

# 圆柱斜齿轮浮动凹模冷挤压成形仿真与实验研究

薛克敏 李晓冬 李萍 许锋 周结魁 石文超

合肥工业大学,合肥,230009

**摘要:**采用浮动凹模冷挤压成形工艺,对螺旋角不同的同一型号圆柱斜齿轮进行了数值模拟与实验研究。分析了成形过程中金属的流动特点、成形载荷,并与传统工艺进行了比较。通过不同螺旋角斜齿轮的对比,探索了影响脱模后锻件精度的因素。结果表明:对圆柱斜齿轮采用浮动凹模冷挤压成形可有效降低成形载荷,且在脱模过程中齿轮锻件沿着齿形螺旋方向做刚性旋转运动,脱模后锻件可保持较高精度。研究成果为圆柱斜齿轮精锻成形工艺的深入研究提供了参考。

**关键词:**圆柱斜齿轮;浮动凹模;脱模;刚性旋转

**中图分类号:** TG316

**DOI:**10.3969/j.issn.1004-132X.2012.04.018

## Simulation and Experimental Research on Floating Die Cold Forming of Helical Gears

Xue Kemin Li Xiaodong Li Ping Xu Feng Zhou Jiekui Shi Wenchao

Hefei University of Technology, Hefei, 230009

**Abstract:** By cold forging process with floating die, the same type helical gears with different helix angles were researched by both numerical simulation and physical experiments. Characteristics of metal flowing and forming load were analyzed and compared with the conventional scheme. Factors that affected the precision of forgings after demoulding were discovered by comparison of helical gears with different helixes. The results show that the cold forming load of floating die can be reduced effectively, and when demoulding, the helical gears make rigid rotation along the helical directions. The paper provides a reference for the further research of helical gear precision forging.

**Key words:** helical gear; floating die; demoulding; rigid rotation

## 0 引言

与直齿轮相比,圆柱斜齿轮具有轮齿重合度高,传动平稳,冲击、振动小等优点,在机械传动领域有着广泛的应用。目前对斜齿轮的成形主要采用切削加工,这不仅破坏了金属的流线性分布,更导致加工后的斜齿轮抗弯、抗疲劳强度大打折扣。对齿轮采取近净成形工艺,就是通过精密挤压技术来达到齿廓不需或仅需少许精加工的方法。通过该方法获得的齿轮锻件,由于金属受三向压应力,其内部疏松、微裂纹等缺陷得以锻合,工艺塑性得以改善,且金属纤维沿齿形均匀分布,齿轮的使用寿命显著提高<sup>[1-3]</sup>。

然而,圆柱斜齿轮形状较为复杂且存在一定的螺旋角,当采用挤压工艺成形时,成形后的齿轮锻件如何从凹模型腔中顺利脱模,成为制约圆柱斜齿轮近净成形研究的瓶颈。目前国内外学者对圆柱斜齿轮近净成形工艺进行了研究。Choi等<sup>[4]</sup>通过上限法分析了斜齿轮导向式和闭式两种锻造工艺,并进行了相关的实验验证;吴昊等<sup>[5]</sup>采用闭式温锻的工艺模拟了圆柱斜齿轮的成形过

程。本文针对某一型号两种螺旋角的圆柱斜齿轮,采用浮动凹模的工艺进行冷挤压成形和脱模的研究,探索了在这两个过程中,影响其成形效果和脱模后斜齿轮精度的因素。

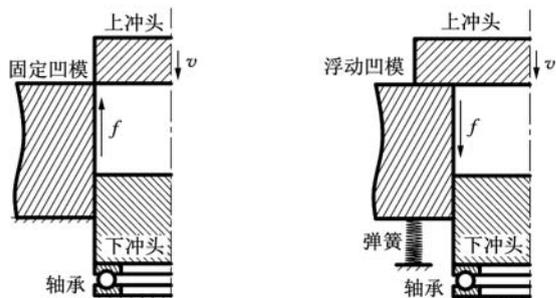
## 1 圆柱斜齿轮浮动凹模成形工艺分析

和圆柱直齿轮相似,斜齿轮在冷挤压成形时,也存在成形力过大、齿形角隅部分难充填等困难。采用浮动凹模结构,可有效改善摩擦条件,改善坯料在模具型腔的充填情况,降低成形载荷,减少模具的磨损等。

