冷表面结霜问题研究

李微微，金敬福，陈廷坤，丛　茜，齐迎春

（吉林大学生物与农业工程学院，长春　130022）

摘要：结霜现象在工程应用的各个领域普遍存在，严重影响了设备的正常运行。结霜过程复杂且不易控制，因此对结霜现象的观察及其规律的深层次研究至关重要。国内外学者关于结霜现象、结霜规律及结霜机理等进行了大量的研究，取得了很好的成果，同时也发现了一些问题。在总结归纳国内外学者对结霜问题研究历程的基础上，详细阐述了目前结霜动态影响因素、霜层物性及霜层生长规律等的研究成果和研究现状，并对结霜研究过程中存在的问题进行了简要分析。

关键词：机械工程其他学科；结霜；综述；影响因素；物性；生长规律

中图分类号：TB61　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1674-2850(2013)08-0706-06

Study on the problem of frosting at the cold surface

LI Weiwei, JIN Jingfu, CHEN Tingkun, CONG Qian, QI Yingchun

(*School of Biological and Agricultural Engineering, Jilin University, Changchun* 130022, *China*)

Abstract: Frost exists generally in various engineering application, it seriously affects the normal operation of those equipments. Frosting process is complicated and difficult to control. The deep research on the frosting and its rules is very important. The domestic and overseas scholars had done a lot of researches on frost phenomena, frost rule and frost mechanism, and achieved very good results. At the same time, some problems were also found. In this paper, based on the summarizing the frosting research process, the current situation about the frost dynamic influence factors, frost layer property and frost layer growth law were described in details. Furthermore, the problems existing in the research process of the frosting were also briefly analyzed.

Key words: other subjects of mechanical engineering; frosting; review; influence factors; physical property; growth law

0　引言

结霜结冰现象广泛存在于工程应用的各个方面，冷表面上形成的霜层及其生长会恶化工程设备运行特性。如：飞机在低于冰点温度下飞行时，机翼表面的过冷水滴凝结结霜现象成为主要安全隐患之一；汽车玻璃结霜将影响驾驶员的正常驾驶，严重时可导致交通事故；输变电线结霜结冰会增加其重量，甚至导致输变电线断裂，造成巨大危险和经济损失；制冷设备换热器冷却表面在空气吸湿工况下会很快被冰霜层覆盖，如不及时除霜，制冷设施的耗能将显著增加；在深冷工况下，空温式翅片管气化器普遍因为表面结霜而造成气化量严重不足甚至停产，导致换热效率降低[1]；空气源热泵冷热水机组在冬季运行时，空气侧换热器表面结霜会降低换热器的传热系数，增加空气侧的流动阻力，减小机组供热能力，特别是在－5～0℃有雾或雨雪天气等最恶劣的运行工况下，机组的工作效率在一定程度上依赖机组换热器表面的结霜状况，机组结霜将导致蒸发压力过低、甚至导致机组停止运行[2]；高寒地区风力发电机组测风仪的结冰现象也是制约着风力发电机组正常运行的一个主要安全隐患，结冰现

基金项目：高等学校博士学科点专项科研基金（新教师基金）（20090061120071）；国家自然科学基金青年科学基金（51005095）；吉林省科技发展计划青年基金（20100187）

