

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.01.047

# 高强钢板热冲压模具冷却水道优化设计\*

蔡玉俊<sup>1</sup> 陈树来<sup>2</sup> 王玉广<sup>2</sup>

(1. 天津大学机械工程学院, 天津 300192; 2. 天津职业技术师范大学天津市高速切削与精密加工重点实验室, 天津 300222)

**摘要:** 利用 ANSYS/LS-DYNA 模块对保压淬火过程零件及模具的温度场分布进行了数值模拟, 分析高强钢板热冲压模具冷却系统均布水道的不足。在此基础上通过 APDL 参数化编程语言, 选择零阶与一阶搜索相结合的优化算法, 编写优化程序, 以模具冷却水道半径、相邻水道间隔尺寸和水道与模面距离等参数为优化变量, 以板料温度分布均匀和保证降温速率达到临界冷却速率为优化目标建立目标函数, 优化后目标函数值为 26.553 (优化前为 64.404)。对优化前后成形件的温度分布进行了比较, 得到成形件最高温度下降了 44.5%, 最低温度下降了 14.5%, 实现了对冷却水道各参数的优化。最后通过实验验证了优化结果的正确性。

**关键词:** 高强钢板 热冲压 冷却水道 优化设计

**中图分类号:** TG376.2      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-1298(2013)01-0253-05

## Optimization Design on Cooling Water Channel of Hot Stamping Mold of High Strength Steel

Cai Yujun<sup>1</sup> Chen Shulai<sup>2</sup> Wang Yuguang<sup>2</sup>

(1. School of Mechanical Engineering, Tianjin University, Tianjin 300192, China)

(2. Tianjin Key Lab of High Speed Cutting &amp; Precision Machining, Tianjin University of Technology and Education, Tianjin 300222, China)

**Abstract:** The temperature distribution of parts and mould was simulated by ANSYS/LS-DYNA. The shortcomings of the uniform waterway were analyzed. APDL was applied over the thermal field simulation. Zero-order search and first-order search was combined as the optimization algorithm. In this program, the radius of holes, the distances of adjacent holes and the distances of holes and the profile were chosen as optimization variables. The well-distributed temperature of parts and the needed critical cooling rate were chosen as the optimization objectives to create the objective function. Objective function value was 26.553 after the optimization which was 64.404 before the optimization. By comparing the temperature distribution of the optimized cooling water channel with original, it can be seen that the maximum temperature was decreased by 44.5% and the lowest temperature was decreased by 14.5%, to realize the optimization design of parameters of the cooling water channel. Finally the experiment had been designed to verify the correctness of the optimization result.

**Key words:** High strength steel sheet Hot stamping Cooling water channel Optimization design

### 引言

使用超高强钢板热冲压零件是减小汽车自重、加强汽车防撞性和抗冲击的有效手段之一。所以,

超高强度热冲压技术已经成为世界各大汽车制造企业的热门技术。热冲压工艺是将高强度钢板加热到奥氏体温度范围, 钢板组织完成变化后, 快速移动到模具, 快速冲压, 在压机保压状态下, 通过

收稿日期: 2012-06-30 修回日期: 2012-08-22

\* 国家自然科学基金资助项目(50975203)、天津市应用基础及前沿研究计划资助项目(12JCYBJC12600)和天津职业技术师范大学科研发展基金资助项目(YJS10-06、KJ11-08)

作者简介: 蔡玉俊, 教授, 博士, 主要从事超高强钢板热冲压研究, E-mail: cyjal@126.com

模具中布置的冷却回路保证一定的冷却速度,对零件进行淬火冷却,最后获得超高强度冲压件的新型工艺<sup>[1-4]</sup>。

钢板热冲压技术的核心在于通过含有冷却管道的模具,对零件实现快速成形、淬火,得到屈服强度1 500 MPa左右甚至更高的冲压件,将板材的抗拉强度提高到原来的2.5倍以上。国内外学者<sup>[5-8]</sup>通过热力耦合数值分析发现板料在保压淬火过程中温度的均匀变化是模具冷却系统设计的关键,并提出热冲压模具冷却系统的设计准则并完成初步设计,在此基础上总结出冷却系统的重要参数并分析其对冷却效果的影响规律。所以在合理设计及优化模具冷却水道方面还需进行深入研究。

