理论与试验研究

# 热作模具表面裂纹局部激光仿生阻断实验研究

邸铁男[1]，刘立君[1,2]，贾志欣[2]，李继强[2]，周宏[3]
(1. 哈尔滨理工大学 材料科学与工程学院，哈尔滨 150080；
2. 浙江大学 宁波理工学院，浙江 宁波 315100；
3. 吉林大学 材料科学与工程学院，长春 130025)

**摘要：** 针对企业热作模具寿命短的现象，分析了热作模具表面热疲劳裂纹是影响其寿命的主要因素之一。在研究植物叶片抗开裂生物原型结构基础上，创造性应用了模具表面裂纹局部激光仿生阻断技术，有别于传统的模具表面整体激光强化，利用激光在模具表面局部熔凝模拟植物叶脉，阻断模具表面裂纹的发展，仿生强化后模具寿命提高 1～1.5 倍。

**关键词：** 模具表面裂纹；激光熔凝；局部仿生阻断；植物叶片
**中图分类号：** TG115.5+7　　**文献标识码：** A
**文章编号：** 1674-6457(2012)03-0001-04

## Hot Work Mould Surface Crack Local Laser Bionic Blocking Experimental Study

*DI Tie-nan*[1], *LIU Li-jun*[1,2], *JIA Zhi-xin*[2], *LI Ji-qiang*[2], *ZHOU Hong*[3]
(1. School of Material Science & Engineering, Harbin University of Science and Technology, Harbin, 150080, China;
2. Ningbo Institute of Technology, Zhejiang University, Ningbo, 315100, China;
3. School of Material Science & Engineering, Jilin University, Changchun, 130025, China)

**Abstract:** For the short sevice life of enterprise hot work die, it is analyzed that surface thermal fatigue crack is one of the main factors affecting the life of hot work mould. Based on studying the plant leaves biological prototypes of cracking resistant, the technology of local laser bionic blocking the mould surface crack is creatively applied. Different from the traditional mould surface integral laser transformation hardening (LTH) technology, by using laser melting coagulation simulating plant veins blocking localized crack in the partial surface of mold, bionic strengthened die life is improved within 1～1.5 times.

**Key words:** mould surface crack; laser melting; local bionic blocking

由于热作模具在服役期间反复与高温材料接触，长期受到交变应力的作用，使模具发生疲劳，从而降低了模具表面强度，产生局部表面裂纹，影响模具的使用寿命。在模具材料选定的情况下，对模具表面进行强化处理是提高模具寿命的有效方法，如模具表面渗碳、氮化、仿生强化等[1-2]。模具表面仿生强化是从仿生角度出发，通过研究耐磨损生物原型、抗疲劳生物原型，将生物原型抗磨

**收稿日期：** 2012-01-12
**基金项目：** 哈尔滨优秀学科带头人基金“基于可听声辅助双视觉热丝小功率激光模具修复机理研究”(RC2012XK006002)
**作者简介：** 邸铁男(1983－)，男，黑龙江哈尔滨人，硕士，主要研究方向为激模具表面强化技术。

损、耐疲劳的结构在模具表面“复制”，提高模具寿命[3]。

自然界中生物体表经过千百万年的进化，形成了非常独特的结构，如蜣螂、穿山甲等与硬物接触部位的体表是由凹坑、凸包或鳞片等几何结构组成的非光滑表面，生物的非光滑体表具有减粘、降阻、耐磨作用，在运动过程中具有很好的耐磨性。将生物非光滑理论应用到机械仿生研究上，将会取得很好的效果。由此有学者提出采用激光表面仿生强化提高模具使用寿命，改善使用性能的方法。通过激光实施仿生强化，可显著提高模具的耐磨性与热疲劳性，将这种方法应用到模具表面会提高模具寿命[4-5]。

文中从植物叶片抗开裂角度，开展热作模具表面裂纹局部激光仿生阻断实验研究，并应用于实际生产中，其实验成果对提高模具寿命提供了一种新的方法。

## 1 热作模具表面裂纹分析

热疲劳裂纹俗称热龟裂，是热作模具常见的主要失效形式之一。热疲劳裂纹由材料热疲劳应力引起，即材料在热应力的作用下，由于经常反复或脉动应变而产生的一种连续的、局部的、永久性的组织变化。热裂纹通常形成于模具型腔表面，裂纹的出现改变了应力分布状态。裂纹发展到一定长度时，由于塑性应变而产生应力松弛使裂纹停止扩展。随着循环次数的增加，裂纹尖端附近出现一些小空洞并逐渐形成微裂纹，与开始形成的主裂纹合并。裂纹继续扩展，最后裂纹间相互连接形成严重的网络状裂纹而导致模具失效（如图 1 所示），严重影响制品表面质量，如图 2 所示。