作者简介：李微微（1988—），女，硕士研究生，主要研究方向：机械表面效应及改良改性

通信联系人：齐迎春，副教授，主要研究方向：机械摩擦、磨损及润滑．E-mail：qiyc@jlu.edu.cn

象降低了风力发电机组的工作效率，造成了严重的经济损失[3]。可见，对结霜规律、影响因素等进行研究具有重要意义。

1 结霜研究历程

在自然界及其工程实际应用领域，当湿空气流经比露点温度低的冷表面时，冷表面上会发生水蒸气的凝结，若冷表面的温度低于冰点温度时，结霜现象就会发生。关于结霜现象的研究，最早是德国学者在 20 世纪 30 年代提出的结霜现象引起传热效率降低的相关问题。在 20 世纪五六十年代，BARRON 等[4]、SMITH 等[5]、BIGURIA 等[6]、BRIAN 等[7]对结霜现象进行了大量的物性研究，讨论了主流速度、含湿量、冷表面温度等对结霜速率的影响规律。TRAMMEL 等[8]研究了低温冷表面上的结霜现象，发现在不同环境参数（风速、空气温度、冷平板的温度）下，形成的霜层结构存在着差异。20 世纪 70 年代，随着制冷、低温以及航空航天领域的发展，结霜研究也得到了迅速的发展，SANDERS[9]研究发现，在结霜工况下空调系统的换热能力下降至少 35%，并指出不同的结霜条件对霜层结构的影响。JONES 等[10]通过试验研究发现霜层结构受环境参数变化的影响，而在这个时期结霜的研究主要集中在霜层结构、霜层生长机理以及霜层生长数学模型的建立。HAYASHI 等[11]将霜层的形成分为 3 个阶段：霜层晶体形成过程、霜层生长过程和霜层充分发展过程，并以霜柱为模型建立了霜层生长的数学模型。20 世纪 80 年代后期至 90 年代，TAO 等[12]提出的划分结霜过程的时间概念为建立较为精确的数学模型提供了试验基础。

显微高速摄像技术的发展为观察结霜过程中水珠形成、霜晶形成及霜晶形状等提供了先进的技术手段，为进一步认识结霜规律提供了可能。吴晓敏课题组[13~15]采用可视化技术对结霜现象进行了详细观察，并对结霜过程和规律进行了深层次的探讨，分析了结霜过程的基本规律和霜晶的结构变化，但是由于结霜过程自身的复杂性和不确定性，对结霜现象的观察方法及描述等仍然存在一些不足。

2 冷表面动态结霜的影响因素研究

冷表面上结霜结冰过程是一个动态复杂的过程。HAYASHI 等[11]通过显微观察发现霜层的形成不是几个环境常量就能描述的，影响霜层生长的主要参数变量为冷表面温度、主流温湿度和主流速度。LEE 等[16~17]发现空气中的相对湿度、温度、流速以及冷表面温度是影响霜层厚度及霜层导热系数的主要因素，其中空气的相对湿度和冷表面温度是主要影响因素。KOYAMA 等[18]在冷表面温度、相对湿度和空气流速不同的试验工况下观察整体的结霜量、结霜速度及结霜厚度等问题，认为冷表面温度和空气湿度是影响结霜量的主要因素。EHSAN 等[19]通过观察换热器的百叶窗翅片的结霜行为，认为空气温度、翅片表面温度和空气湿度是影响结霜速率的主要因素。KYOUNGMIN 等[20]通过观察翅片表面的结霜现象，发现空气温度、空气流速、空气相对湿度及冷表面温度是影响翅片的结霜特性的主要因素。吴晓敏课题组[21~22]在不同工况下，做了大量关于空气温湿度和冷表面温度对冷表面结霜影响的试验，认为冷表面温度、空气温湿度对过冷水珠持续时间、冻结粒径、初始霜晶的形状、霜层生长后期的倒伏和回融均有较大的影响。

由于空气温湿度较难控制，受试验条件的限制，结霜试验大多在风洞里面进行，因此试验结果仅涵盖部分湿空气状态下冷表面的结霜状况，而实际工况中冷表面的结霜与环境、地域密切相关，因此建立温湿度可调控的试验系统对揭示冷表面的结霜规律具有十分重要的意义，例如，空气源热泵在不同地域、不同气象条件下的结霜情况不同，只有全面掌握其结霜规律，才能准确判断空气源热泵在我国各地域的结霜情况，并制定出行之有效的除霜控制策略。

3 冷表面霜层的物性研究与存在的问题

霜层密度和导热系数是霜层物性研究的重点和难点，两者的变化与整个动态结霜过程密切相关。

宏观上，霜层的生长可分为 3 个阶段：霜层晶体的形成过程、霜层生长过程和霜层充分生长过程。每一时期霜层的表面温度都不相同，霜层的密度和导热系数随温度变化而变化。1965 年，BARRON 等[4]试验发现：霜层的平均密度随着时间的延续而增加，二者大致呈抛物线关系。1970 年，BIGURIA 等[6]指出：霜层的密度不仅随着结霜时间的变化而变化，还受到主流温度、湿度、壁面温度等的影响：冷表面温度越低，形成霜层的密度也越低；而主流含湿量和速度的增大将引起密度的增大。侯普秀等[23]认为：在霜层生长初期，霜层密度随着高度的增加而减少，在靠近冷表面处，冰晶体非常密集，随着高度的增加，冰晶体的数量以近似于线性的方式减少。