当采用传统的闭式挤压成形时,下冲头及凹模固定,上冲头以速度 $v$ 向下运动,如图1a所示。毛坯的主要流动方向是朝下的,凹模相对于毛坯向上运动,毛坯在挤压过程中受到凹模施加的摩擦力作用,该摩擦力方向与金属运动方向相反,随着挤压过程的进行,摩擦力会越来越大,最后导致斜齿轮的上下角隅处难以充填。若将凹模改为可浮动的,如图1b所示,在挤压变形开始时,凹模在上冲头的压力下,随其以同一速度 $v$ 下行。整个变形过程中,凹模对坯料产生摩擦力,但该力方向沿轴向向下,与金属运动方向相同,最终可促进齿形角隅部分的充填<sup>[6]</sup>。

收稿日期:2011-03-03

基金项目:国家大学生创新性实验计划项目(091035909);安徽省优秀青年科技基金资助项目(10040606Y21)



(a)传统闭式模具

(b)浮动凹模

图1 模具工装对比图

由于圆柱斜齿轮存在一定的螺旋角,在挤压成形和脱模时,下冲头会在凹模齿腔的导向作用下,自动地沿着螺旋角方向边旋转边沿轴向向上运动,为方便下冲头运动,可在其底部安装推力球轴承。

## 2 工艺过程有限元模拟

为了进一步探索圆柱斜齿轮在浮动凹模冷挤压成形过程中金属流动规律以及影响脱模后齿轮精度的因素,本文以某一型号的两圆柱斜齿轮为对象进行了相关研究。斜齿轮的基本几何参数如下:齿数为22,法面模数为2.5mm,压力角为 $20^\circ$ ,齿顶高系数为1.0,顶隙系数为0.25,螺旋角分别为 $22^\circ$ 和 $32^\circ$ 。

### 2.1 有限元模型的建立

运用 Deform-3D 有限元软件,采用刚塑性有限元法,对圆柱斜齿轮浮动凹模冷挤压成形过程进行计算机仿真模拟。模拟时坯料所选材料为20CrMnTi,将模具视为刚体,不发生弹塑性变形,坯料和模具的初始温度均设定为室温 $25^\circ\text{C}$ 。为精确建模及节省计算时间,划分网格时,对圆柱斜齿轮的齿形部分进行局部细化,网格总数为 $1.2 \times 10^5$ ,齿形与其余部分网格尺寸比为1:10,建立的有限元模型如图2所示<sup>[6]</sup>。

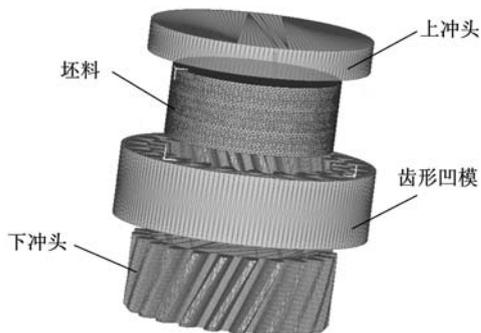


图2 斜齿轮模具与坯料的有限元模型

### 2.2 摩擦模型的建立

在进行有限元模拟及物理实验时,需正确处理毛坯金属与模具之间的摩擦关系<sup>[7]</sup>。不考虑接触面上的黏合现象,本文采用应用比较广泛的库

伦摩擦模型,其数学表达式为

$$f = \mu P_n \quad (1)$$

式中, $f$ 为与速度方向相反的摩擦力; $\mu$ 为摩擦因数; $P_n$ 为法向压力。

## 3 浮动凹模成形过程模拟与实验

### 3.1 实验过程

为了降低实验成本,简化实验过程,本次实验毛坯材料选用工业纯铅。分别制作了螺旋角为 $22^\circ$ 和 $32^\circ$ 的两套简易模具来作工艺对比。在挤压成形时为便于斜齿轮下冲头自由地在齿形凹模内沿轴向和圆周方向运动,在设计模具时,下冲头齿顶圆直径较标准齿形小0.05mm,如图3所示<sup>[8-9]</sup>。成形设备是2MN液压机。