本文在超高强度钢板热冲压成形保压淬火过程温度场数值模拟的基础上,利用参数化编程语言APDL (ANSYS parametric design language),选择零阶与一阶搜索相结合的优化算法,编写高强度钢板热冲压模具冷却系统的优化程序,得到优化的冷却水道位置,并对优化结果进行实验验证。

## 1 热冲压冷却系统有限元模拟

### 1.1 建立有限元模型

有限元模型包括板料和模具两部分。板料的长度、宽度和厚度分别为200 mm、100 mm、2 mm,圆角半径为5 mm。冷却水道的初始位置是:水道的中心距离模面20 mm,相邻管道之间的距离也是20 mm。这里选取模具和板料整体的一个截面(图1所示),这样既简化了建模,又减少了运算时间,降低了对硬件的要求。

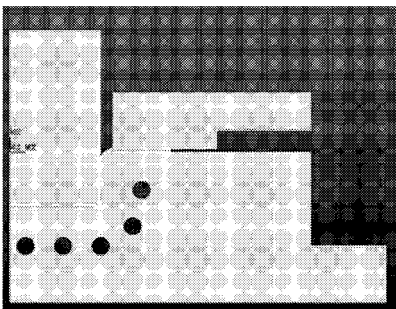


图1 有限元模型

Fig.1 Finite element model

所选材料为热冲压专用钢板22MnB5,定义其物性参数,包括板料随温度变化的热传导系数、密度、比热容。模具的导热系数、密度和比热容分别为32 W/(m·K)、7 830 kg/m<sup>3</sup>、650 J/(kg·K)。定义热冲压零件的初始温度为810℃,热冲压模具的初始温度可以定义为与冷却水的初始温度相同,为15℃<sup>[9]</sup>。热冲压过程中冷却速率至少是27℃/s<sup>[10]</sup>。

### 1.2 网格划分

采用的单元类型为实体三角形六节点单元PLANE35,而根据模型的复杂程度,应用智能网格划分将凸、凹模圆角处的网格设置密一些,其他部位设置稀疏一些(如图2),这样既能满足分析精度也能减小计算时间并降低对硬件的要求。检查网格后,确认无网格缺陷。

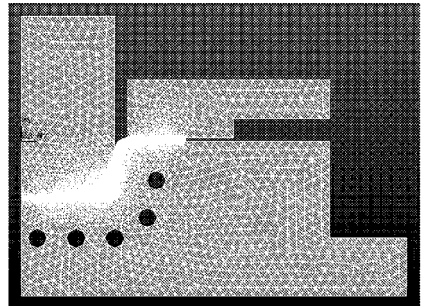


图2 网格示意图

Fig.2 Mesh on 1/2 section surface of punch, die, blank holder and blank

### 1.3 边界条件确定

主要的热量交换发生在模具和板料之间,水道和模具之间的对流系数 $h$ 计算式为<sup>[11]</sup>

$$h = A_0 \frac{(\rho v)^{0.8}}{D^{0.2}} \quad (1)$$

式中  $A_0$ ——温度  $\rho$ ——水的密度,kg/m<sup>3</sup>  
 $v$ ——冷却水的流速,m/s  
 $D$ ——冷却管道的直径,m

所得出的对流系数 $h$ 为30 080 W/(m<sup>2</sup>·K)。

### 1.4 加载并求解

首先,选定分析类型为瞬态分析。根据分析计算了初始条件以及公式(1)所得的对流系数等参数。温度施加在板料和模具有限元模型的节点上,而节点温度在整个瞬态分析过程保持不变,所以要先做稳态分析确定初始温度,并在第二载荷步中删去所设定的温度。

然后,设置载荷步选项,第一步的稳态分析设置时间为0.01 s,时间步长为0.01 s,第二步之后的瞬态分析参考文献[10],文献[10]设定的生产周期是30 s,零件在模具中20 s,剩下的10 s用于取出零件和放置下一个钢板,其中零件的淬火时间约是17 s,本文同样初步设定17 s,时间步长为0.1 s。为便于观测结果,所有步长均为恒值。最后设置分析输出选项,存盘,进行求解。