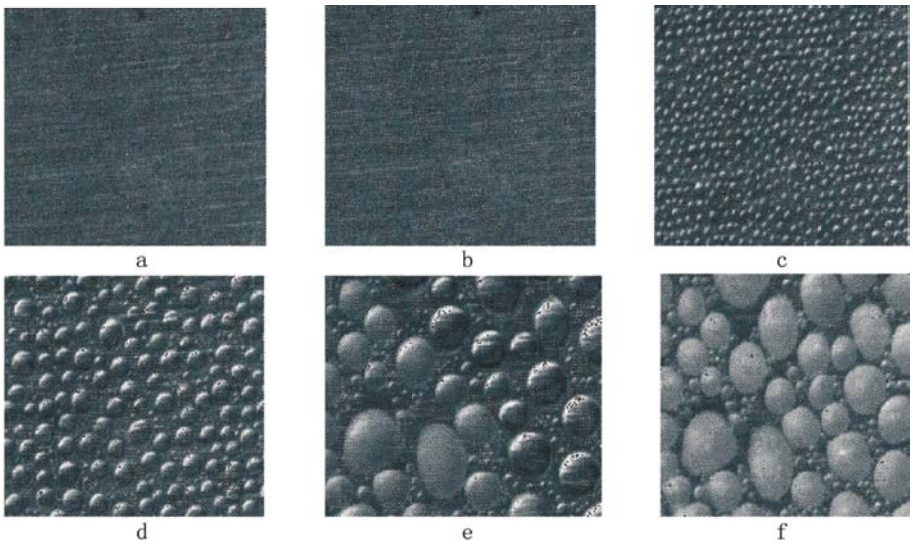
霜层导热系数是霜层结构及霜层内温度梯度的变化引起的水蒸汽扩散及凝华潜热释放和霜表面粗糙度引起涡流效应等因素共同作用的结果，因此霜层的导热系数主要取决于霜层密度，但也与霜层的微观结构有关。HAYASHI 等[11]提出：霜由冰柱和冰-空气混合物两部分组成，霜层的导热由这两部分并联而成，建立的模型结构与霜层充分生长期试验数据吻合较好。郝英立等[24]对自然对流条件下水平冷壁面上霜层的形成和成长的初始阶段进行了试验观测，结果显示：霜层形成的初始阶段是由冻结的冰粒组成，薄且具有相对较大的有效导热系数；随后冰晶在冻结冰粒的顶部沿着高度方向生长，霜层厚度增长很快，大量的空气间隙导致导热能力迅速下降。王伟等[25]在直流风洞型试验台中研究了冷表面温度对霜层物性的影响规律，认为单位时间内的结霜量随着冷表面温度降低而降低，霜层密度随着温度的升高而变高，由于霜层导热系数和霜层密度相关，而这 2 个参数随着冷表面温度的变化规律不尽相同，因此造成冷表面温度对霜层导热系数的影响并不显著。

结霜过程是一个典型的非平衡、非线性、非稳态的传热传质过程，霜层的结构非常复杂且不稳定，因此霜层物性会随着结霜时间、结霜条件和结霜地点的变化而变化。当霜层的表面温度达到水的三相点温度时，霜层的表面就会出现霜晶的重复融化和凝霜，融化后的水慢慢地渗入霜层，这时就很难预测它们在什么地方凝结，霜层的密度分布和变化更难预测。霜层物性是结霜现象研究的难点，由于试验数据的适用性很差，目前还没有一种能够精密准确测量这 2 个参数的试验手段。

