

# 300M 超高强钢起落架外筒模锻件锤锻工艺

代伟<sup>1</sup> 易幼平<sup>1</sup> 李蓬川<sup>2</sup> 陈春<sup>1</sup>

(1 中南大学机电工程学院,长沙 410083)

(2 中国第二重型机械集团公司,德阳 618000)

**文 摘** 利用 Gleeble-1500 热模拟试验机对 300M 超高强钢进行了热压缩试验,建立了材料流变应力模型;采用 DEFORM 3D 有限元软件对 300M 超高强钢起落架外筒模锻件锤锻成型过程进行了数值模拟,研究了不同工艺参数对锻件成型的影响。结果表明:模锻件在 1 100℃ 始锻温度下,经三火成型填充完全,锻件平均应力 228 MPa,平均应变 1.51。

**关键词** 300M 超高强钢,流变应力模型,数值模拟

## Hammer Forging Process for 300M Ultra High Strength Steel Die Forging of Landing Gear Cylinder

Dai Wei<sup>1</sup> Yi Youping<sup>1</sup> Li Pengchuan<sup>2</sup> Chen Chun<sup>1</sup>

(1 School of Mechanical and Electrical Engineering, Central South University, Changsha 410083)

(2 China National Erzhong Group Co., Deyang 618000)

**Abstract** The material flow stress model for 300M ultra high strength steel has been established by hot compression tests on the Gleeble-1500 thermal simulation testing machine. The hammer forging forming for 300M ultra high strength steel die forging of landing gear cylinder has been investigated by DEFORM 3D FEM software, the influence of hammer forging under different process parameters has been researched in this paper. The results show that: the die forging filled completely at 1 100℃ initial forging temperature after the three fires;the average stress of the forging is 228 MPa and the average strain is 1.51, which provides technical reference for hammer forging process.

**Key words** 300M ultra high strength steel, Flow stress model, Numerical simulation

### 0 引言

起落架在飞机起飞、降落的过程中承受巨大的冲击载荷<sup>[1-2]</sup>,外筒作为起落架的关键部件,长期承受着径向和周向交变应力,极易造成构件失效,严重影响起落架的寿命和飞机的正常运行<sup>[3-4]</sup>。300M (40CrNi<sub>2</sub>Si<sub>2</sub>MoVA)是在 4340 基础上改进得到的一种超高强钢,该材料采用真空电弧重熔(VAR)后进行低温回火制备得到<sup>[5]</sup>,拉伸强度 1.69 GPa,压缩强度 2.0 GPa,硬度 52~55 HRC<sup>[6-7]</sup>,其极高的力学性能非常适用于飞机起落架材料<sup>[8-9]</sup>,但传统方式机械加工起落架外筒会破坏锻坯流线,引起微裂纹和应力腐蚀开裂,降低零件性能。模上锤锻工艺不仅增强材料流动性,促使锻件形成均匀细化的晶粒组织,还能

最大限度保存锻件的完整流线,发挥 300M 超高强钢的优良性能。为提高产品质量、降低成本,需要进行热模拟实验和成型仿真,以得到材料在模腔内的流动状况、锻件的温度分布、应力应变和成型载荷,进而对锤锻工艺进行优化。

本文首先研究了 300M 超高强钢在锻造区间的高温材料特性,建立了 300M 超高强钢流变应力模型,然后运用 DEFORM 有限元仿真软件对 300M 超高强钢飞机起落架外筒模锻件的锤锻成型过程进行仿真计算,并进一步分析了锻造过程中的温度、应力等参数,从而为起落架外筒的锤锻生产工艺提供设计参考。

### 1 流变应力模型的建立

收稿日期:2011-05-03

基金项目:国家 973 计划资助项目(2011CB706802);国家重大专项资助项目(2012ZX04010-081)

作者简介:代伟,1988 年出生,硕士,从事精密锻造成型工艺数字化仿真研究。E-mail:daiwei158@163.com

## 1.1 材料试验

在 Gleeble-1500 热模拟机上进行材料热压缩试

验,试样为 300M 超高强钢,其名义化学成分如表 1 所示<sup>[6]</sup>。

表 1 300M 超高强钢化学成分

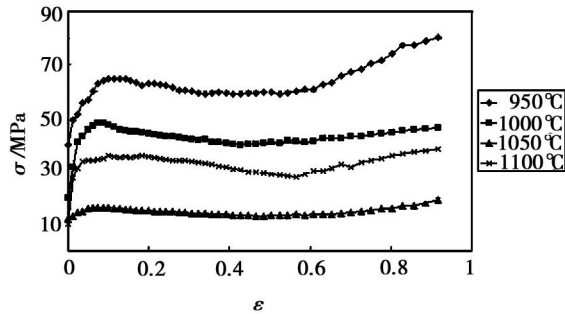
Tab.1 Chemical composition of 300M ultra high strength steel

