



壁面粗糙度对压缩空气储能大功率轴流空气透平性能影响研究

辛 明, 刘 通, 王 旭, 赵芝庆, 张文凯, 袁雪萌, 李博文, 郝 沛
(国华(诸城)风力发电有限公司, 山东 潍坊 262200)

摘 要: 压缩空气储能 (CAES) 是实现大规模电力储能的关键技术之一, 其中大功率轴流透平作为能量转换的核心部件, 其性能显著影响储能电站的整体效率。在储能电站实际运行中, 透平叶片壁面因加工工艺以及长期磨损导致的粗糙度改变会显著影响透平性能和内部流动, 然而目前针对空气为工质的大功率多段多级轴流透平的粗糙度影响机理尚不明确。本研究针对储能功率为 350 MW 的压缩空气储能系统中大功率三段式多级轴流透平, 通过高精度数值模拟方法, 系统研究了表面粗糙度对透平气动性能及内部流动特性的影响机制。结果表明: 表面粗糙度的增加显著降低了各级透平的质量流量和等熵效率, 其中第一段透平受表面粗糙度的影响最为突出, 效率降幅最为显著。粗糙度通过增厚吸力面边界层、扩大叶片弦向低速区范围并削弱流场高速核心区动能, 加剧了流动损失。研究进一步揭示, 第一段透平性能受粗糙度影响程度高于第二段和第三段透平, 随着粗糙度增加, 叶片表面涡量强度减弱, 分离点向上游移动。本研究揭示了壁面粗糙度对多段透平性能的影响规律, 为 CAES 电站大功率轴流透平高精度气动设计、表面工艺控制及运行维护策略提供了理论依据。

关键词: 压缩空气储能; 轴流透平; 壁面粗糙度; 等熵效率

doi: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2025.1063

中图分类号: TH 41; TK 02

文献标志码: A

文章编号: 2095-4239 (2026) 06-2185-12

Investigation of influence of wall roughness on performance of high-power axial flow air turbine for compressed air energy storage

XIN Ming, LIU Tong, WANG Xu, ZHAO Zhiqing, ZHANG Wenkai, YUAN Xueming, LI Bowen,
HAO Pei

(Guohua (Zhucheng) Wind Power Generation Co., Ltd, Weifang 262200, Shandong, China)

Abstract: Compressed air energy storage (CAES) is a key technology for large-scale power storage. As a core component for energy conversion, a high-power axial flow turbine significantly influences the overall efficiency of an energy storage station. During actual operation, changes in turbine blade surface roughness, which are caused by processing techniques and long-term wear, significantly affect the turbine performance and internal flow. However, the mechanism of the roughness influence for large-power multistage multilevel axial flow turbines with air as the working medium remains unclear. This study investigates the influence of surface roughness on the aerodynamic performance and internal flow

收稿日期: 2025-11-26; 修改稿日期: 2025-12-22。

基金项目: 国家能源集团科技创新项目 (GJNY-23-71-1)。

第一作者: 辛明 (1984—), 男, 工程师, 研究方向为新能源技术, E-mail: 11668404@ceic.com; 通信作者: 郝沛, 工程师, 研究方向为新能源技术, E-mail: 11668002@ceic.com。

引用本文: 辛明, 刘通, 王旭, 等. 壁面粗糙度对压缩空气储能大功率轴流空气透平性能影响研究[J]. 储能科学与技术, 2026, 15(6): 2185-2196.

Citation: XIN Ming, LIU Tong, WANG Xu, et al. Investigation of influence of wall roughness on performance of high-power axial flow air turbine for compressed air energy storage[J]. Energy Storage Science and Technology, 2026, 15(6): 2185-2196.

characteristics of a high-power, three-stage multilevel axial flow turbine within a 350-MW compressed air energy storage system using high-precision numerical simulation methods. The results indicate that increased surface roughness significantly reduces the mass flow rate and isentropic efficiency of all turbine stages, with the first stage exhibiting the most significant efficiency reduction. Surface roughness intensifies flow losses by thickening the suction-side boundary layer, expanding the chordwise low-speed zone on the blade, and diminishing the kinetic energy within the high-speed core region of the flow field. The performance of the first-stage turbine was more significantly affected by roughness than that of the second and third stages. As the roughness increased, the intensity of the blade surface vorticity weakened, and the separation point moved upstream. This study reveals the influence law of wall roughness on the performance of multistage turbines, providing a theoretical basis for high-precision aerodynamic design, surface process control, and operation and maintenance strategies for high-power axial-flow turbines in CAES power stations.

Keywords: compressed air energy storage; axial flow turbine; wall roughness; isentropic efficiency

压缩空气储能 (CAES) 系统是一种规模大、效率高、寿命长的新型物理储能技术^[1], 可辅助电力系统调峰调频, 提升电网稳定性和经济性。大功率轴流空气透平是 CAES 系统重要核心部件之一, 其气动性能直接决定储能系统的能量转换能力^[2]。然而当前, 针对空气工质特性的高负荷、大功率、多级轴流透平设计理论尚未充分, 尤其是壁面粗糙度对透平性能的影响机理尚未明确。本工作以储能为 350 MW 的 CAES 系统多段多级轴流透平为研究对象, 分析其壁面粗糙度对透平性能及内部流动的影响。

在透平实际运行过程中, 受加工精度限制和运行中积垢、腐蚀等因素影响, 透平壁面表面必然存在一定的粗糙度, 对透平总体性能产生不利影响。平艳等^[3]研究表明透平叶片粗糙度显著影响级间压力分布和叶型损失分布特性, 且损失曲线斜率随粗糙度增大而衰减。何磊等^[4]在超临界二氧化碳透平研究中发现, 粗糙度每增加 10 μm 透平效率降低约 1.2%。王昊冉^[5]发现不同级透平中壁面粗糙度的影响有所差别, 首段透平性能对粗糙度敏感度是末段的 3.6 倍。卜学兵等^[6]认为热障涂层工艺需将粗糙度控制在 $Ra < 6.3 \mu\text{m}$, 否则损失增加 23%。此外, 王磊等^[7]、霍鑫睿^[8]提出了粗糙度与压气机性能下降的数学模型。王英杰等^[9]建立了粗糙度与雷诺数对叶栅表面摩擦因子的修正关联式。

