

花键轴增量式滚轧成形工艺的分流方式及温度效应研究

李泳峰, 赵升吨, 范淑琴, 孙振宇
(西安交通大学机械工程学院, 710049, 西安)

摘要: 为了降低花键轴增量式滚轧成形工艺中工件初始直径对滚轧载荷和齿形填充质量的负面影响, 根据分流锻造思想提出了一种齿顶分流方式, 分析了温度效应对滚轧载荷和齿形填充质量的影响, 并通过 DEFORM-3D 有限元软件对该分流方式进行了数值分析验证. 研究表明: 在校正滚轧阶段, 齿顶分流方式的应用使得花键轴增量式滚轧成形工艺中滚轧载荷最大值平均下降了约 60%, 并降低了工件初始直径对花键轴齿形填充质量和齿距累计误差的影响. 工件材料在 400、800、1 000 °C (相对室温 20 °C) 时, 温度效应使得最大滚轧载荷分别平均下降了约 20%、67%、80%, 并且明显提高了齿形处工件材料的填充质量.

关键词: 花键轴; 增量式滚轧; 齿顶分流方式; 温度效应

中图分类号: TG306; TG302 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2012)09-0060-06

Research on Divided Flow Method and Temperature Effect of the Incremental Rolling Forming Process for Spline Shaft

LI Yongyi, ZHAO Shengdun, FAN Shuqin, SUN Zhenyu
(School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: To reduce the negative effect of initial workpiece diameter on the rolling load and tooth filling quality, a tooth divided flow method is put forward according to the thought of divided flow forging, and the relevant numerical analysis and verification are conducted with DEFORM-3D. Furthermore, the temperature effect on the rolling load and tooth filling quality is investigated. The results show that after the tooth divided flow method is applied, the maximum rolling load during calibrating phase can be lowered by 60% averagely, the tooth filling quality and pitch cumulative error can be improved obviously. Due to the temperature effect, the maximum rolling load is reduced by 20%, 67% and 80% respectively under 400 °C, 800 °C and 1 000 °C compared with the case under material temperature of 20 °C, and also the tooth filling quality is improved.

Keywords: spline shaft; incremental rolling; tooth divided flow method; temperature effect

花键联接由于联接强度高、结构紧凑、可靠性高、装卸方便等诸多优点而被广泛应用于众多机械行业, 例如汽车、航天航空、拖拉机、船舶、机床、工程机械等工业, 特别是对于汽车工业, 在一辆普通的汽

车上约有 30 个花键轴零件, 通常用在离合器、减速器、传动总成、转向总成等位置^[1-2]. 因此, 增量式滚轧成形作为一种重要的花键轴塑性成形工艺, 不仅符合汽车轻量化的生产目标, 而且具有齿形表层材

料组织的密度大、有残余压应力、抗疲劳强度高、表面光滑等优点^[3-4]. Zhang 等人^[5]根据应力的滑移线场理论,解决了滚轧过程中接触面上的单位平均压力,并通过有限元方法验证了滚轧力和滚轧运动的计算公式. 王明福等人^[6]基于刚塑性材料模型,分析了整个花键轴冷滚轧的成形过程,并获得了滚轧力-行程、等效应力和等效应变的分布情况. 可以看出,目前对于花键轴增量式滚轧成形工艺,主要以基础研究为主,而对该传统工艺的创新及改进研究,将为解决花键轴零件庞大的需求量提供有效的途径.

本文为了降低花键轴增量式滚轧成形工艺中工件初始直径对滚轧载荷和齿形填充质量的负面影响,根据分流锻造思想提出了一种齿顶分流方式,基于 Johnson-Cook (J-C) 材料模型,通过 DEFORM-3D 有限元软件,对该分流方式进行了数值分析验证,为进一步的工艺试验提供了理论依据.

