文章编号:1000-582X(2009)04-0396-06

大型全纤维曲轴 TR 镦锻装置失效分析

徐戊矫,王凯庆,周　杰,胡锋涛
(重庆大学 材料科学与工程学院,重庆 400030)

摘　要:对大型全纤维曲轴 TR 镦锻装置中的模座进行了断裂失效分析,该装置在修改曲轴大法兰成形方式为全封闭成型后的第一次使用中,上、下模座均断裂。采用 DEFORM-3D 软件对该全纤维钢曲轴镦锻成形进行数值模拟,计算获得锻件成形力和模具充填效果。采用 I-Dears 软件对曲轴 TR 镦锻装置进行结构强度计算,获得了镦锻装置的应力和变形状态,分析了模座发生断裂失效的原因。计算结果表明,模座实际的断裂部位和裂纹方向与强度分析结果吻合。

关键词:大型全纤维曲轴;镦锻成形仿真;结构强度计算;装置失效分析
中图分类号: TG315　　文献标志码:A

Failure analysis of upset-bending equipment for a heavy crankshaft with continuous grain flow

XU Wu-jiao, *WANG Kai-qing*, *ZHOU Jie*, *HU Feng-tao*
(College of Material Science and Engineering, Chongqing University, Chongqing 400030, P. R. China)

Abstract: A failure investigation is conducted on the upset-bending equipment of a heavy crankshaft with continuous grain flow which is broken in the first use after the crankshaft flange is modified to deform in the die cavity. The forging process of the heavy crankshaft is simulated using the DEFORM-3D software, through which the forming load and die filling are calculated. Using the I-Dears software, the structural strength calculation for the upset-bending equipment is performed. The stress field and displacement in the equipment are obtained. The failure analysis of the die base is accomplished. The analysis results show that the practical crack location and orientation in the die base are consistent with those in the structural strength calculation.

Key words: heavy crankshaft; forging process simulation; structure strength calculation; equipment failure analysis

曲轴是内燃机的关键部件,由于内燃机工作时曲轴受力状况复杂,其制造质量的好坏对内燃机性能和可靠性影响很大。随着世界造船、石油、电力和内燃机车的快速发展,大型全纤维曲轴市场广阔。弯曲镦锻成形是目前生产全纤维曲轴的主要方法,按照其原理和结构的不同,可以主要分为 RR 和 TR 法两种[1]。中国南车集团资阳机车厂引进第 3 代 TR 镦锻装置,该装置从投产至今共使用 60 余火次,在使用期间所锻打的曲轴法兰和曲拐均为半开放成形。在修改法兰成形方式为全封闭成形后的第一次

收稿日期:2009-01-17
基金项目:重庆市"十一五"科技攻关重大项目(CSTC,2005AA3012－4);重庆市科委自然科学基金计划资助项目(CSTC,2007BB3135);2006 年度重庆大学自然科学青年基金资助项目
作者简介:徐戊矫(1975-),女,重庆大学副教授,博士,主要从事金属塑性成形技术与模具 CAD/CAE/CAM 的研究,(Tel)023-66887600;(E-mail)xuwujiao_cq@163.com。
欢迎访问重庆大学期刊社 http://qks.cqu.edu.cn

使用时，镦锻装置的模座断裂。对曲轴镦锻成形进行数值模拟仿真，获得镦锻成形力和模具充填效果。将锻造模拟仿真的结果作为边界条件引入镦锻装置结构强度计算，获得工作状态下装置的应力和变形状态。将强度计算所得的模座裂纹部位和裂纹走向与模座实际的断裂情况进行比较，分析镦锻装置的模座发生断裂失效的原因。

