

Ni-Cr-W-Mo 合金异型件热旋成形的质量分析

安震¹, 李金山¹, 胡锐¹, 唐斌¹, 王健², 姚草根²

1. 西北工业大学凝固技术国家重点实验室, 西安 710072
2. 航天材料及工艺研究所, 北京 100076

摘要 基于 ABAQUS 软件的 Explicit/Standard 模块建立了 Ni-Cr-W-Mo 合金异型件热旋成形的多道次热力耦合三维有限元模型, 研究了 Ni-Cr-W-Mo 合金异型件热旋成形过程中的应力应变场的分布以及成形规律和常见缺陷。结果表明, 考虑到缺陷的形成以及成形道次尽可能减少等因素, 旋压间隙应大于 3.7mm; 此外, 工件在靠近中心轴的部分贴模性非常好, 但越靠近工件口部, 不贴模的趋势越明显。

关键词 高温合金; 热旋成形; 回弹; 数值模拟

中图分类号 TG302

文献标识码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2012.03.003

Forming Quality of Heat Spinning for the Ni-Cr-W-Mo Superalloy Workpiece with Strange Shape

AN Zhen¹, LI Jinshan¹, HU Rui¹, TANG Bin¹, WANG Jian², YAO Caogen²

1. State Key Laboratory of Solidification Processing, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China
2. Aerospace Research Institute of Materials & Processing Technology, Beijing 100076, China

Abstract Based on the Explicit/Standard modules of software ABAQUS, a 3D finite element model of Ni-Cr-W-Mo superalloy workpiece with strange shape multi-pass is built. The distribution and variation features of stress-strain, hot spinning regular pattern, and common defects are investigated in the forming process for the Ni-Cr-W-Mo superalloy workpiece with strange shape. The results show that by taking some factors, such as the defects forming, minimizing forming pass, etc into account, the spinning gap should be bigger than 3.7mm. The gap between blank and mandrel is quite small at the region near the central axis, however, the gap near the oral part of workpiece increases enormously.

Keywords superalloy; heat spinning forming; springback; numerical simulation

0 引言

多道次复合旋压成形技术是提高工件成形极限和质量的一种首选加工方式^[1-2]。Ni-Cr-W-Mo 合金异型件热旋成形是一个同时包括边界条件非线性、材料非线性、几何非线性的多物理场复杂耦合过程, 易出现拉裂、起皱、金属堆积、减薄过度等常见缺陷。近年来, 随着数值仿真和计算机技术的不断发展, 将计算机技术和旋压技术相结合, 进而模拟工件的成形过程, 对实际加工过程进行更加透彻的研究, 并加工

出质量高、壁层薄、尺寸大的零件是旋压技术的发展方向^[3-4]。

Ni-Cr-W 系固溶强化合金是一种能在 900—1100℃ 高温环境下长期使用的一类难变形高温合金, 是制作航天航空尾喷管、热交换管等关键部件的材料, 服役条件极为严酷, 难以用常规成形方法加工成薄壁回转件, 热旋成形技术是解决此类问题的方法之一, 所以有必要对该合金的塑性加工过程进行研究。

目前, 国内外学者对旋压成形模拟仿真技术和实验的研

收稿日期: 2011-12-05; 修回日期: 2012-01-06

基金项目: 国家自然科学基金项目(51171150); 凝固技术国家重点实验室自主研究课题(62-TP-2011)

作者简介: 安震, 博士研究生, 研究方向为先进材料塑性加工及仿真技术, 电子信箱: anzhen1016@163.com; 胡锐(通信作者), 教授, 研究方向为稀有金属材料与加工, 电子信箱: rhu@nwpu.edu.cn

究,包括有限元模型的建立和工艺参数的优选等方面,文献[5]利用统计工具,得到了圆柱杯形件在旋压成形过程中影响最为显著的因素,并就这些因素对成形的影响规律进行分析,结果显示,进给比、旋轮间隙、圆角半径等对于工件平均壁厚、壁厚均匀性以及工件的回弹具有重要影响,使用优选后的工艺参数旋制的工件,平均壁厚、壁厚均匀性以及回弹等质量指标提高了约 22%;李虎等^[9]采用 ABAQUS/Explicit 平台建立了钛合金锥形件局部加热的三维有限元模型。然而在多道次热力耦合有限元模型方面,特别是针对难变形高温合金材料以及异型件的多道次热旋成形方面的研究,报道还很少。