1 花键轴增量式滚轧成形工艺

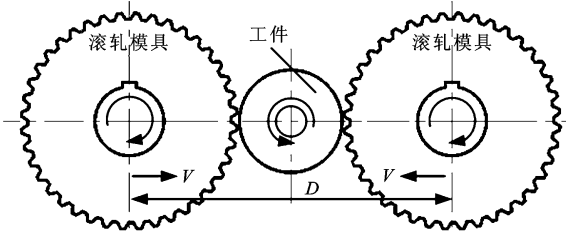
目前,在花键轴增量式滚轧成形工艺中,主要采用圆形滚轧模具和平板形滚轧模具,如图 1 所示. 其中在图 1a 中的滚轧模具中心距 D 是可变的,滚轧模具在转动的同时以一定速度 V 朝工件径向进给. 利用滚轧模具与工件间的摩擦力实现啮合对滚,并连续压入工件材料使齿形逐渐增高而形成花键轴. 图 1b 中将 D 固定,由滚轧模具上逐渐增高的齿连续压入工件材料,使齿形逐渐增高形成花键轴^[4-7]. 如图 1c 所示,将工件置于以 V 作平行交错运动的上、下平板形滚轧模具间,在摩擦力作用下滚轧模具带动工件滚动,滚轧模具上逐渐增高的齿连续压入工件材料,使齿形逐渐增高而形成花键轴^[4,8].

在花键轴增量式滚轧工艺中,由于图 1a 的方式需要径向进给,工艺系统相对复杂,因此本文主要针对图 1b、图 1c 的滚轧方式进行研究. 图 1b、图 1c 方式具有生产效率高、花键轴尺寸精度高等优点,但图 1c 的方式不适合加工尺寸较大的花键轴零件^[4].

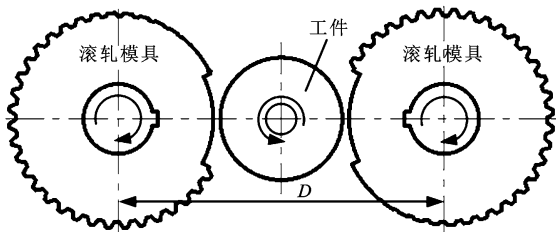
2 花键轴增量式滚轧成形过程及分流方式的分析

以平板形滚轧模具的滚轧方式为例,花键轴增量式滚轧成形过程分为 3 个阶段:①图 2a 为初始滚轧阶段,滚轧模具齿顶接触工件初始圆周;②图 2b 为增量滚轧阶段,滚轧模具上的齿形连续压入工件材料,使工件上的齿形逐渐增高;③图 2c 为校正滚

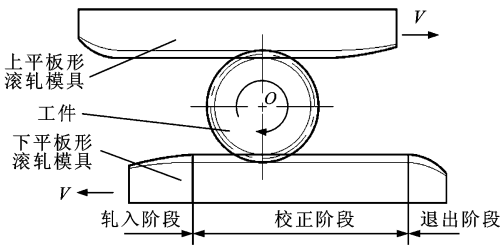
轧阶段,工件上的齿高达到了理论高度,它与滚轧模具实现啮合对滚,继续提高齿形填充质量和表面精度^[9]. 可以看出,工件初始直径太小会造成花键轴齿形填充不够饱满而不符合使用要求,但直径过大则会造成工件材料富余,影响齿距累计误差,使增量滚轧阶段后期和校正滚轧阶段的滚轧载荷过大,造成设备损坏. 因此,采用齿顶分流方式,可以降低工件初始直径的负面影响.



