

航空电连接器接触性能评估与参数灵敏度分析

李翠玲¹, 代朋飞¹, 杨强¹, 张孟君²

(1. 东北大学 机械工程与自动化学院, 辽宁 沈阳 110819; 2. 沈阳兴华航空电器有限责任公司, 辽宁 沈阳 110144)

摘 要: 针对航空航天设备中的重要零件——圆柱式开双槽电连接器建立了接触计算模型, 推导了接触件间的摩擦力与插针插入量之间的数学关系. 运用 SOLIDWORKS 软件实现了 38999 系列 22# 通用接触件参数化建模, 利用 ABAQUS 有限元分析软件进行了接触性能仿真分析, 得到了以插拔力为考核指标的插孔端部的最佳收口量为 0.66 mm. 又对插孔结构进行了参数灵敏度分析, 利用模糊综合评价法确定了插孔结构的最优参数, 即插孔簧片长度为 3 mm、开槽宽度为 0.43 mm 和插孔端部收口量为 0.67 mm, 此时接触件的接触性能最佳.

关 键 词: 电连接器; 接触性能; 仿真; 插拔力; 灵敏度

中图分类号: TH 123.4

文献标志码: A

文章编号: 1005-3026(2018)01-0071-05

Contact Performance Evaluation and Parameter Sensitivity Analysis for Aerospace Electrical Connector

LI Cui-ling¹, DAI Peng-fei¹, YANG Qiang¹, ZHANG Meng-jun²

(1. School of Mechanical Engineering & Automation, Northeastern University, Shenyang 110819, China;

2. Shenyang Xinghua Aviation Electric Appliance Co., Ltd., Shenyang 110144, China. Corresponding author:

LI Cui-ling, E-mail: clii@mail.neu.edu.cn)

Abstract: The contact calculation model for the cylindrical double groove electric connector, a significant component in aerospace equipment, was established. The mathematical relationship between the contact friction force and the insertion amount of pins was derived. The parameterized modeling for 38999 series 22# general contact elements was performed using SOLIDWORKS, and the contact performance was analyzed using ABAQUS finite element analysis software. It is obtained that the optimum closing amount of the socket end, with the insertion force as an assessment index, is 0.66 mm. Sensitivity of the socket structure parameters was analyzed, and its structural optimization was determined based on the fuzzy comprehensive evaluation method. The optimum contact performance is obtained when the length of the socket reed is 3 mm, the width of the socket slot is 0.43 mm and the closing amount of the socket end is 0.67 mm.

Key words: electrical connector; contact performance; simulation; insertion force; sensitivity

电连接器是飞机、导弹、舰艇等系统中用量最多的电子元器件之一, 其可靠性关系到整个武器系统的可靠性, 而接触失效是电连接器的主要失效形式, 约占失效总数的 45.1%^[1-2], 因此对其接触性能的研究是分析其失效原因的一个重要环节. Amine^[3] 利用有限元软件对不同结构参数的接触件进行了模拟仿真分析, 并将分析结果与试验结果进行了对比. Duan 等^[4] 利用有限元软件对

不同接触应力收缩范围内接触电阻进行了模拟仿真分析, 得出在同一个接触应力收缩范围内, 接触电阻变化很小的结论. Li 等^[5] 对电连接器在不同摩擦系数下的插入力进行了研究和接触可靠性分析, 给出了提高电连接器可靠性的措施; 文献 [6-7] 利用有限元软件模拟了轴向微动引起的电连接器微动腐蚀条件下的接触性能, 对其进行了实验验证. Song 等^[8] 对电连接器触头进行不同

纳米电镀情况下的接触性能分析,并进行了实验验证. Liao 等^[9]对激光焊接在电连接器上的应用进行了相关讨论. Li 等^[10]利用 ANSYS 参数化设计模块提出了一种接触性能模拟分析的新方法. 相关学者从实验角度研究了类似部件的接触性能与疲劳寿命可靠性的关系^[11-13]. 本文针对不同结构参数接触件的接触性能仿真结果,从理论上得到了插孔端部缩孔的最佳收口尺寸;运用模糊综合评价方法,得出了插孔结构尺寸的最优参数,为电连接器接触件结构和制造工艺的改进提供了理论依据.