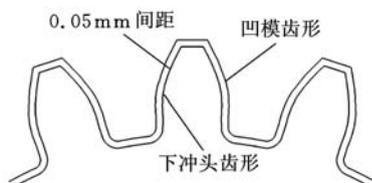


图3 下冲头齿形示意图

### 3.2 模拟与实验结果分析

表1所示为采用传统闭式挤压工艺和浮动凹模冷挤压工艺时,螺旋角分别为 $22^\circ$ 和 $32^\circ$ 的圆柱斜齿轮不同压下量的成形效果对比图。现以前者为例进行成形分析。从表1中第1组图可以看出,若采用传统的闭式挤压工艺成形圆柱斜齿轮,由于上下冲头与坯料表面的摩擦作用,毛坯在挤压过程中表现出中部径向流动速度快,上下端部流动较慢的特征。当压下量达到30%时,锻件中部出现一定量的鼓形趋势,但不明显;当压下量达到60%时,形成鼓形的趋势加剧,上下端部径向流动明显滞后,因此在后续成形过程中,主要完成上下端部及其角隅部分的充填。若对其采用浮动凹模工艺成形(如表1中第2、第3组图所示),由于浮动凹模改变了摩擦力的方向,使其与金属的流向相同,从而加快了毛坯的中下部金属的径向充填速度。当压下量达到30%时,已出现上端径向流动滞后于下端,锻件略微呈现梯形;当压下量达到60%时,形成梯形的趋势明显加剧,锻件下端及中部齿形已经充填大部分,此时上端齿形刚开始充填,因此在后续成形过程中,主要完成上端部齿形及其角隅部分的充填。

对于螺旋角为 $32^\circ$ 的圆柱斜齿轮,在浮动凹模冷挤压工艺下(如表1中第4、第5组所示),其成形规律与螺旋角为 $22^\circ$ 时相似。

图4所示为两种斜齿轮在传统闭式挤压工艺和浮动凹模冷挤压工艺下成形载荷随时间增量步

表 1 成形过程模拟与实验对比分析

组号	压下量 30%	压下量 60%	压下量 100%
1			
2			
3			
4			
5			

注:第 1 组为 22°螺旋角传统工艺等效应变图;第 2 组为 22°螺旋角浮动凹模成形等效应变图;第 3 组为 22°螺旋角浮动凹模成形实验效果图;第 4 组为 32°螺旋角浮动凹模成形等效应变图;第 5 组为 32°螺旋角浮动凹模成形实验效果图。

变化曲线。圆柱斜齿轮采用浮动凹模冷挤压工艺时,整个冷挤压过程所需的成形力相对于传统闭式挤压工艺明显降低。螺旋角为 22°和 32°的圆柱斜齿轮采用浮动凹模冷挤压工艺成形时载荷分别为 6.0MN 和 7.1MN,而采用传统闭式挤压工艺时两者的成形载荷分别为 8.5MN 和 9.5MN。相比之下,采用浮动凹模工艺成形时工作载荷可分别降低约 30%和 25%。

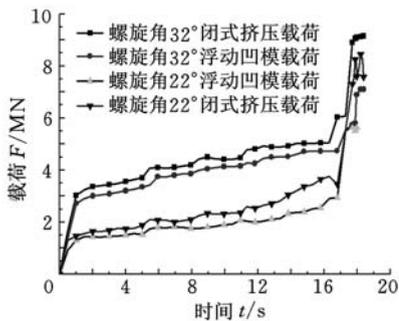


图 4 成形载荷—时间曲线图

#### 4 脱模过程模拟与实验分析

圆柱斜齿轮在脱模时若工艺参数控制不当,势必会使成形好的锻件产生破坏性的变形,导致其无法修复。而影响脱模过程的因素较多,其中比较显著的有摩擦因数和螺旋角。脱模时,单个齿形的受力情况如图 5 所示。

图 5 中,  $F$  为下冲头施加的脱模力,方向竖直向上;  $F_1$ 、 $F_2$  分别为  $F$  沿着齿形方向和垂直于齿形方向的分力;  $\beta$  为斜齿轮螺旋角;  $F_z$  为齿形在挤压成形时,由于胀形而对凹模产生的作用力,该力的方向应垂直于齿形,对于既定的工艺,  $F_z$  可取常数(其值近似等于当  $\beta=0, \mu=1$  而其他参数不变时的脱模力,通过数值模拟,浮动凹模成形工艺下  $F_z$  约为 182.61kN)。

