

## 快速热循环注塑模具加热与冷却过程分析及其结构优化设计\*

(山东大学 模具工程技术研究中心, 济南 250061) 李熹平 赵国群 管延锦 李辉平

**摘要:** 快速热循环注塑成型技术(Rapid Heating Cycle Molding, RHCM)是一种新兴的注塑技术, 能够消除塑件表面熔痕、流线、银线等缺陷, 塑件表面达到镜面效果, 可消除污染严重的喷涂工艺。该文以大型液晶平板电视机面板为例, 建立了 RHCM 注塑模具的传热分析模型, 给出了 RHCM 模具的几种加热和冷却管道的布局结构, 并通过对不同结构模具型腔表面加热和冷却分析, 讨论了影响型腔温度分布的主要因素及其规律, 并选定了一种较优的管道布局方式, 在实际生产中得到了很好的应用。

**关键词:** 快速热循环; 高光无熔痕; 传热分析; 注塑模具

**中图分类号:** TQ315.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-2012(2009)01-0196-06

### Analysis and optimal design of heating and cooling process for rapid heating cycle injection mold

LI Xi-ping ZHAO Guo-qun GUAN Yan-jin LI Hui-ping

(Engineering Research Center for Mold & Die Technologies, Shandong University, Jinan 250061 China)

**Abstract:** Rapid Heating Cycle Molding (RHCM) is a novel plastic injection molding method. It can be used effectively to eliminate the many problems on polymer molding, such as weld mark, flow mark, poor surface transcription of products which are usually very difficult to solve. In this paper, the front shell of a large-size plat-panel TV was taken as an example, a thermal analysis mathematical model for RHCM injection mold was established. Several different kinds of layouts of heating and cooling channels in injection mold were presented. The temperature distributions on the mold cavity surface for different channel layouts were analyzed. The influence of process parameters on the temperature distribution of the mold surface were discussed as well. At last, an optimal channel layout was determined and the practical production application demonstrated its effectiveness.

**Key words:** rapid heating cycle molding; shine surface and no weld mark; thermal analysis; injection mold

## 引言

注塑成型工艺已被广泛应用于国民经济的各个领域, 但采用传统注塑工艺生产的制品, 其表面存在熔痕、流痕、银线等缺陷, 塑件表面光泽度不高, 难以满足人们对塑料制品力学性能、外观等要求。快速热循环注塑成型技术(Rapid Heating Cycle Molding, RHCM)是近年来发展起来的一种高光无熔痕注塑成型新技术。该技术采用高温高压水蒸汽

(或热水), 将模具快速加热到一定温度后, 在模腔中注入塑胶, 完成保压, 再用室温水或冷却水将塑件快速冷却至出模温度, 完成一个注塑过程, 然后进入下一个注塑循环。使用该技术可使塑件表面无熔痕并达到镜面效果, 提高塑件强度和表面硬度, 可取消环境污染严重的喷涂工艺等二次加工, 保护环境和操作人员的身体健康, 减少工艺流程, 节省二次加工费用, 降低生产成本, 节能减排, 是一种前景广阔的绿色注塑工艺。

目前, 国内外对该技术的研究甚少, 近两年, 日本、美国的几家公司相继推出了该项技术, 在国内, 本文作者和海信集团合作自主开发了该项技术, 并成功应用于大型液晶平板电视机面板的注塑生产, 并建成了注塑生产线, 得到了很好的应用。尽管国内外开展了注塑模具传热和冷却分析研究<sup>[1-6]</sup>, 但所研究的工艺都不是 RHCM 注塑工艺。作为一项新技术的研究和推广, 有必要开展快速热循环注塑模

\* “十一五”国家科技支撑计划资助项目(2006BAF02A05)。

赵国群 E-mail: zhaogq@sdu.edu.cn

作者简介: 李熹平, 男, 1981年生, 山东大学材料科学与工程学院, 博士研究生, 主要研究方向为注塑工艺与模具技术  
收稿日期: 2008-01-26

具加热与冷却过程分析及其结构优化设计研究。

RHCM 技术的关键是在注塑周期中,能够使模具快速加热和冷却到预定的温度。模具型腔表面温度的高低和分布,直接影响着注塑生产的效率和塑件的质量。本文通过对 RHCM 注塑模型腔表面温度的分析,预测模具型腔、型芯的温度和温差分布及塑件的冷却时间等,为实际生产中的模具设计、加热和冷却系统布局优化设计提供了重要理论依据。