### 1.5 模拟结果

在17 s的数值模拟之后,通过ANSYS/LS-DYNA模块的专用后处理器LS-Prepost,得到超高强度钢板在专用模具内保压淬火过程中的瞬态温度场分布(图3所示),图4为热冲压U形件在分析结

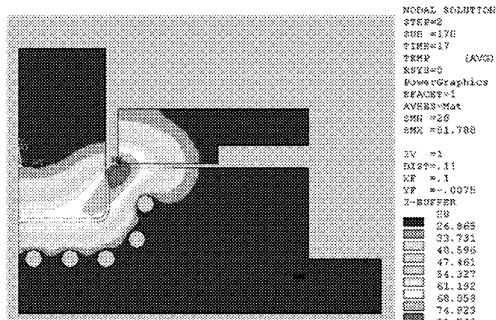


图 3  $t = 17\text{ s}$  时模具与零件的瞬态温度分布

Fig. 3 Transient temperature distributions of mould and parts when temperature is 17 s

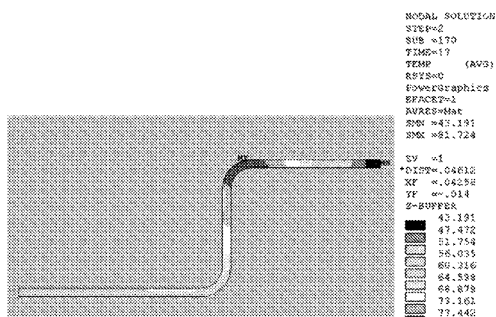


图 4 成形件在  $t = 17\text{ s}$  时瞬态温度分布

Fig. 4 Transient temperature distributions of forming parts when temperature is 17 s

束时的瞬态温度分布。

从热冲压零件在模具内的瞬态温度分布图及零件的瞬态温度分布图可知, 冲压件的最高温度为  $81.724^\circ\text{C}$ , 最低温度为  $43.191^\circ\text{C}$ , 热冲压零件在模具中保压淬火后温度分布不均匀, 可以看出零件在弯角处的温度与其他部位的温度差较大, 容易产生内应力, 降低热冲压零件的性能。产生这种结果的原因是冷却水道的尺寸和位置的不合理导致零件的降温效果不佳。由此以冷却水道的形状位置参数为设计变量, 以零件冷却的平均温度为状态变量, 以零件冷却的均匀程度为目标函数, 对热冲压模具冷却系统进行优化设计。

## 2 冷却系统优化设计

使某个目标函数在满足约束条件的同时达到最优值的传统方法有很多, 本文所采用的优化方法为零阶法和一阶法。零阶方法最大的特点是只用到了因变量而没有用到因变量的偏导数。而一阶方法用到了设计变量的一阶偏导数, 精度很高, 尤其是在设计变量的变化范围较大, 设计空间相对较大时。但是一阶方法可能在不合理的设计序列上收敛, 对于这种情况, 可以采用零阶方法。一阶方法更容易获得局部最优值, 但是如果起点附近有局部最优值, 就会选择该最小值而找不到所要找的全局最小值。这

时可以采用零阶方法或随机搜索的方法对一阶方法所得结果进行验证。

### 2.1 参数化建模

影响热冲压零件淬火过程温度场分布的结构是冷却水道的直径(或半径)、冷却水道与模具成形面的距离和冷却水道之间的距离。本文是基于参数化的优化设计, 因此以水道与型腔之间的距离  $x$ 、水道与水道之间的距离  $s$ 、水道与临界空气模具边之间的距离  $a$ 、水道直径  $d$  作为优化设计变量(图 5 所示), 以温度分布均匀作为优化目标。

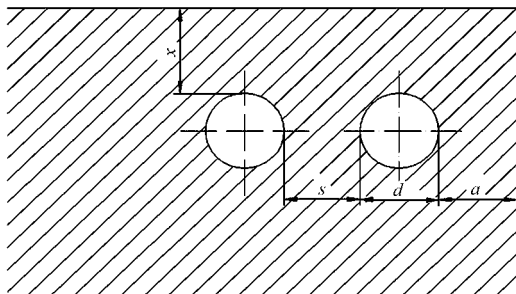


图 5 热冲压水道优化参数示意图

Fig. 5 Optimization size of hot stamping channels

### 2.2 状态变量的选取

状态变量就是优化分析中的约束条件, 对于超高强度钢板热冲压模具冷却系统优化设计来说, 当冷却水道的位置发生变化时, 热冲压零件截面单元节点的温度平均值也随之发生变化, 因而将热冲压零件截面单元节点的温度平均值作为状态变量。