(a) 圆形滚轧模具的径向进给方式

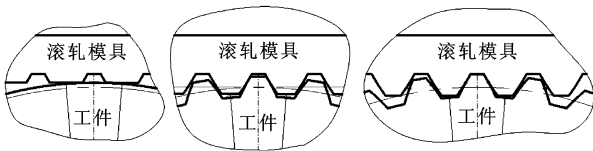


(b) 圆形滚轧模具的径向固定方式



(c) 平板形滚轧模具的滚轧方式

图 1 花键轴增量式滚轧成形工艺示意图

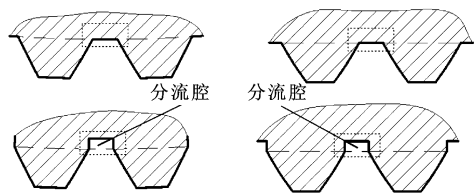


(a) 初始滚轧阶段 (b) 增量滚轧阶段 (c) 校正滚轧阶段

图 2 花键轴增量式滚轧成形过程示意图

在锻造工艺中,齿顶分流思想可用于降低成形载荷、提高齿轮角隅的填充质量^[10-11],而本文提出的齿顶分流方式则根据分流锻造的思想,在滚轧模具

齿槽的齿根圆处,即花键轴齿形最难填充的位置,设置分流腔,使工件材料进入滚轧模具齿槽后,始终有自由流动的余地.特别是在增量滚轧阶段后期,花键轴齿形即将完成成形时,多余的工件材料将超出花键轴齿顶圆,进入齿顶分流腔,从而避免了由滚轧模具齿槽底部堵塞造成的滚轧载荷急剧上升,以及对齿距累计误差的影响.当花键轴滚轧完成后,通过车削或磨削去除进入分流腔的多余工件材料,即可达到正常使用要求.滚轧模具齿顶分流腔如图3所示,分流腔形状设置为矩形,可避免材料进入分流腔后与分流腔表面接触,使得滚轧载荷下降更为明显.



(a)圆形滚轧模具 (b)平板形滚轧模具

图3 滚轧模具分流腔示意图

3 花键轴增量式滚轧成形工艺齿顶分流方式的数值分析

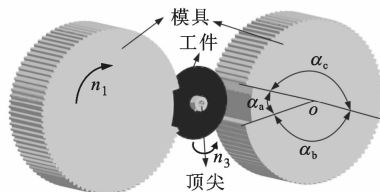
DEFORM-3D 有限元分析软件是一套基于有限元的工艺仿真系统,用于分析金属成形及其相关工业的各种成形工艺和热处理工艺^[12]. 本文以 DEFORM-3D 有限元分析软件为平台,对花键轴增量式滚轧成形工艺的齿顶分流方式、温度效应进行了研究.

3.1 模型描述

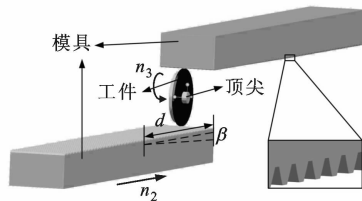
本文数值分析的模型由三维建模软件 Pro/E 构造,并通过 STL 格式文件输入到有限元分析软件中. 工件及其成形花键轴的参数如下:工件初始直径 Φ 为 50.13 mm,齿数为 40,模数为 1.25 mm,压力角为 30° ,变位系数为 0.312 5 mm,齿顶圆直径为 51.75 mm,齿根圆直径为 48.7 mm. 如图4所示,滚轧模具齿形参数均与花键轴齿形参数一致,其中图4a中的滚轧模具齿数为 90, α_a 为 28° , α_b 为 146° , α_c 为 186° . 图4b中 d 为 100 mm, β 为 0.3° ,增量滚轧段齿数为 50.

3.2 非线性材料模型

在花键滚轧成形过程中,由于工件材料的应变和应变率较高,因此不能忽略它的非线性特性,并且在成形中应变、应变率硬化,以及温度的软化作用都



(a)圆形滚轧模具的滚轧方式



(b)平板形滚轧模具的滚轧方式

$\alpha_a, \alpha_b, \alpha_c$: 分别为缺口段、增量滚轧段、校正滚轧段的角度;

β : 增量滚轧段的倾角; d : 增量滚轧段长度; n_1, n_2 : 滚轧

模具的转速、移动速度; n_3 : 工件转速

图4 花键轴增量式滚轧成形工艺的有限元模型

会对成形造成很大的影响. 在花键轴增量式滚轧成形工艺中,选用 Johnson-Cook 刚塑性本构模型,工件材料的流动应力为

$$\sigma_y(\epsilon, \dot{\epsilon}, T) =$$

$$(A + B\epsilon^n) \left[1 + C \ln\left(\frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0}\right) \right] \left[1 - \left(\frac{T - T_r}{T_m - T_r} \right)^M \right]$$