本文在第一道次热旋成形的基础上,建立 Ni-Cr-W-Mo 合金异型件热旋成形后续道次的三维有限元模型,并研究应力场的分布、材料不均匀变形规律、回弹及退火对成形规律的影响以及缺陷的形成,为保障工件成形质量、优选工艺参数提供理论依据。

1 有限元模型的建立和可靠性验证

1.1 有限元模型的建立

Ni-Cr-W-Mo 合金异型件热旋成形的实体单元仿真模型如图 1 所示,后续道次的仿真模型是在前一道次热旋成形结果的基础上,建立第二道次热旋成形模型。第一道次的模拟结果经过回弹分析后,如图 2(a)所示,弹性部分的应力消失,将旋轮重新定位,然后将回弹后的结果以初始条件的形式加载到第二道次成形的毛坯上,模型重新装配校正。在后续道次热旋成形前需要对坯料进行去应力退火,如图 2(b)所示,退火后材料的残余应力消失。由于该模型计算过程复杂,如果不采用质量放大加快计算速度的话,所需时间难以接受。为了兼顾计算效率和保证模拟结果的计算精度,后续道次热旋成形与第一道次一样采用质量放大和网格自适应技术,质量放大因子为 2000。

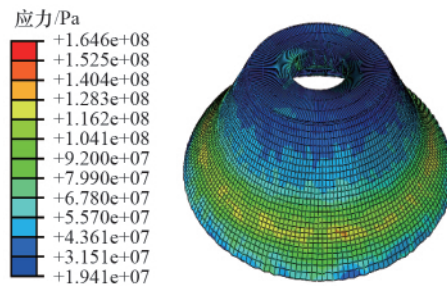


图 1 热旋成形仿真模型

Fig. 1 3D simulation model for hot spinning

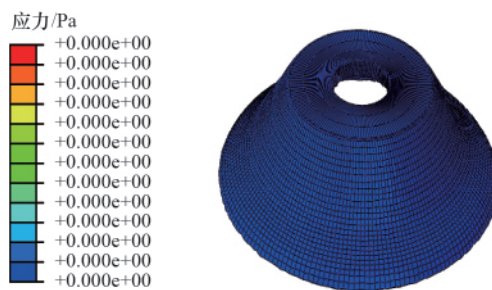
1.2 可靠性验证

验证模型可靠性可以利用软件本身的功能。对于金属成形问题,采用动力学显式算法(Explicit)进行模拟时,如果模拟是准静态的,那么外力所做功几乎等于系统内部的能量。从图 3^[7]可以看出,在成形大部分时间内动能与内能的比值小于 10%,说明结果是一个可接受的准静态解,采用的质量放大因子可以接受,理论上表明该模型是可靠的^[8]。



(a) 退火前

(a) Before annealing



(b) 退火后

(b) After annealing

图 2 Ni-Cr-W-Mo 合金异型件热旋成形第一道次结束时退火后应力分布

Fig. 2 Stress distribution of Ni-Cr-W-Mo superalloy workpiece with strange shape after first annealing

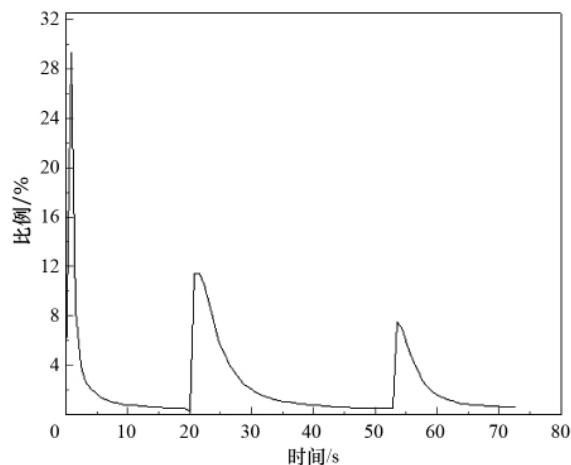


图 3 动能与内能之比

Fig. 3 Kinetic energy to internal energy ratio

2 研究方案与仿真条件

本文研究的是西北工业大学开发的一种新型 Ni-Cr-W-Mo 固溶强化型高温合金^[9-10],第一道次热旋成形工艺参数见文献[7]。为了研究该合金成形过程中的缺陷及工艺参数的影响,在第一道次优选工艺参数后的模拟结果基础上,将回弹计算的结果作为第二道次热旋成形的初始条件,第二道次工艺参数如表 1 所示。