图 1 热作模具表面热疲劳裂纹

Fig. 1 Thermal fatigue crack of the hot work mould surface

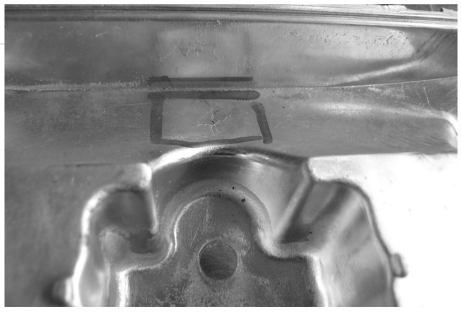


图 2 模具热疲劳裂纹影响制品表面质量

Fig. 2 Mould thermal fatigue crack affecting product surface quality

## 2 植物叶片抗开裂生物原型

天然生物体长时间生活于自然界恶劣、复杂的气候变化和环境中，其体表具有很强的抵御外界破坏和损伤的能力。生物体表的非光滑形态、非光滑结构和非光滑成分等呈现典型的生物耦合特征，多种非光滑效果协同作用使生物体具有完美的强度和韧性组合，在抵御外界交变应力或直接的破坏中各自发挥着特殊功能[6-7]。植物叶片有很强的抵御因刮风下雨导致叶片开裂的作用，这与叶片具有的非光滑特性紧密相关。植物叶片生物耦合抗疲劳开裂生物原型如图 3 所示，叶片表面呈现出凸凹不平的几何非光滑，可减少风吹阻力，防止灰尘粘附。叶片结构由平行状、网络状或放射状分布的叶脉和连接叶脉的叶肉构成。叶脉犹如深嵌在叶肉中的筋骨，保持着叶片的强度并抵御开裂，叶肉质地较软，对外界应力有缓冲作用。叶脉材质由维管束和机械组织组成，其组织与化学成分均不同于叶肉的薄壁细胞，植物叶片的生物耦合特征是生物体柔性和刚性完美结合并赋予其优异力学性能的典范。

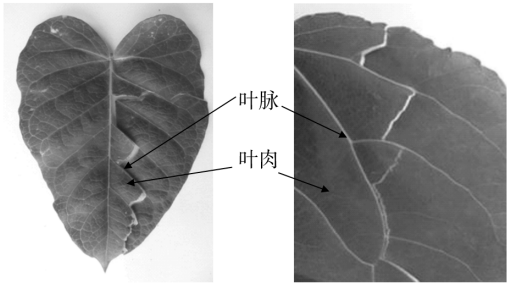



图 3 植物叶片抗开裂生物原型

Fig. 3 Biological prototypes of the plant leaves resisting crack

文中利用激光在模具表面熔凝模拟植物叶片筋脉,对模具表面裂纹进行阻断,从而延长模具寿命。激光熔凝叶脉与表层不同连接形式的裂纹阻滞机制模型如图 4 所示。当激光熔凝叶脉较厚较长时,由于应力松弛,消耗能量,使裂纹扩展的驱动力远小于裂纹扩展的阻力,裂纹在叶脉终止,如图 4a 所示。当叶脉较窄时,裂纹尖端遇到叶脉受阻钝化,在其周边产生应力集中并最终形成裂纹核,使裂纹存在着向周边扩展的可能性。由于叶脉不宽,在叶脉对面循环方向上又萌生新裂纹核,随后主裂纹和裂纹核之间因颈缩而发生相向长大,最后发生桥接,如图 4b 所示。当裂纹正对圆形叶脉中心线扩展时,裂纹首先在叶脉处受阻,进而形成耳状切口,随着循环次数的增加裂纹出现分叉,沿叶脉边缘扩展,如图 4c 所示。当裂纹偏离圆形叶脉中心线扩展时,裂纹在叶脉处转移,改变方向扩展一段距离,随后又回到循环方向上,如图 4d 所示。即使裂纹路径存在很小的转移(与裂纹长度相比),也可能使裂纹扩展速率降低几个数量级,极大提高模具耐热疲劳寿命。

