

燃气轮机轮盘预旋冲击冷却特性研究

李宗全, 牛夕莹

(中国船舶集团有限公司第七〇三研究所 船舶与海洋工程动力系统国家工程实验室, 黑龙江 哈尔滨 150078)

摘要:为提高冷却空气对涡轮轮盘的冷却效果,以某型燃气轮机低压涡轮为研究对象,提出了一种带有预旋冲击的轮盘冷却结构。当冷却空气流过该结构时,冷却空气的流动方向发生改变,提高了轮盘的换热效果,降低轮盘温度进而提高了轮盘强度储备。使用CFX有限元计算软件,对该冷却结构和轮盘进行了气-热-固耦合计算,结果表明:带有预旋冲击的冷却结构比非预旋冲击的冷却结构具有更高效的冷却效率;轮盘在预旋冲击冷却作用下,轮盘换热表面温度降低显著;当冷却空气进口温度降低60 K时,轮盘换热表面温度降低37 K;冷却空气进口压力增加0.39 MPa时,轮盘换热表面温度降低10 K。

关键词:燃气轮机;涡轮轮盘;预旋;冲击冷却

中图分类号:TK473 文献标识码:A DOI:10.16146/j.cnki.rndlgc.2021.08.004

[引用本文格式]李宗全,牛夕莹. 燃气轮机轮盘预旋冲击冷却特性研究[J]. 热能动力工程,2021,36(8):22-27. LI Zong-quan, NIU Xi-ying. Research on the characteristics of pre-swirl impingement cooling of gas turbine disc[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2021, 36(8): 22-27.

Research on the Characteristics of Pre-swirl Impingement Cooling of Gas Turbine Disc

LI Zong-quan, NIU Xi-ying

(No. 703 Research Institute of CSSC National Engineering Laboratory of Ship and Marine Engineering Power System, Harbin, China, Post Code: 150078)

Abstract: In order to improve the cooling effect of the cooling air on the gas turbine disc, the cooling structure of disc with pre-swirl impingement was proposed, taking the low pressure turbine of a certain gas turbine as research object. The flow direction of cooling air was changed when the cooling air flowed through the structure, which improved the heat transfer effect of the disc and reduced the disc temperature, so as to improve the strength reservation of disc. The gas-thermal-solid coupling calculations for the cooling structure and the disc were performed by use of CFX finite element software. The results show that the cooling structure with pre-swirl impingement has higher cooling efficiency than that without pre-swirl impingement. The heat transfer surface temperature of the wheel decreases significantly under the cooling effect of pre-swirl impingement. When the inlet temperature of cooling air is reduced by 60 K, the heat transfer surface temperature of wheel is reduced by 37 K. When the inlet pressure of cooling air increases by 0.39 MPa, the heat transfer surface temperature of wheel is reduced by 10 K.

Key words: gas turbine, turbine wheel, pre-swirl, impingement cooling

引 言

随着燃气轮机初温的不断提高,涡轮轮盘所受热负荷不断增大,因此对燃气轮机的结构设计提出了更高要求。由于轮盘材料耐温提升的速度远小于燃气初温的提升速度,仅仅依靠材料的发展是不够的。因此,合理引入轮盘冷却系统是解决问题的关键。高效的冷却技术可以延长受热部件的使用寿命,并且可以使用更经济的材料来降低制造成本,这些显著的优点使得冷却系统的设计在燃气轮机研制中占有举足轻重的地位^[1]。

关于冲击冷却技术,国内外一些学者进行了相关研究。Chupp^[2]和 Metzger 等人^[3]对冲击冷却的冲击孔大小和排布形式、冲击射流到冲击靶面的垂直距离等参数进行了充分研究,同时给出了冲击靶面的传热系数分布云图。Burnham Slipper 等人^[4]发现了提高冲击冷却换热在数值模型预测准确性方面的应用方法。Liu 等人^[5]通过实验和仿真研究了狭窄通道中错排冲击射流结构的气动性能。