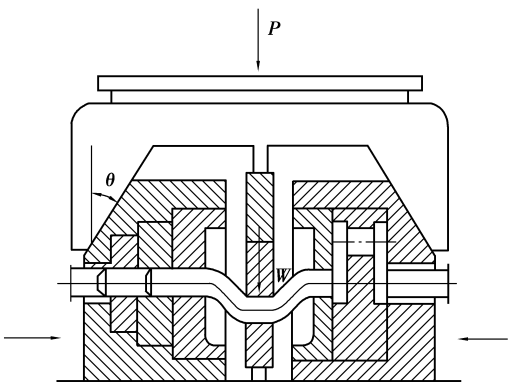
1　曲轴弯曲镦锻工艺分析

1.1　弯曲镦锻工艺简介

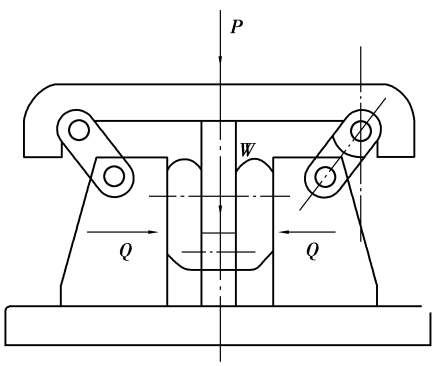
大型曲轴的锻造方法很多，如错拐、扭拐等自由锻造法，错挤、循序模锻、弯曲镦锻等模锻法，其中弯曲镦锻法是一种生产全纤维曲轴的先进锻造方法。弯曲镦锻法按照其原理和结构的不同，可以分为 RR 法和 TR 法两种。

1.2　RR 法和 TR 法对比

图 1 中所示为 RR 法和 TR 法工作简图，P 为压机压力，W 为弯曲力，Q 为水平镦粗力。采用 RR 弯曲镦锻法时，压机压下的整个行程中，装置所提供的水平镦粗力和垂直弯曲力保持恒定，同时这两个方向的行程速度之比也恒定不变，与锻件变形过程没有关联。但是，在曲轴实际成形过程中，所需水平镦粗力和垂直弯曲力的比例并非保持不变，因此 RR 装置的特点决定了其局限性，无法完全发挥设备的能力，容易出现水平镦锻力不足的情况。TR 装置采用可在一定角度范围内旋转的肘杆机构，从而将压机的压力转化成水平力和垂直力。随着水压机的压下，肘杆与水平夹角逐渐变小，水平镦粗力由小变大，符合锻件变形的需要，充分发挥了设备能力，节约了能源。TR 装置与 RR 装置相比，体积小，重量轻；因此，从工艺和效能上比较，TR 法优于 RR 法[2-4]。



(a)RR法



(b)TR法

图 1　RR 法和 TR 法工作简图

1.3　大型全纤维钢曲轴

中国南车集团资阳机车厂锻造的首批中速柴油机钢曲轴的正式下线，填补了我国中速柴油机曲轴的空白。图 2 所示为资阳机车厂自行开发锻造的目前国内最大的全纤维钢曲轴，其锻件重量达到 7 t。

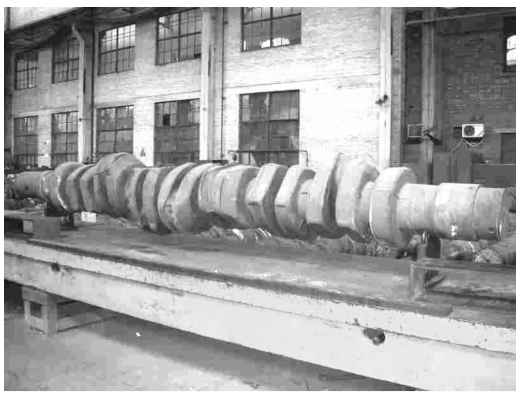


图 2　大型全纤维钢曲轴

2　曲轴 TR 镦锻成形模拟

采用弯曲镦锻法生产曲轴是一个高温、高压、不稳定的塑性加工过程，难以用理论方法精确计算[5-10]。这里，对大曲轴的镦锻成形进行数值模拟仿真，采用先进的体积成形模拟软件 DEFORM-3D 对其进行分析。图 3 所示为按照 TR 镦锻装置的 CAD 图纸所建立的装置实体模型。