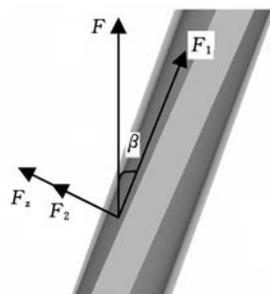


图 5 单个齿形受力图

假设在脱模时,斜齿轮锻件能匀速被顶出,则有下列受力平衡关系:

$$\left. \begin{aligned} F_1 &= (F_2 + F_z)\mu \\ F_1 &= F \cos \beta \\ F_2 &= F \sin \beta \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中,  $F$ 、 $\beta$ 、 $\mu$  为变量;  $F_z$  为常数。

#### 4.1 摩擦因数对脱模过程的影响

当螺旋角  $\beta$  一定时,由式(1)可得  $F$  与  $\mu$  有下列关系式:

$$F = \frac{F_z \mu}{\cos \beta - \mu \sin \beta} \quad (2)$$

当摩擦因数  $\mu$  分别取 0.10、0.12、0.14 时,通过式(2)计算可得表 2。

表 2 脱模力理论计算表 kN

	$\beta = 22^\circ$	$\beta = 32^\circ$
$\mu = 0.10$	20.53	22.97
$\mu = 0.12$	24.84	27.94
$\mu = 0.14$	29.23	33.04

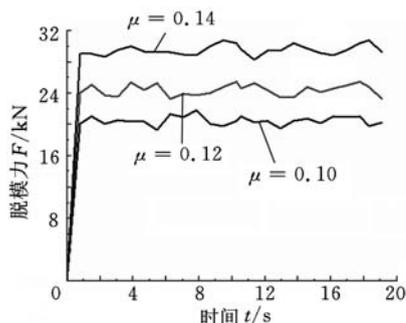
从表 2 可以看出,当螺旋角  $\beta$  不变时,脱模力随摩擦因数  $\mu$  的增大而增大。图 6 为在三种摩擦因数下,圆柱斜齿轮通过数值模拟所获得的脱模力随时间变化曲线图,由模拟曲线可以看出,当  $\mu$  分别取 0.10、0.12、0.14 时,螺旋角为 22°的圆柱斜齿轮脱模力分别在 20kN、24kN、29kN 上下波动;螺旋角为 32°时,其波动值则分别为 22kN、27kN、33kN。由此可见,数值模拟与计算结果是较为吻合的,在一定程度上验证了数值模拟的可靠性。

#### 4.2 螺旋角对脱模过程的影响

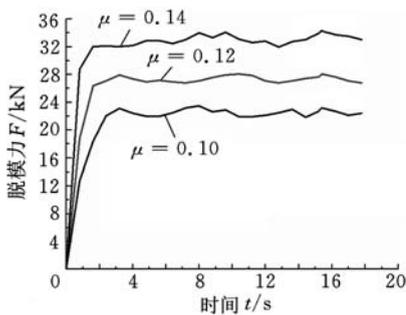
当摩擦因数  $\mu$  一定时,由式(1)可得  $F$  与  $\beta$  有下列关系式:

$$F = \frac{F_z \sin \alpha}{\cos(\alpha + \beta)} \quad (3)$$

$$\alpha = \arcsin \frac{\mu}{\sqrt{1 + \mu^2}}$$



(a)  $\beta = 22^\circ$



(b)  $\beta = 32^\circ$

图 6 脱模力—时间变化曲线图

图 7 为摩擦因数  $\mu=0.10$  时,脱模力  $F$  与螺旋角  $\beta$  之间的关系曲线图。从图 7 可以看出,脱模力随着螺旋角的增大而增大,且增大的趋势越来越快。当  $\beta=22^\circ$  和  $32^\circ$  时,脱模力分别达到约 20kN 和 23kN。