表 1 第二道次热旋模拟基本参数

Table 1 Basic parameters of second around hot spinning simulation

基本参数名称	基本参数值
安装角/(°)	45
进给比/(mm·r ⁻¹)	0.8
旋压间隙/mm	4
圆角半径/mm	8
芯模转速/(rad·s ⁻¹)	1.5π

3 结果与讨论

3.1 第一道次应力应变分布

3.1.1 第一道次最大主应力分布

从图 4 可以看出,坯料与旋轮接触的前方,有一个蓝色

三向压应力区,坯料和旋轮接触的区域和该区域的后方受到的是红色的拉应力,在成形初期蓝色的三向压应力区很小,呈球状,随着旋压的进行该蓝色区域变得细长,到了成形后期,三向压应力区又变小,最终消失,这是因为旋轮的前方坯料的减少。最大主应力 σ_1 的极大值也在逐渐上升,但中间也有波动,红色区域是以拉应力为主的应力集中的区域,拉伸应力会促进材料的晶间变形,加速晶界的破坏,但不易起皱。

3.1.2 最小主应力分布

从图 5 可以看出,坯料与旋轮接触的前方,有一个蓝色三向压应力区,这个区域的坯料受到的旋压以压应力为主,随着旋压的进行,最小主应力 σ_3 的极大值逐渐增大,说明受压程度越高对变形越有利,也越有利于愈合塑性变形中产生的各种损伤,但易起皱。

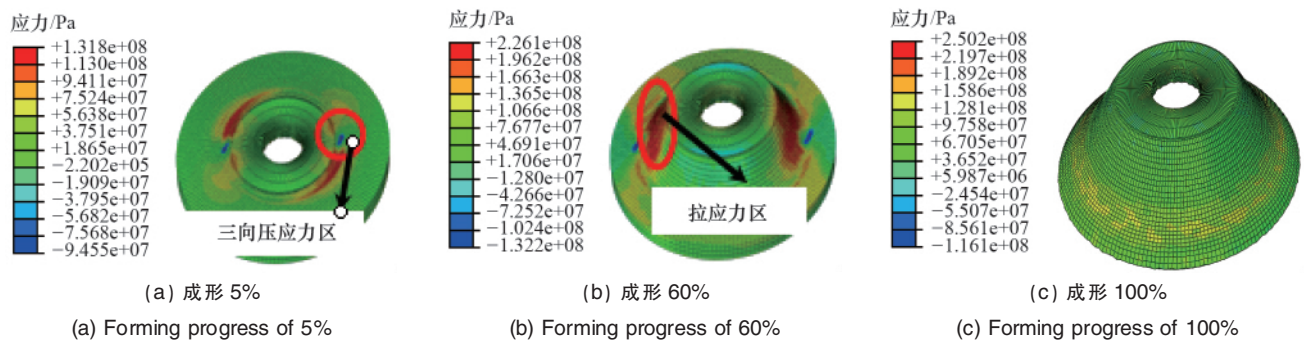


图 4 Ni-Cr-W-Mo 高温合金热旋过程中的 σ_1 分布

Fig. 4 σ_1 Distribution during the heat spinning of Ni-Cr-W-Mo superalloy workpiece with curvilinear shape

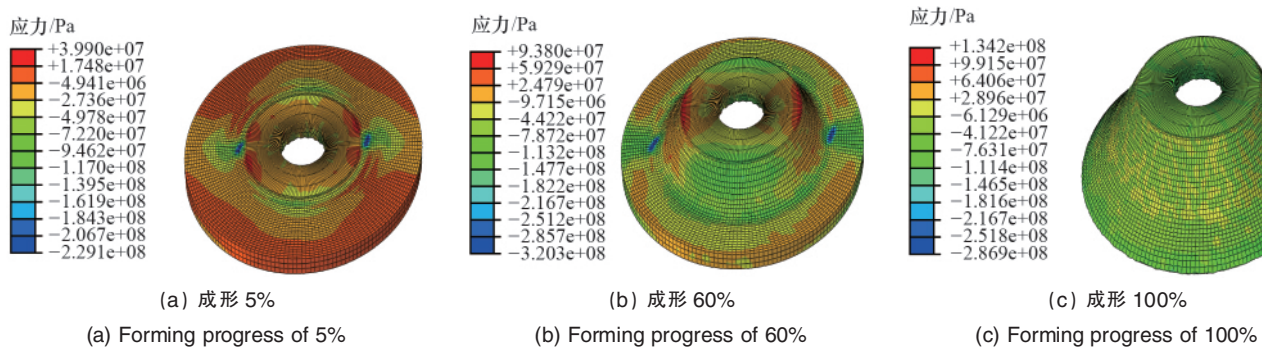


图 5 Ni-Cr-W-Mo 高温合金热旋过程中的 σ_3 分布

Fig. 5 σ_3 Distribution during the heat spinning of Ni-Cr-W-Mo superalloy workpiece with curvilinear shape