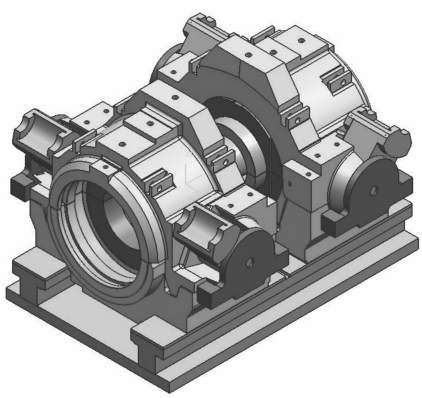


图 3　TR 镦锻装置实体模型

曲轴的镦锻成形数值模拟仿真包含前处理、求解和后处理 3 个阶段。其中前处理阶段包含了以下内容：

1)按成形分析需要简化模型，如图 4(a)所示；

2)指定分析模型的材料参数；

3)确定坯料规格，为简化求解，仅对坯料划分网格，网格数量为 100 000 个；

4)采用剪切摩擦模型，即

$$\dot{\tau}_f = m \cdot k = \frac{\bar{\sigma}}{\sqrt{3}}, \tag{1}$$

其中，k 为屈服极限；m 为剪切摩擦因子，取 m 为 0.3 进行计算；

5)如图 4(b)所示设置镦锻速度，

竖直弯曲速度为 $v_1 = 5$ mm/s，

水平镦粗速度为

$$v_2 = v_1 \operatorname{ctg}\lambda \qquad (\lambda_1 \leqslant \lambda \leqslant \lambda_2), \tag{2}$$

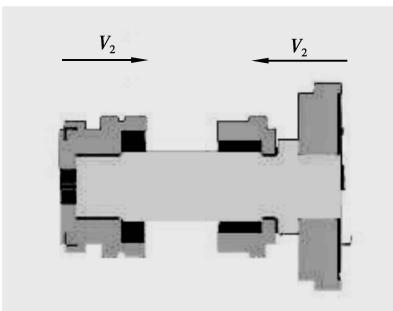
其中，终锻角 $\lambda_1 = 16°$，始锻角 $\lambda_2 = 47.95°$；

6)设置成形模拟步长为 0.1 s/每步；

7)设定曲轴毛坯的温度为 1 150 ℃；

8)设置锻造成形总时间为 63 s。

(a)曲轴镦锻成形简化模型



(b)曲轴镦锻速度及运动关系

图 4 镦锻模具组合及运动关系图

图 5 所示为模腔的充填效果图，镦锻结束时，锻件法兰成形情况较好。图 6 所示为法兰成形仿真所获得的模具水平和竖直方向提供的成形力。法兰镦锻结束时，水平镦粗力约为 4 030 t，竖直弯曲力约为 55.1 t，获得的成形力数据将被用于对该镦锻装置进行断裂失效分析。

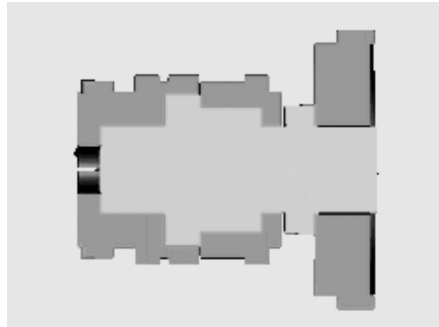
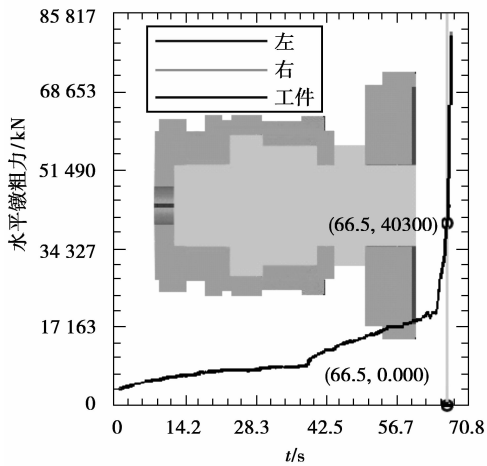
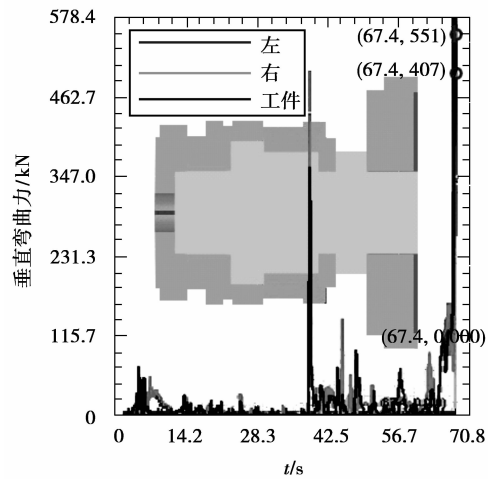