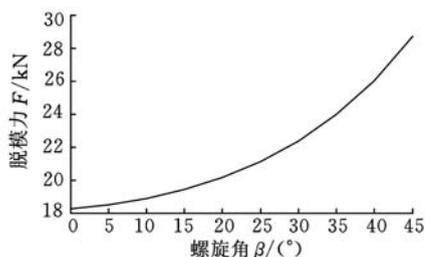


图 7  $\mu = 0.10$  时,  $F$  与  $\beta$  曲线图

### 4.3 模拟与实验结果对比

表 3 所示为斜齿轮锻件脱模过程中模拟与实验结果对比分析。从速度场可以看出,齿轮锻件在脱模时,金属的流动速度均沿着齿形方向,且大小相近,这说明在脱模过程中,齿形在凹模的导向作用下,自动地沿着螺旋方向做刚性旋转运动,几乎不产生塑性变形,可有效地保证脱模后斜齿轮锻件的精度。从应变场可以看出,螺旋角为  $22^\circ$  的斜齿轮锻件脱模后,等效应变主要集中在上下齿形的角隅部分,其余部分几乎没有变形;当螺旋角增大到  $32^\circ$  时,等效应变除了集中在齿形角隅部分外,中部齿形也出现微小的应变。因此,随着螺旋角的增大,脱模后的斜齿轮锻件精度会有一定的下降。

表 3 脱模过程模拟与实验对比分析

类别	$\beta = 22^\circ$	$\beta = 32^\circ$
速度场	0.219 0.146 0.073 0	1.210 0.807 0.403 0
等效应变场	0.400 0.267 0.133 0	0.400 0.267 0.133 0
实验效果图		

从表 3 中实验效果图可以看出,脱模后的斜齿轮锻件齿形较饱满,无角隅塌陷等缺陷,在保证使用要求的前提下,只需对齿轮锻件进行稍微的倒角、打磨处理即可保证精度要求<sup>[10-11]</sup>。

### 5 结论

通过数值模拟与实验相结合的方法,对两种不同螺旋角的圆柱斜齿轮浮动凹模冷挤压成形及脱模进行对比分析,得出以下结论:

(1)圆柱斜齿轮采用浮动凹模工艺可有效改变摩擦力方向,降低成形载荷,与传统工艺相比,螺旋角为  $22^\circ$  和  $32^\circ$  的两种斜齿轮,成形力分别下降约 30% 和 25%。

(2)通过数值模拟和铅试样实验,揭示了脱模过程中斜齿轮锻件沿着齿形螺旋方向做刚性旋转运动的现象,在一定程度上避免了脱模时凹模齿腔对锻件齿形产生的破坏性变形。

(3)影响圆柱斜齿轮成形的因素较多,其中比较显著的是螺旋角和摩擦因数,总的来说,锻件精度随着螺旋角和摩擦因数的增大而有所降低。因此,在保证使用要求的前提下,需对锻件进行一定的表面处理以保证其精度。

### 参考文献:

[1] 海锦涛. 塑性成形技术的新思路[J]. 中国机械工程, 2000, 11(1/2): 180-182.  
 [2] 王岗超,薛克敏,许峰,等. 齿腔分流法冷精锻大模数圆柱直齿轮[J]. 塑性工程学报, 2010, 17(3): 18-21.  
 [3] 胡成亮,刘全坤,王强,等. 直齿轮刚性旋转两步成形工艺仿真与试验[J]. 农业机械学报, 2008, 39(1): 161-164.  
 [4] Choi J C, Choi Y, Tak S J. The Forging of Helical Gears: Comparisons of the Forging Processes[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 1999, 41(6): 725-739.

# 基于有限元的激光熔覆凝固过程分析

陈 刚<sup>1</sup> 黎向锋<sup>1</sup> 左敦稳<sup>1</sup> 王宏宇<sup>1,2</sup>

1. 南京航空航天大学, 南京, 210016 2. 江苏大学, 镇江, 212013

**摘要:** 针对激光熔覆过程中温度变化对其凝固组织的影响, 讨论了温度梯度  $G$  与冷却速度 (即降温阶段的温度变化率) 对凝固组织的影响, 利用形状控制因子  $K$  分析了激光熔覆过程的凝固行为。分析结果表明: 在热源中心的正下方晶粒是沿基体垂直方向析出的; 冷却速度有细化晶粒的作用, 冷却速度越大, 晶粒越细小; 熔覆材料或基材达到熔点的时间与达到最大冷却速度时间的先后顺序对其凝固组织形态有重要影响, 若冷却速度先达到最大值, 其组织呈胞状晶粒, 否则, 其组织呈柱形树枝晶。  $K$  在  $80 \times 10^6 \sim 120 \times 10^6 \text{ } ^\circ\text{C} \cdot \text{s}$  时, 凝固组织为密布排列且粒径较大的胞状晶粒; 当  $K$  大于  $200 \times 10^6 \text{ } ^\circ\text{C} \cdot \text{s}$  时, 凝固组织为柱形树枝晶。