## 1 液晶平板电视机面板 RHCM 模具结构与加热冷却模型建立

液晶平板电视机面板属于大平面塑件,用户对塑件的外观质量有着很高要求,目前普遍采用的注塑工艺得到的产品表面粗糙,存在明显的熔痕、流痕等缺陷,表面光泽度不高。为满足用户对外观质量的要求,必须通过喷涂等工艺对塑件进行二次加工处理,这样,既延长了产品的生产周期,增加了生产成本,又造成了环境污染。

将 RHCM 技术应用于液晶平板电视机面板等大型塑件生产,可得到表面无熔痕、高度光泽和达到镜面效果的产品,完全可以消除污染严重的喷涂工艺,实现节能减排的短流程生产。但 RHCM 注塑模具结构完全不同于现行其他注塑方法的模具结构,RHCM 注塑模具结构能否实现 RHCM 工艺所要求的模具快速均匀加热和冷却效果,成为模具结构设计的关键。因此,模具结构合理与否很大程度上决定着该项技术能否被成功实施。图 1 是本文设计的电视机面板的定模与固定板的结构示意图。

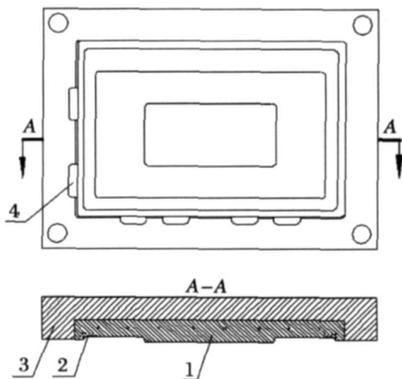


图 1 模具结构示意图

1-定模; 2-塑件; 3-定模板; 4-定位镶块

Fig. 1 General view of mold structure

为了研究该模具传热过程、加热和冷却效果,进而优化模具的加热/冷却管道布局与结构,本文取

模具的典型截面作为分析对象,暂不考虑模具的固定板,但考虑动模镶块,简化后的分析模型如图 2 所示。此外,由于平板电视面板为具有一定厚度的“回”字形结构,其模具加热/冷却管道为距型腔表面一定距离的直孔,因此,可将三维模具简化为二维平面问题进行分析。



图 2 简化的平板电视机面板 RHCM 注塑模具分析模型

1-定模板; 2-塑件; 3-动模

Fig. 2 Simplified analysis model of RHCM mold

### 1.1 加热分析几何模型

模具加热时,热量通过加热管道只在定模内传递,型腔表面的温度分布是影响塑件质量的关键,取定模结构的典型截面作为研究对象。图 3 为 46 英寸液晶平板电视机面板的定模截面结构图,RHCM 模具结构与普通模具结构不同,常规模具结构中的管道只有冷却管路,而 RHCM 模具中,既有冷却管路又有加热管路。本文采用加热和冷却共用相同的管路结构。图 3 还分别用实线和虚线表示出了两种不同的加热/冷却管道的布局设计方案。实线和虚线表示出的两种管路的直径分别为 7mm、5mm,管路中心距模具型腔表面的距离均为 10mm。

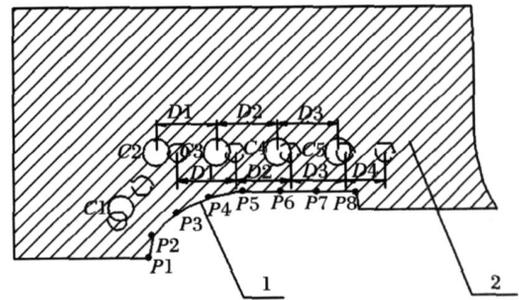


图 3 加热模型

1-型腔表面; 2-定模

Fig. 3 Model for heating phase

### 1.2 冷却分析几何模型

模具冷却时,热量在定模、熔体和动模内传递,需要考虑到熔体和动模部分的结构及其传热情况,故冷却分析模型与加热分析模型不同,在对整个模具结构分析后,将冷却模型简化为如图 4 所示的形式,其中,上半部分为定模,下半部分为动模,中间为塑件。动模上设有冷却管道,当模具进入冷却状态时,动模和定模上的所有管道都通入冷却水进行冷却。