图 5 法兰成形结束时模腔充填效果图



(a)水平镦粗力随行程变化曲线



(b)竖直弯曲力随行程变化曲线

图 6 曲轴法兰成形力—行程关系曲线

欢迎访问重庆大学期刊社 http://qks.cqu.edu.cn

3　TR 镦锻装置断裂失效分析

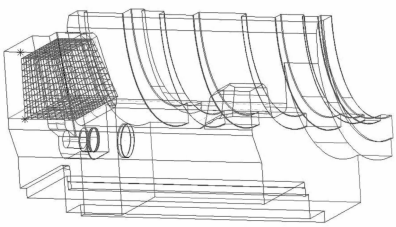
3.1　镦锻装置结构强度计算前处理

采用 I-Dears 软件进行大型曲轴 TR 镦锻装置结构强度计算，以分析装置中模座发生断裂失效的原因。结构强度计算前处理的工作如下[11-15]：

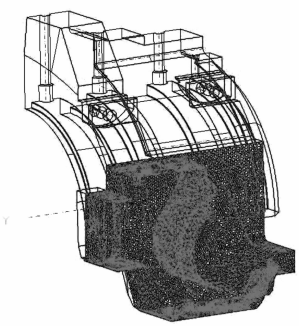
1）为提高结构强度计算效率，镦锻装置采用对称剖分模型；

2）设定模座的材料参数，其中抗拉强度：750～850 MPa，屈服强度：500 MPa；

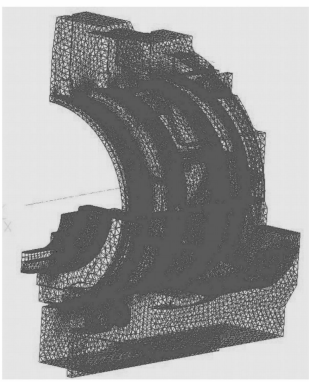
3）模型离散化，对模型上的载荷作用区域和装配部件相互接触区域采用六面体网格划分，如图 7(a)所示，模型局部网格细化，如图 7(b)所示，其余部分采用四面体网格，网格装配模型中单元总数为 103 万个，见图 7(c)；



(a)下模座接触面六面体网格划分



(b)上模座受力区域局部网格细化



(c)网格装配模型

图 7　镦锻装置结构强度计算模型离散化

4）设定镦锻装置结构强度计算的边界条件集，边界条件集中包含镦锻装置的约束集，载荷集和接触集，如图 8 所示。

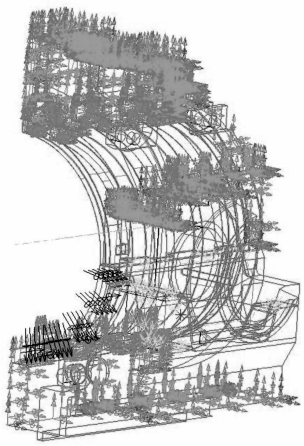
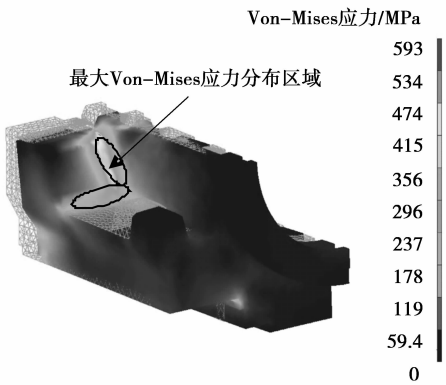