Si	Ni	Cr	Mn	Mo	C	V	Cu	P	S	Fe
1.61	1.82	0.91	0.69	0.42	0.39	0.07	0.06	0.0089	0.0012	其余

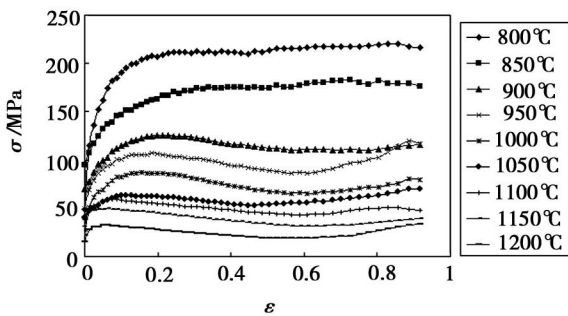
试样为  $\Phi 8 \text{ mm} \times 12 \text{ mm}$ 。为了避免试样在高温下氧化,在氩气保护下进行试验。为消除端面摩擦对变形抗力的影响,在端面添加石墨与机油混合物润滑。依据 300M 的锻造温度范围,试验选取变形温度为  $800 \sim 1200^\circ\text{C}$ ,每隔  $50^\circ\text{C}$  取一个实验点;变形速率为  $0.001, 0.01, 0.1 \text{ s}^{-1}$ ;变形程度为 60%。试样以  $10^\circ\text{C}/\text{s}$  的加热速率升温至  $1300^\circ\text{C}$  后保温 5 min,以保证奥氏体均匀化,然后以  $5^\circ\text{C}/\text{s}$  的冷却速率冷却到变形温度,保温 60 s 后进行压缩变形,变形结束后立即水淬。

## 1.2 流变应力模型

根据热压缩试验得到 300M 超高强钢的压力、位移、温度、时间等实验数据,经处理得到不同应变速率和不同温度下的应力—应变曲线如图 1 所示。



(a)  $\dot{\varepsilon} = 0.001 \text{ s}^{-1}$



(b)  $\dot{\varepsilon} = 0.01 \text{ s}^{-1}$

图 1 300M 超高强钢应力—应变曲线

Fig.1 300M ultra high strength steel stress-strain curves

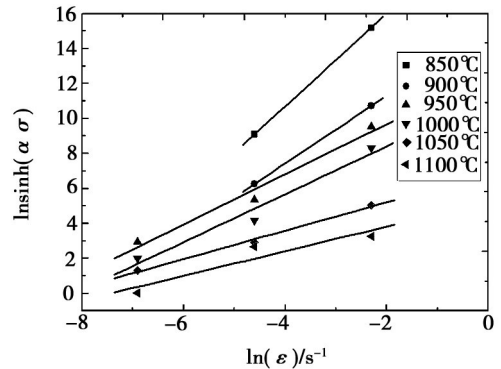
在高温塑性变形条件下,300M 超高强钢的流变应力和应变速率之间的关系可用 Sellars 和 Tegart 提出的包含变形激活能  $Q$  和温度  $T$  的双曲正弦形

式<sup>[10-11]</sup>描述:

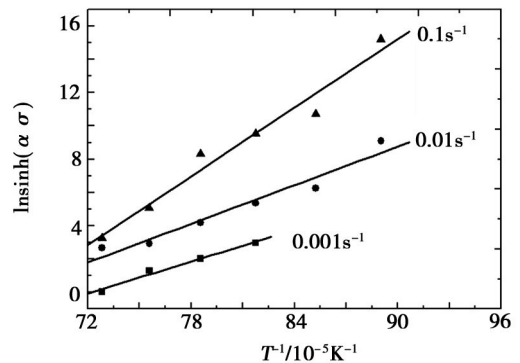
$$\dot{\varepsilon} = A [\sinh(\alpha\sigma)]^n \exp(-Q/RT) \quad (1)$$

式中,  $A$  为常数;  $Q$  为变形激活能;  $R$  为气体常数;  $\dot{\varepsilon}$  为应变速率;  $T$  为绝对温度,  $n$  是与温度无关的常数。