本文针对轴流涡轮轮盘的冲击冷却技术,采用气-热-固耦合的数值仿真方法,探索预旋冲击冷却下的轮盘冷却特性,研究结果可为燃气轮机的冲击冷却设计提供指导。

1 数值模拟

1.1 计算模型

涡轮轮盘及其预旋冷却结构简图如图 1 所示,图中横向大箭头代表燃气,竖向小箭头代表冷却空气,箭头方向为对应物质的流动方向,由压气机输送来的冷却空气经过空心导叶、空气连接管进入冷却结构的环型腔室,并通过环型腔室右侧的预旋喷嘴射流喷出,将冷却空气均匀地喷射在轮盘盘幅上,确保轮盘均匀冷却,大部分冷却空气通过动叶与导叶之间的间隙流出,与通流部分中的燃气汇合,起到密封燃气的作用。

冷却结构的三维简图如图 2 所示。该结构主要由隔板、压环两部分组成,通过连接螺栓将两部分固定在一起,形成中空、的环型空腔结构。在隔板上开有连接孔,一端连接环型空腔,另一端与空气连接管相连。喷嘴数量为 108 个,喷嘴处气流出口方向与

轮盘旋转轴方向的夹角为 75°。

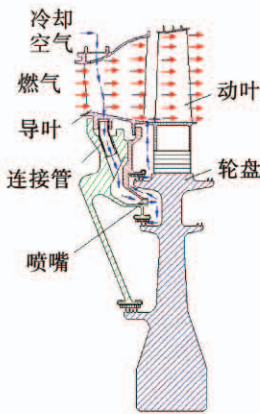


图 1 轴流式涡轮结构简图

Fig. 1 Structure diagram of axial turbine

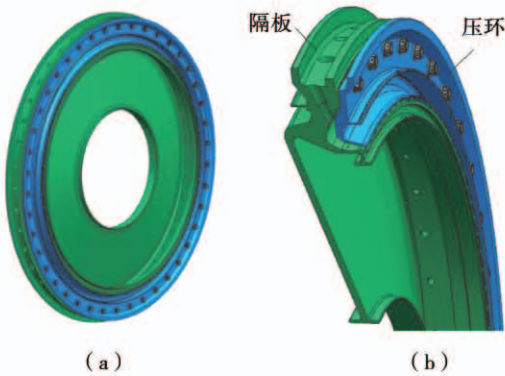


图 2 冷却结构三维视图

Fig. 2 3D view of cooling structure

为了简化计算,降低工作量,本文选取 1/108 几何模型进行仿真计算,并在边界位置施加循环对称约束。

1.2 网格划分及边界条件设置

采用 ICEM 软件对计算域进行网格划分,如图 3 所示,图 3(b)为流体域网格放大模型。在进行计算之前,首先针对模型进行网格无关性验证,确保网格数量对仿真结果无影响,本文最终选取的计算模型网格数为 421 万。

为了对轮盘冷却特性进行更加准确的仿真分析,对冷却气体与轮盘的交界表面进行气-热-固耦合数值模拟,对轮盘其余表面施加温度及换热系数边界,盘表面换热参数如图 4 所示。A 点与 B 点之间的粗线所代表的表面为气-固换热表面,冷却空气主要对气-固换热表面进行冷却。

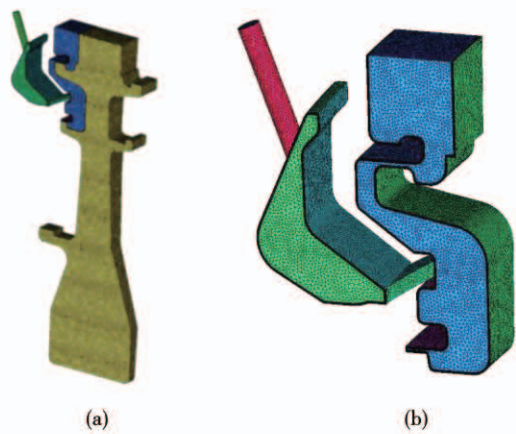


图 3 网格模型
Fig. 3 Grid model

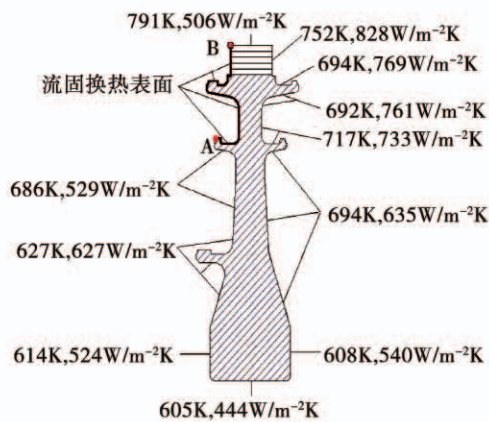


图 4 轮盘表面换热参数示意图
Fig. 4 Schematic diagram of heat transfer parameters
of wheel surface