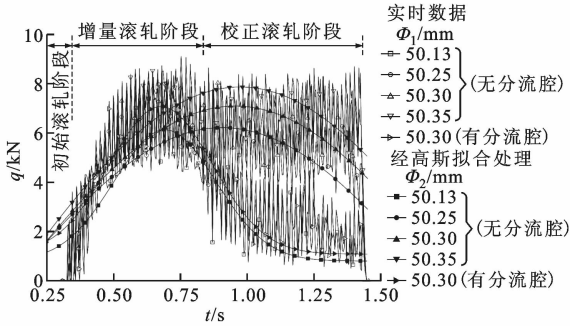
式中: $A, B, n, C, \dot{\epsilon}_0, M$ 均为材料模型的参数; ϵ 为材料的应变变量; $\dot{\epsilon}$ 为材料的应变速率; T 为材料温度; T_r 为室温; T_m 为材料熔化温度^[12]. 将 42CrMo 高强度钢作为齿轮、花键、连杆等零件的原料,其质量分数^[13]为: $w(C) = 0.38\% \sim 0.45\%$; $w(Si) = 0.17\% \sim 0.37\%$; $w(Mn) = 0.5\% \sim 0.8\%$; $w(Cr) = 0.9\% \sim 1.2\%$; $w(Mo) = 0.15\% \sim 0.25\%$; $w(S) < 0.04\%$; $w(P) < 0.04\%$; $w(Cu) < 0.03\%$.

3.3 齿顶分流方式的数值分析及工艺参数

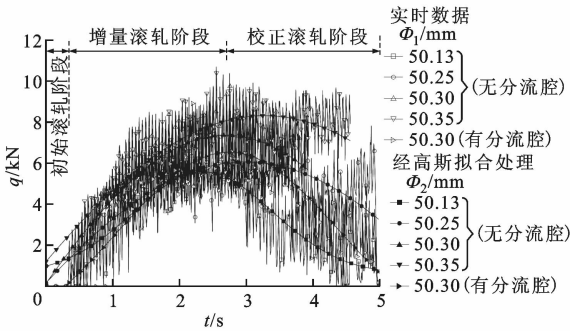
为了提高数值的计算效率,对工艺环境及参数进行了部分假设:①采用刚塑性材料模型,变形过程中工件材料为各向同性,并忽略包申格效应,且没有断裂现象,不考虑材料的弹性回弹量^[14];②忽略工件自身重力、惯性力的影响,以及变形过程中工件材料的轴向变形和移动,取工件轴向长度为 2 mm;③定义环境温度为 20°C ;④分析过程中采用剪切摩擦模型,摩擦系数根据钢模冷成形推荐值^[13],取 0.12;⑤将滚轧模具设置为刚体. n_1, n_2 分别设为 40 r/min、90 r/min;图4b中将 n_2 设为 78.54 mm/s, n_3 设为 30 r/min.

3.4 结果比较与分析

在不同工件初始直径下,将齿顶分流方式对滚轧载荷的影响进行了分析.如图 5 所示,在增量滚轧阶段, Φ 对滚轧载荷 q 的影响不大,在校正滚轧阶段, q 随着 Φ 的增大而增大. $\Phi=50.30$ mm(有分流腔)时相对 $\Phi=50.13$ mm(无分流腔) q 明显下降,且与 $\Phi=50.13$ mm(无分流腔)时的 q 基本相等.在图 5a 的校正滚轧阶段,滚轧载荷的最大值下降了约 70%,在图 5b 的校正滚轧阶段,滚轧载荷的最大值下降了约 57%.可见,齿顶分流方式可大大降低 Φ 增大后的 q ,且圆形滚轧模具的减载效果更加明显.



(a)圆形滚轧模具的滚轧方式



(b)平板形滚轧模具的滚轧方式

图 5 不同工件初始直径下齿顶分流方式对滚轧载荷的影响

从图 6a、6e 的虚线框中可以看出, $\Phi=50.13$ mm 时齿形未能完全成形,随着 Φ 的增大,如图 6b、图 6c、图 6f、图 6g,虽然花键轴成形齿形的完整性提高了,但多余的工件材料将影响成形花键轴齿距的累计误差.在滚轧模具上设置分流腔后,如图 6d、图 6h 的虚线框,花键轴齿形完全成形后,多余的工件材料进入分流腔,既保证了齿形的完整性,也克服了多余工件材料对齿距累计误差的负面影响.因此,齿顶分流方式在花键轴增量式滚轧成形工艺中的作用显著,可使滚轧载荷明显下降,同时还降低了 Φ 对齿形填充质量及齿距累计误差的影响.