3.1.3 等效应变分布

从图 6 可以看出,等效应变沿着周向分布比较均匀,等效应变的极大值随着旋压的进行逐渐增大,增大到一定程度时,趋于一个定值。等效应变在沿着坯料母线方向上,从上到下依次减小,因为随着旋压的进行,最早成形的区域受到的拉应力最大,时间也越长,减薄越严重。

3.2 后续成形中的缺陷分析

后一道次成形是在前一道次成形基础上完成的,由于材

料变形到一定程度后,坯料各个部位累积的塑性应变不同,导致材料后续的屈服应力差距比较大,出现加工硬化现象。如果材料继续变形,不仅应力会增大,而且容易出现失效和断裂,同时在模拟计算过程中,容易出现迭代收敛以及停止计算等问题。表现在网格畸变上,为消除这种材料不均匀变形导致的变形和计算问题,有必要施加去应力退火,以便使材料变形均匀,并获得最大的变形程度。

由于热旋成形过程是一个局部连续塑性变形的过程,不

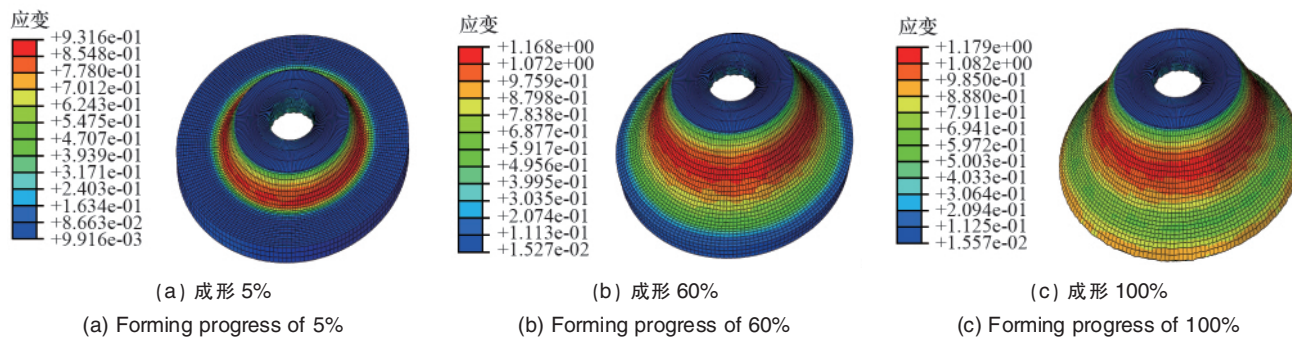


图 6 Ni-Cr-W-Mo 高温合金异形件热旋过程中的等效应变分布

Fig. 6 Distribution of equivalent strain during the heat spinning of the Ni-Cr-W-Mo superalloy workpiece with curvilinear shape

易控制成形件的形状尺寸和精度,而且不均匀变形导致的起皱、拉裂容易在实际加工过程中出现。如果工艺参数控制不当,如图 7—图 9 所示,在第二道次热旋成形过程中,旋压间隙为 3.2mm 或 3.7mm 时,Ni-Cr-W-Mo 合金异形件热旋过程中出现了过度拉薄、金属堆积和鼓包现象,也有明显的起皱趋势。如图 7 所示,当加工进行到一定程度时,旋轮前端金属发生严重堆积并使得已成形区的网格发生严重畸变,这是因为,一方面,旋压间隙比较小,会使材料的变形程度增大,变形抗力也随之增大,越来越多的金属流向旋轮的前方,从而出现金属的堆积现象;另一方面,旋轮压入材料的深度增加,造成材料与旋轮的接触面积和旋压力增大。由于旋压间隙较小的时候,容易出现上述缺陷,考虑到成形道次应尽可能减少,旋压间隙至少应该大于 3.7mm。如图 8 所示,减薄率分配不合理,出现应力集中,造成工件在先前的加工中被