在 CFX 有限元软件中,将流体域设置为非旋转域,固体域设置为旋转域,旋转速度为 $n(\text{r/min})$,固定表面与转动表面之间设置为接触模式,可以模拟轮盘旋转对流体影响,更为准确地给出空气在冷却结构中的流动特点。

2 流场计算及结果分析

冷却空气在流体域中的流线分布如图 5 所示。冷却空气在进口位置流动较为均匀,进入环型腔室后,通流面积急剧增大,空气流动速度降低,在预旋出口位置面积急剧减小,冷却空气流速迅速增加,空气流动较为流畅。由静压分布云图可知冷却空气在冷却结构中的静压较大,流出冷却结构后,静压明显降低,冷却空气静压分布如图 6 所示。在喷嘴位置与入口位置的总压相当,表明空气在结构中的流动

损失较小,冷却空气总压分布如图 7 所示。由于通流面积急剧减小,在喷嘴位置的冷却空气流速大幅增加。冷却空气在喷嘴中进行预旋,使冷却空气具有一定周向速度,射流冲出的冷却空气,遇到轮盘表面发生弯折。由图 5 流线分布情况可知,喷嘴上方的流线较密集,说明绝大部分冷却空气由上部出口流出。冷却空气在与轮盘的接触表面流动较为均匀,在出口位置的大腔室内存在较大的涡流,具有一定的压力损失,影响冷却空气的流动。

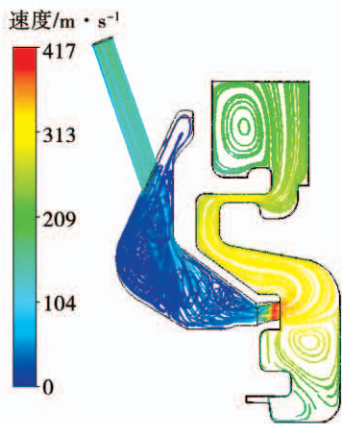


图 5 冷却空气流线分布
Fig. 5 Streamline distribution of cooling air

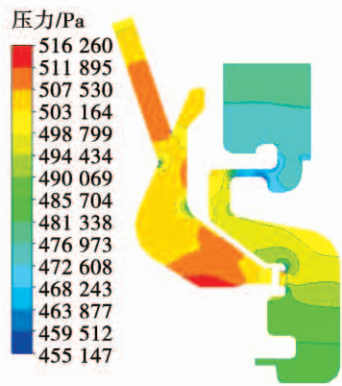


图 6 冷却空气静压分布
Fig. 6 Static pressure distribution of cooling air

轮盘温度场分布如图 8 所示。轮盘最高温度为 757 K,出现在右上角轮盘与动叶连接位置。最低温度为 656 K,出现在轮盘盘心位置。轮盘温度沿半径方向依次降低,等温线形状接近同心圆。由于冷却空气的冷却作用,在喷嘴出口位置的轮盘温度较低,等温线在该处发生转折,为非圆弧曲线,冲击冷却对轮盘的冷却效果较为明显。

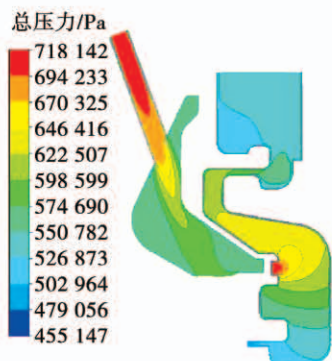


图 7 冷却空气总压分布

Fig. 7 Total pressure distribution of cooling air

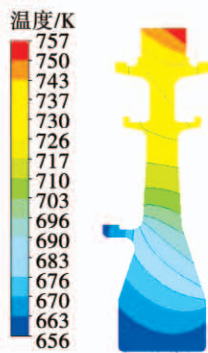


图 8 轮盘温度场分布

Fig. 8 Temperature field distribution of wheel

3 影响因素分析

在保证轮盘材料、轮盘固体壁面换热参数不变情况下,改变冷却空气进口温度、进口压力、轮盘转速及射流方式,研究这 4 个参数对涡轮轮盘冷却效果的影响。冷气进口温度取值分别为 718,698,678 和 658 K;冷气进口压力取值分别为 1.14,1.01,0.88 和 0.75 MPa;轮盘转速取值分别为 1.2*n*,1.1*n*,1.0*n* 和 0.9*n*。注:轮盘额定转速为 *n*(r/min)。