### 2.3 优化目标函数

优化过程中, 正确目标函数的选择是最优化方法的核心, 在保证单元网格划分足够细以保证计算精度的前提下, 将热冲压模具中心截面处零件截面各单元节点的温度对热冲压零件截面单元节点温度平均值的均方差来构成热冲压零件冷却的均匀性。所以建立目标函数

$$F = \alpha \bar{T} + (1 - \alpha) \sum_{i=1}^n \left( \frac{T_i - \bar{T}}{\bar{T}} \right)^2 \quad (2)$$

其中  $\bar{T} = \sum_{i=1}^n T_i / n$

式中  $F$ ——目标函数

$n$ ——热冲压零件截面单元节点个数

$T_i$ ——热冲压零件截面单元节点温度

$\bar{T}$ ——所有热冲压零件截面单元节点温度平均值

$\alpha$ ——比例因数

$\alpha$  用来衡量热冲压零件温度平均值  $\bar{T}$  和热冲压零件平均温度的均方差  $T_s = \sum_{i=1}^n \left( \frac{T_i - \bar{T}}{\bar{T}} \right)^2$  的相互作用, 数值在  $(0, 1)$  内变化, 本文取  $\alpha = 0.581$ 。

## 2.4 优化步骤

(1) 进入通用后处理模块 (POST1), 从瞬态分析结果中提取热冲压零件截面所有节点温度的平均值, 再根据各节点温度值与温度平均值计算出目标函数。并赋值给相应的变量参数。

(2) 进入优化分析模块, 指定分析文件、设计变量及其变化范围与公差、状态变量及其变化范围与公差, 还有目标函数及其公差, 指定优化分析策略, 由于本文主要研究超高强度钢板热冲压模具冷却系统的设计, 首先采用随机搜索方法得出一系列初始设计序列, 去除其中不合理的设计序列, 然后在此基础上采用零阶方法进行优化分析, 最后得出最优设计序列。

(3) 优化迭代结束后, 设计变量与目标函数间的变化关系可以通过图形表示出来。在默认情况下, 在 Jobname.rfl 文件中保存着最后设计方案的模拟结果。要获得初始设计结果, 在初始分析完成后, 进入后处理器查看、保存及输出数据。

## 3 优化结果与分析

表 1 为初始设计序列与优化设计序列,  $R$  为冷却水道的半径,  $(x, y)$  为冷却水道位置, 冷却水道的形状本文取圆孔式。因此通过调整这 3 个参数来改善热冲压零件冷却过程中温度场的分布, 从而实现成形件冷却均匀的目的。其中初始设计序列的目标函数值为 64.404, 优化后的目标函数值为 26.553。本文得到的最优设计并不是理想的绝对最优解, 是因为在设计初期做了近似假设, 而优化分析所得解的精确程度与最大迭代次数、目标函数工程等因素

表 1 初始设计序列与优化设计序列

Tab.1 Initial design sequence and optimization

	design sequence			mm
初始设计序列	R01	5.0	X04	28.32
	R02	5.0	X05	8.32
	R03	5.0	Y01	20.00
	R04	5.0	Y02	39.44
	R05	5.0	Y03	50.00
	X01	70.0	Y04	50.00
	X02	65.3	Y05	50.00
	X03	48.32		
优化设计序列	R01	7.9991	X04	29.591
	R02	7.77984	X05	11.208
	R03	7.9450	Y01	12.102
	R04	6.7467	Y02	44.283
	R05	7.7684	Y03	42.036
	X01	62.170	Y04	42.000
	X02	66.395	Y05	42.556
	X03	46.126		