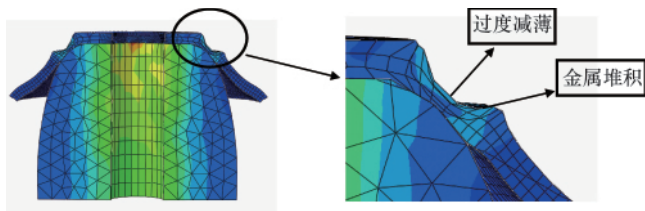
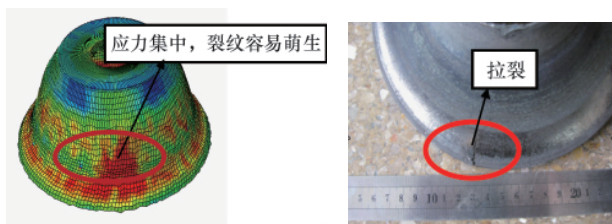


图 7 热旋过程中出现的金属堆积和过度减薄

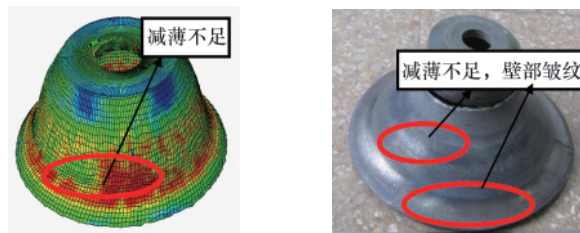
Fig. 7 Excessive thinning and metal accumulation occurred during the hot spinning process



(a) 仿真实验中的应力集中现象 (a) Stress concentration in the simulation
(b) 实验中的拉裂现象 (b) Crack on the workpiece in the experiment

图 8 模拟和实验中出现的拉裂现象

Fig. 8 Crack on the workpiece occurred in both simulation and experiment



(a) 仿真实验中的减薄不足现象 (a) Lack of thinning in the simulation
(b) 实验中的壁部皱纹现象 (b) Wrinkle in the experiment

图 9 模拟和实验中出现的起皱现象

Fig. 9 Wrinkle on the workpiece occurred in both simulation and experiment

过度减薄,从而造成已成形壁部被拉裂,采用合理的间隙分配及旋轮轨迹,在第一道次成形中尽量减薄,形状尽可能逼近最终形状,可以避免破裂的产生^[4]。如图 9 所示,壁部出现皱纹的原因是旋压前轮过早地将工件贴合在芯模上,造成工件金属在旋压后轮的作用下无法沿芯模表面流动,金属在旋轮前端堆积,造成板坯所受最小主应力 σ_3 增大, σ_3 在某种程度上反映了板料在成形过程中的起皱倾向,从而导致出现皱纹和鼓包。

3.3 贴模性

以工件的内表面与芯模的最大距离来衡量贴模性,距芯模中心轴 0—20mm 处为工艺孔。图 10 是工件成形刚结束时

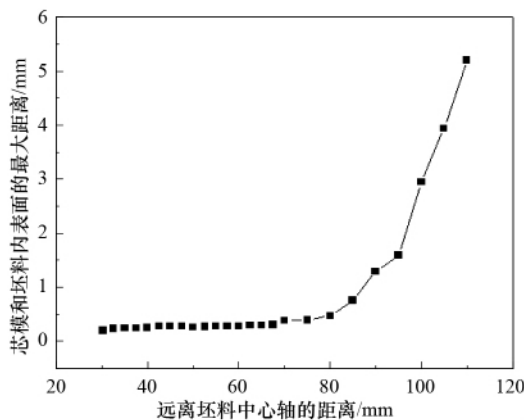


图 10 最终贴模性

Fig. 10 Fittability distribution finished simulation product

的贴模性曲线,从圆角过渡区距中心轴 30mm 左右处考察贴模性。如图 10 所示,工件靠近中心轴的部分贴模性非常好,贴模性从远离中心轴距离 82mm 左右处急剧变差,靠近口部部分贴模性最差,这是因为越靠近口部,较顶端的温度越高,回弹量较大等原因造成的。依据软件预测的 Ni-Cr-W-Mo 合金旋压成形的变化趋势和工艺参数,经过多次旋压成形后,实验获得质量合格的成形件如图 11^[7]所示,经过测量对比,模拟与实验结果吻合,说明模拟优选出的工艺参数合理,所建立的模型可靠。