国际上, 叶轮机械中叶片表面粗糙度研究得到

了广泛关注。实验研究方面, Yu 等^[10]开展了低速直列压气机叶栅实验, 研究发现当粗糙度超过临界阈值时, 叶片损失显著增加, 且可用攻角范围明显缩小。Vázquez 等^[11]在多级高速透平试验台上分析了表面粗糙度对低压涡轮效率的影响规律, 结果发现在部分高空运行的低压涡轮中采用粗糙度较高的铸造叶片不会产生额外损失。数值模拟方面, Wang 等^[12]采用大涡模拟方法研究了粗糙度对高负荷压气机叶片分离流转换过程的影响规律。Nardini 等^[13]发现随着粗糙度幅值增大, 叶片吸力面边界层转捩位置逐渐向上游移动, 导致湍动能增大, 且总尾迹损失显著升高, Cheng 等^[14]研究发现, 随着粗糙度雷诺数的增大, 压气机气动性能逐步改善。

现有粗糙度对叶轮机械内部流动影响的研究中, 主要探讨其对冷却效果方面的影响。邸娟等^[15]对重型燃气轮机透平叶片的研究表明, 在一定粗糙度下压力面与吸力面对流换热系数较光滑壁面提升 20% 以上。窦翔宇^[16]发现涡轮叶片表面粗糙度增大会使局部冷却效率降低 12%~18%, 换热系数提高 15%~25%。李本威等^[17]以低温透平表面粗糙度为研究对象, 结果发现考虑壁面粗糙度后涡轮泵动静间隙流场数值模拟与实验测量误差可缩小至 5% 以内, 表明了粗糙度修正的必要性。姚君等^[18]在低雷诺数透平研究中发现叶片表面温度随粗糙度增加平均上升 8~12℃。此外, 壁面粗糙还会影响其他方面, 例如王立松^[19]发现 10 μm 粗糙度下透平末级材

料空化损失为光滑表面的2.24倍;王立松等^[20]研究发现0.03 mm粗糙度使分离泡长度缩短50%,但换热系数提高166%。然而,上述研究较多关注局部冷却性能评估,缺乏对多级透平内部流动结构与冷却过程耦合分析。

目前,由于多方面原因,壁面粗糙度对空气工质多级轴流透平总体性能的影响机理仍不明确。首先,大功率空气透平的实验条件苛刻、实验成本高、风险大;其次,粗糙度参数化较为复杂,且与透平内部流动状态、雷诺数等因素耦合,整体分析难度较高;此外,空气透平与传统航空燃气轮机透平的研究侧重点不同,空气透平领域主要关注长期运行中的磨损和寿命问题,而航空燃气轮机领域主要考虑轻量化设计,工业透平粗糙度研究相对滞后。

研究壁面粗糙度对空气透平的影响具有一定的工程意义与科学价值。在工程方面,粗糙度可能会显著影响CAES系统的效率和经济性,诱发流动不稳定,妨碍储能系统可靠性。从科学研究角度看,粗糙度通过改变边界层结构可能加剧流动损失,本研究可为优化设计方法、表面工艺控制和透平性能预测提供理论依据,从而支持CAES系统的智能化运行和维护。

现有研究中空气透平壁面粗糙度对总体性能的影响研究较少,而实际CAES系统中亟需阐明这一影响规律。因此,本工作以大规模CAES系统大功率多段多级轴流空气透平为研究对象,分析壁面粗糙度对各段空气透平总体性能和内部流动的作用规律。

1 透平几何模型

1.1 压缩空气储能系统模型

本工作所研究的大功率多段多级轴流透平主要用于储能功率为350 MW的压缩空气储能电站中,该系统释能部分工作原理如图1所示。离开第二段透平的空气再进入第三段加热器加热后,进入第三段透平做功,空气内能转化为第三段透平转子的机械能,最后乏气排入大气。三段透平转子与一台发电机相连,其机械能转化为电能。由于三段透平共轴,三段透平转速相同。第三段透平分流成两部分,镜像布置。这样结构的透平系统,可以显著减少发电机使用数量,降低轴向推力,提高储能系统的经济性。

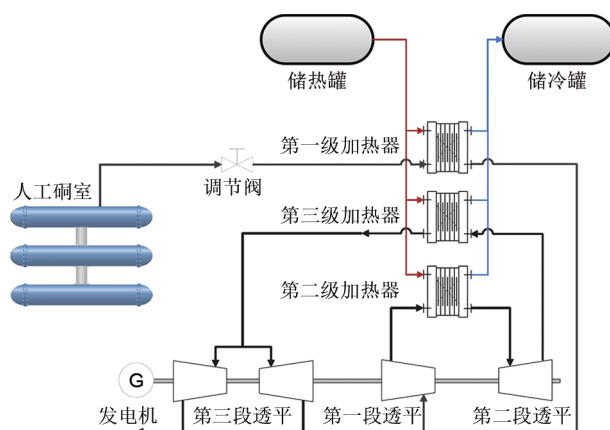


图1 CAES系统释能过程示意图

Fig. 1 Diagram of the energy releasing phase of CAES system

1.2 透平三维模型

本研究建立的三维计算模型基于一台三段式多级轴流透平结构,其整体构型如图2所示。该透平的设计采用串联布置形式,具体配置为第一段包含6个透平级,第二段包含5个透平级,第三段则包含3个透平级,三个透平段均以3000 r/min转速运行。

图2(d)详细展示了透平各级中静叶片与动叶片的安装角度特征。分析其几何设置可知,各段透平内部,虽然级数不同,但所有级别的静叶和动叶其安装角具有基本相似的布局规律。具体表现为:透平采用轴向进气方式,静叶入口段的安装角设计为约0°,以确保气流平稳进入;而在静叶出口处,安装角则增大至约50°,引导气流以较大角度冲击下游动叶。相应地,动叶入口安装角设计为约0°,接收来自静叶的气流,而动叶出口安装角则调整为约-50°。