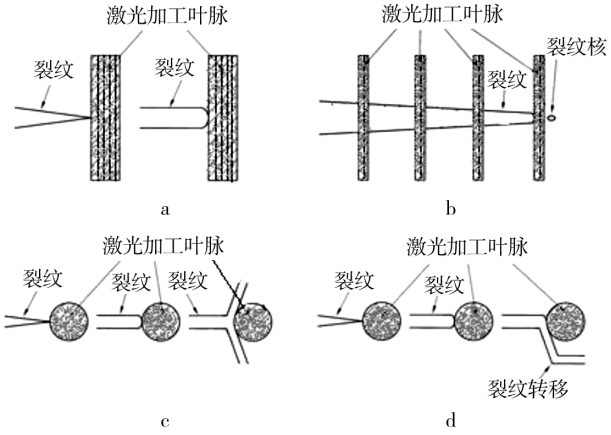
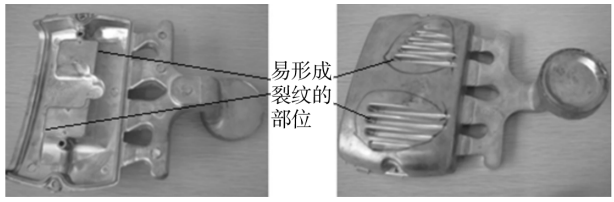



图 4　激光熔凝叶脉裂纹阻滞机制模型

Fig. 4　Theory model about the laser melting veins against crack

## 3　模具局部表面裂纹仿生阻断实验与分析

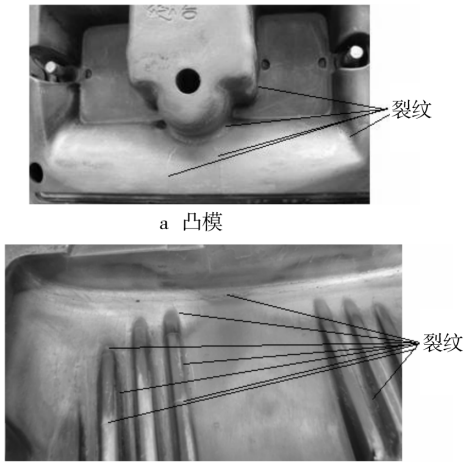
实验模具压铸制品如图 5 所示。当模具压铸制品达到 12 000 模次时,由于热作模具的工作表面受到反复的温度升降,使其产生拉、压应变交替变化。当模具的局部应力超过模具钢的弹性极限并进入塑性应变区域时,产生塑性变形。如局部应力超过其抗拉强度极限,形成疲劳裂纹,表现为工作表面的龟裂,如图 6 所示。将在图 5 制品表面所指位置出现裂纹,无法满足产品质量需要。




a 内表面　　b 外表面

图 5　因压铸模具表面有缺陷所产生的压铸制品

Fig. 5　Goods manufactured by die casting mold with surface defects




a 凸模

b 凹模

图 6　压铸模具

Fig. 6　Die-casting die

针对模具裂纹产生的位置,根据植物叶片抗开裂生物原型分析,采用激光熔凝技术,在模具表面熔凝模拟叶片叶脉,达到对模具表面裂纹进行阻断的目的。实验装置如图 7 所示,采用脉冲 YAG 激光器,聚焦透镜焦距 $f=100$ mm,工件为汽车零件压铸模,激光焊接电流为 180 A,离焦量为+5.0,频率为 5 Hz,脉宽时间为 8.0 s,焊接速度为 40.0 mm/min,氩气流量为 10.0 mL/min,模具材料为 H13。

根据模具表面易产生裂纹位置和萌生方向(如图 6a 所示),在模具表面 1,2,3,4,5,6 等位置激光熔凝成叶脉(如图 8 所示)。当裂纹萌生扩展方向不平行叶脉激光熔凝体,则叶脉熔凝体对裂纹会产生阻断作用,如图 9 所示。