有关。

继而对优化后的分析结果进行模拟仿真, 数值模拟的时间仍是 17 s。优化设计后, 从图 6、7 可以看出, 热冲压零件的最高温度为 45.359℃, 最低温度为 36.939℃, 热冲压零件的冷却效果有了较明显的改善, 特别是零件弯曲部位淬火冷却的均匀性有了很大的提高。图 7 与图 4 对比可知, 零件的温度最高值降低了 36.325℃, 即下降了 44.5%, 温度最低值下降了 6.252℃, 即下降了 14.5%, 说明冷却系统优化设计后, 明显地改善了热冲压零件的冷却效果。

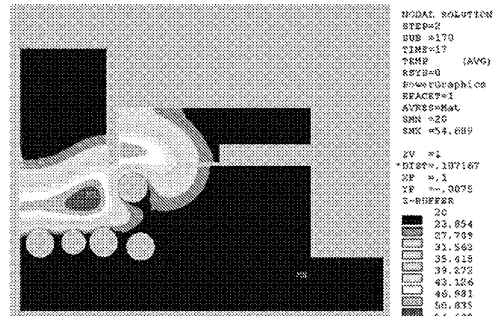


图 6 优化后  $t = 17$  s 时模具与零件的瞬态温度分布

Fig.6 Transient temperature distributions of optimization mould and forming parts when temperature is 17 s

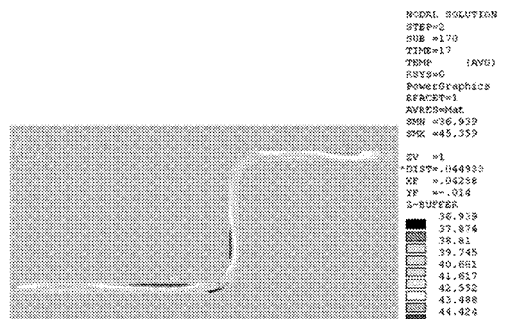


图 7 优化后热冲压成形件在  $t = 17$  s 时瞬态温度分布

Fig.7 Transient temperature distributions of optimization forming parts when temperature is 17 s

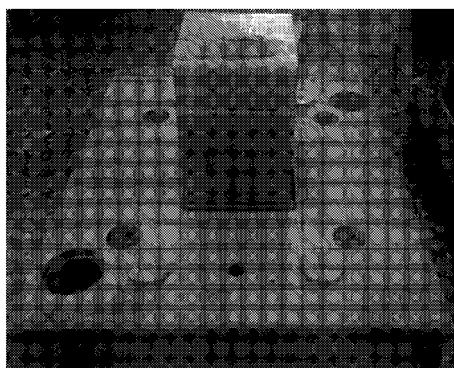
## 4 实验

### 4.1 实验装置及过程

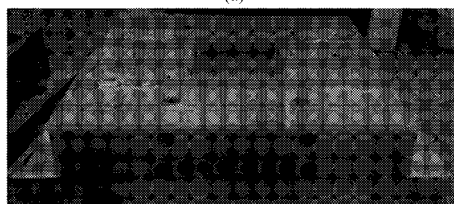
选用自行设计的热冲压模具 (图 8 所示)。选用功率为 30 kW 的箱式电阻炉 (炉膛尺寸 350 mm × 300 mm × 150 mm) 对钢板进行加热, 用火钳将加热后的钢板快速移动到冷却水道优化后的模具中, 选用 Y32-100 型压力机对零件进行保压淬火。由于超高强度钢板热冲压是从 850 ~ 900℃ 降至 200℃ 以下, 所以选测量零件温度变化过程的传感器为 K 型热电偶温度传感器, 其测量温度范围为 0 ~ 1 200℃。

### 4.2 实验结果与分析

由于冷却水道的存在给测量增加了难度, 导致



(a)



(b)

图 8 热冲压模具实物图

Fig. 8 Hot stamping die physical diagram

(a) 凸模 (b) 凹模

安置传感器的位置受到限制,不能将 U 形件中的所有点温度都测量出来,因此本次实验对超高强度钢板热冲压成形过程中的 4 个位置进行测量,图 9 中 4 个点的温度随时间变化的曲线如图 10 所示。

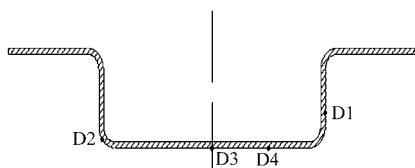


图 9 U 形件测点示意图

Fig. 9 Measurement schematic diagram about U workpiece

对 U 形件进行超高强度钢板热冲压成形实验及对成形件的测量可以看出,所设计优化后的冷却系统基本上达到了预期的效果。虽然 4 个点的温度都比数值模拟高些且有一定的差别,但是实际温度