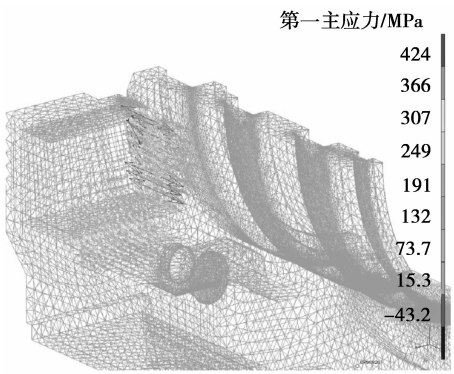
图 8　镦锻装置结构强度计算边界条件

3.2　装置结构强度计算结果

图 9 和图 10 所示分别为大曲轴法兰镦锻成形时下模座和上模座的应力状态、第一主应力矢量分布和实际使用过程中模座的断裂状态。



(a)下模座的Von-Mises应力分布图



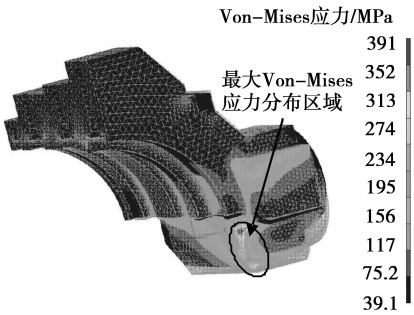
(b)下模座推力面边渡圆角第一主应力矢量图

(c)下模座实际断裂情况

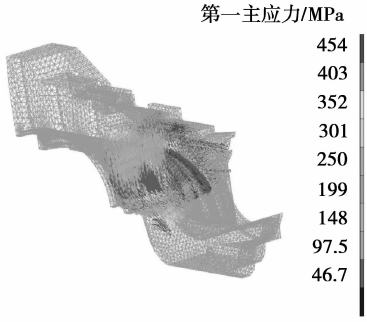
图 9 下模座结构强度计算结果和实验断裂情况对比

3.3 TR 镦锻装置模座失效分析

图 9(a)显示下模座 Von-Mises 应力的最大值为 593 MPa,其应力最大值的分布区域见图中椭圆线框。图 10(a)中上模座 Von-Mises 应力的最大值为 391 MPa。根据南车集团检测中心的检测报告,镦锻装置上、下模座推力面过渡圆角处均存在铸造缺陷。从强度计算结果看,应该是下模座推力面过渡圆角在大拉应力作用下超过材料许用应力,首先产生断裂破坏,由于下模座在锻造过程中的突然断裂改变了上模座的受力,从而使上模座从其铸造缺陷位置开始沿切向发生一次性脆性断裂。



(a)上模座的Von-Mises应力分布图



(b)上模座推力面过渡圆角第一主应力矢量图

(c)上模座实际断裂情况

图 10 上模座结构强度计算结果和实际断裂情况对比

图 9(b)和图 10(b)分别给出了下模座和上模座中结构危险区域第一主应力的矢量分布图。如果结构发生破坏,则断裂方向应垂直于第一主应力矢量方向。对比各自模座实际的断裂照片,模座实际断裂部位和裂纹走势与强度分析结果吻合。

4 结 论

1)采用先进的体积成形模拟软件,对曲轴镦锻成形过程进行数值模拟仿真,得到了锻件的成形效果,获得了锻造成形力-行程关系曲线。通过锻造成形仿真,为大曲轴的热成形工艺设计提供了帮助,而计算得到的成形力是镦锻装置进行结构强度计算的重要边界条件。

2)TR 镦锻装置结构强度计算结果表明,下模座发生断裂失效的原因是推力面过渡圆角区域的拉应力超过了模座材料许用应力。由于下模座在锻造过程中的突然断裂改变了上模座的受力,从而使上模座从其铸造缺陷位置开始沿切向发生一次性脆性断裂。上、下模座的裂纹方向均垂直于计算获得的第一主应力矢量方向,模座实际断裂部位和裂纹走势与强度分析的结果吻合。

参考文献:

[1]《大型锻件的生产》编写组. 大型锻件的生产[M]. 北京:机械工业出版社,1978.

[2]陈太生. 曲轴全纤维弯曲镦锻成形技术 RR 法、TR 法、NTR 法对比研究[D]. 天津:天津大学,2005.

[3]万煦义. 大中型全纤维曲轴锻造方法的探讨[J]. 大型铸锻件,2006(3):45-52.
WAN XU-YI. The exploration of the forging method for the large-middle size continuous grain flow crankshaft[J]. Heavy Casting and Forging, 2006(3):

欢迎访问重庆大学期刊社 http://qks.cqu.edu.cn

45-52.

[4] 冯道武. TR 镦锻曲轴的生产[J]. 大型铸锻件，1994(2)：5-10.
FENG DAO-WU. The production of TR upset forging crankshaft[J]. Heavy Casting and Forging, 1994(2): 5-10.