针对模具表面易产生裂纹位置和萌生方向,在

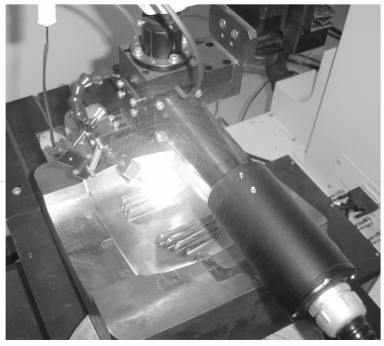


图 7 模具激光仿生强化装置

Fig. 7 Laser bionic strengthened device

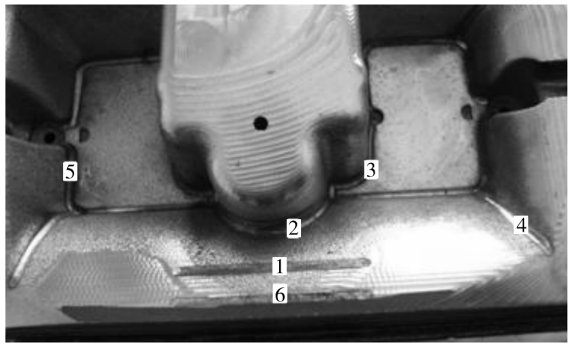



图 8 压铸模激光熔凝叶脉

Fig. 8 Veins of laser melting die-casting die

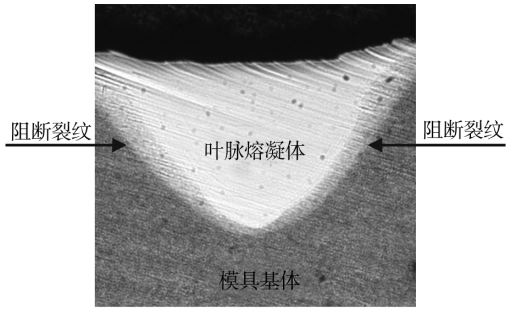



图 9 叶脉熔凝体对裂纹阻断示意

Fig. 9 Diagram of the laser melting veins against crack

模具表面 1,2,3,4,5,6,7,8 等位置激光熔凝成扇形叶脉,对裂纹进行阻断,如图 10 所示。在图 10 中 1,4,6 和 7 位置,由于受到压铸铝熔体热冲击和压力冲击较大,会在凸棱前后端 1,4,6 和 7 位置产生裂纹,所以在 7 个凸棱前后端激光熔凝扇形叶脉阻断裂纹。在图 10 中 3 和 8 等凸棱根部,由于长时间冷热和压力冲击,产生应力集中,进而产生裂纹,因此在 7 个凸棱根部都用激光熔凝成叶脉阻断裂纹。在图 10 中 2 位置是凸棱顶部,易产生如图 6b 所示的横向裂纹,影响铝制品压铸件的表面质量,在 7 个凸棱顶部熔凝激光叶脉阻断热疲劳裂纹。图 10 中 5 位置受铝熔体冲刷较为严重,在冷热交替和压力作用下,产生大量龟裂,在相应位置激光熔凝成叶脉,直接承受铝熔体冲刷。

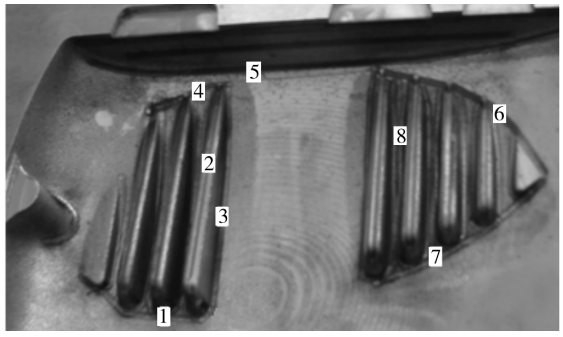



图 10 压铸模激光熔凝扇形叶脉

Fig. 10 Fan-shaped veins of the laser melting die-casting die

通过激光在模具表面熔凝模拟植物叶片筋脉,对模具表面裂纹进行阻断,仿生强化,然后模具再经过电火花处理。经在宁波东浩铸业有限公司生产应用,原来没经过处理模具实用寿命为 12 000 模次左右,在模具表面出现如图 6 所示热疲劳裂纹,此时模具已经失效。经过激光仿生强化处理模具达到 18 000模次时模具表面状态如图 11 所示,模具表面比较完好,当达到 28 000 模次以上模具才失效,模具使用寿命提高 1 倍以上。随后又试验 3 套 4Cr5MoSiV1 钢模具,模具寿命提高 1～1.5 倍。由此说明模具局部表面裂纹激光仿生阻断是可行的,在模具行业推广该技术将会为企业带来显著经济效益。

图 11 H13 材料 18 000 模次模具表面状态

Fig. 11 Surface condition of H13 mould after 18 000 times molding

## 4 结语

1) 从仿生角度出发,通过研究植物叶片抗开裂

(下转第 9 页)

