

文章编号: 0258-0926(2019)02-0062-06; doi:10.13832/j.jnpe.2019.02.0062

空间弯管管束固有频率及附加质量系数计算

刘丽艳, 徐 炜, 谭 蔚*, 李 昭, 郭 凯

天津大学化工学院, 天津, 300350

摘要: 在工程设计过程中, 合理确定中间热交换器内空间弯管的固有频率和附加质量系数, 对于该设备的安全稳定运行至关重要。本文旨在通过有限元方法计算中间换热器同心圆排布的管束在空气和液钠环境中的固有频率及附加质量系数。将管束分为 3 个典型区域, 选取 6 个位置建立换热管和流体域的三维模型, 计算换热管的固有频率和附加质量系数。结果表明, 换热管在空气中的固有频率受空间弯管的弯曲半径影响较小, 附加质量系数受空间弯管的弯曲半径和所处区域位置影响较大, 近似三角形排布区域的管束固有频率最低, 该区域内层换热管的附加质量系数最大。

关键词: 中间热交换器; 空间弯管; 固有频率; 附加质量系数; 有限元方法

中图分类号: TL364 **文献标志码:** A

Calculation of Natural Frequency and Added Mass Coefficient of Spatial Bend Tube Bundle

Liu Liyan, Xu Wei, Tan Wei*, Li Zhao, Guo Kai

School of Chemical Engineering and Technology, Tianjin University, Tianjin, 300350, China

Abstract: It is a crucial step for the safe and stable operation of the intermediate heat exchanger to determine the reasonable values of natural frequencies and added mass coefficients of the spatial bend tubes during the engineering design process. This work aims to calculate the natural frequencies and added mass coefficients of the concentric spatial bend tubes of the intermediate heat exchanger in air and liquid sodium by finite element method. The concentric tube bundle was divided into three typical areas. For these typical areas, three-dimensional models of heat exchanger tubes and fluid fields were built to calculate the natural frequencies and added mass coefficients at six places. The results show that the natural frequency of the heat transfer tubes in the air is less affected by the bending radius of the spatial bend tube, while the added mass coefficient is greatly affected by the bending radius of the spatial bend tube and the place in which it is located. The tubes located in the approximate triangular arrangement place have the lowest natural frequency and the highest added mass coefficient.

Key words: Intermediate heat exchanger, Spatial bend tube, Natural frequency, Added mass coefficient, Finite element method

0 引 言

随着核工业的发展, 核电厂换热器的设计和制造要求也越来越高^[1-2]。中国实验快堆 (CEFR) 的中间热交换器 (IHx) 是反应堆中一回路和二

回路进行热量交换的关键设备, 以钠-钠为介质。

管束的固有频率是进行所有振动分析的基础, 固有频率计算的准确性对于流体诱发振动的分析、计算与校核具有重要意义^[3]。

收稿日期: 2018-09-03; 修回日期: 2019-01-08

基金项目: 国家重点研发计划资助 (2018YFC0808500)

作者简介: 刘丽艳 (1977—), 女, 副教授, 现从事化工设备安全可靠性方面的工作

*通讯作者: 谭 蔚, E-mail: wtan@tju.edu.cn

获取固有频率和附加质量系数的传统方法有公式计算法和实验法等^[4]，GB151—2014^[5]和TEMA—2007^[6]分别给出了常见管束结构形式的简化计算方法。近年来，计算机技术迅速发展，有限元方法被广泛应用于科学研究及工程计算中。Prakash 等^[7]对原型快堆（PFBR）的 IHX 管束固有频率进行了有限元分析计算，杨志海等^[8]利用有限元方法计算了被刚性管包围的中心弹性管的附加质量系数，均得到了与实验相吻合的结果。因此，有限元数值模拟是一种有效且可靠的计算固有频率和附加质量系数的方法。

IHX 与传统的换热器相比有较明显的区别：

①换热管为空间弯管结构；②支撑形式采用波纹钢带与扁钢带相结合的方法；③热交换器中换热管的排布形式为同心圆排布。考虑到 IHX 换热管结构和支撑形式的特殊性，现有标准或计算公式无法用于计算换热管的固有频率，实验方法测量也有较大难度。