结合热压缩试验得到的数据绘制出  $\ln\sigma - \ln\dot{\varepsilon}$  和  $\sigma - \ln\dot{\varepsilon}$  曲线,通过线性回归的方法得到其直线斜率的平均值,从而求出  $\alpha = 0.05608 \text{ MPa}^{-1}$ 。根据得到的  $\alpha$  值,绘制  $\ln\sinh(\alpha\sigma) - \ln\dot{\varepsilon}$  曲线,如图 2(a) 所示。通过线性回归求出直线斜率平均值  $n = 1.02011$ 。图 2(b) 为流变应力随变形温度的变化情况,在相同应变速率条件下,流变应力的双曲正弦的对数项和温度的倒数之间满足线性关系,表明超高强钢高温变形时流变应力和温度之间满足 Sellars 和 Tegart 提出的包含变形激活能  $Q$  和温度  $T$  的双曲正弦形式。



(a) 应力—应变速率关系



(b) 应力—温度关系

图 2 系数回归曲线

Fig.2 Regression curves of coefficient

对图 2(b) 中数据进行线性回归分析,变换后可

以得到激活能  $Q = 393.804 \text{ kJ/mol}$ 。再根据  $\ln Z - \ln [\sinh(\alpha\sigma)]$  关系, 将  $\alpha, n$  及  $Q$  值代入(1)式, 对其进行线性回归, 得到  $A = 1.12908 \times 10^{12}$ 。

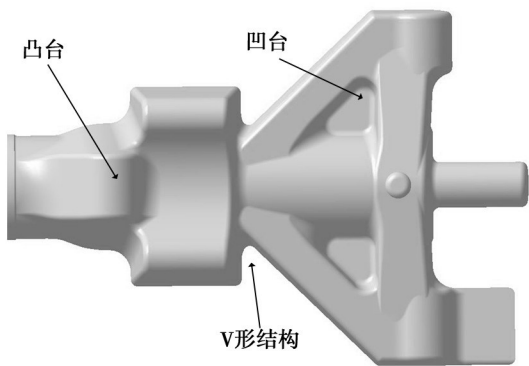
将所求得的材料常数代入式(1)中, 即可求得适用于 300M 超高强钢所有应力状态的流变应力模型:

$$\dot{\varepsilon} = 1.12908 \times 10^{12} [\sinh(0.05608\sigma)]^{1.0211} \cdot \exp\left(\frac{-393804}{RT}\right) \quad (2)$$

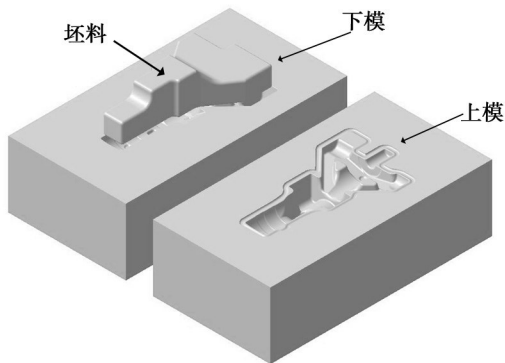
## 2 成型工艺仿真

### 2.1 仿真基本参数

利用 CATIA 三维造型软件完成锻件的三维造型, 如图 3(a) 所示, 锻件头部的凹台与后部的凸台通过腰部的 V 形结构连接, 结构复杂, 尺寸变化梯度大; 利用 DEFORM 3D 进行有限元锻造成型工艺模拟, 图 3(b) 为坯料与模具位置关系图。