1.3 数值模型及模型验证

本工作采用TurboGrid软件对各段透平各级叶片进行逐级网格划分,如图2(a)、2(b)和2(c)所示。壁面附近第一层网格高度约为0.008 mm,网格增长率约为1.2,预计 y^+ 约为30。采用ANSYS CFX软件求解计算域单通道的连续性方程、动量方程、能量方程和湍流模型方程等。SST $k-\omega$ 湍流模型对边界层流动、流动分离及转捩预测具有较高的模拟精度,兼顾 $k-\omega$ 模型在近壁区的优势与 $k-\epsilon$ 模型在远场区域的稳定性。因此,本工作采用SST $k-\omega$ 湍流模型对透平内部复杂压力梯度、边界层发展及分离流动进行模拟。为验证模型适用性,本工作初步对比 $k-\epsilon$ 模型与SST模型对第一段轴流透平的模拟

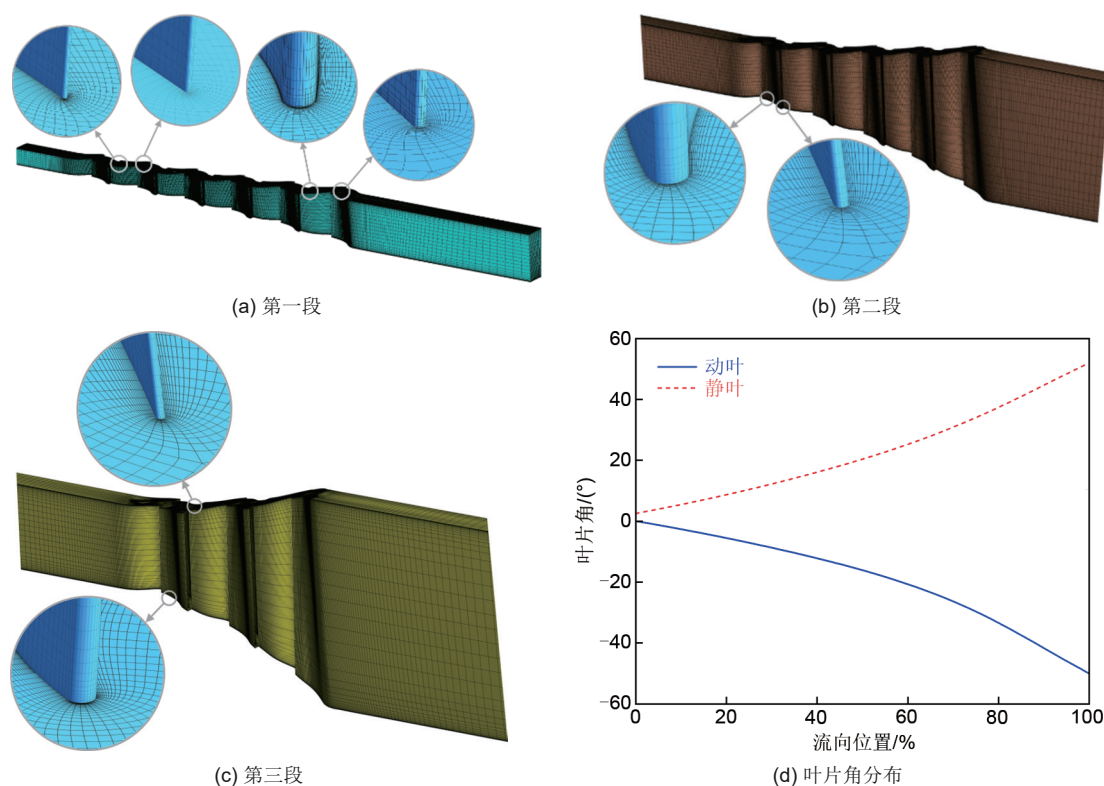


图2 轴流透平结构模型示意图

Fig. 2 Diagram of the axial turbine structure

结果, 结果显示 SST 模型对叶片吸力面边界层厚度、尾迹区流动的预测更为合理。

本工作采用 Stage 动静交界模型, 高精度离散格式, 总压和总温入口边界条件, 静压出口边界条件。壁面无滑移, 叶顶无间隙。对透平模型开展网格无关性验证, 如图3所示。从中可以看出, 当三段透平网格量分别达到 304 万、366 万和 169 万之

后, 透平等熵效率变化较小。因此, 三段透平, 本工作分别选择 304 万、366 万和 169 万网格量。

2 粗糙度对透平总体性能的影响

2.1 质量流量

本工作采用壁面粗糙度模型分别研究光滑壁面、Ra0.8、Ra1.6、Ra3.2 和 Ra6.3 几种壁面情况下的透平总体性能和内部流动, 第一段和第二阶段透平额定流量为 629.2 kg/s, 第三段透平额定流量为 314.6 kg/s。根据文献[7], 几种粗糙度所对应的模型参数分别为 0 mm、0.002 mm、0.004 mm、0.0065 mm 和 0.015 mm。对相同边界条件下不同粗糙度的透平进行数值模拟, 所获各透平质量流量的结果如图4所示。从图中可以看出, 随着总静膨胀比增加, 质量流量逐渐减少, 而且下降率也随之增加; 同时随着粗糙度增加, 各段透平质量流量逐渐减少。对于第一段透平, 当总静膨胀比小于 0.19 时, 质量流量随总静膨胀比下降变化较小; 当总静膨胀比为 0.19 时, 光滑壁面与 Ra6.3 壁面的透平质量流量相差 2.15%, 当总静压比增长到 0.38 时二者相差 2.02%, 如图4(a)所示。对于第二段透平, 当

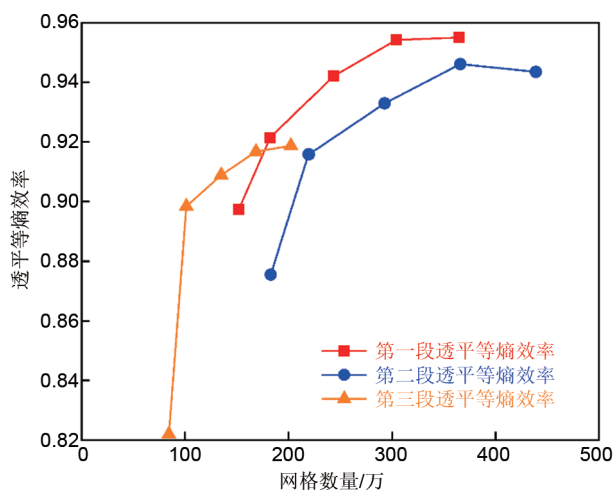


图3 网格无关性验证

Fig. 3 Mesh independence

总静膨胀比小于0.20时, 质量流量随总静膨胀比下降变化较小; 当总静膨胀比为0.20时, 光滑壁面与Ra6.3壁面的透平质量流量相差1.37%, 而当总静压比增长到0.82时二者相差1.81%, 如图4(b)所示。对于第三段透平, 当总静膨胀比小于0.20时, 质量流量随总静膨胀比下降变化较小; 当总静膨胀比为0.20时, 光滑壁面与Ra6.3壁面的透平质量流量相差0.86%, 而当总静压比增长到0.62时二者相差0.81%, 如图4(c)所示。这主要是由于壁面粗糙度会引起流动过程中壁面黏性阻力损失增加, 使相同膨胀比下透平流量降低。

