了 14.91%。T3 样品与 T0 样品相比,接触角基本相同。T1 样品和 T4 样品与 T0 样品相比,接触角都有略微提高,分别提高了 4.48% 和 7.29%。试验结果表明,通过构建仿生表面结构和设置冷铁设计的结构/材料二元耦合仿生表面结构样品(T2)其疏水性能最好,仅仿生表面结构(T1)或仅设置冷铁(T4)的样品疏水性能次之,正常表面样品(T3)及芯部基体样品(T0)的疏水性最差。水接触角是衡量固体材料与土壤粘附倾向的重要参数之一,不同的接触角(水润湿性)会形成土壤不同的粘附力,接触角较大时耕作过程中易形成脱附力,减少土壤粘附^[26]。

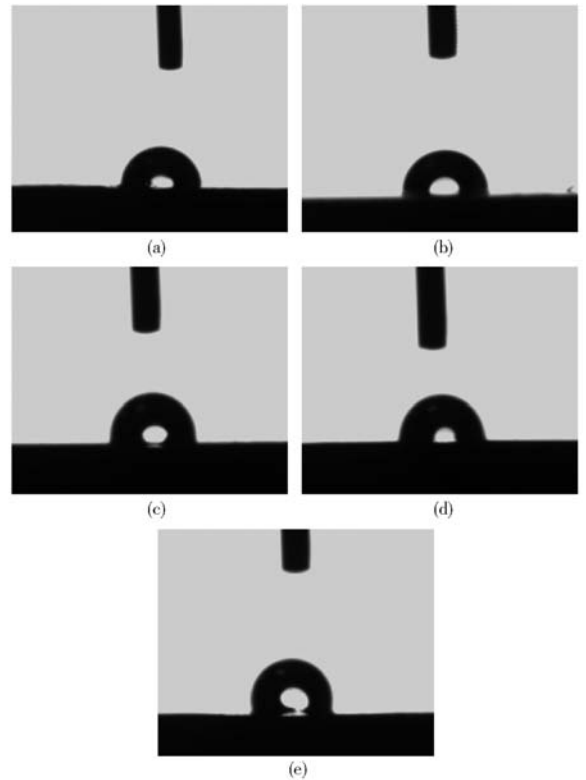


图 8 样品的接触角

Fig. 8 Contact angle of sample

此外,部件表面所呈现的梯度接触角分布,有利于粘附土壤在耕作过程中产生脱附力,因此,耦合仿生表面结构的接触角显著增大,且可在表面形成润湿性梯度分布,构成良好的脱附减粘性能。

3 结论

(1) 试验结果表明,仿生表面结构和设置冷铁均会对铸件表面局部熔体流动、凝固过程和微观组织结构产生影响,但均未在表面局部诱导形成白口铁组织,而二者结合可进一步限制熔体流动,提高局部冷却速度,实现表面白口化仿生结构与材料特性的耦合仿生设计。

(2) 耦合仿生表面结构处表层显微硬度较芯部基体组织显微硬度提高 35.71%;形成相同宽度的划痕时,耦合仿生表面结构处所需的载荷较芯部基体提高 1.16 倍。说明耦合仿生表面结构具有良好的耐磨性。

(3) 耦合仿生表面结构处水接触角显著高于芯部组织的水接触角,更大的接触角有利于降低土壤粘附,表面水接触角的梯度分布有利于粘附土壤实现脱附。

参 考 文 献

- 1 中国农业机械化科学研究院. 农业机械设计手册[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2007.
- 2 李宝筏. 农业机械学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2003.