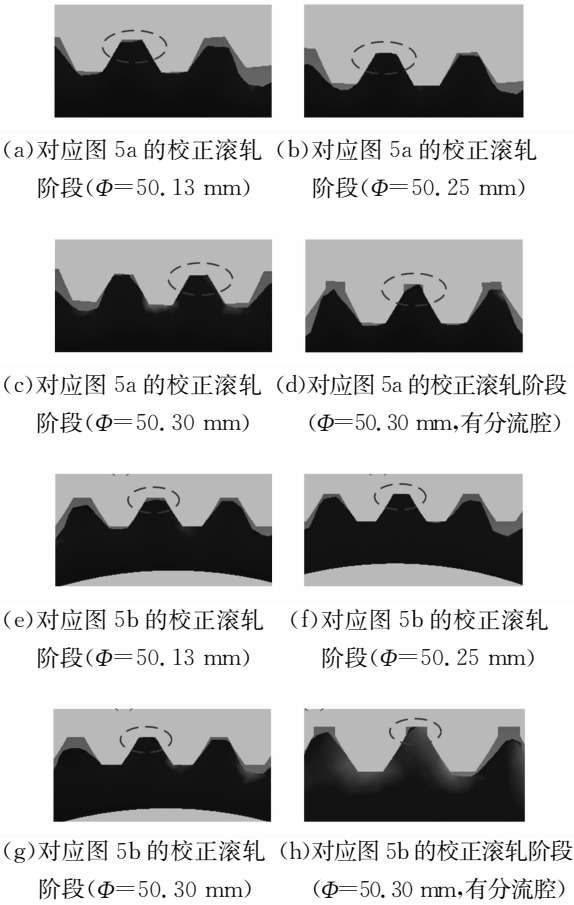


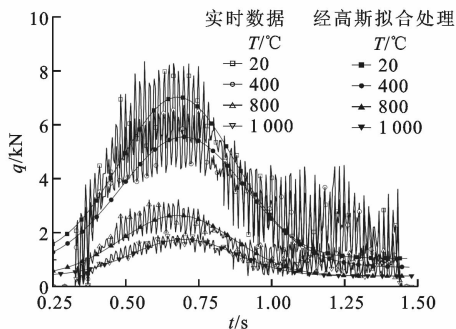
图 6 不同工件初始直径下齿顶分流方式对齿形填充的影响

4 花键轴增量式滚轧成形工艺的温度效应

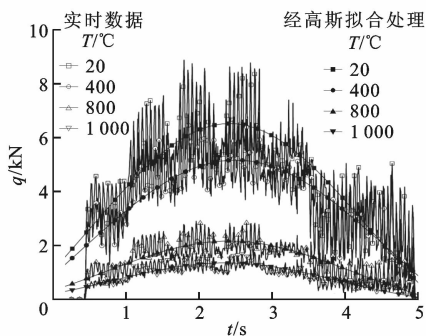
花键轴增量式滚轧成形工艺是基于金属塑性成形原理,利用金属在常温下具有一定塑性的特点,通过滚轧模具的作用使花键轴成形^[4]的.由于工件材料属于高强度钢,因此存在着常温下滚轧载荷较大和齿形填充不饱满等缺点.温度效应的作用使工件材料的流动应力随温度的升高而下降,当温度为 1 000 ℃(相对室温 20 ℃)时,工件材料的流动应力下降了约 600 MPa,因此温度效应有利于提高材料在成形过程中的流动能力^[12].在花键轴增量式滚轧成形工艺及齿顶分流方式的基础上,分析了工件材料在 20、400、800 和 1 000 ℃下对滚轧载荷和齿形填充的影响,为该工艺的实际应用提供了一定的参考依据.