2.2 等熵效率

粗糙度同样会显著影响各段透平的等熵效率, 如图5所示。随着总总膨胀比增加, 透平等熵效率逐渐减少; 随着粗糙度增加, 等熵效率逐渐减少; 随着膨胀比增加, 相对于光滑壁面, 粗糙壁面透平等熵效率下降程度逐渐增加。对于总总膨胀比为0.20的第一段透平, 相对于其光滑壁面的透平等熵效率, Ra0.8壁面的透平等熵效率下降0.9%, Ra1.6壁面的透平等熵效率下降1.36%, Ra3.2壁面的透平等熵效率下降1.75%, Ra6.3壁面的透平等熵效率下降2.6%。对于总总膨胀比为0.22的第二段透平, 相对于其光滑壁面情况, Ra0.8透平等熵效率下降0.48%, Ra1.6透平等熵效率下降0.77%, Ra3.2透平等熵效率下降1.04%, Ra6.3透平等熵效率下降1.63%。对于总总膨胀比为0.24的第三段透平, Ra0.8、Ra1.6、Ra3.2和Ra6.3透平等熵效率分别下降0.12%、0.28%、0.4%和0.72%。因此, 可以发现, 粗糙度对第一段透平等熵效率下降程度的影响更为显著。

3 粗糙度对透平内部流动的影响

3.1 叶片表面压力分布

不同粗糙度壁面的透平, 叶片表面压力会发生一定程度的改变, 如图6所示。可以看出, 对于第一段透平, 不同粗糙度下叶片表面压力差异的主要位置位于叶片前缘至吸力面中部附近。几种壁面的叶片前缘附近吸力面压力突降, 沿着流向从第一级至第六级, 这种突降逐渐降低。在叶片前缘至叶片中部位置, 光滑壁面吸力面和压力面压差较大, 而带有粗糙度情况下, 这种压差相对较小。几种粗糙度对该压差影响较小。在叶片吸力面中部附近位

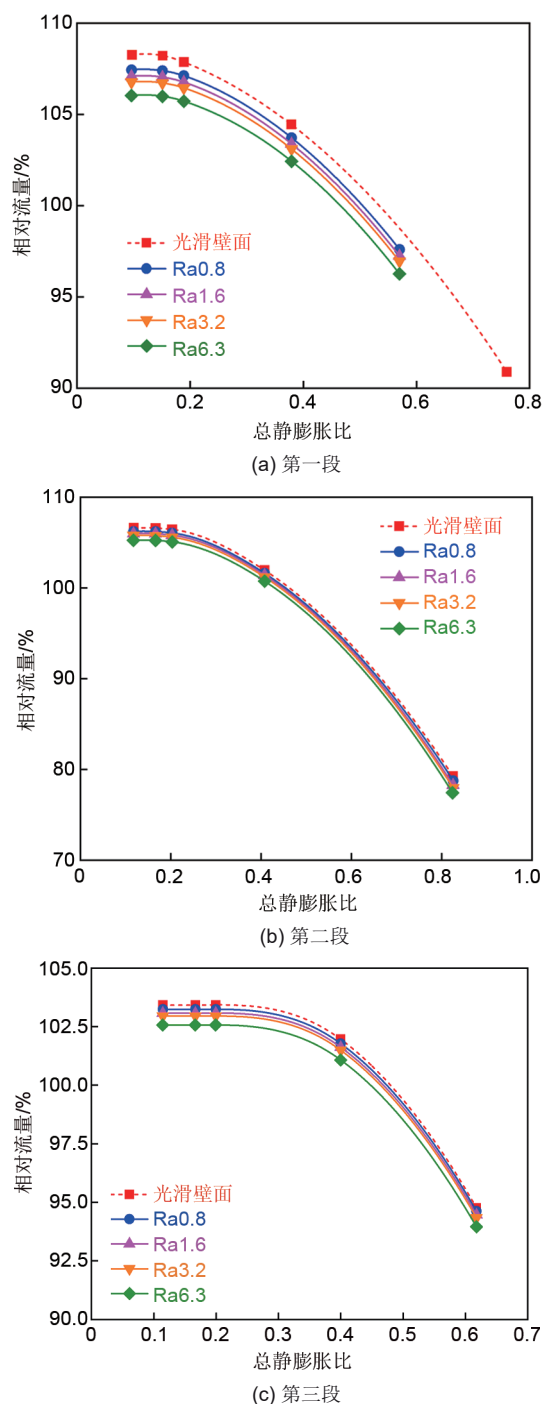
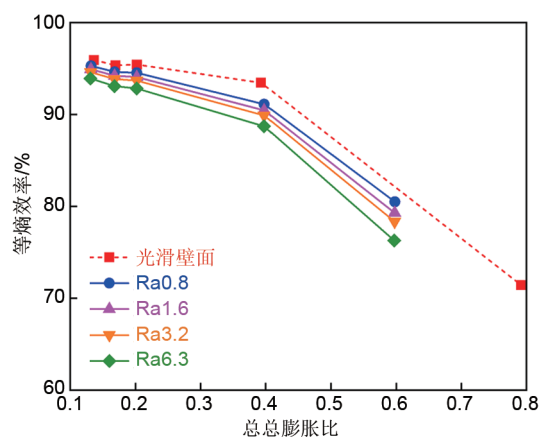