本文采用有限元计算的方法对空气中和液钠中的换热管固有频率进行数值模拟计算，并以固有频率为依据计算同心圆排布的附加质量系数。

1 IHX 空间弯管模型

1.1 IHX 简介

IHX 是 CEFR 连接一、二回路的边界。一次侧主冷却系统的钠通过 IHX 将热量传递给二次侧，并隔离两侧流体，避免放射性物质的泄漏和污染^[9]。IHX 主要结构如图 1 所示。管束由换热管、内筒体、外壳、拉杆、防振带和上下管板组成。换热管直线段在轴向高度上安装防振带，构成支撑结构，约束换热管位移。

1.2 换热管管束结构

为研究空间弯管的固有频率以及附加质量系数等参数，需先建立换热管的三维模型。该换热管为空间螺旋弯管结构，其外径为 16 mm，以环排方式进行安装，管束位移由钢带进行约束，如图 2 所示，具有较好的抵御由于热应力引起变形的能力^[10]，是一种常见的 IHX 管型。换热管中部为同轴弯曲，且同一层的换热管弯曲成同环面，各层管束根据布置半径的不同，空间结构有所不同^[11]，内层换热管弯曲半径明显小于外层换热管，如图 2 所示。在计算换热管固有频率时，需考虑换热管所在位置的影响。

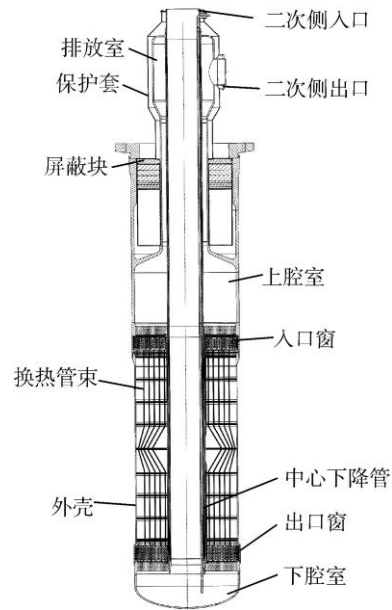


图 1 IHX 结构简图

Fig. 1 Structure Diagram of Intermediate Heat Exchanger

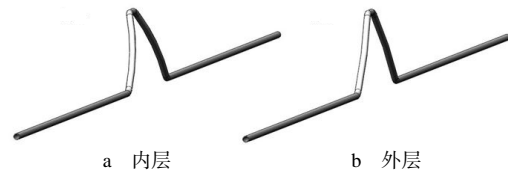


图 2 换热管模型

Fig. 2 Models for Heat Exchange Tube

1.3 支撑模型简化

IHX 换热管 2 端与管板采用胀焊结合的方式固定，其余约束采用扁钢带和波纹钢带相结合的方式。扁钢带和波纹钢带支撑的建模如图 3 所示。换热管穿插于波纹钢带和扁钢带中间。该支撑可较好地限制换热管沿径向和周向的运动，为换热管提供稳定支撑，并降低支撑对轴向流的影响。

若完全按照实际情况进行建模，会使建模难度增大，计算量大幅提高，因此笔者做出一些合理的假设与简化。对于胀焊结合的连接方式，假设管板在其厚度方向与换热管全部接触^[10]，且管

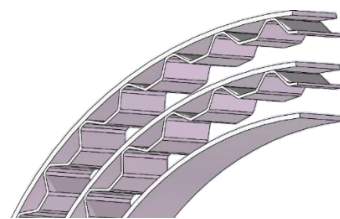


图 3 IHX 换热管支撑结构

Fig. 3 Support Structure of Heat Transfer Exchange in IHX

板厚度远大于换热管外径,连接牢固,因此将换热管 2 端与管板的接触均简化为固支处理。支撑主要限制换热管周向和径向的运动,假设换热管和支撑结构间的接触连续无分离,则支撑对于换热管的约束作用完全达到,因此笔者建立柱坐标系在支撑处将周向位移和径向位移约束为 0,轴向位移自由。共设置 2 个固支约束和 9 个位移约束,换热管支撑简化设置结果如图 4 所示。