1 接触件插拔力的理论计算

在插针插入插孔过程中,插孔簧片的弹性变形产生了接触件间的接触压力. 若将插孔简化成悬臂梁结构,则其接触压力的大小为

$$F = \frac{3EI_x\delta}{L}. \quad (1)$$

式中: E 表示插孔材料的杨氏模量; δ 表示插孔端部的挠度; I_x 表示插孔截面对于中性轴 x 的惯性矩; L 表示插孔簧片的长度.

接触件接触面之间的摩擦力 F_t 和法向接触压力 F_n 之间的关系为 $F_t = \mu F_n$, μ 表示摩擦因数. 插针插入插孔过程中,插孔受力情况如图 1 所示,在 y 轴上插孔受力平衡,即 $F + F_n \cos \alpha = F_t \sin \alpha$, 由此可得

$$F_t = \frac{\mu F}{\mu \sin \alpha - \cos \alpha}. \quad (2)$$

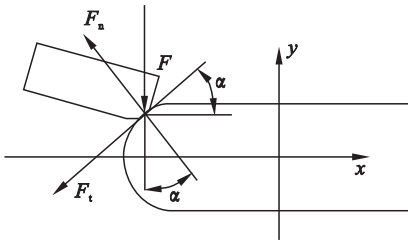


图 1 插孔受力分析

Fig. 1 Force analysis of socket

令插针端部球体半径为 r_1 , 插孔端部倒角半径为 r_2 . 当插针的端部完全插入插孔后,压力角设为 α_0 , 则

$$\cos \alpha_0 = \frac{r_1 + r_2 - \delta}{r_1 + r_2}. \quad (3)$$

当插针插入量为 s 时,

$$s = (r_1 + r_2)(\sin \alpha_0 - \sin \alpha). \quad (4)$$

解得

$$\alpha = \sin^{-1} \left(\sin \alpha_0 - \frac{s}{r_1 + r_2} \right). \quad (5)$$

由式(3)和式(5)得,当插入量为 s 时,插孔端部产生的挠度为

$$\delta = \begin{cases} (r_1 + r_2)(\cos \alpha - \cos \alpha_0), & 0 < s < (r_1 + r_2); \\ (r_1 + r_2)(1 - \cos \alpha_0), & s \geq (r_1 + r_2). \end{cases} \quad (6)$$

则接触件间的摩擦力为

$$F_t = \frac{3\mu EI_x \delta}{L^3 (\mu \sin \alpha - \cos \alpha)}. \quad (7)$$

2 接触件接触性能有限元分析

2.1 接触件参数化建模

基于 SOLIDWORKS 软件,建立电连接器插针与插孔三维参数化模型如图 2 所示,插孔端部缩孔精确建模局部放大如图 3 所示. 将接触件三维模型导入 ABAQUS 软件中,进行有限元分析.

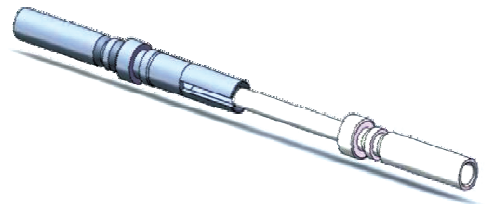


图 2 插针与插孔接触的完整模型

Fig. 2 Complete model of pin and socket contact

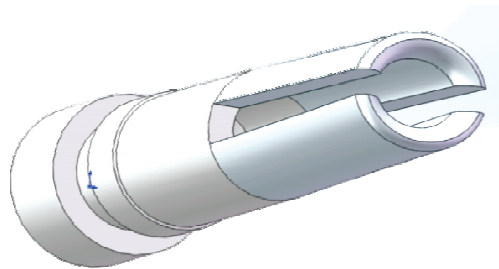


图 3 插孔端部的放大模型

Fig. 3 Enlarged model of the end of the socket

2.2 接触件插拔过程的插拔力分析

国军标规定:插孔与直径为 0.749 mm 的量规之间的插拔力应大于 0.4 N; 插孔与直径为 0.775 mm 的量规之间的插拔力应小于 1.4 N. 将接触件三维模型导入 ABAQUS 软件中,根据电连接器接触件的材料特性,设置插针与插孔的弹性模量和泊松比等参数. 利用 ABAQUS 计算了端部收口尺寸为 0.72, 0.70, 0.68, 0.66, 0.64 mm 的插孔与直径为 0.749, 0.775 mm 的标准量规之间的插拔力见表 1. 由表 1 可知端部收口量为 0.66, 0.64 mm 的插孔与标准量规之间的插拔力的大小

满足国军标要求. 综合考虑插孔簧片根部受力状况,最终确定插孔端部的收口量为 0.66 mm.