图4 粗糙度对各段透平质量流量的影响

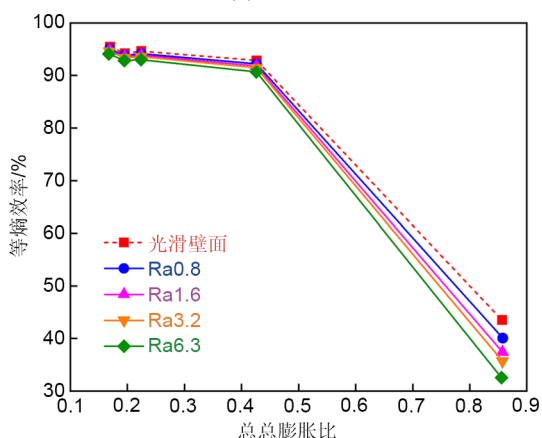
Fig. 4 Influence of wall roughness on mass flow rate of each section of the axial turbine

置, 几种粗糙度下的叶片表面压力产生一点差异, 压力随粗糙度升高而略有增加。

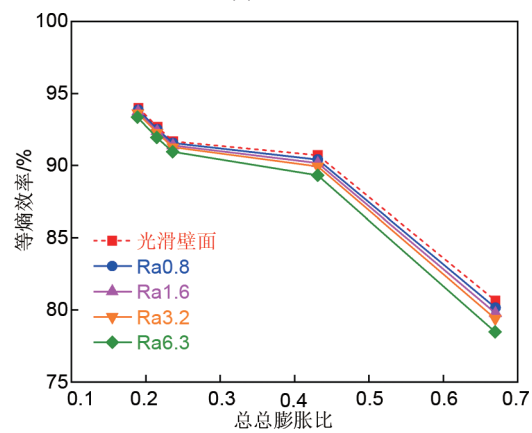
从图6(b)可以看出对于第二段透平, 吸力面压力最低位置位于叶片中部附近, 且从第一级至第五级, 该位置从叶片中后部逐渐向叶片中部移动; 粗



(a) 第一段



(b) 第二段

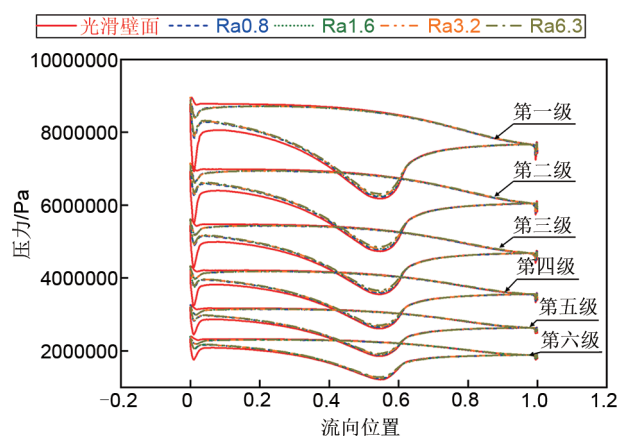


(c) 第三段

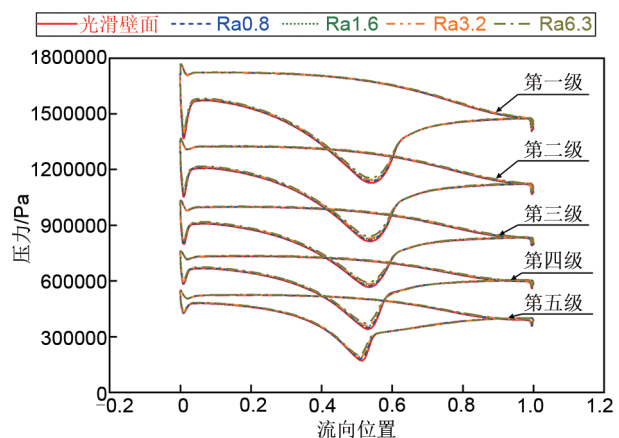
图5 粗糙度对各段透平等熵效率的影响

Fig. 5 Influence of wall roughness on isentropic efficiency of each section of the axial turbine

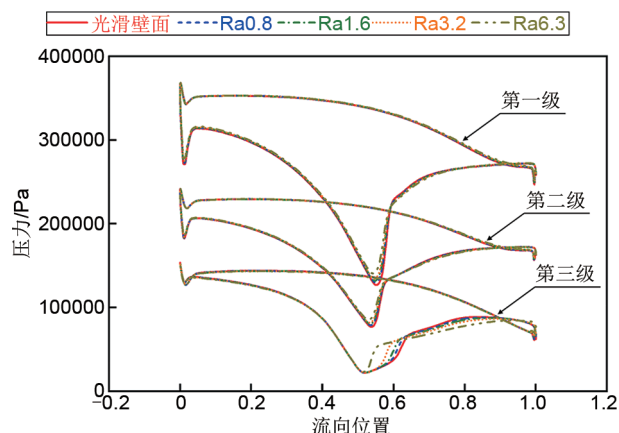
糙度对叶片表面压力影响较大的位置主要位于叶片中部附近。随着粗糙度增加,该位置吸力面的压力略有增加。从图6(c)可以发现对于第三段透平,从第一级至第三级,吸力面压力最低位置同样从叶片中后部逐渐向叶片中部移动;粗糙度对叶片表面压



(a) 第一段



(b) 第二段



(c) 第三段

图6 粗糙度对各段透平动叶表面压力分布的影响

Fig. 6 Influence of wall roughness on the pressure of each section's rotor blade of the axial turbine

力影响较大的位置主要位于叶片中部至叶片尾缘附近。在叶片中部附近,随着粗糙度增加叶片表面压力也逐渐增加;在叶片后部,粗糙度增加会引起叶片表面压力降低。

为了研究第三段透平第三级动叶压力分布差异

的原因, 分析该动叶内部涡量分布的差异, 如图7所示, 从50%展向位置的涡量云图可以看出, 随着壁面粗糙度的增加, 叶片表面附近的涡量强度减弱, 特别是在吸力面中后区域, 高涡量区明显收缩。这一现象可能与边界层厚度变化有关, 具体来说表面

粗糙度增加使得近壁区域流体动量耗散加剧, 边界层内速度梯度降低, 涡量强度削弱。此外, 流动分离位置随着粗糙度升高向上游移动, 在Ra6.3条件下, 分离位置较光滑壁面提前, 这可能是由于粗糙壁面强化边界层能量损耗, 促使分离提前发生。