4 冷表面霜层生长规律与存在的问题

探讨霜层生长规律对明确结霜机理和霜层数学模型的建立有至关重要的作用。BIGURIA 等[6]、HAYASHI 等[11]、TAO 等[12]很早就借助显微摄像手段拍摄了霜的生长过程，发现霜层由初始期的树枝状冰柱慢慢在枝端分枝网化后，进入生长的准稳态时期，并将霜层生长划分为结晶生长期、霜层生长期和霜层充分生长期。由于结霜是一个特殊的多孔介质、空隙率不定地伴随有边界移动的复杂热传递过程，如果对结霜过程的认识只停留在宏观表象观察阶段，对结霜机理的认识一定不充分明确。近年来，随着数字影像技术的发展，许旺发等[13]和吴晓敏等[14~15]对水平冷面上的结霜过程进行了显微观察，认为结霜过程基本上都经历了水珠生成、长大（包括水珠的合并）、冻结、初始霜晶生成、霜晶成长（包括部分霜晶的倒伏）等过程，并将初始霜晶分成了 4 大类：无规则霜晶、片状霜晶、针柱状霜晶和羽毛状霜晶。但在霜层生长过程中，组成霜层结构的冰晶形状具有随机性，不只是无规则、片状、针柱状和羽毛状。由于冷表面上结霜大多是在试验室的条件下进行，而在各个环境因素不可控的自然环境下，霜层的生长规律未必与试验的描述完全吻合。图 1 为吴晓敏等[15]对裸铝面及疏水面进行微细观观察得到的冷表面结霜初始阶段状态图。

观察结霜过程对正确认识结霜现象、规律有非常重要的意义。从侧向观察冷铜表面的结霜现象时不排除试件边缘快速生长的霜层挡住中间区域的可能，如图 2 所示。图 2d 圆圈部分为霜晶倒状前的霜枝变化；图 2e 圆圈部分为霜晶倒状后的霜枝变化。由于边缘空气温湿度比较充分，霜层的生长速度较中间区域快。金敬福等[26]将试样弯曲成拱形，观察其拱峰处的结霜现象，将霜层生长划分为初始快速生长阶段和后续稳定慢速生长阶段，避免了试样边缘的霜层生长对观察区域的影响。



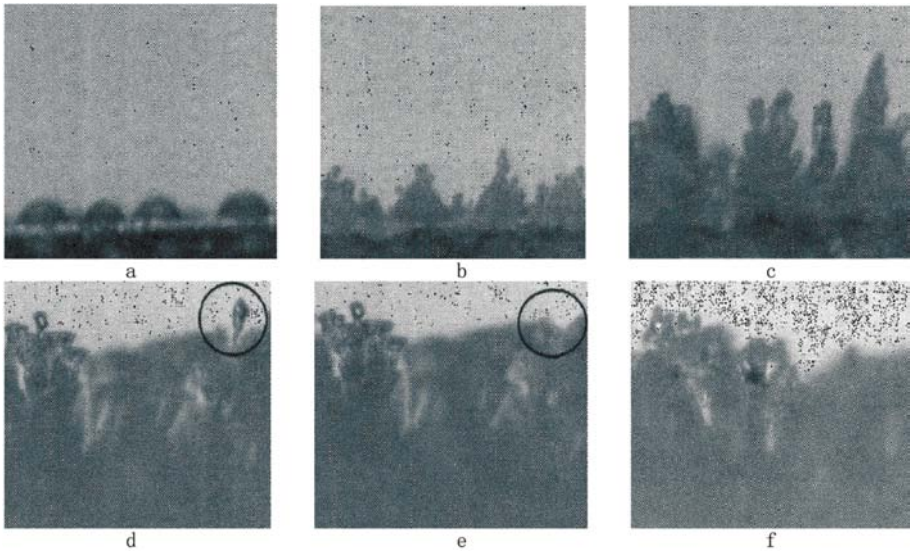
注：正拍，冷表面温度－8.1℃，空气温度 17.3℃，相对湿度 30%

图 1 竖直裸铝面结霜初始过程[15]

Fig. 1 Initial frosting process at vertical bare aluminum surface[15]

a—裸铝表面；b—开始结露；c—水珠形成；d—聚合长大；e—部分冻结；f—完全冻结

a-Bare aluminum surface; b-Condensation; c-Droplet growing;
d-Aggregating; e-Partial frozen; f-Completely frozen



注：侧拍，冷表面温度－9.5℃，空气温度 15.5℃，相对湿度 60%

图 2 竖直裸铝表面结霜过程[26]

Fig. 2 Frosting process at vertical bare aluminum surface[26]

a—水珠冻结；b—初始霜晶；c—霜的长大；d—霜晶倒伏前；e—霜晶倒伏；f—霜晶回融

a-Frozen droplet; b-Initial frost crystal; c-Growth of frost;
d-Before falling; e-Frost crystal falling; f-Frost crystal melting