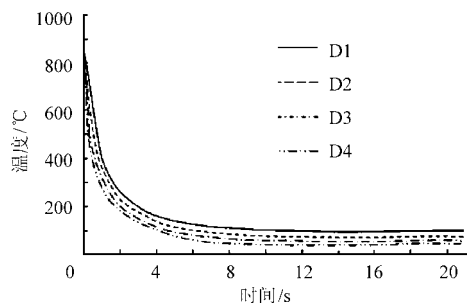


图 10 测点温度变化曲线

Fig. 10 Temperature change curves of measurement points

比模拟的高是由于实际零件与模具间的传热是有热阻的,4 个点的温度有差别也是因为零件侧壁与凹模的接触不完全,所以温度比较高,而零件弯角处的温度相对较低是因为与凸模接触较好、传热较快。总体说来,零件的温度分布比较均匀,证明了优化结果的正确性。

## 5 结论

(1) 基于参数化编程语言 APDL,结合零阶与一阶搜索相结合的优化算法,以模具冷却水道半径、相邻水道间隔尺寸和水道与模面距离为优化设计变量,以板料温度分布均匀为优化目标,建立了热冲压模具中冷却水道分布优化设计方法。

(2) 应用上述方法进行了 U 形件热冲压模具冷却水道分布的优化设计,优化后 U 形件温度分布比较均匀,通过实验验证了优化结果的可靠性。同时优化变量少,优化计算成本低,可实现在设计阶段对成形件最终性能的有效控制。

(3) 根据优化设计结果分析了不同的冷却水道半径、相邻水道间隔尺寸以及水道与模面距离间交互效应对成形件温度分布的影响,为高强度钢板热冲压模具设计提供了理论基础。

## 参 考 文 献

- 1 康斌. 国内外高强度汽车板热冲压技术研究现状[J]. 冶金管理, 2009(8): 58 ~ 60.
- 2 胡平, 马宁, 郭威, 等. 超高强度汽车结构件热冲压技术研究进展[C] // 2010 力学与工程应用学术研讨会论文集, 上海, 2010.
- 3 Malek Naderi. Hot stamping of ultra high strength steel[D]. Germany: Aachen University, 2007: 11 ~ 16.
- 4 林建平, 孙国华, 朱巧红, 等. 超高强度钢板热成形板料温度的解析模型研究[J]. 锻压技术, 2009, 34(1): 20 ~ 23.  
Lin Jianping, Sun Guohua, Zhu Qiaohong, et al. Research on analytical model of blank temperature prediction for hot stamping of ultra high strength steels[J]. Forming & Stamping Technology, 2009, 34(1): 20 ~ 23. (in Chinese)
- 5 Malek Naderi, Vitoon Uthaisangskul, Ulrich Prah, et al. A numerical and experimental investigation into hot stamping of boron alloyed heat treated steels[J]. Steel Research International, 2008, 79(2): 77 ~ 84.
- 6 张志强. 高强度钢板热冲压技术及数值模拟[J]. 热加工工艺, 2010, 39(11): 103 ~ 105.  
Zhang Zhiqiang. Hot stamping of high strength steel sheet and its numerical simulation[J]. Hot Working Technology, 2010, 39(11): 103 ~ 105. (in Chinese)
- 7 Oberpriller B, Burkhardt L, Griesbach B. Benchmark 3-continuous press hardening part A: physical tryout report [R]. Switzerland: Institute of Virtual Manufacturing, 2008: 115 ~ 124.