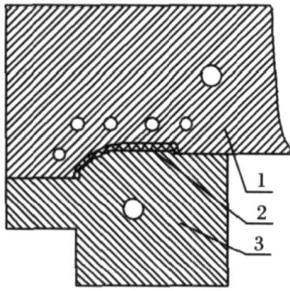


图 4 冷却模型

1-定模; 2-塑件; 3-动模

Fig. 4 Model for cooling phase

## 2 模具传热分析边界条件的确定

注塑模具的实际加热和冷却过程十分复杂, RHCM 模具由于其结构的复杂性, 更增加了其加热和冷却过程分析的复杂程度。因此, 在建立数学模型时, 本文作如下假设:

1) 塑料熔体、模具和冷却介质的热性能恒定, 忽略模具与熔体间的间隙热阻, 并假设冷却水的温度不随时间变化, 其导热系数为常数。

2) 因塑件较薄, 认为塑件与模壁完全接触, 且塑件表面温度与模壁温度相等。

3) 只考虑模具与冷却介质及塑件之间的热传导和热对流, 对于 RHCM 模具而言, 因定模外表面热量散失很小, 且周围包覆有绝热层, 因此可不考虑定模外表面的辐射, 视为与外界绝热。

### 2.1 模具型腔表面

RHCM 模具型腔表面加热与冷却时的边界条件不尽相同。加热时, 模具型腔表面与注塑型腔内的空气接触, 与空气的传热既有对流又有辐射传热, 此两类边界条件属于传热学中的第三类边界条件, 可统一写为

$$q = - \left[ \frac{\partial t}{\partial n} \right] = (t - t_e) \quad (1)$$

式中  $q$  ——热流密度/ $W/m^2$

——换热系数/ $W/(m^2 \cdot K)$

$t$  ——注塑型腔表面温度/

$t_e$  ——环境温度/

——导热系数/ $W/(m \cdot K)$

而在冷却时, 注塑模具型腔中则已充满高温塑料熔体, 高温熔体与模具型腔表面之间存在热传导。

### 2.2 加热和冷却管道表面与模具外廓边界

液晶平板电视机面板的 RHCM 模具采用共用的加热和冷却管道, 在加热阶段, 管道中通入

180 左右的饱和蒸汽; 在冷却阶段, 管道中通入 20 ~ 30 的水。通过控制不同温度介质的通入时刻和时间来实现模具的快速加热和冷却。因此, 分析时需要考虑不同温度介质与管道壁面之间的传热。RHCM 模具的定模部分与固定模板间存在隔热装置, 因此, 可认为定模外表面与外界绝热。

通过上述对 RHCM 模具不同部位在加热和冷却阶段的传热分析, 并根据具体的工艺参数条件, 本文确定了传热分析的换热系数, 加热时型腔表面换热系数为  $30 W/(m^2 \cdot K)$ , 水与模具管道换热系数为  $11000 W/(m^2 \cdot K)$ , 水蒸汽与模具管道换热系数为  $5200 W/(m^2 \cdot K)$ 。

### 2.3 工艺条件

在液晶平板电视机面板的 RHCM 注塑过程中, 为保证产品质量, 当模具型腔平均温度加热到 120 左右时注射熔料, 当模具型腔平均温度冷却到 80 左右时开模取件。熔料注射温度设定为 235, 冷却水温度设定为 25, 加热水蒸汽温度为 175, 环境温度为 25。

## 3 材料性能参数的确定

模具材料为瑞典的热作模具钢 (VIDAR SUPERIOR), 塑件材料为高光 ABS, 分析中不考虑材料性能参数与温度的相关性, 模具和塑件材料的主要热物性能参数有: 模具材料的密度为  $7.78 g/cm^3$ , 比热为  $460.00 J/(kg \cdot K)$ , 热导率为  $30.00 W/(m \cdot K)$ ; 塑件材料的密度为  $0.968 g/cm^3$ , 比热为  $2047.00 J/(kg \cdot K)$ , 热导率为  $0.157 W/(m \cdot K)$ 。

在上述研究的基础上, 本文利用 MSC Marc 软件建立了平板电视机面板快速热循环注塑模具加热与冷却过程分析及其结构优化设计的有限元模型, 并对 RHCM 模具加热和冷却过程进行了有限元分析。