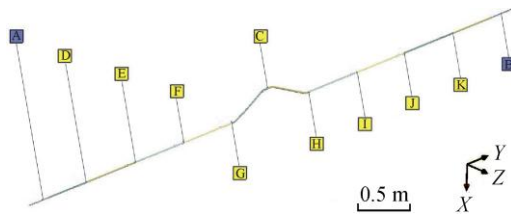


图 4 换热管约束设置

Fig. 4 Setting of Constraint of Heat Exchange Tube

A—固支约束 1; B—固支约束 2; C—位移约束 1; D—位移约束 2; E—位移约束 3; F—位移约束 4; G—位移约束 5; H—位移约束 6; I—位移约束 7; J—位移约束 8; K—位移约束 9

1.4 计算位置选取

IHX 的管束排布形式为同心圆排布,图 5 为 1/6 模型。由图 5 可知,换热管分布于圆环形的管板,由内侧向外侧换热管数量依次增加。同心圆排布管束与现有标准中的正方形排布、三角形排布有明显区别,同一层中不同位置的管与周围管的相互位置关系各不相同。因此在计算附加质量系数时需考虑换热管位置的影响。

为对各位置的换热管固有频率及附加质量系数进行全面的计算,本文选取 6 根具有代表性的换热管进行研究(图 5)。选择 1#~6#位置是由于同心圆排布中换热管的相对位置随着层数和位置变化而变化。1#和 4#可视为近似正方形排布,3#和 6#可视为近似三角形排布,2#和 4#可认为是介于正方形排布和三角形排布的过渡排布。1#、

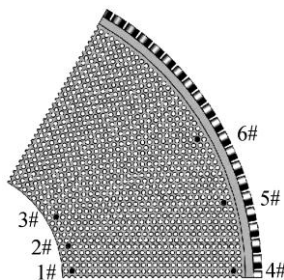


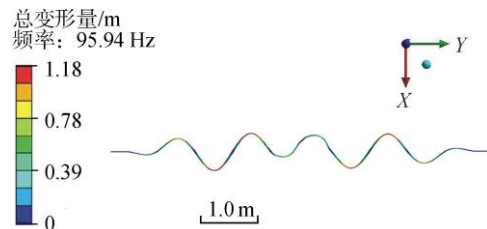
图 5 IHX 管束分布

Fig. 5 Tube Bundle Distribution of IHX

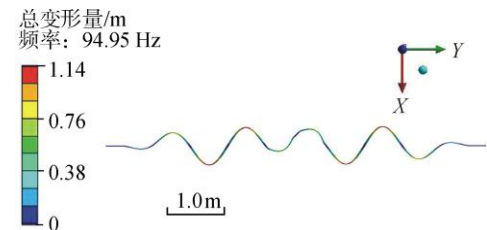
2#和 3#为弯曲半径较小的内层换热管,4#、5#和 6#为弯曲半径较大的外层换热管。采用 ANSYS workbench 有限元计算模块对管束空气中与液钠环境下的固有频率和附加质量系数进行计算。

2 空气中换热管固有频率

同层换热管的结构和支撑形式相同,因此针对不同层换热管的固有频率进行计算,1 阶振型如图 6 所示。可以看出,不同层换热管的振型相似,最大位移处均出现在靠近弯管段的直管处,在此后的计算和校核中应特别注意这一位置。



a 内层



b 外层

图 6 空气中换热管 1 阶振型

Fig. 6 First-Order Mode of Heat Exchange Tube in Air

空气中内层(1#、2#、3#)和外层(4#、5#、6#)换热管固有频率计算结果分别为 95.94 Hz 和 94.95 Hz。不同层的换热管固有频率差距不大,内层与外层最大固有频率差为 0.99 Hz,因此弯管段结构的不同对于换热管固有频率的影响可忽略,不同层的换热管固有频率近似相同。

3 液钠中换热管固有频率

3.1 模态分析数值模型

管束固有频率的计算主要采用流固耦合模态方法,考虑到液钠环境下的管束模态受到周围管的影响。Moretti 和 Lowery^[12]在进行换热管附加质量系数实验研究时将中心管设置为弹性管,周围管设置为刚性管,以模拟真实管束环境,并得到较好的研究结果,本文采取相同的设置方法。