(a) 锻件三维模型



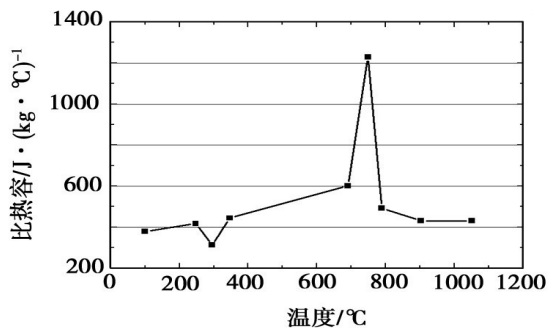
(b) 坯料-模具位置关系

图 3 三维模型

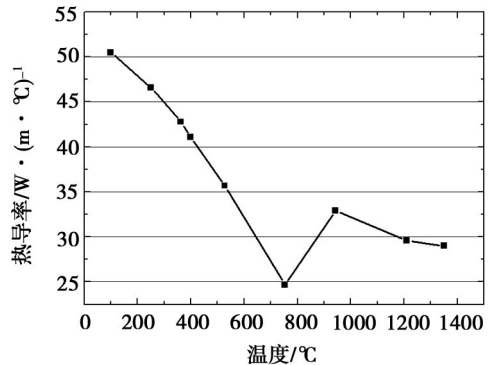
Fig. 3 Three dimensional model

坯料材料为 300M 超高强钢, 密度为  $7.85 \text{ g/cm}^3$ , 泊松比为 0.3, 弹性模量为 198 GPa, 辐射率为 0.6, 材料的应力模型为式(2)中所建立的流变应力模型, 材料的体积比热容和热传导率均随温度变化, 如图 4 所示。在锻造成型模拟中, 不考虑模具的变形, 模具材料属性设为刚体。利用 DEFORM 3D 软件自动划分网格功能对坯料进行网格划分, 坯料网格数为 220 000, 在计算过程中随时根据网格畸变情况进行

行重划分, 以保证计算的精度和收敛性。



(a) 比热容



(b) 热导率

图 4 材料参数

Fig. 4 Material parameters

根据现场工艺参数, 模具材料采用 5CrMnMo, 上模 109 t, 下模 117 t, 模具温度  $400^\circ\text{C}$ ; 第一火次运料时间 60 s, 第二、三火次运料时间 45 s; 锻件与空气发生换热, 换热系数  $0.018 \text{ N}/(\text{mm} \cdot \text{s} \cdot ^\circ\text{C})$ ; 锻件锻造温度区间  $850 \sim 1100^\circ\text{C}$ ; 锤锻机参能量  $E = 1 \text{ MJ}$ , 打击效率  $\eta = 0.8$ , 能量方案为第 1、2 锤轻打, 能量取 0.5 MJ, 第 3 锤之后满载重打, 能量取 1.0 MJ。

试锻采用一火成型, 经锤锻 30 锤后, 最大峰值载荷 1.07 GN, 欠压 16.77 mm, 锻件尚未成型, 锻件最低温度仅  $590^\circ\text{C}$ , 低于 300M 的最低成型温度, 故采取多火成型方案。本文对成型火次及坯料开锻温度进行优化, 拟定模锻仿真方案如表 2 所示。

表 2 锤锻仿真方案

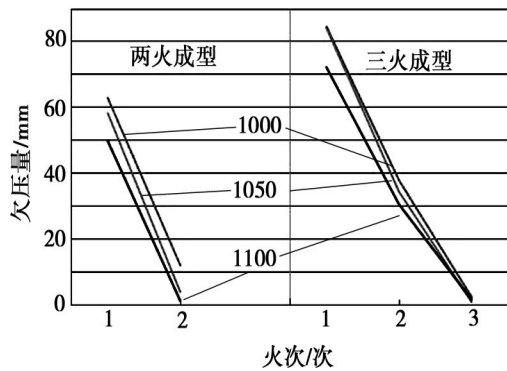
Tab. 2 Scheme for hammer forging simulation

仿真方案	成型火次	每火预设锤数	摩擦因数 (FR6) <sup>[12]</sup>	坯料开锻温度/ $^\circ\text{C}$
1	两火成型	14	0.08	1000/1050/1100
2	三火成型	10	0.08	1000/1050/1100

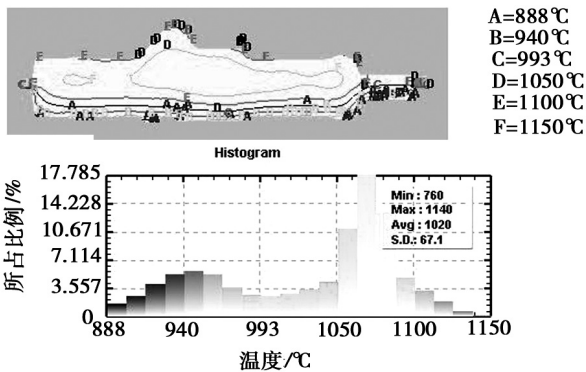
### 2.2 仿真结果与分析

图 5(a) 为两种锤锻火次的温度-欠压量曲线。可知, 随着温度增加, 变形抗力减小, 在设定锤数下, 欠压量减少; 仅两火成型方案中  $1000^\circ\text{C}$  开锻温度欠压量达 12.16 mm, 不符合要求, 其他锻造方案的欠压

量均在 5 mm 以下,锻件完全成型。初始温度 1 100℃ 时,锻件三火成型后欠压 1.53 mm,锻件充填完全,终锻件的填充情况及温度场如图 5(b) 所示。