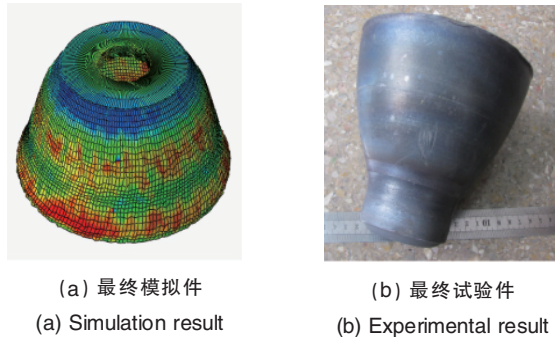


图 11 实验结果与模拟结果对比

Fig. 11 Comparison between the simulation result and experimental result

4 结论

(1) 建立了 Ni-Cr-W-Mo 合金异型件热旋成形多道次的热力耦合三维有限元模型。

(2) 为了避免过度拉薄、金属堆积和鼓包等缺陷的形成以及考虑到成形道次尽可能减少等因素,旋压间隙应大于 3.7mm。

(3) 成形结束后,工件在靠近中心轴的部分贴模性非常好,贴模性从远离中心轴距离 82mm 左右处急剧变差,靠近口部部分贴模性最差。

参考文献 (References)

- [1] Zhan M, Yang H, Jiang Z Q, et al. 3D FEM analysis of forming parameters on cone spinning based on orthogonal experimental design method [C]//Advanced Technology of Plasticity 2008. Gyeongju: The Korean Society for Technology of Plasticity, 2008: 74-388.
- [2] 赵云豪,李彦利.旋压技术与应用[M].北京:机械工业出版社,2007: 1-5, 64.
Zhao Yunhao, Li Yanli. Spinning technology and application[M]. Beijing: China Machine Press, 2007: 1-5, 64.
- [3] Yang F H, Zhan M. Plastic deformation behaviors and their application in power spinning process of conical parts with transverse inner rib[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2010, 210: 180-189.
- [4] 吴统超,詹梅,蒋华兵,等.旋压间隙对大型复杂薄壁壳体多道次旋压第二道次成形质量的影响[J].西北工业大学学报,2011,29(1): 74-80.
Wu Tongchao, Zhan Mei, Jiang Huabing, et al. *Journal of Northwestem Polytechnical University*, 2011, 29(1): 74-80.
- [5] Essa K, Hartley P. Optimization of conventional spinning process parameters by means of numerical simulation and statistical analysis [J]. *Journal of Engineering Manufacture*, 2010, 224(11): 1691-1705.
- [6] 李虎,詹梅,杨合,等.钛合金薄壁壳体强旋热耦合有限元分析[J].机械工程学报,2008,44(6): 188-193.
Li Hu, Zhan Mei, Yang He, et al. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2008, 44(6): 188-193.
- [7] 安震,李金山,胡锐,等. Ni-Cr-W-Mo 合金异形件的热旋成形规律有限元分析[J].稀有金属材料与工程, in press.
An Zhen, Li Jinshan, Hu Rui, et al. *Rare Metal Materials and Engineering*, in press.
- [8] 赵腾伦. ABAQUS6.6 在机械工程行业中的应用[M].北京:中国水利出版社,2007: 339-340.
Zhao Tenglun. The application for ABAQUS6.6 in mechanical engineering[M]. Beijing: China Water Power Press, 2007: 339-340.
- [9] Liu Y, Hu R, Li J S, et al. Hot working characteristic of as-cast and homogenized Ni-Cr-W superalloy[J]. *Materials Science and Engineering*, 2009, 508A: 141-147.
- [10] Liu D M, Hu R, Li J S, et al. Isothermal oxidation behavior of haynes230 alloy in air at 1100°C [J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2008, 37(9): 1545-1548.

(责任编辑 马宇红,代丽)

·学术动态·

“第一届中国互联网学术会议”征文



由中国计算机学会主办的“第一届中国互联网学术会议”拟于 2012 年 5 月 31 日—6 月 1 日在北京市召开。

征文范围:未来互联网体系结构、互联网路由、网络安全、网络管理、数据中心网络、绿色网络、无线网络、P2P 网络、移动互联网、物联网,以及其他互联网研究领域。

论文截止日期:2012 年 3 月 15 日。

联系电话:010-62603001。

电子信箱:ccf-internet@cernet.edu.cn。

会议网站:<http://www.ccf.org.cn/sites/ccf/nry.jsp?contentId=2652454289709>。