表 1 不同收口量的插孔与标准量规之间的插拔力
Table 1 Insertion force between different closing amount of socket and the standard pin

插孔端部 收口量/mm	与直径为 0.749 mm 量规 的插拔力/N	与直径为 0.775 mm 量规 的插拔力/N	是否满足国 军标要求
0.72	0.231	—	不满足
0.70	0.332	—	不满足
0.68	0.374	—	不满足
0.66	0.425	0.657	满足
0.64	0.451	0.734	满足

最后,利用 ABAQUS 软件完成了直径为 0.762 mm 的插针插入端部收口量为 0.66 mm 插孔的虚拟仿真,计算了插拔力随着插入量的变化,如图 4 所示.

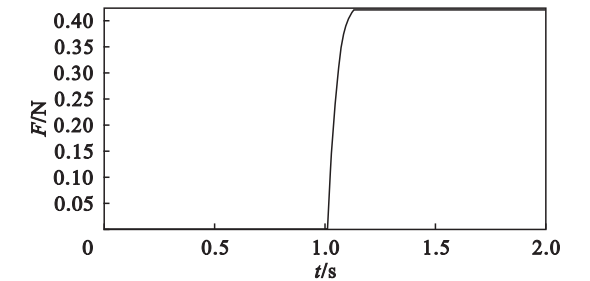


图 4 收口量为 0.66 mm 的插孔与 0.762 mm 插针的插拔力
Fig. 4 Insertion force between the socket of 0.66 mm and pin of 0.762 mm

2.3 接触件插拔过程的应力分析

电连接器插针端部逐渐插入插孔的过程中,插孔簧片根部的弯曲应力在逐渐变大,插针和插孔接触位置的接触应力也在逐渐变大. 如图 5 所示,插针端部完全插入插孔时,最大应力出现在插针和插孔接触的位置,大小为 662.3 MPa,这也是整个插拔过程中的最大接触应力.

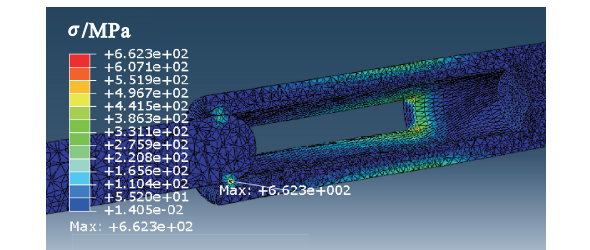


图 5 插针端部完全插入插孔时的应力云图
Fig. 5 Stress nephogram when the pin head is fully inserted into the socket

当插针完全插入插孔时,如图 6 所示,可以看出:插孔的收口量达到最大,此时插孔簧片的弯曲程度达到最大,最大弯曲应力出现在插孔簧片的根部,大小为 588.8 MPa. 在 ABAUQS 设置中,将

超过材料屈服极限的部分用白色标出,如图 7 所示,可以看出:白色部分主要集中在插孔簧片根部边缘的结构突起部分,因此插孔簧片的根部容易发生塑性变形.

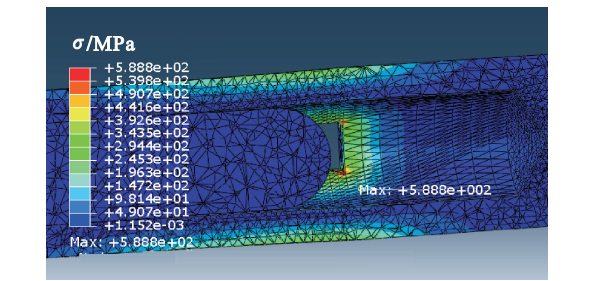


图 6 插针完全插入插孔时的应力云图
Fig. 6 Stress nephogram when the pin is fully inserted into the socket