## 4 RHCM 注塑过程的模具温度分析

### 4.1 加热过程的模具温度分析

在液晶平板电视机面板的 RHCM 注塑过程中, 要求模具型腔表面温度达到 120 左右时开始注射。图 5 给出了管道直径为 7mm、管道中心距为 16mm 时液晶平板电视机面板 RHCM 注塑模具在加热 24s 后定模型腔处 P1 ~ P8 点的温度分布曲线。分析发现, 模具加热 24s 后, 型腔 P1 ~ P8 点温度的平均值可达到 120。

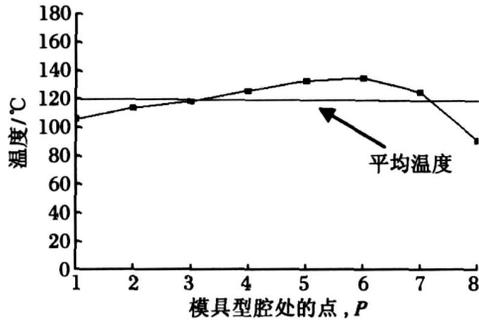


图 5 加热 24s 后模具型腔处 P1 ~ P8 点的温度分布曲线

Fig. 5 Temperature distribution of cavity surface after heating 24s

由图 5 可以看出，加热 24s 后，定模型腔的温度分布并不均匀，型腔中间部分（P5 点和 P6 点）温度分别为 133 和 135，而两侧部分温度较低，特别是型腔右侧部分（P8 点）温度仅为 91。造成这种情况的主要原因是 C5 管道位于型腔最右侧壁的左侧，导致型腔右侧壁附近传热较慢，温度较低。中间两管道 C3 和 C4 由于与其他管道的距离间隔一致，导致中间部分加热过快，若在这种情况下注射熔体，熔体表面温度势必不均匀，冷却速度也不一致，影响塑件质量。

为获得高光无熔痕塑件和提高生产效率，要求定模型腔表面温度应在尽量短的时间内到达工艺要求的温度，并具有良好的温度均匀性。为此，合理地确定加热/冷却管道的数量、管径、间距、及其与型腔表面的距离等设计参数就显得尤为重要。一般原则是，在满足模具强度要求等前提下，力求高的加热/冷却效率和良好的加热/冷却均匀性。为研究不同的加热/冷却管道设计参数对模具型腔表面温度分布的影响，本文提出了 4 种不同的管道设计方案，如表 1 所示。经模具温度分析获得了如图 6 所示的 4 种设计方案的型腔表面各点的温度分布曲线，可见，不同的设计方案，其型腔表面温度分布的均匀性和加热/冷却效率不同。

表 1 4 种管道设计方案

Tab. 1 Four kinds of cases designed for channels

方案	管道直径/mm	管道间距/mm	管道数量	管道中心距型腔表面距离/mm	加热时间/s
1	7	$D1 = D2 = D3 = 16$	5	10.7	24
2	7	$D2 = 22 \quad D1 = D3 = 18$	5	10.7	25
3	5	$D1 = 15, D2 = D3 = 14.5, D4 = 10.5$	7	10.7	23
4	5	$D1 = 15, D2 = D3 = 14.5, D4 = 10.5$	7	9.7	21

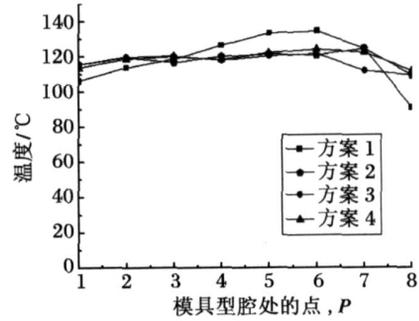


图 6 不同管道设计方案的模具型腔表面温度分布

Fig. 6 Cavity temperature distribution of different cases

4. 1. 1 管道间距对模具型腔表面加热效果的影响

方案 1 和方案 2 的唯一差别是冷却管道间距不同。在方案 1 中，冷却管道均匀分布，最高温度为 134.7，最低温度为 90.9，型腔温差较大，最大温差约为 44，P1 ~ P8 点的平均温度为 120.5。在方案 2 中，改变了管道布局，将最右边管道（C5）右移 9.6mm 距离，并适当增大中间两管道 C3 和 C4 之间的距离。经分析发现，方案 2 的型腔最高温度约为 124，最低温度约为 109，P1 ~ P8 点的平均温度为 120.3，其最大温差只有 15，较方案 1 的温差明显减小。可见管道的间距与排布是影响型腔温度分布的重要因素。