流体中换热管模态的计算模型同时包含中间弹性管、周围换热管以及流体域, 1#~6#位置对应的管束横截面如图 7 所示。

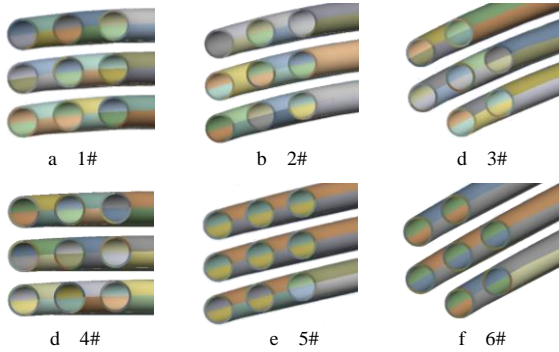


图 7 液钠中换热管计算模型横截面

Fig. 7 Cross Section of Calculation Model of Heat Exchange Tube in Liquid

本文针对液钠中管束的固有频率计算采用 ANSYS 数值计算模拟结合 ACT (ANSYS Customization Toolkit) 扩展插件的方法, 主要采用 ExtAcoustics 插件。与以往采用 Fluent 或 ANSYS CFX 计算流场中固有频率相比, 该方法可在将流场和换热管数据输入 ANSYS 后直接计算模态数据, 保证结果准确的同时减少计算量。

为了保证计算精度并提高计算效率, 流体域采用与换热管形状类似的流场对换热管束进行包裹, 图 8 为 4#位置的换热管及流体域模型。中间弹性管约束方式与第 2 节中的设置相同, 周围刚性管均设置为全管固支约束。液钠为高温环境, 通过查阅金属材料手册对换热管材料性能进行相应调整, 表 1 列出了数值计算模型的具体参数。

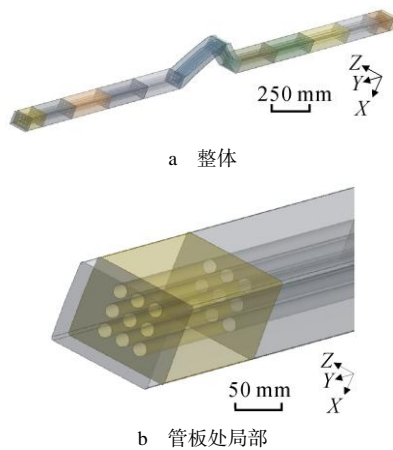


图 8 4#位置的流体域及管束模型

Fig. 8 Fluid Domain and Tube Bundle Model of 4#

表 1 数值计算模型参数

Table 1 Parameter of Numerical Calculation Model

参数名	参数值设置
液钠密度/ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	823
液钠中声速/ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	2318
换热管材料密度/ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	8030
换热管材料弹性模量/GPa	156
换热管材料线膨胀率/ 10^{-6}K	18.6
换热器材料泊松比	0.31
流体域外侧边界	壁面
固液接触面	声学流固耦合界面
耦合方式	非对称算法耦合
重力加速度/ $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$	9.8
流体域横截面边长/mm	≥ 90

本文采用扫除 (Sweep) 方法对换热管和流体域进行网格划分, 但这 2 部分网格尺寸不同。为确定合理的网格尺寸, 需要对网格敏感性进行分析。换热管网格尺寸控制为 0.5~4.0 mm, 流体域网格尺寸控制为 2.0~8.0 mm。以 4#位置作为分析模型, 分析换热管网格尺寸时保持流体域网格尺寸为 2 mm, 分析流体域网格尺寸时保持换热管网格尺寸为 0.5 mm。结果如图 9 所示, 可看出, 应选取换热管网格尺寸为 4 mm, 流体域网格尺寸为 6 mm。

以 4#位置为例, 划分网格数为 107 万, 节点数为 489 万, 网格质量为 0.75, 网格划分质量较好, 网格规模合理。

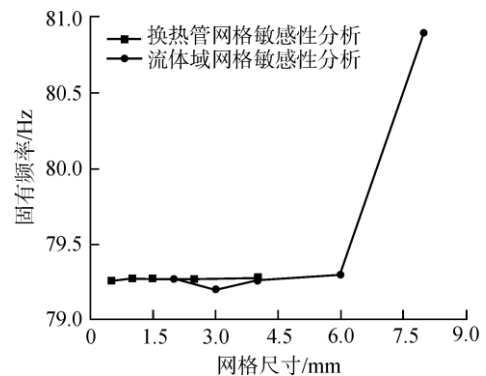


图 9 网格尺寸敏感性分析

Fig. 9 Sensitivity Analysis of Mesh Size

3.2 计算结果

本文对同心圆排布条件下 IHX 中 6 个不同位置的换热管在液钠中的固有频率进行计算, 结果显示 1 阶振型相近, 1#和 4#位置振型云图如图 10 所示。可看出, 液钠中换热管的 1 阶振型与空气