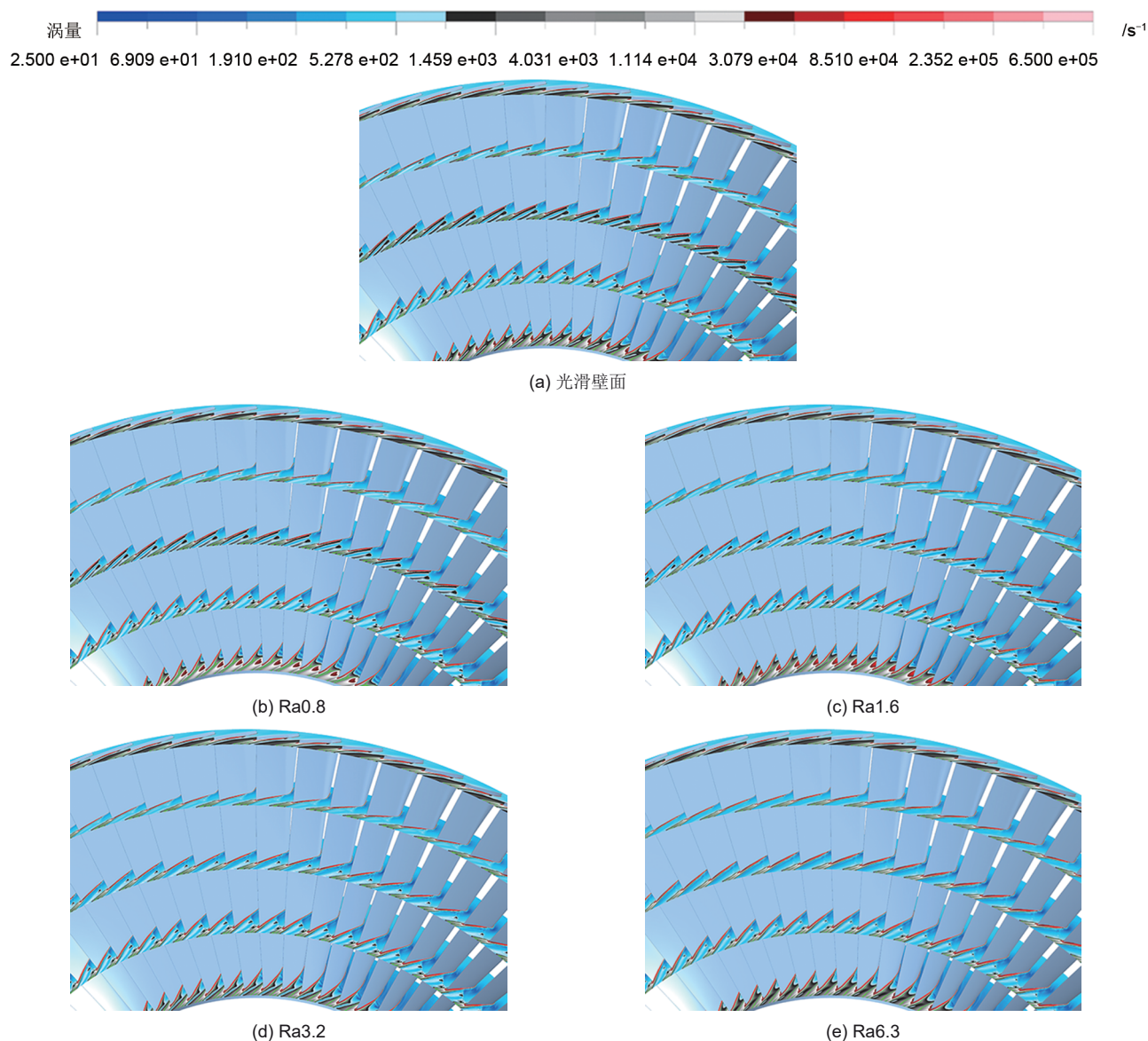


图7 粗糙度对第三透平第三级动叶内部涡量分布的影响
Fig. 7 Influence of wall roughness on the internal vorticity of the third rotor in the third section

3.2 速度分布

壁面粗糙度的变化显著影响了叶片表面流动边界层的结构与演变特征, 如图8所示。光滑壁面透平叶片前缘区域存在一个明显的低速流动区, 该区域覆盖范围较广且更偏向压力面一侧。当叶片表面存在粗糙度时, 前缘低速区的核心位置则移动至靠

近前缘中部附近; 不同粗糙度值对这一低速区分布的影响相对较小。另一方面, 透平叶片的吸力面上存在较厚的边界层流动, 其厚度随壁面粗糙度提升而略有增加。在叶片中部区域, 流场吸力面附近存在较为明显的高速流动区。