5 结论与展望

霜层的存在，轻则恶化工程设备运行特性，重则影响到设备的正常运转。因此，研究结霜过程对指导结霜工况下运行的工程设备设计有着重要的指导意义。结霜是一个复杂且受诸多因素影响的动态过程，空气的相对温湿度和冷表面温度是影响冷表面结霜的主要因素，在这些不易控制的环境因素影

响下，霜层的生长、霜层的物理结构和霜层的物性均呈现较大差异。冷表面结霜大致经历水珠生成、长大（包括水珠的合并）、冻结、初始霜晶生成、霜晶成长（包括部分霜晶的倒伏）等过程。在霜层生长阶段，受环境因素影响的霜晶形状不一，具备随机性，环境因素和冷表面温度时刻变化导致霜层的物性十分复杂，凝华融化现象的出现使得霜层的物理结构和物性更加不确定。

结霜试验观察过程中显微观察手段不完善，试件边缘效应对结霜过程研究影响较为严重，物性参数的检测手段和精度不能满足实际需求，数据重复性较差，受环境因素干扰严重等，都是亟待解决的问题，是结霜现象领域接下来要研究的重点。

[参考文献] (References)

[1] 陈叔平，来进琳，殷劲松，等. 空温式深冷翅片管气化器表面结霜特性实验研究[J]. 制冷学报，2010，31（4）：26-30.
CHEN S P，LAI J L，YIN J S，et al. Experiment on frost characteristic of air-warmed cryogenic finned-tube vaporizer[J]. Journal of Refrigeration，2010，31(4)：26-30.（in Chinese）

[2] 乔燕军，王丰绪，崔啸鸣. 高寒地区风力发电机组测风仪结冰现象的研究[J]. 内蒙古电力技术，2011，29（6）：14-17.
QIAO Y J，WANG F X，CUI X M. Research on anemoscope freeze of wind power units in severe cold district[J]. Inner Mongolia Electric Power，2011，29(6)：14-17.（in Chinese）

[3] 姚杨，姜益强，马最良. 空气源热泵冷热水机组空气侧换热器结霜规律[J]. 哈尔滨工业大学学报，2002，34（5）：660-662.
YAO Y，JIANG Y Q，MA Z L. Frosting for airside heat exchanger of the water chiller/heater of air source heat pump[J]. Journal of Harbin Institute of Technology，2002，34(5)：660-662.（in Chinese）

[4] BARRON R F，HAN L S. Heat and mass transfer to a cryo-surface in free convection transactions of the ASME[J]. Journal of Heat Transfer，1965，87(4)：499-506.

[5] SMITH R V，EDMONDS D K，BRENTARI E G F. Analysis of frost phenomena on cryo-surface[J]. Advances in Cryogenic Engineering，1964，9：88-98.

[6] BIGURIA G，WENZEL L A. Measurement and correlation of water frost thermal conductivity and density[J]. Industrial and Engineering Chemistry Fundamentals，1970，9(1)：129-138.

[7] BRIAN P L T，REID R C，SHAH Y T. Frost deposition on cold surface[J]. Industrial and Engineering Chemistry Fundamentals，1970，9(3)：375-380.

[8] TRAMMEL G J，LITTLE D C，KILLGORE E M. A study of frost formed on a flat plate held at sub-freezing temperatures[J]. ASHRAE，1968，10：42-47.

[9] SANDERS C T. The influence of frost formation and defrosting on the performance of air cooler[M]. Netherland：Technische Hogeschool Delft，1974.

[10] JONES B W，PARKER J D. Frost formation with varying environmental parameters[J]. Journal of Heat Transfer，1975，97(2)：255-259.

[11] HAYASHI Y，AOKI A，YUHANA H. Study of frost properties correlation with frost formation types[J]. Journal of Heat Transfer，1977，99(2)：239-245.

[12] TAO Y X，BESANT R W，REZKALLAH K S. A mathematical model for predicting the densification and growth of frost on a flat plate[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer，1993，36（2）：353-363.