**关键词:** 激光熔覆; 形状控制因子; 有限元; 凝固组织

**中图分类号:** TG1

**DOI:** 10.3969/j.issn.1004-132X.2012.04.019

## Solidification Analysis during Laser Cladding Process Based on Finite Element

Chen Gang<sup>1</sup> Li Xiangfeng<sup>1</sup> Zuo Dunweng<sup>1</sup> Wang Hongyu<sup>1,2</sup>

1. Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing, 210016

2. Jiangsu University, Zhenjiang, Jiangsu, 212013

**Abstract:** Finite element was used to analyze effects of the temperature variations on the solidification organization for laser cladding. The influences of the temperature gradient  $G$  and the cooling rate (cooling part of temperature changing rate) were discussed. A feature controlling factor  $K$  was used to study the solidification performance in the laser cladding process. The results show that the grains precipitate along the vertical direction below the heat source center and the cooling rate plays an important role in refining the grains. The larger the cooling rate is, the less the grains are. It is also found that the solidification structure is significantly dependent on the occurring time of the highest cooling rate and on that of  $K$  at the melting point of the cladding or the substrate. It is demonstrated that, if the largest cooling rate is achieved prior to  $K$  at the melting point, the structure is of the cellular-grain form. Otherwise, it is of column-dendrite grain form. And when  $K$  is in the range of  $80 \times 10^6 \sim 120 \times 10^6 \text{ } ^\circ\text{C} \cdot \text{s}$ , the solidification structure is of densely arranged cellular-grain form whose grain size is larger. When  $K$  is more than  $200 \times 10^6 \text{ } ^\circ\text{C} \cdot \text{s}$ , the structure is of column-dendrite form.

**Key words:** laser cladding; feature controlling factor; finite element; solidification structure

## 0 引言

激光熔覆是一种快速加热、快速冷却的典型

工艺, 短时间内激光能量主要集中于液态熔池内。相对于熔覆材料和基材的总体积, 液态熔池的体积非常小, 其液体温度远远高于液相线, 存在着多种物理变化和化学反应的过程, 如液体对流、溶质扩散、晶粒析出、生长以及演化<sup>[1-2]</sup>。这些物理化

收稿日期: 2010-12-01

基金项目: 南京航空航天大学创新基地(实验室)开放基金资助项目(200902011); 航空科学基金资助项目(2010ZE52056)

- [5] 吴昊, 伍万斌, 薛克敏. 圆柱斜齿轮闭式温锻数值模拟[J]. 合肥工业大学学报, 2008, 31(1): 96-99.
- [6] 江雄心, 万平荣, 扶名福. 齿轮精锻的数值模拟与实验研究[J]. 塑性工程学报, 2002, 9(1): 62-65.
- [7] 俞汉清, 陈金德. 金属塑性成形原理[M]. 北京: 机械工业出版社, 1999: 151-153.
- [8] 刘华, 席庆坡, 霍艳军, 等. 圆柱齿轮精锻数值模拟及轮齿修形规律[J]. 西安交通大学学报, 2004, 38(11): 1186-1189.
- [9] 朱家诚, 王纯贤, 等. 机械设计基础[M]. 合肥: 合肥工业大学出版社, 2003: 49-54.
- [10] 胡成亮, 刘全坤, 王强, 等. 基于灰色关联和模糊逻辑的齿轮锻模多目标优化设计[J]. 中国机械工程,

2007, 17(14): 1739-1742.

- [11] 陈永久, 蒿敬恪, 杜梅. 机械加工技术[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2008: 154-160. (编辑 陈 勇)

**作者简介:** 薛克敏, 男, 1963年生。合肥工业大学材料科学与工程学院教授、博士研究生导师。主要研究方向为精密塑性成形理论与工艺、成形过程数值模拟与分析、神经网络优化。获部级科技进步二等奖1项。发表论文100余篇。李晚冬, 男, 1985年生。合肥工业大学材料科学与工程学院硕士研究生。李 萍, 女, 1973年生。合肥工业大学材料科学与工程学院教授、博士研究生导师。许 锋, 男, 1978年生。合肥工业大学材料科学与工程学院博士研究生。周结魁, 男, 1986年生。合肥工业大学材料科学与工程学院硕士研究生。石文超, 男, 1988年生。合肥工业大学材料科学与工程学院硕士研究生。