(3) 弹塑性接触载荷是不可忽略的,弹塑性接触载荷占总的载荷比例取决于表面分形维数的大小。忽略弹塑性变形会使得预估的接触载荷偏大,误差的大小取决于表面分形维数的大小。

## 参 考 文 献

- 1 Majumdar A, Bhushan B. Fractal model of elastic-plastic contact between rough surfaces[J]. ASME Journal of Tribology, 1991, 113(1):1~11.
- 2 尤晋闽,陈天宇.基于分形接触理论的结合面法向接触参数预估[J].上海交通大学学报,2011,45(9):1275~1280.  
You Jinmin, Chen Tianning. Estimation for normal parameters of joint surfaces based on fractal theory [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2011, 45(9): 1275~1280. (in Chinese)
- 3 陈辉,胡元中,王慧,等.粗糙表面分形特征的模拟及其表征[J].机械工程学报,2006,42(9):219~223.  
Chen Hui, Hu Yuanzhong, Wang Hui, et al. Simulation and characterization of fractal rough surfaces[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2006, 42(9): 219~223. (in Chinese)
- 4 张学良,温淑花,兰国生,等.平面结合面切向接触阻尼分形模型及其仿真[J].西安交通大学学报,2011,45(5):74~77.  
Zhang Xueliang, Wen Shuhua, Lan Guosheng, et al. Fractal model for tangential contact damping of plane joint interfaces with simulation [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2011, 45(5):74~77. (in Chinese)
- 5 温淑花,张学良,文晓光,等.结合面切向接触刚度分形模型建立与仿真[J].农业机械学报,2009,40(12):223~227.  
Wen Shuhua, Zhang Xueliang, Wen Xiaoguang, et al. Fractal model of tangential contact stiffness of joint interfaces and its simulation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(12):223~227. (in Chinese)
- 6 温淑花,张学良,武美先,等.结合面法向接触刚度分形模型及其仿真[J].农业机械学报,2009,40(11):197~202.  
Wen Shuhua, Zhang Xueliang, Wu Meixian, et al. A fractal model of normal contact stiffness of joint interfaces and its simulation [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(11): 197~202. (in Chinese)
- 7 兰国生,张学良,丁红钦,等.基于分形理论的结合面静摩擦因数改进模型[J].农业机械学报,2012,43(1):213~218.  
Lan Guosheng, Zhang Xueliang, Ding Hongqin, et al. Modified model of static friction coefficient of joint interfaces based on fractal theory[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(1):213~218. (in Chinese)
- 8 兰国生,张学良,丁红钦,等.基于分形理论的结合面改进接触模型[J].农业机械学报,2011,42(10):217~223,229.  
Lan Guosheng, Zhang Xueliang, Ding Hongqin, et al. Modified contact model of joint interfaces based on fractal theory [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(10):217~223,229. (in Chinese)
- 9 Robert L Jackson, Itzhak Green. A finite element study of elasto-plastic hemispherical contact against a rigid flat[J]. ASME Journal of Tribology, 2005, 127(2): 343~354.
- 10 Kogut L, Etsion I. Elastic-plastic contact analysis of a sphere and a rigid flat[J]. ASME Journal of Applied Mechanics, 2002, 69(5): 657~662.
- 11 赵永武,吕彦明,蒋建忠.新的粗糙表面弹塑性接触模型[J].机械工程学报,2007,43(3):95~101.  
Zhao Yongwu, Lü Yanming, Jiang Jianzhong. New elastic-plastic model for the contact of rough surfaces[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2007, 43(3): 95~101. (in Chinese)
- 12 Chang W R, Etsion I, Bogy D B. An elastic-plastic model for the contact of rough surfaces[J]. ASME Journal of Tribology, 1987, 109(2):257~263.

(上接第257页)

- 8 Oberpriller B, Burkhardt L, Griesbach B. Benchmark 3-continuous press hardening part B; benchmark analysis [R]. Switzerland: Institute of Virtual Manufacturing, 2008:125~129.
- 9 朱巧红.热成形模具热平衡分析及冷却系统设计优化[D].上海:同济大学,2007.  
Zhu Qiaohong. Heat balance analysis of hot stamping and optimizing design of cooling system [D]. Shanghai: Tongji University, 2007. (in Chinese)
- 10 Shapiro A. Using LS-DYNA to model hot stamping [C] // Proceedings of 7th European LS-DYNA Conference, 2009:37~45.
- 11 Merklein M, Lechler J, Geiger M. Characterization of the flow properties of the quenchenable ultra high strength steel 22MnB5 [C]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2006, 55(1):229~232.
- 12 Sikora S, Lenze F J. Hot-forming important parameters for the production of high-strength BIW parts [C] // Proceedings of the IDDRG 2006 Conference, 2006:295~301.