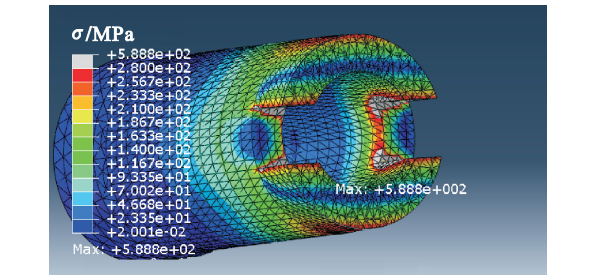


图 7 插孔簧片根部应力云图
Fig. 7 Stress nephogram of the socket reed root

为了说明在整个插拔过程中插孔簧片根部的应力变化,在插孔簧片根部选取应力最大的点,并输出该点在整个仿真过程中的应力变化,如图 8 所示,最大应力随着插针插入量而逐渐变大,并稳定在 588.837 MPa.

3 参数灵敏性分析

基于 ABAQUS 对插孔簧片长度、开槽宽度和端部收口量对接触件性能的影响进行了分析. 应用模糊综合评价法,考虑因素集 $U = \{U_1, U_2, U_3\}$,其中 U_1 是以插拔力的大小满足国军标条件

为准则, U_2 是以根部应力最小为准则, U_3 是以接触压强最大为准则,使其可用度最高. 确定因素集 U 中元素的模糊集为

$$A_{U_i} = \{A_{U_1}, A_{U_2}, A_{U_3}\} . \tag{8}$$

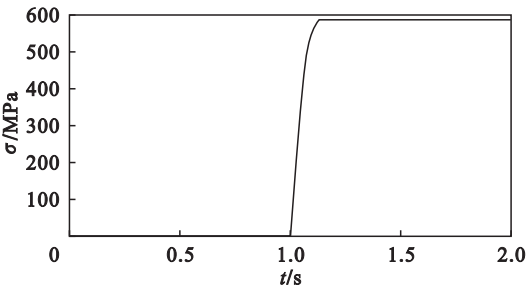


图 8 插针插孔接触位置的接触应力变化
Fig. 8 Change of contact stress in the pin and socket contact position

结合经验和专家的意见,将 A_{U_1} , A_{U_2} 和 A_{U_3} 归一化处理得到每一个影响因素的权重: $W_{U_1} = 0.3846$, $W_{U_2} = 0.3077$, $W_{U_3} = 0.3077$.

3.1 插孔簧片长度对接触件的影响分析

由图 9 可知:随着簧片长度的增加,接触压强、插拔力和簧片根部最大应力均减小. 运用综合模糊评价法,确定簧片长度 $L_1 = 3\text{ mm}$; $L_2 = 3.6\text{ mm}$; $L_3 = 2.4\text{ mm}$. 最终可得插孔簧片的最佳长度 $L = 3\text{ mm}$.

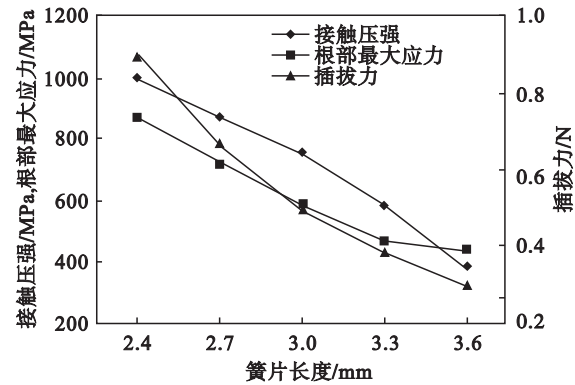


图 9 插孔簧片长度对接触性能的影响
Fig. 9 Effect of the socket reed length on the contact performance

3.2 插孔开槽宽度对接触件的影响分析

由图 10 可知:随着开槽宽度的增加,接触压强、插拔力和簧片根部最大应力均在减小. 运用综合模糊评价法,确定开槽宽度为 $M_1 = 0.44\text{ mm}$; $M_2 = 0.48\text{ mm}$; $M_3 = 0.36\text{ mm}$. 最终可得插孔开槽的最佳宽度 $M = 0.43\text{ mm}$.

3.3 插孔端部收口量对接触件的影响分析

由图 11 可知:随着收口量的增加,接触压强、插拔力和簧片根部最大应力都在减小. 运用综合

模糊评价法,确定端部收口量 $N_1 = 0.66\text{ mm}$, $N_2 = 0.70\text{ mm}$, $N_3 = 0.64\text{ mm}$. 最终可得插孔端部的最佳收口量 $N = 0.67\text{ mm}$.