[13] 许旺发，吴晓敏，王维城，等. 水平冷表面上霜晶生长规律的实验研究[J]. 低温工程，2003，136（6）：41-45.
XU W F，WU X M，WANG W C，et al. Experimental study of frost crystal growth on a horizontal cold surface[J]. Cryogenics，2003，136(6)：41-45.（in Chinese）

[14] 吴晓敏，单小峰，王维城，等. 冷表面结霜的微细观可视化研究[J]. 清华大学学报：自然科学版，2003，43（10）：1437-1440.
WU X M，SHAN X F，WANG W C，et al. Meso-scale visual observation of frost formation on cold surfaces[J].

Journal of Tsinghua University: Science and Technology, 2003, 43(10): 1437-1440. (in Chinese)

[15] 吴晓敏，江航，王维城. 冷面结霜微细观特性的实验研究[J]. 工程热物理学报，2008，29 (9)：1545-1547.
WU X M, JIANG H, WANG W C. Experimental studies of meso-scale frost formation on cold surface[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2008, 2(9): 1545-1547. (in Chinese)

[16] LEE Y B, RO S T. An experimental study of frost formation on a horizontal cylinder under cross flow[J]. International Journal of Refrigeration, 2001, 24(6): 468-474.

[17] LEE Y B, RO S T. Frost formation on a vertical plate in simultaneously developing flow[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2002, 26(8): 939-945.

[18] KOYAMA S, KIM D, KUWAHARA K, et al. An experiment on frosting phenomena in a fin bundle[C]//Purdue University. International Refrigeration and Air Conditioning Conference. West Lafayette, 2006: R134. 1-R134. B.

[19] EHSAN M, SANKAR P, LORENZO C, et al. Experimental investigation of the surface temperature and water retention effects on the frosting performance of a compact microchannel heat exchanger for heat pump systems[J]. International Journal of Refrigeration, 2012, 35(1): 171-186.

[20] KYOUNGMIN K, JUNG-SOO K, KWAN-SOO L. Characteristics of frost formation on two-dimensional fins and its empirical correlations[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2010, 53(13-14): 2670-2675.

[21] 李瑞霞，吴晓敏，王维城. 铝表面结霜现象的实验研究[J]. 热科学与技术，2005，4 (4)：315-318.
LI R X, WU X M, WANG W C. Experimental study of frost phenomena on aluminum plate[J]. Journal of Thermal Science and Technology, 2005, 4(4): 315-318. (in Chinese)

[22] 吴晓敏，李瑞霞，王维城. 强制对流条件下结霜现象的实验研究[J]. 清华大学学报：自然科学报，2006，46 (5)：682-686.
WU X M, LI R X, WANG W C. Experimental investigation of frost growth in forced convection[J]. Journal of Tsinghua University: Science and Technology, 2006, 46(5): 682-686. (in Chinese)

[23] 侯普秀，蔡亮，虞维平. 霜层生长初期冰晶体分布状况实验研究[J]. 制冷学报，2006，27 (2)：1-5.
HOU P X, CAI L, YU W P. Experiment investigation on distribution of ice crystal during initial period of frost growth[J]. Journal of Refrigeration, 2006, 27(2): 1-5. (in Chinese)

[24] 郝英立，IRAGORRY J，TAO Y X. 初始成长阶段霜层特性实验研究[J]. 东南大学学报：自然科学版，2005，35 (1)：154-158.
HAO Y L, IRAGORRY J, TAO Y X. Experimental investigation on characteristics of frost layer during the initial growth period[J]. Journal of Southeast University: Natural Science Edition, 2005, 35(1): 154-158. (in Chinese)

[25] 王伟，张富荣，赵耀华，等. 冷表面温度对动态结霜过程霜层特性影响的实验研究[J]. 工程热物理学报，2010，31 (4)：663-666.
WANG W, ZHANG F R, ZHAO Y H, et al. Experimental study for frost characteristics of dynamic frosting process under variable cold surface temperatures[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2010, 31(4): 663-666. (in Chinese)

[26] 金敬福，李微微，陈廷坤，等. 拱形铜片试样表面的结霜过程[J]. 吉林大学学报：工学版，2012，42 (5)：1168-1172.
JIN J F, LI W W, CHEN T K, et al. Frosting process of arched copper surface[J]. Journal of Jilin University: Engineering and Technology Edition, 2012, 42(5): 1168-1172. (in Chinese)