该高速区之后、靠近叶片吸力面一侧的流场

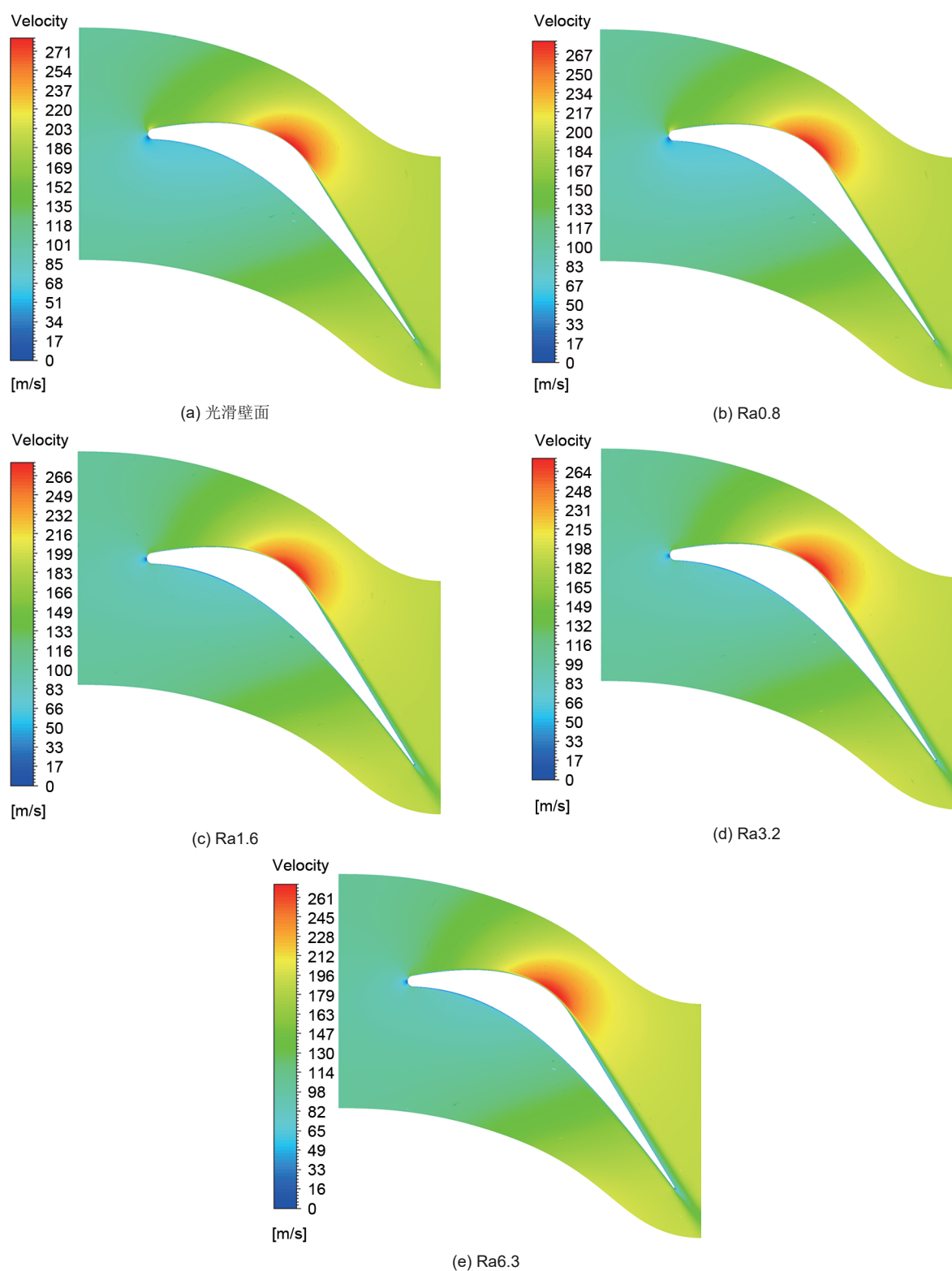


图 8 各种粗糙度下第一段透平第一级动叶 50% 位置处相对速度云图

Fig. 8 Contours of relative velocity on 50% span of the first rotor of the first section under various wall roughness

中, 出现了一条沿着叶片弦长方向延伸的低速带区域, 且其范围会随着壁面粗糙度的不断增加而逐渐

扩大。此外, 从图 8 中也可以看出流场区域最高速度随粗糙度增加而逐渐降低。

图9展现了第二段透平第一级动叶内的流场结构。可以发现,随着壁面粗糙度的逐步提高,其流动演化趋势与第一段透平有一定的相似性。随表面粗糙度增加,动叶压力面上的流动边界层厚度呈现

稳定的增加,沿吸力面附近发展的低速流带范围明显扩大,叶片表面附近流动损失增加;整个流场高速区的最高速度同样逐渐下降,表面粗糙度增加后流动损失增加引起了叶片通道内整体动能减少。

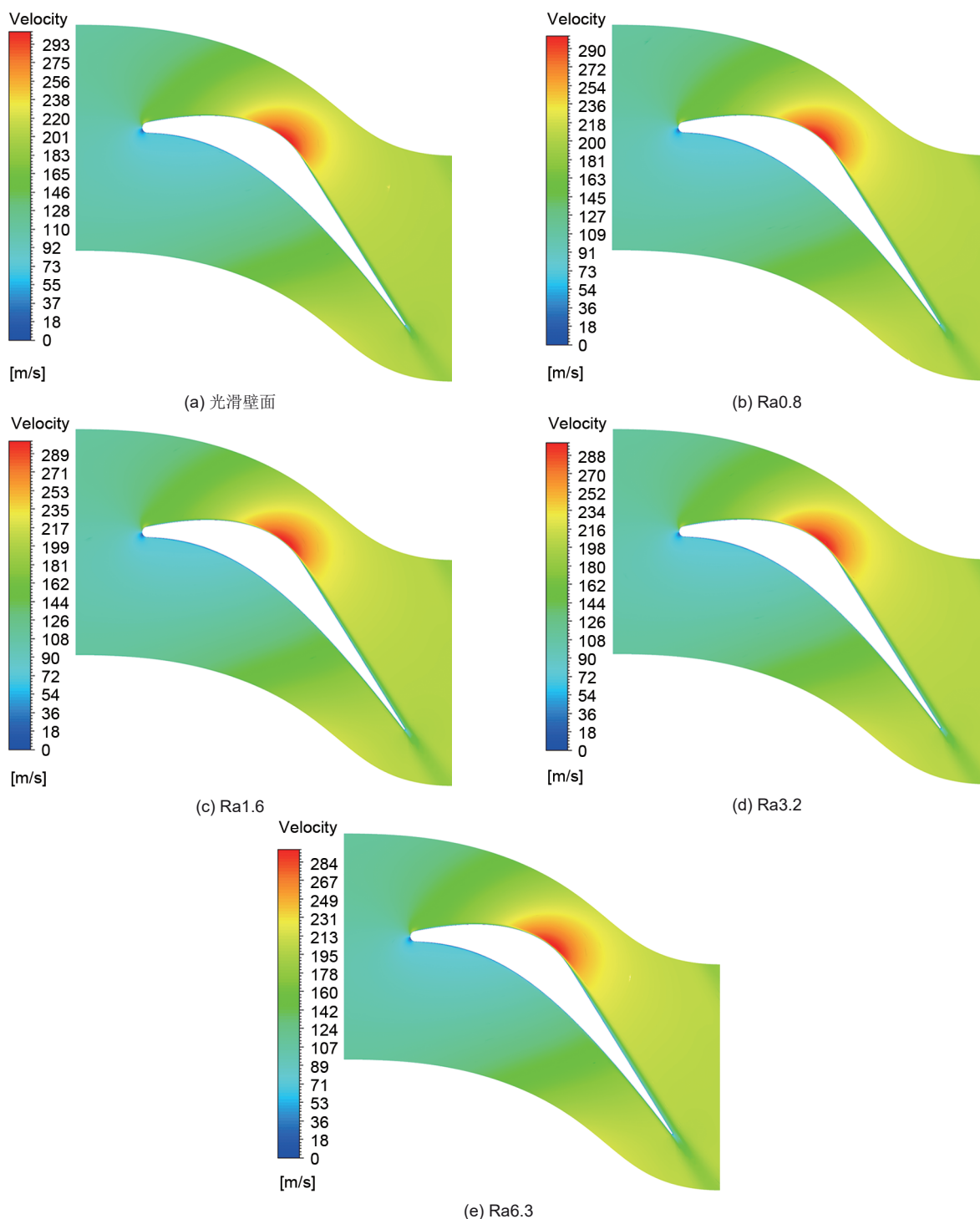


图9 各种粗糙度下第二段透平第一级动叶50%位置处相对速度云图

Fig. 9 Contours of relative velocity on 50% span of the first rotor of the second section under various wall roughness