4. 1. 2 管道直径对模具型腔表面加热效果的影响

方案 2 和方案 3 的不同在于管道数量及其直径。方案 2 的管道数量为 5 个，直径均为 7mm；而方案 3 的管道数量为 7 个，直径均为 5mm。从图 6 可知，方案 2 和方案 3 的温度曲线在初始阶段基本重合，在靠近型腔右侧时温度出现差异，由于方案 3 的管道布局方式与方案 2 的管道布局方式基本相同，都吸取了方案 1 布局的经验，二者的温度分布都在 120 左右浮动。但从表 1 所示的加热时间看，方案 3 的加热时间比方案 2 的加热时间短 2s，加热效率提高。方案 3 的模具型腔最高温度约为 121.4，最低温度约为 109.2，P1 ~ P8 点的平均温度为 119.9，其最大温差只有 12.2，温差进一步减小。

4. 1. 3 管道到型腔表面距离对模具型腔表面加热效果的影响

方案 3 和方案 4 的管道离型腔表面的距离分别为 10.7mm 和 9.7mm，其他布局一样。由图 6 可知，在加热到型腔要求的温度后，方案 4 的最高温度为 124，比方案 3 的最高温度高 3，其最低温度也比方案 3 高 3 左右，温度分布趋势基本相同。但方案 4 加热所需时间比方案 3 短 2s。因此，在保

证型腔壁不被压塌及加工条件下,管道距型腔壁越近,加热效率越高。但是管道距型腔壁较近,会对型腔强度造成影响,若型腔强度过小,不但不能保证塑件的精度,而且模具使用寿命也会受到影响,因此,在设计时应综合考虑模具强度、寿命和加热效率。对于本文研究的平板电视机面板注塑模具,建议管道到型腔表面距离在 10mm 左右为宜。

#### 4.2 冷却过程的模具温度分析

冷却时,模具的所有管道都通入冷却介质,作为模具型腔内高温熔体的塑件在定模和动模的共同作用下,快速冷却达到脱模状态。由图 4 可以看出,定模部分的冷却管道较多,使塑件的外表面(在定模内部分)冷速较快,动模内冷却管道较少,塑件的内表面(动模内)部分冷速较慢,因此当塑件内表面的温度达到脱模温度时,才能允许脱模。分析获得的上述 4 种设计方案的塑件脱模时其内表面的温度分布曲线和温度数值分别如图 7 和表 2 所示。

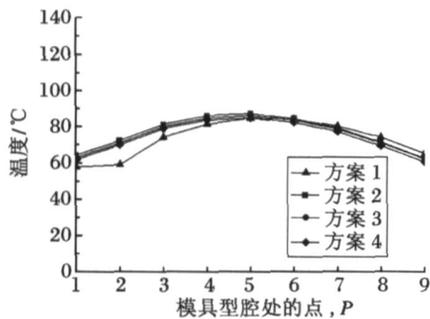


图 7 脱模时塑件内表面温度分布曲线

Fig. 7 Temperature curves of the part inner surface when ejection

表 2 不同方案脱模时塑件内表面的温度

Tab. 2 Temperatures of the part inner surface in different cases when ejection

方案	最高温度/	最低温度/	温差/	平均温度/
1	84.7	57.7	27.0	73.5
2	87.1	64.2	22.9	76.6
3	86.2	62.7	23.5	75.6
4	84.9	61.8	23.1	74.4

由图 7 和表 2 可以看出,不同的管道布局在冷却相同的时间(25s)后,温度分布曲线和平均温度的数值相差不大,均达到了塑件脱模要求。塑件脱模时,方案 1 的平均温度最低,但塑件表面的温差较大,会导致塑件内部的热应力较大,塑件将会发生较大的翘曲变形。因此,在实际生产中,选用了方案 3 所述的管道布局,经过 25s 冷却后开模取件,取得

了良好的效果。

图 8 为采用本文研发的 RHCM 高光无熔痕注塑技术和模具所生产的高光无熔痕 46 英寸平板电视机面板塑件,图 9 为常规注塑工艺和 RHCM 注塑工艺生产的塑件的比较,RHCM 注塑工艺生产的塑件显著提高了塑件表面光泽度,消除了熔痕、流线、银线等缺陷,可直接应用于电视机装配。