(a) 温度—欠压量

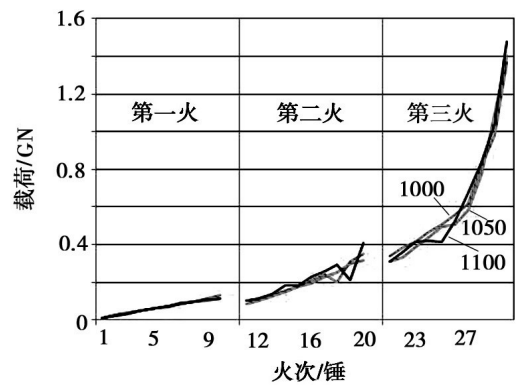


(b) 三火/1 100℃ 的充填及温度云图

图 5 锻件成型

Fig. 5 Forging forming

图 6 为不同开锻温度下成型峰值载荷的变化曲线。可知,高温坯料流动性好,充填完全,锻件变形速度快。两火成型时,从变形温度为 1 000℃ 的 988 MN 增加到变形温度为 1 100℃ 的 1.9 GN,增幅达到 93.9%。三火成型时,从变形温度为 1 000℃ 的 1.37 GN 增加到变形温度为 1 100℃ 的 1.48 GN,增幅仅 8%,这表明三火成型过程中锻件与锻造机械的相互作用随温度变化较小,锻件性能平稳,故选择三火成型方案。

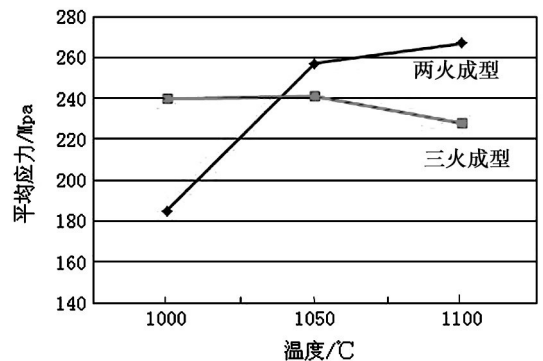


(b) 火次—峰值载荷(三火)

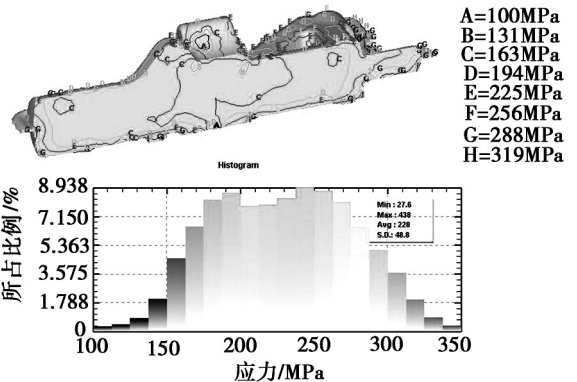
图 6 成型载荷

Fig. 6 Form load

图 7(a) 为不同开锻温度下,终锻件的等效应力分布。虽然 1 000℃ 时两火成型平均应力仅为 185 MPa,但锻件尚未成型,不符合要求。在锻件成型条件下,随着变形温度的升高,原子扩散能力增强,金属的塑性提高,等效应力明显降低,三火成型比两火成型应力小。综合考虑锻件等效应力水平及成型效果,选择 1 100℃/三火成型方案,图 7(b) 为 1 100℃/三火成型终锻件应力云图,终锻件等效应力 228 MPa。