- 3 曾德超. 机械土壤动力学[M]. 北京: 北京科学技术出版社, 1995.
- 4 吉尔(Gill W R) (美), 范德伯奇(Vanden B G E) (美). 耕作和牵引土壤动力学[M]. 耕作和牵引土壤动力学翻译组, 译. 北京: 中国农业机械出版社, 1983.
- 5 吕龙云. 农业机械材料失效与控制[M]. 北京: 化学工业出版社, 2014.
- 6 黄建洪. 农机零件的磨损选材及热处理[M]. 北京: 机械工业出版社, 2013.
- 7 苏彬彬, 徐杨, 简建明. 农业机械耐磨件发展及研究现状[J]. 热处理技术与装备, 2013, 34(5): 53-58.
SU Binbin, XU Yang, JIAN Jianming. The actuality of development and research of wear resistant part for agricultural machinery [J]. Heat Treatment Technology and Equipment, 2013, 34(5): 53-58. (in Chinese)
- 8 陈秉聪, 李建桥, 任露泉. 传统犁壁材料脱土性分析研究[J]. 农业机械学报, 1995, 26(4): 46-49.
CHEN Bingcong, LI Jianqiao, REN Luquan. Research on scouring soil for materials of the traditional plow moldboard [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 1995, 26(4): 46-49. (in Chinese)
- 9 SALOKHE V M, SHIRIN A K M. Effect of enamel coating on the performance of a disc plough [J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 1992, 53: 71-80.
- 10 李达. 阳城犁镜的研究[J]. 铸造, 1976(3): 43-51.
- 11 陆顺耕. 江苏粘土地区使用的传统犁镜铸铁组织及其曲面的初步分析研究[J]. 农业机械学报, 1964(3): 229-235.
LU Shungeng. On materials and surface of the traditional moldboard plow bottoms used in the clay soil regions of Jiangsu province [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 1964(3): 229-235. (in Chinese)
- 12 GREEN D J (美). 陶瓷材料力学性能导论[M]. 龚江宏, 译. 北京: 清华大学出版社, 2003.
- 13 ORLOWICZ Antoni W, TRYTEK Andrzej. Effect of rapid solidification on sliding wear of iron castings [J]. Wear, 2003, 254(1-2): 154-163.
- 14 孙浩, 凌刚, 李洪文, 等. 扫描间距对45钢激光熔凝强化组织性能的影响[J]. 农业工程学报, 2011, 27(2): 156-160.
SUN Hao, LING Gang, LI Hongwen, et al. Influence of scanning interval on microstructure and abrasive wear resistance of 45 steel by laser melting [J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(2): 156-160. (in Chinese)
- 15 SEAH K H W, HEMANTH J, SHARMA S C. Wear characteristics of sub-zero chilled cast iron [J]. Wear, 1996, 192(1-2): 134-140.
- 16 高红霞, 崔晓康, 海伟, 等. 犁铧表面耐磨层的消失模铸渗工艺研究[J]. 铸造技术, 2010, 31(9): 1205-1208.
GAO Hongxia, CUI Xiaokang, HAI Wei, et al. Study on evaporation pattern casting-infiltration technology of wear resistant layer on plough share surface [J]. Foundry Technology, 2010, 31(9): 1205-1208. (in Chinese)
- 17 CECCARELLI B A, DOMMARCO R C, MARTÍNEZ R A, et al. Abrasion and impact properties of partially chilled ductile iron [J]. Wear, 2004, 256(1-2): 49-55.
- 18 任露泉, 杨卓娟, 韩志武. 生物非光滑耐磨表面仿生应用研究展望[J]. 农业机械学报, 2005, 36(7): 144-147.
REN Luquan, YANG Zhuojuan, HAN Zhiwu. Non-smooth wearable surfaces of living creatures and their bionic application [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2005, 36(7): 144-147. (in Chinese)
- 19 汲文峰, 佟金, 贾洪雷, 等. 鼯鼠爪趾几何结构量化特征分析[J]. 农业机械学报, 2010, 41(4): 193-198.
JI Wenfeng, TONG Jin, JIA Honglei, et al. Quantitative characteristic features of geometric structures of claws of mole rat [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(4): 193-198. (in Chinese)
- 20 李建桥, 任露泉, 陈秉聪, 等. 犁壁材料表面特性与土壤粘附间的关系[J]. 农业工程学报, 1996, 12(2): 45-48.
LI Jianqiao, REN Luquan, CHEN Bingcong, et al. Study on surface characteristics of materials of plough mouldboard and their effects on soil adhesion [J]. Transactions of the CSAE, 1996, 12(2): 45-48. (in Chinese)
- 21 ZHANG Z, JIA H, SUN J. Bioinspired design of a ridging shovel with anti-adhesive and drag reducing [J]. Advances in Mechanical Engineering, 2015, 7(2): 1-11.
- 22 任露泉, 梁云虹. 耦合仿生学[M]. 北京: 科学出版社, 2012.
- 23 庄健, 贾洪雷, 齐江涛, 等. 农业机械触土部件仿生功能表面设计 [C] // 2012 中国农业机械学会国际学术年会论文集, 2012: 222-226.
- 24 GIACCHI J V, MARTÍNEZ R A, GAMBA M R, et al. Abrasion and impact properties of partially chilled gray iron [J]. Wear, 2007, 362(3-4): 282-291.
- 25 HEMANTH J. The solidification and corrosion behaviour of austempered chilled ductile iron [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2000, 101(1): 159-166.
- 26 刘耀辉, 陈秉聪, 任露泉. 金属材料的功能表面与水的润湿性[J]. 农业工程学报, 1992, 8(3): 15-20.
LIU Yaohui, CHEN Bingcong, REN Luquan. Wettability between water and function surface of metal material [J]. Transactions of the CSAE, 1992, 8(3): 15-20. (in Chinese)