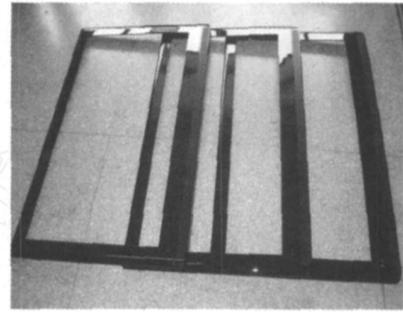


图 8 高光无熔痕平板电视机面板塑件

Fig. 8 Plastic parts of RHCM technology

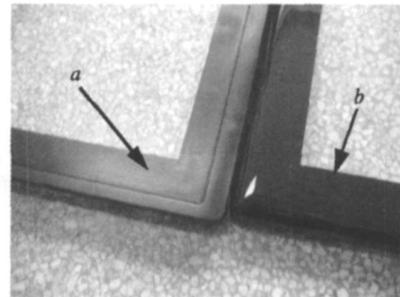


图 9 两种工艺生产的塑件

a) 常规塑件; b) 高光塑件

Fig. 9 Products of the two methods

## 5 结 论

本文建立了 RHCM 注塑模具传热分析模型,优化获得了使模具加热冷却效率高、温度分布均匀的管道布局设计方案,成功生产出大型液晶平板电视面板高光无熔痕塑件,通过研究得出如下结论:

从 RHCM 模具的加热和冷却的模拟结果可以直观的得到定模型腔的温度变化过程,了解每一时刻各个结点的瞬态温度值,并可判断加热和冷却的效果,验证管道分布的合理性。定模上管道排布不同,型腔的加热效率极其温度分布的曲线不同,管道间距、管道直径和管路数目、管道到型腔表面距离是影响型腔表面温度分布的主要因素。模拟结果能够有效的指导 RHCM 实际的模具设计,对研究 RHCM 模具结构,提高企业的生产效率具有重要意义。

## 参考文献

- [ 1 ] D E Dimla , M Camilotto , F Miani. Design and optimisation of conformal cooling channels in injection moulding tools[J]. Journal of Materials Processing Technology , 2005. (164-165) :1294-1300
- [ 2 ] S H Tang , Y M Kong , S M Sapuan , R Samin , S Sulaiman. Design and thermal analysis of plastic injection mould[J]. Journal of Materials Processing Technology , 2006. (171) :259-267
- [ 3 ] Y Shiraishi , H Norikane , N Narazaki , T Kikutani. Analysis of heat flux from molten polymers to molds in injection molding processes [J]. International Polymer Processing , 2002. 17 :166-175
- [ 4 ] 平学成 , 健萍. 注塑模具瞬态温度仿真研究[J]. 机械 , 2005. (2) :6-9
- [ 5 ] 庄俭 , 于同敏 , 王敏杰. 微注塑成型中熔体与壁面间传热系数对充模流动影响的研究[J]. 传感技术学报 , 2006. (5) :1466-1469
- [ 6 ] 石宪章 , 田中 , 申长雨 , 陈静波. 平板塑件瞬态传热解析解及其在冷却分析中的应用[J]. 中国塑料 , 2004. (9) :63-67

(上接第 175 页)

## 参考文献

- [ 1 ] Guofei Chen , Xiao Ming Chen , Ming F Shi. Material and Processing Modeling of Dual Phase Steel Front Rails for Crash , A HSSS PROCEEDINGS , 1998 : 161-170
- [ 2 ] Z Cedric Xia , Craig E Miller , Maurice Lou. A Benchmark Test for Springback: Experimental Procedures and Results of a Slit-Ring Test , SAE Technical Paper Series , 2005-01-0083 :1-8
- [ 3 ] Jody Shaw , Kenichi Watanabe , Ming Chen. Metal Forming Characterization and Simulation of Advanced High Strength Steels , SAE 2001-01-1139 :1-10
- [ 4 ] X M Chen , J J Drouin. Stamping and Crush Performance of Dual Phase Steel , SAE 2001-01-3074 :1-8
- [ 5 ] Jody Shaw 等. 钢的强度和加工过程对冲撞能量吸收件冲击变形的影响[J]. 世界钢铁 , 2003. (3) :29-33
- [ 6 ] X M Chen , D A Witmer. Metal Forming Characterization and Simulation of Advanced High Strength Steels , SAE 2004-01-1048 :1-7
- [ 7 ] Aleksy A. Konieczny 等. 汽车用双相钢成形性能评价[J]. 世界钢铁 , 2003. (1) :34-38