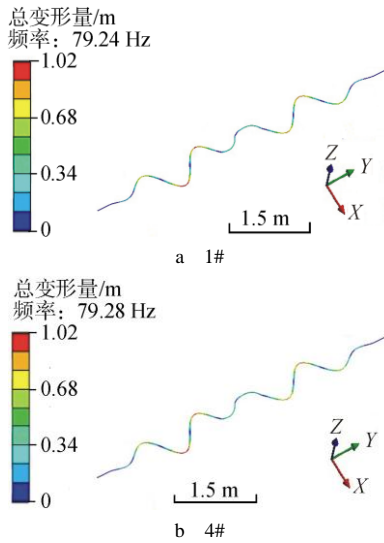


图 10 液体中 1#和 4#位置换热管 1 阶振型
Fig. 10 First-Order Mode of Heat Exchange Tubes of 1# and 4# in Liquid

中接近，最大振幅均出现在靠近弯管的直管部分。

液钠中换热管固有频率计算结果列于表 2，由结果可知，液钠中换热管的固有频率相比于空气中的固有频率有明显降低，液钠中的固有频率较空气中的固有频率低约 20%，管外流体对管束固有频率有明显影响。同一种排布下内层与外层换热管相应的固有频率相差不大，差值均在 2 Hz 以内，不同排布对固有频率的影响较小。当换热管所在层相同时，近似正方形排布和过渡排布位置处换热管固有频率很接近，但近似三角形排布较前两者固有频率均低，这意味着在近似三角形排布位置处换热管更容易出现流致振动，且内层近似三角形排布位置处的固有频率最低，为 76.20 Hz，在设计和运行维护中应重点关注。

表 2 不同位置换热管 1 阶固有频率计算结果
Table 2 Calculation Result of First-Order Natural Frequency of Heat Exchanger Tube at Different Locations

换热管位置	固有频率/Hz	
	空气	液钠
1#	95.94	79.24
2#	95.94	79.16
3#	95.94	76.20
4#	94.95	79.28
5#	94.95	79.02
6#	94.95	77.97

4 附加质量系数

当换热管在液体中振动时，其固有频率会由

于液体的影响而有所降低，表征该特点的系数称为附加质量系数，表示附加质量与被管子排开的液体质量之比^[8]。液体环境下的附加质量系数主要受换热管所处液体环境以及管束的排布形式的影响。对于同一台换热器，可认为换热管所处的液体环境是相同的，因此本文仅考虑管束排布形式对附加质量系数的影响。GB/T 151 标准中附加质量系数曲线是根据 Moretti 和 Lowery^[12]于 1976 年测定的静水中三角形排布和正方形排布管束中心管的附加质量系数而绘制的，这一曲线四十年来也一直作为换热器设计的经典曲线被沿用。但该曲线适用于常规排布的直管换热器，对同心圆排布的空间螺旋管并不适用，本文利用公式法和数值模拟计算的结果，分析并获得了 IHX 不同位置换热管的附加质量系数。

附加质量系数可利用空气中的固有频率和液体中的固有频率计算得到，根据 Chen^[13]的推导结果，附加质量系数 C_M 可由下式求得：

$$C_M = \left[\left(\frac{f_a}{f_w} \right) - 1 \right]^2 \frac{(d_o^2 - d_i^2) \rho_l}{d_o^2 \rho_0} \quad (1)$$

式中， f_a 、 f_w 分别为空气和液体中换热管的固有频率，Hz； d_i 、 d_o 分别为换热管的内径和外径，m； ρ_l 、 ρ_0 分别为管材和管外流体密度， kg/m^3 。