3.1 冷却空气进口温度对轮盘冷却特性的影响

在预旋冷却结构中,改变冷却空气进口温度,获得不同条件下的轮盘冷却效果,如图 9 所示。在进、出口压力边界不变情况下,随着冷却空气入口温度的不断降低,轮盘换热表面平均温度不断降低,轮盘平均温度不断降低,冷却效果不断增强。不同冷却空气进口温度下轮盘气-固换热表面温度如图 10 所示(喷嘴位置对应 0.053 m 处)。随着冷却空气进口温度的降低,换热表面空气平均流速略有下降,

对应换热系数略有降低,但由于冷却空气温度起主要作用,因此,随着冷却空气进口温度的降低,冷却空气对轮盘的冷却效果依然是增强的。冷却空气进口温度每降低 60 K,则气-固换热表面的平均温度降低 37 K,轮盘平均温度降低 10 K,不同冷却空气进口温度下轮盘温度如图 11 所示。

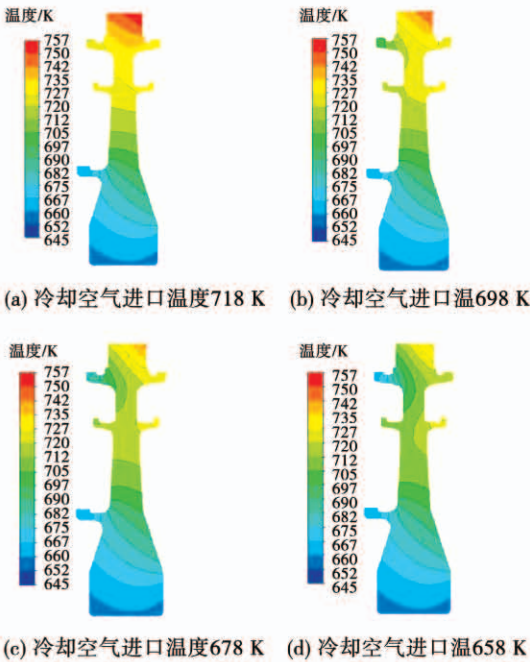


图 9 不同冷却空气进口温度轮盘冷却效果

Fig. 9 Cooling effect of wheel under different cooling air inlet temperatures

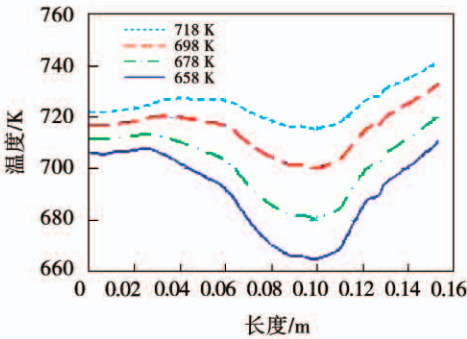


图 10 不同冷却空气进口温度下轮盘气-固换热表面温度

Fig. 10 Wheel temperatures on gas-solid heat transfer surfaces under different cooling air inlet temperatures

3.2 冷却空气进口压力对轮盘冷却特性影响

图 12 为不同冷却空气入口压力下轮盘温度。在进口温度边界不变情况下,随着冷却空气进口压

力的不断增加,冷却空气的流量不断增大,喷嘴处的冷却空气流速也相应增加,射流冲击轮盘的冷却效果提升明显,轮盘换热表面的温度不断降低,冷却空气对轮盘的冷却效果不断增强,不同冷却气体入口压力下轮盘气-固换热表面温度如图 13 所示。随着冷却空气进口压力的增加,换热表面空气流速增加,换热能力增强,对轮盘的冷却效果提升较大。