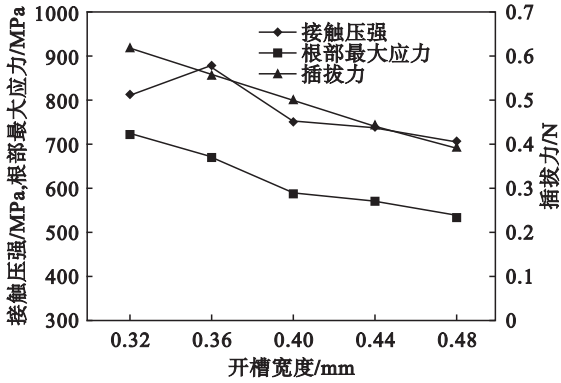


图 10 插孔开槽宽度对接触性能的影响
Fig. 10 Effect of the socket slot width on the contact performance

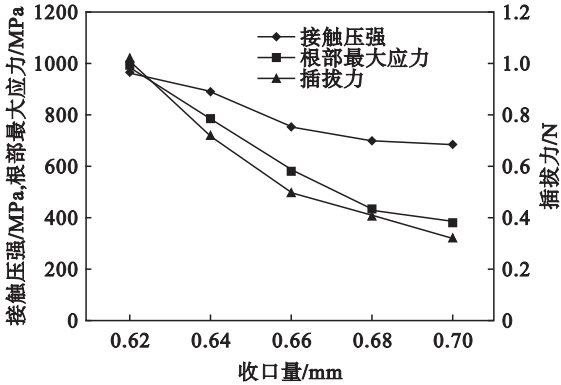


图 11 插孔端部收口量对接触性能的影响
Fig. 11 Effect of the socket closing amount on the contact performance

4 结 论

1) 以航空电连接器单对针孔接触件为研究对象,建立了接触件间摩擦力与插针插入量之间的理论计算模型,基于三维软件 SOLIDWORKS 建立参数化模型,利用有限元软件 ABAQUS 仿真分析接触件插拔过程中接触应力、插孔根部弯曲应力和插拔力的变化,建立了电连接器接触性能的仿真分析模型,为电连接器多对针孔接触性能分析提供了借鉴和参考.

2) 基于插拔力指标,仿真分析得到插孔端部最佳收口量为 0.66 mm ,为插孔端部工艺参数的确定提供了理论支撑.

3) 以接触应力、根部弯曲应力和插拔力为接触性能的考核指标,基于模糊综合评价法,得出了插孔结构尺寸参数为插孔簧片长度 3 mm 、开槽宽度 0.43 mm 和插孔端部收口量 0.67 mm 时,接触

件接触性能最佳。

参考文献：

[1] 杨奋为. 军用电连接器的应用及发展[J]. 机电元件, 2007, 27(3) : 42 – 49.
(Yang Fen-wei. The application and development of military electric connector [J]. *Mechanical and Electronic Components*, 2007, 27(3) : 42 – 49.)

[2] 潘骏, 刘红杰, 陈文华, 等. 基于步进加速退化实验的航天电连接器接触可靠性评估[J]. 中国机械工程, 2011, 22(10) : 1197 – 1200.
(Pan Jun, Liu Hong-jie, Chen Wen-hua, et al. Contact reliability assessment of aerospace electrical connector based on step-up-stress accelerated degradation testing[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2011, 22(10) : 1197 – 1200.)

[3] Amine B. Numerical and experimental optimization of mechanical stress, contact temperature and electrical contact resistance of power automotive connector[J]. *International Journal of Mechanics and Materials in Design*, 2010, 4(4) : 94 – 104.

[4] Duan K, Zhu F, Li Y, et al. Contact resistance investigation of electrical connector with different shrink range[C] //The 15th International Conference on Electronic Packaging Technology. Chengdu, 2014 : 1146 – 1149.

[5] Li Y, Zhu F L, Duan K, et al. Analysis of insertion force of electric connector based on FEM [C] //The 21st International Symposium on Physical and Failure Analysis of Integrated Circuits. Singapore, 2014 : 195 – 198.

[6] Zhang F X, Flowers G T. Fretting corrosion in electric connectors, induced by axial vibration[C] //The 60th IEEE Holm Conference on Electrical Contacts. New Orleans, 2014 : 1 – 8.