根据式 (1) 及表 2 中换热管固有频率数据，结合换热管内径和外径、管内和管外流体密度等参数，求得附加质量系数，计算结果见表 3。

表 3 附加质量系数计算结果
Table 3 Calculation Results of Additional Mass Coefficient

换热管位置	附加质量系数
1#	1.26
2#	1.27
3#	1.58
4#	1.18
5#	1.20
6#	1.31

由表 3 可知，同一层换热管中，近似正方形排布和过渡排布换热管的附加质量系数相近，近似三角形排布的附加质量系数大于另外 2 种排布，且内层和外层管束近似三角形排布的附加质量系数较另外 2 种排布的分别大 25% 和 10% 左右。同一种排布下，内层比外层换热管的附加质量系数大，这是因为内层螺旋弯管结构相比外层

结构曲率半径小, 管束振动受到周围管束的影响较外层的大, 从而导致附加质量系数的增加。

5 结 论

针对 CEFR 的 IHX 换热管建立三维模型, 并根据同心圆排布的特点选取 6 个不同位置的换热管, 分析其在空气和液钠中的固有频率, 计算不同位置的附加质量系数, 主要结论如下:

(1) 不同层换热管固有频率近似相同, 因此可忽略弯管段结构对于换热管固有频率的影响。

(2) 换热管在空气和液钠中 1 阶模态下的最大振幅均出现在靠近弯管的直管段部分, 在计算和校核过程中应予以重视。

(3) 相较于空气中换热管的固有频率, 管外液钠的存在会使换热管固有频率降低约 20%, 且在液钠环境中, 排布形式对同层换热管的固有频率有影响, 近似三角形排布的换热管固有频率最低, 为 76.20 Hz, 在工程中应特别注意防止流致振动的发生。

(4) 近似三角形排布的换热管附加质量系数大于近似正方形排布以及过渡排布的换热管, 且内层换热管附加质量系数大于外层, 内层近似三角形排布换热管附加质量系数最大, 为 1.58, 固有频率降低也最为明显。

参考文献:

- [1] 广东核电培训中心. 900 MW 压水堆核电站系统与设备[M]. 北京: 原子能出版社, 2007: 87-88.
[2] 赖永星, 刘敏珊, 董其伍. 静止外部流体对换热器管

束动特性的影响分析[J]. 压力容器, 2004, 21(12): 22-25.

- [3] 刘敏珊, 刘彤, 董其伍. 蒸汽发生器 U 形传热管动态特性影响因素分析[J]. 核动力工程, 2008, 29(2): 43-47.
[4] GANAPATHY V. Finding the natural frequency of vibration of exchanger tubes[J]. Chemical Engineering, 1977, 84(20): 122.
[5] 全国锅炉压力容器标准化技术委员会. 热交换器: GB/T 151-2014[S]. 北京: 中国标准出版社, 2014.
[6] Tubular Exchanger Manufacturers Association. TEMA-2007 Standards of Tubular Exchanger Manufacturers Association Ninth Edition[S]. New York: Tubular Exchanger Manufacturers Association, 2007.
[7] PRAKASH V, THIRUMALAI M, PRABHAKAR R, et al. Assessment of flow induced vibration in a sodium-sodium heat exchanger[J]. Nuclear Engineering and Design, 2009, 239(1): 169-179.
[8] 杨志海, 谭蔚, 杜克铭, 等. 换热器管束附加质量系数的影响因素[J]. 化学工程, 2016, 44(8): 25-30.
[9] 冯预恒, 王一新, 赵勇, 等. CEFR 中间热交换器一次侧数值拟[J]. 原子能科学技术, 2014, 48(7): 1172-1175.
[10] 张添翼, 张振兴, 胡丽娜, 等. CEFR 中间热交换器管束结构形式对热应力影响的研究[J]. 核动力工程, 2015, 36(5): 148-151.
[11] 张添翼, 刘佳, 张振兴. 基于固有频率分析的中间热交换器管束支撑设计[J]. 原子能科学技术, 2017, 51(12): 2149-2153.
[12] MORETTI P M, LOWERY R L. Hydrodynamic inertia coefficients for a tube surrounded by rigid tubes[J]. Journal of Pressure Vessel Technology, 1976, 98(3): 190-193.
[13] CHEN S S, WAMBSGANSS M W, JENDRZEJCZYK J A. Added mass and damping of a vibrating rod in confined viscous fluids[J]. Journal of Applied Mechanics, 1976, 43(2): 325-329.

(责任编辑: 张祚豪)