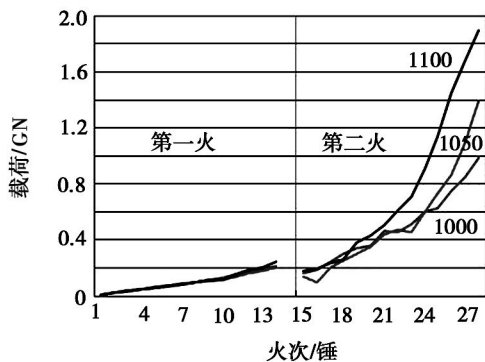
(a) 温度—平均等效应力



(b) 1 100℃ 的应力云图

图 7 锻件等效应力

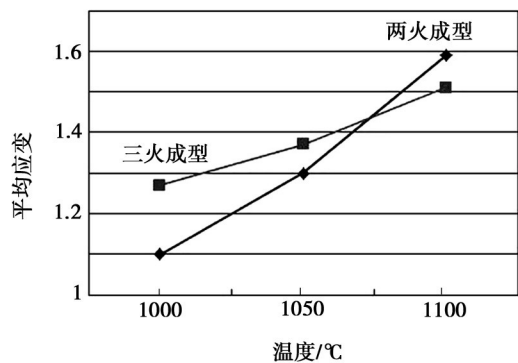
Fig. 7 Equivalent stress of forging



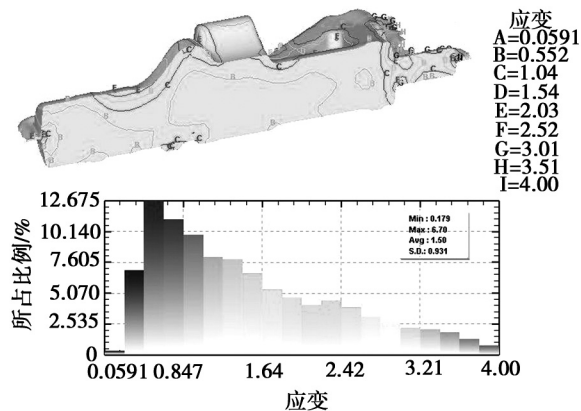
(a) 火次—峰值载荷(两火)

图 8(a) 为不同锻造火次下,终锻件等效应变分

布图,随着成型温度的增高,锻件的应变水平增高,在 1 100℃ 始锻温度下,两火成型与三火成型的平均应变相差较小,基于前文分析,选择 1 100℃/三火成型方案,终锻件等效应变 1.51。



(a) 温度—平均等效应变



(b) 1 100℃ 的应变云图

图 8 锻件等效应力

Fig. 8 Equivalent strain of forging

### 3 结论

(1) 通过热压缩实验研究了 300M 超高强钢在不同变形工艺条件下材料的流变特性,建立了 300M 超高强钢流变应力模型为

$$\dot{\epsilon} = 1.12908 \times 10^{12} [\sinh(0.05608\sigma)]^{1.0211} \cdot \exp\left(\frac{-393804}{RT}\right)$$

(2) 变形温度对锻件成型影响较大,适当增大变

形温度,可减小成型载荷,增强材料的流动性,使变形均匀,300M 超高强钢的适宜的锻造温度在 1 100℃ 左右;

(3) 300M 超高强钢起落架外筒模锻件在 1 100℃/三火成型时,终锻件平均应力 228 MPa,平均应变 1.51,为起落架外筒模锻件锤锻生产工艺提供技术参考。

### 参考文献

- [1] 王磊,费敬银,辛文利. 飞机起落架应力腐蚀断裂及预防措施[J]. 材料热处理技术, 2011,40(4): 186-189
- [2] 邓春明,周克崧,刘敏,等. 300M 钢超音速火焰喷涂 WC 涂层的抗冲击性能[J]. 机械工人, 2007(5): 31-33
- [3] Jame M D, Paul M N. Tech spotlight air-fame and landing gear alloy [J]. Advanced Materials and Processes, 1999, 17(3):23-25
- [4] 陈锦东. 飞机起落架关键部位疲劳寿命仿真及其预测系统开发[D]. 南京:南京航空航天大学,2009:1-8
- [5] 刘美娟. 飞机起落架 300 M 钢轮轴加工工艺研究[J]. 制造技术与机床,2009(10):115-116
- [6] Zhang S S, Li M Q, Liu Y G, et al. The growth behavior of austenite grain in the heating process of 300M steel [J]. Materials Science and Engineering, 2011, 528:4967-4968
- [7] Grac M L A, Hoo C Y, Silva O M M, et al. Failure analysis of a 300M steel pressure vessel [J]. Engineering Failure Analysis, 2009 (16):182-184
- [8] 赵振业,宋德玉,李向斌,等. 一种超高强钢构件抗疲劳实验研究[J]. 中国工程科学,2005,7(10):51-55
- [9] 赵振业,赵英涛,何鲁林,等. 先进飞机结构材料的发展[J]. 材料工程,1995(1):4-11
- [10] 易幼平,杨积慧,蔺永诚. 7050 铝合金热压缩变形的流变应力本构方程[J]. 材料工程,2007(4):20-22
- [11] Shi H, McLaren A J, Sellars C M, et al. Constitutive equations for high temperature flow stress of aluminums alloys [J]. Materials Science and Engineering, 1997,13:210-216
- [12] 杨久强,涂光纯. TC4 气瓶模锻技术[J]. 锻压技术,1995(5):11-12

(编辑 任涛)