[7] Yang H Y, Flowers G T. Fretting in electrical connectors induced by axial vibration [J]. *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*, 2015, 5(3) : 328 – 336.

[8] Song J, Koch C, Wang L L. Nanoscale particles modified gold plating for electrical contacts [C] // International Conference on Electrical Contacts. Beijing, 2012 : 331 – 337.

[9] Liao C F, Liu S P, Liao K C. Applications of laser welding to electric connectors [C] // International Conference on Thermal, Mechanical and Multi-Physics Simulation and Experiments in Microelectronics and Microsystems. Ghent, 2014 : 1 – 6.

[10] Li P Y, Liu Q, Hui Y, et al. Analysis of contact performance of real machined surface based on finite element method[J]. *Tribology Online*, 2016, 11(1) : 61 – 68.

[11] 陈文华, 李红石, 连文志. 航天电连接器环境综合应力加速寿命试验与统计分析[J]. 浙江大学学报(工学版), 2006, 40(2) : 348 – 351.
(Chen Wen-hua, Li Hong-shi, Lian Wen-zhi. Accelerated life test and statistical analysis of aerospace electrical connectors under multiple environmental stresses [J]. *Journal of Zhejiang University(Engineering Science)*, 2006, 40(2) : 348 – 351.)

[12] Laurvick T V, Couto R A. Micro-contact performance and reliability under low frequency, low amplitude, alternating current (AC) test conditions [C] //The 61st IEEE Holm Conference on Electrical Contacts. San Diego, 2015 : 222 – 226.

[13] Fu R J, Chose S Y B, Jackson R L, et al. Vibration-induced changes in the contact resistance of high power electrical connectors for hybrid vehicles [J]. *Packaging and Manufacturing Technology*, 2012, 2(6) : 185 – 193.

(上接第 54 页)

[4] 杨玉先, 向昌武, 石国光, 等. 15CrMoG 高压锅炉管在线热处理混晶的产生原因分析与工艺改进[J]. 钢管, 2012, 41(6) : 14 – 17.
(Yang Yu-xian, Xiang Chang-wu, Shi Guo-guang, et al. Analysis of causes for mischcrystal of 15CrMoG high-pressure boiler steel tube as occurring during on-line normalization process and relevant process improvement measures[J]. *Steel Pipe*, 2012, 41(6) : 14 – 17.)

[5] Davinci M A, Samantaray D, Borah U, et al. Characterization of hot workability of boron-added modified 9Cr-1Mo steel (P91B) using dynamic materials model [J]. *Materials Science Forum*, 2015, 830/831 : 325 – 328.

[6] 赵勇桃. 超超临界锅炉用 P92 钢的组织性能及应用[M]. 北京 : 冶金工业出版社, 2015 : 152 – 154.
(Zhao Yong-tao. Structure properties and applications of P92 steel for boiler of USC power plants [M]. Beijing : Metallurgical Industry Press, 2015 : 152 – 154.)

[7] 束国刚, 刘江南, 石崇哲, 等. 超临界锅炉用 T/P91 钢的组织性能与工程应用[M]. 西安 : 陕西科学技术出版社, 2006 : 131 – 132, 155 – 157.
(Shu Guo-gang, Liu Jiang-nan, Shi Chong-zhe, et al. Structure properties and engineering applications of T/P91 steel for boiler of SC power plants [M]. Xi'an : Shaanxi Science and Technology Press, 2006 : 131 – 132, 155 – 157.)

[8] Jones R D. Developing coiled-tubing techniques on the Karachaganak field, Kazakhstan [R]. Houston : Society of Petroleum Engineers, 2001.

[9] Ning B Q, Shi Q Z, Yan Z S, et al. Variation of martensite phase transformation mechanism in minor-stressed T91 ferritic steel [J]. *Journal of Nuclear Materials*, 2009, 339(1) : 54 – 60.

[10] Tsuji N, Maki T. Enhanced structural refinement by combining phase transformation and plastic deformation in steels [J]. *Scripta Materialia*, 2009, 60(12) : 1044 – 1049.

[11] Lin Y C, Chen M S, Zhong J. Prediction of 42CrMo steel flow stress at high temperature and strain rate[J]. *Mechanics Research Communications*, 2008, 35(3) : 142 – 150.