[5] 刘建生，王仲仁，卢志永. 曲轴 RR 法镦锻成形的数值模拟与缺陷预测[J]. 中国机械工程，2001，12(4)：429-432.
LIU JIAN-SHENG, WANG ZHONG-REN, LU ZHI-YONG. Numerical simulation and defect prediction of RR upsetting process of crankshaft [J]. China Mechanical Engineering, 2001,12(4):429-432.

[6] ZHANG Y J, HUI W J, DONG H. Hot forging simulation analysis and application of microalloyed steel crankshaft[R]. Beijing: Proceedings of Sino-Swedish Structural Materials Symposium, 2007.

[7] CHUN H L, A C W, YI S C, et al. The coupled thermo-mechanical analysis in the upsetting process by the dynamic FEM[J]. Journal of Material Processing Technology, 2008, 20(1), 37-42.

[8] 范海清. 大型曲轴 RR 法弯曲镦锻的弹塑性有限元模拟与成形规律研究[D]. 天津：天津大学，2003.

[9] 王纪武，刘庄，王本一. 280 曲轴 RR 法成形的三维有限变形弹塑性有限元模拟[J]. 塑性工程学报，1999，6(2)：73-77.
WANG JI-WU, LIU ZHUANG, WANG BEN-YI. 3-D finite deformation elasto-plastic FEM simulation of RR upsetting process of 280 crankshaft[J]. Journal of Plasticity Engineering, 1999,6(2):73-77.

[10] SOO Y K, SATOSHI K, MASAHITO Y. Application of CAE in cold forging and heat treatment processes for manufacturing of precision helical gear part[J]. Journal of Material Processing Technology, 2008, 20(1), 25-31.

[11] YU Z W, XU X L. Failure analysis of a diesel engine crankshaft[J]. Engineering Failure Analysis, 2005, 12, 487-495.

[12] JING J P, MENG G. Investigation on the failure of the gear shaft connected to extruder[J]. Engineering Failure Analysis, 2008, 15, 420-429.

[13] 董湘怀. 材料加工理论与数值模拟[M]. 北京：高等教育出版社，2005，89-99.

[14] GHASEM D, SAYED M M V, MOSTAFA L, et al. Computational and experimental failure analysis of continuous-annealing furnace radiant tubes exposed to excessive temperature [J]. Engineering Failure Analysis, 2008, 15, 445-457.

[15] WALCZYK W. Operation and maintenance manual for TR35Z forging device[J]. Pozan, 2004(6),22.

（编辑　陈移峰）

(上接第 395 页)

[10] 宋敏，李波欣，郑亚茹. 利用光学方法测量薄膜厚度的研究[J]. 光学技术，2004，30(1)：103-106.
SONG MIN, LI BO-XIN, ZHENG YA-RU. Study of optical methods for measuring the thickness of the thin films[J]. Optical Technique, 2004, 30(1): 103-106.

[11] 周仲浩，秦志伟，黄光周. 智能化涡流薄膜厚度测量的研究[J]. 真空与低温，1997(1)：5-8.
ZHOU ZHONG-HAO, QIN ZHI-WEI, HUANG GUANG-ZHOU. Research on thickness measuring of thin film with intelligent vortex method[J]. Vaccum and Cryogenics, 1997(1): 5-8.

[12] 唐春和，张纯，张冬梅. X 射线照相法测量包覆燃料颗粒包覆层的厚度和 UO_2 核芯的直径[J]. 核科学与工程，1998，18(4)：371-375.
TANG CHUN-HE, ZHANG CHUN, ZHANG DONG-MEI. Measurement of diameter of UO_2 nucleus and thickness of coat with X-Ray photographic method[J]. Nuclear Science and Engineering, 1998, 18(4): 371-375.

[13] 于志伟，黑祖昆，马永庆，等. 采用 Seemann-Bohlin 准聚焦 X 射线衍射仪测量薄膜厚度的误差理论分析[J]. 分析测试学报，1996，15(5)：35-38.
YU ZHI-WEI, HEI ZU-KUM, MA YONG-QING, et al. Error analysis of film thickness measurements with Seemann-Bohlin quasi-focusing X-ray diffractometer[J]. Journal of Instrumental Analysis, 1996, 15(5): 35-38.

[14] 王英华. X 光衍射技术基础[M]. 北京：原子能出版社，1987.

[15] 李宁. 化学镀实用技术[M]. 北京：化学工业出版社，2003.

（编辑　陈移峰）