如图 7 所示,温度效应对花键轴增量式滚轧成形工艺中滚轧载荷的影响十分明显,随着工件材料温度的升高滚轧载荷明显下降.在图 7a 中,工件材料在 400、800 和 1 000 ℃(相对室温 20 ℃)时,滚轧

载荷的最大值分别下降了约21%、65%、79%。在图7b中,工件材料在400、800和1 000℃(相对室温20℃)时,滚轧载荷的最大值分别下降了约22%、70%和82%。



(a)圆形滚轧模具的滚轧方式



(b)平板形滚轧模具的滚轧方式

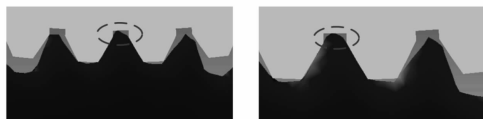
图7 温度效应对花键轴增量式滚轧成形工艺中滚轧载荷的影响

从图8的虚线框中可以看出,齿形处的工件材料均流入滚轧模具的分流腔中,花键轴齿形均能完整成形,并且随着工件材料温度的升高,齿形顶部的形状更加光滑,说明材料的流动能力和齿形的填充能力增强,齿形组织更加均匀。因此,温度效应在花键轴增量式滚轧成形工艺中减载和提高齿形填充质量的效果十分明显。在实际工艺中,选择材料温度时应综合考虑温度效应对工艺减载、提高齿形填充能力的积极作用,以及花键轴工件的高温氧化、成形精度下降和后续热处理的负面影响。

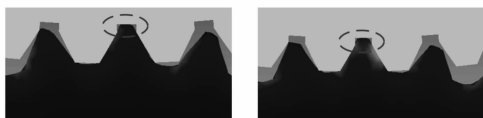
5 结 论

(1)本文在花键轴增量式滚轧成形工艺中采用齿顶分流方式,用于降低工件初始直径对滚轧载荷、齿形填充质量及齿距累计误差的负面影响。其中,在圆形滚轧模具的滚轧方式中,最大滚轧载荷下降了约70%,在平板形滚轧模具滚轧方式中,最大滚轧载荷下降了约57%,从而提高了齿形处工件材料的

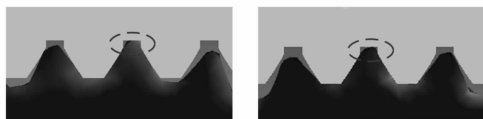
填充质量。



(a)对应图5a的校正滚轧阶段($T=20\text{ }^{\circ}\text{C}$) (b)对应图5a的校正滚轧阶段($T=400\text{ }^{\circ}\text{C}$)



(c)对应图5a的校正滚轧阶段($T=800\text{ }^{\circ}\text{C}$) (d)对应图5a的校正滚轧阶段($T=1\text{ }000\text{ }^{\circ}\text{C}$)



(e)对应图5b的校正滚轧阶段($T=20\text{ }^{\circ}\text{C}$) (f)对应图5b的校正滚轧阶段($T=400\text{ }^{\circ}\text{C}$)



(g)对应图5b的校正滚轧阶段($T=800\text{ }^{\circ}\text{C}$) (h)对应图5b的校正滚轧阶段($T=1\text{ }000\text{ }^{\circ}\text{C}$)

图8 温度效应对花键轴增量式滚轧成形工艺中齿形填充的影响

(2)本文通过对花键轴增量式滚轧成形工艺中温度效应的研究表明,温度效应对工艺减载、提高齿形处工件材料的填充质量效果十分明显。在圆形滚轧模具的滚轧方式中,工件材料在400、800和1 000℃(相对室温20℃)时的最大滚轧载荷分别下降了约21%、65%和79%。在平板形滚轧模具的滚轧方式中,工件材料在400、800和1 000℃(相对室温20℃)时的最大滚轧载荷分别下降了约22%、70%和82%。

参考文献:

- [1] 关文达. 汽车构造 [M]. 3版. 北京: 机械工业出版社, 2010: 224-427.
- [2] CHILDS P R N. Mechanical Design [M]. 2nd ed. Oxford, UK: Elsevier Butterworth-Heinemann, 2004: 79-101.
- [3] KLEPIKOV V V, BODROV A N. Precise shaping of splined shafts in automobile manufacturing [J]. Russian Engineering Research, 2003, 23(12): 37-40.