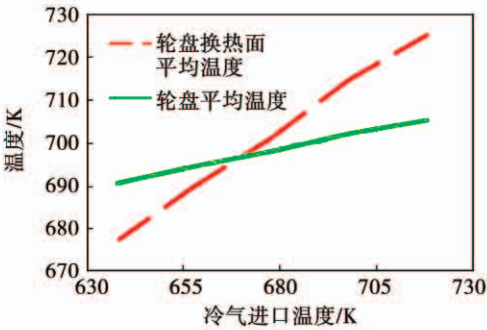


图 11 不同冷却空气进口温度下轮盘温度

Fig. 11 Wheel temperatures under different cooling air inlet temperatures

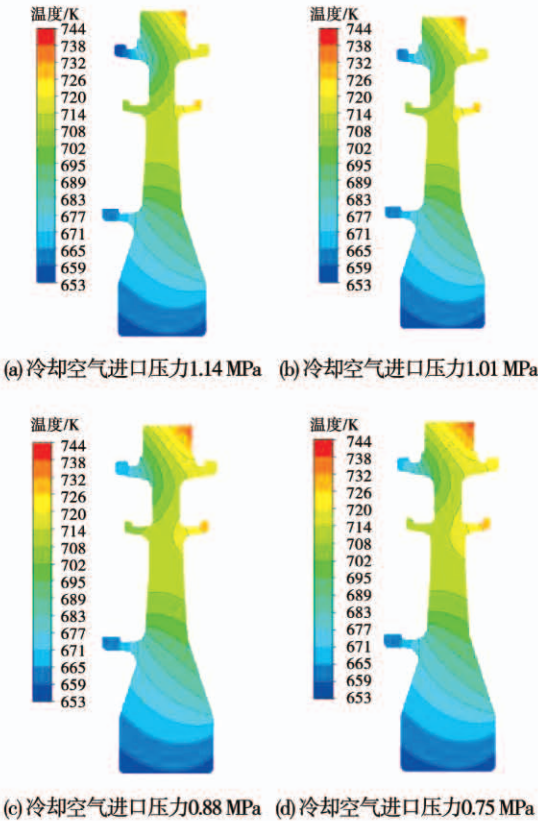


图 12 不同冷却气体进口压力下轮盘温度

Fig. 12 Wheel temperatures under different cooling air inlet pressures

冷却空气进口压力每增加 0.39 MPa,则气-固换热表面的平均温度降低 10 K,轮盘平均温度降低 4 K,不同冷却气体入口压力下轮盘温度如图 14 所示。由图 14 可知,冷却进口压力的变化,对轮盘冷却效果影响明显。

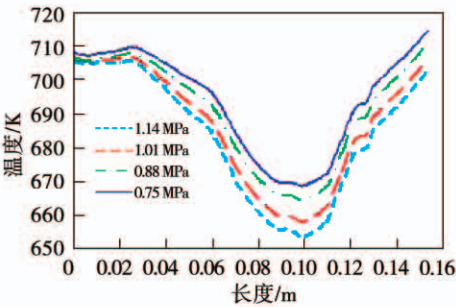


图 13 不同冷却空气进口压力下轮盘气-固换热表面温度

Fig. 13 Wheel temperatures on gas-solid heat transfer surfaces under different cooling air inlet pressures

3.3 轮盘转速对轮盘冷却特性的影响

在预选冷却结构中,将冷却空气进口温度设置为 658 K,进口压力设置为 0.75 MPa,仅改变轮盘转速,获得不同条件下的轮盘冷却效果,结果表明轮盘转速的变化对轮盘的冷却无明显影响。

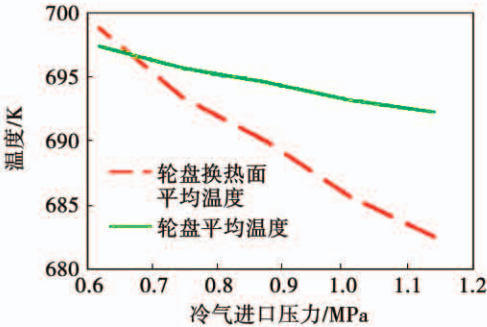


图 14 不同冷却空气入口压力下轮盘温度

Fig. 14 Wheel temperatures under different cooling air inlet pressures

3.4 预旋式冷却与无预旋式冷却对轮盘冷却效果的影响

预旋式冲击冷却相对于无预旋式冲击冷却具有更优良的冷却效果,预旋式冲击冷却结构使得冷却空气具有一定的周向旋转速度,避免了直接冲击轮盘而造成较大损失,使得冷却空气在轮盘表面具有