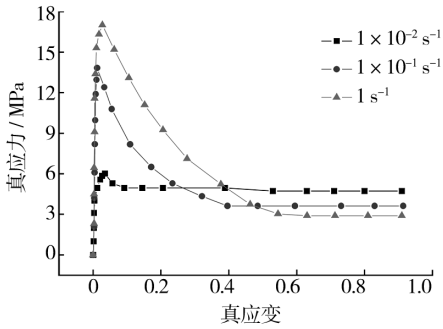



图 6　MB15-RE 镁合金常规铸坯 560 ℃的应力-应变曲线

Fig. 6　Stress-strain curves of as-cast MB15-RE magnesium alloy prepared by pretreatment at 560 ℃

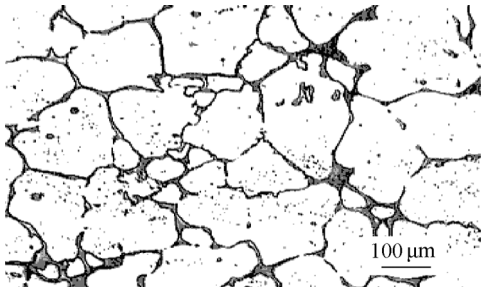



图 7　MB15-RE 镁合金常规铸坯 560 ℃的微观组织

Fig. 7　Microstructure of as-cast MB15-RE magnesium alloy at 560 ℃

## 3　结语

1）MB15-RE 镁合金常规铸坯在 560 ℃半固态温度的真应力-真应变曲线都可分为 3 个阶段：应力上升阶段、应力下降阶段和应力稳定阶段。

2）MB15-RE 镁合金常规铸坯在相同应变速率下，合金温度越高，其应力峰值和稳态应力越低；在相同温度下，应变速率越大，峰值应力越大，稳态应力越小。

**参考文献：**

[1]　陈振华. 变形镁合金[M]. 北京：化学工业出版社，2005：1－6.

[2]　康永林，毛卫民. 金属材料半固态加工理论与技术[M]. 北京：科学出版社，2004：153－193.

[3]　罗守靖，杜之明. 液相线模锻制备半固态坯料方法：中国，01116406[P]. 2002-11-20.

[4]　JOLY P A，MEHRABIAN R. The Rheology of a Partially Solid Alloy[J]. Materials Science，l976（11）：1393－1418.

[5]　BRABAZON D，BROWNE D J，CARR A J. Experimental Investigation of the Transient and Steady State Rheological Behavior of Al-Si Alloys in the Mushy State[J]. Materials Science And Enginnering，2003：69－80.

[6]　陈强. MB15-RE 镁合金半固态温度等温组织演变及流变性实验研究[D]. 哈尔滨：哈尔滨工业大学，2006.

（上接第 4 页）

生物原型结构，并在模具表面“复制”，可提高模具寿命 1～1.5 倍。

2）有别于传统模具表面整体激光强化技术，从植物叶片抗开裂角度，提出模具表面裂纹局部激光仿生阻断其发展，为提高模具寿命提供了一种新的方法。

**参考文献：**

[1]　黄升金，谢长生，许德胜. 脉冲激光熔凝和相变硬化的研究现状[J]. 激光技术，2004，27(2)：130－133.

[2]　王福德，胡乾午，曾晓雁. ZL108 镍基粉末激光表面合金化气孔与裂纹的研究[J]. 应用激光，2004，24(5)：264－268.

[3]　周宏，张志辉，任露泉，等. 仿生非光滑表面 45 # 钢模具的热疲劳性能[J]. 材料科学与工艺，2004，12(6)：561－564.

[4]　JERONIMIDS G，ATKINS A G. Mechanics of Biological Materials and Structures：Nature's Lessons for the Engineer[C]. Proc Instn Mech Engrs，1995，209：221－235.

[5]　REN L Q，HAN Zhi-wu，LI Jian-jiao，et al. Effects of Non-smooth Characteristics on Bionic Bulldozer Blades in Resistance Reduction Against Soi[J]. Journal of Terramechanics，2002，39(4)：21－230.

[6]　任露泉，周宏，沈中虎，等. 一种增强金属工件表面的仿生非光滑工艺方法和制备装置：中国，200610016699[P]. 2006-11-15.

[7]　ZHANG Zhi-hui，ZHOU Hong，REN Lu-quan，et al. Effect of Units in Different Sizes on Thermal Fatigue Behavior of 3Cr2W8V Die Steel with Biomimetic Non-smooth Surface[J]. International Journal of Fatigue，2009，31(3)：468－475.