- [4] 崔凤奎,李言,李春梅.渐开线花键加工方法进展[J]. 矿山机械, 2007, 35(2): 116-119.
CUI Fengkui, LI Yan, LI Chunmei. The fabricating methods of cold rolling for involute spline shafts [J]. Mining & Processing Equipment, 2007, 35 (2): 116-119.
- [5] ZHANG Dawei, LI Yongtang, FU Jianhua, et al. Mechanics analysis on precise forming process of external spline cold rolling [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2007, 20(3): 54-58.
- [6] 王明福,付建华,刘志奇,等.花键冷滚压成形过程有限元分析[J]. 锻压技术, 2010, 35(4): 155-159.
WANG Mingfu, FU Jianhua, LIU Zhiqi, et al. Finite element analysis of spline cold roll forming process [J]. Forging & Stamping Technology, 2010, 35(4): 155-159.
- [7] 刘志奇,宋建丽,李永堂,等.渐开线花键冷滚压精密成形工艺分析及试验研究[J]. 机械工程学报, 2011, 47(14): 32-38.
LIU Zhiqi, SONG Jianli, LI Yongtang, et al. Analysis and experimental study on the precision cold rolling process of involute spline [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47(14): 32-38.
- [8] 顾科建,彭晓南,刘飞.基于 ANSYS 渐开线花键冷搓成形的数值模拟[J]. 河南科技大学学报: 自然科学版, 2008, 29(2): 20-24.
GU Kejian, PENG Xiaonan, LIU Fei. Numerical simulation of cold roll forming of involute spline by ANSYS [J]. Journal of Henan University of Science and Technology: Natural Science, 2008, 29(2): 20-24.
- [9] NEUGEBAUER R, PUTZ M, HELLFRITZSCH U. Improved process design and quality for gear manufacturing with flat and round rolling [J]. Annals of the CIRP, 2007, 56(1): 307-312.
- [10] KONDO K, OHGA K. Precision cold die forging of a ring gear by divided flow method [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 1995, 35(8): 1105-1113.
- [11] 寇淑清,杨慎华,黄良驹,等.用约束分流法冷锻成形高精度直齿圆柱齿轮[J]. 吉林工业大学学报: 自然科学版, 2004, 30(2): 19-23.
KOU Shuqing, YANG Shenhua, HUANG Liangju, et al. The applications of constrained divided-flow technique to cold precision forging spur gears [J]. Journal of Jilin University of Technology: Natural Science, 2004, 30(2): 19-23.
- [12] FLUHRER J. DEFORMTM-3D version 6.0 user's manual [M]. Columbus, USA: Scientific Forming Technologies Corporation, 2006.
- [13] LIN Yongcheng, CHEN Mingsong, ZHONG Jue. Effect of temperature and strain rate on the compressive deformation behavior of 42CrMo steel [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2008, 205(1/3): 308-315.
- [14] WARRINGTON C, KAPOOR S, DEVOR R. Finite element modeling for tap design improvement in form tapping [J]. ASME Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2006, 128(1): 65-73.

[本刊相关文献链接]

- 内啮合摆线转子压缩机型线连续性条件研究. 2009, 43(1): 34-37.
- 气压熔融挤压快速成形材料及成形工艺研究. 2010, 44(1): 100-104.
- 不同压力下 Ti_3SiC_2 陶瓷的干摩擦磨损性能研究. 2011, 45(2): 121-124.
- 43" 汽轮机叶片材料热变形行为及制坯工艺参数优化. 2011, 45(1): 94-98.
- 自润滑活塞环的热胀失效研究. 2011, 45(5): 90-93.
- 尺寸效应对纳米银杆拉伸力学特性的影响. 2006, 40(1): 101-105.
- 轧机机架参数敏感性分析及顺序优化的研究. 2008, 42(1): 1-4.
- 相关衰落多输入多输出系统的参数化信道估计. 2007, 41(12): 1431-1435.
- 面向缩聚模型的结构损伤识别研究. 2011, 45(9): 101-107.

(编辑 管咏梅)