更高的流速,增强换热效果。无预旋情况下(喷嘴位置冷却空气速度方向与轮盘转轴方向夹角为 0°)冷却空气流线分布云图如图 15 所示,由图可知,流出喷嘴后的冷却空气直接冲击轮盘端面,造成较大的流动损失,喷嘴上方的冷却空气流速明显降低,换热效果变差。

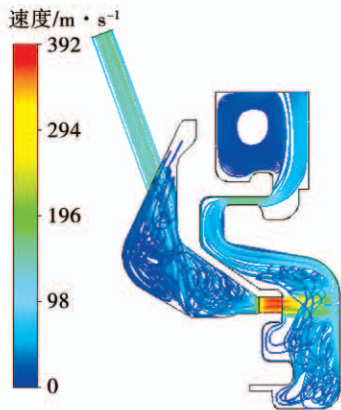


图 15 无预旋情况下冷却空气流线分布云图
Fig. 15 Streamline distribution of cooling air without pre-swirl

在冷却空气进口温度为 658 K,压力为 0.88 MPa 情况下,两种冷却方式的换热表面温度分布云图如图 16 所示。

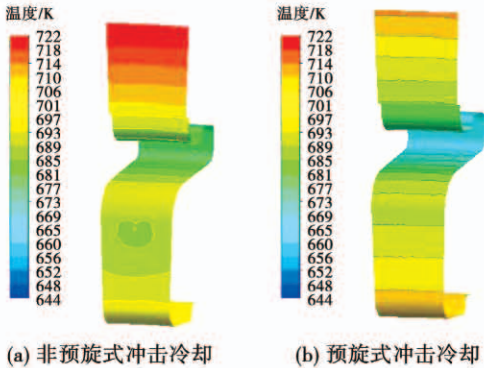


图 16 换热表面温度分布云图

Fig. 16 Temperature distribution of heat transfer surface

在喷嘴上方,预旋式冷却具有更好的冷却效果,并且在喷嘴位置没有集中冷却区,不会造成轮盘表面的冷热不均。由于预旋后的冷却空气大部分直接

由上出口流出,因此对喷嘴下方的轮盘表面冷却效果相对较差。在喷嘴上方的换热表面,预旋式冲击冷却平均温度比非预旋式冲击冷却低 11 K。

4 结 论

- (1) 轮盘与动叶连接位置热负荷较大,预旋冲击冷却技术对该区域的冷却效果显著,预旋装置可以有效降低冷却空气的能量损耗,提高轮盘换热表面的冷却效果;
- (2) 冷却空气进口温度降低 60 K,轮盘换热表面温度降低 37 K;
- (3) 冷却空气进口压力增加 0.39 MPa,轮盘换热表面温度降低 10 K;
- (4) 轮盘转速的变化对轮盘的冷却无明显影响;
- (5) 预旋式冲击冷却相比非预旋式冲击冷却具有更好的冷却效果,并且轮盘不会出现局部低温现象。

参考文献:

[1] 卢康博,马 超,白书战,等. 微型燃气轮机涡轮背盘冲击冷却特性研究 [J]. 热科学与技术,2020,19(1): 55 – 62.
LU Kang-bo,MA Chao,BAI Shu-zhan, et al. Impingement cooling performance of back-disk in micro gas turbine [J]. Journal of Thermal Science and Technology,2020,19(1): 55 – 62.

[2] CHUPP R E,HELMS H E,MCFADDEN P W. Evaluation of internal heat transfer coefficients for impingement-cooled turbine airfoils [J]. Journal of Aircraft,2012,6(3):203 – 208.

[3] METZGER D E,KORSTAD R J. Effects of cross flow on impingement heat transfer[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power,1972,94(1): 35.

[4] BURNHAM S H,CLIFFORD M J,SCHOOL S J. Jet impingement heat transfer for low nozzle to plate distances[J]. 2007.

[5] LIU H,LIU S,QIANG H, et al. Aerodynamic investigation of impingement cooling in a confined channel with staggered jet array arrangement [J]. Experimental Thermal & Fluidscience, 2013, 48 (7):184 – 197.

(姜雪梅 编辑)