与第一段透平流动差别主要体现在叶片前缘附近。第二段透平前缘低速区位置,光滑壁面和不同粗糙度叶片的低速区始终定位在靠近压力面的一侧,其主导因素主要依赖于几何构型或进气条件

本身。

图 10 给出了第三段透平内部的流场特征,可以看出其内部流动的演变规律与第二段透平具有一定的相似性。随着壁面粗糙度的升高,第三段透平

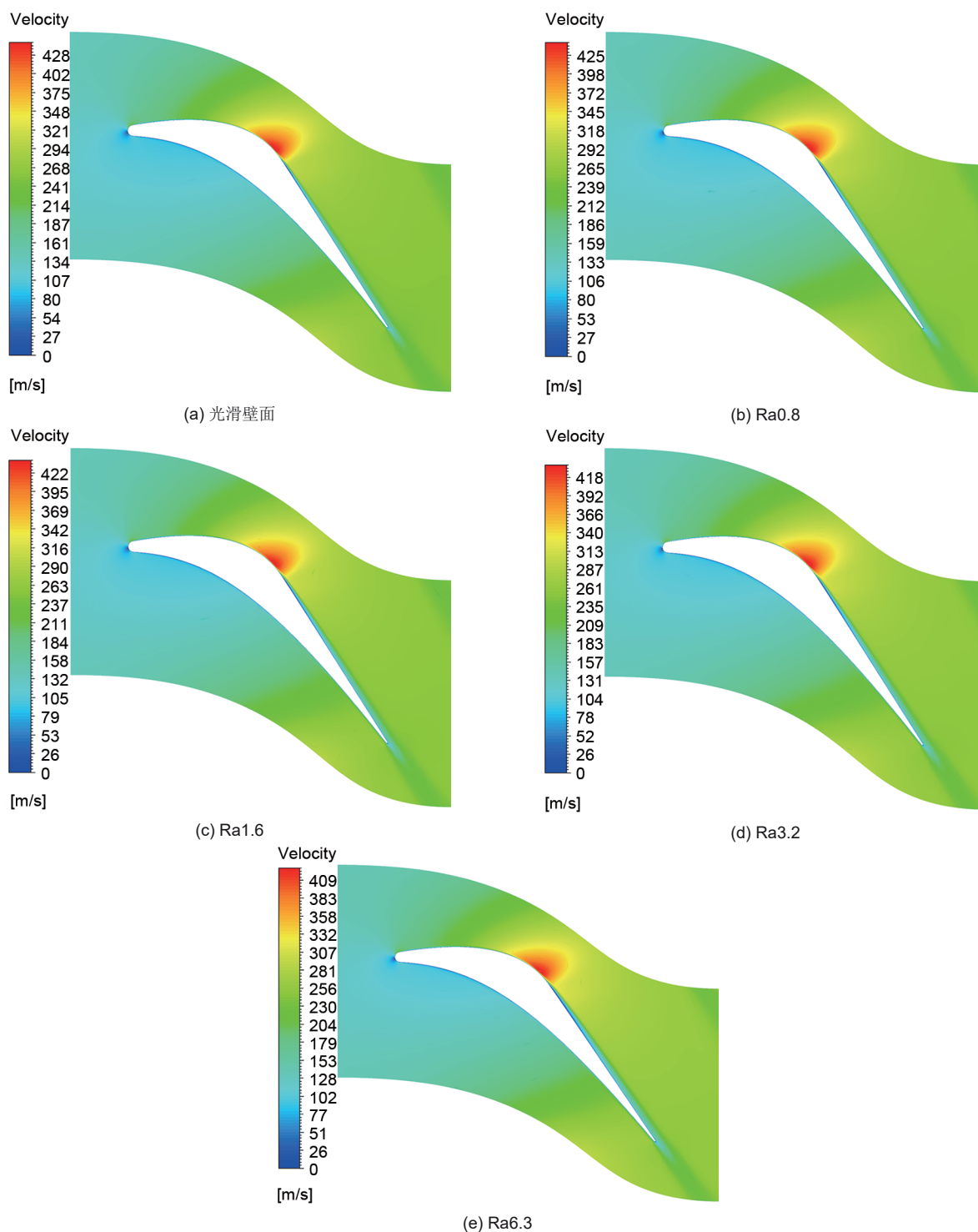


图 10 各种粗糙度下第三段透平第一级动叶 50% 位置处相对速度云图

Fig. 10 Contours of relative velocity on 50% span of the first rotor of the third section under various wall roughness

也呈现出压力面附近流动边界层逐渐增厚、吸力面侧形成的低速流动带范围逐步扩大以及吸力面高速区最高速度降低的趋势。然而,与第二段透平相比,第三段透平吸力面上高速核心流动区域的范围显著减小。

4 结 论

本研究通过数值模拟方法分析了表面粗糙度对CAES系统中三段式多级轴流透平性能及内部流动的影响,研究结果表明,增加表面粗糙度会显著降低各段透平的质量流量和等熵效率,而且影响程度随膨胀比增大而加剧。在相同膨胀比下,粗糙度等级Ra6.3的壁面相较于光滑壁面,第一段透平的质量流量可下降2.15%,等熵效率可下降2.6%;而第二透平等熵效率最大下降1.63%,第三透平等熵效率最大下降0.72%。从内部流动机制看,粗糙度主要改变叶片表面局部压力分布与边界层结构。粗糙度使吸力面中后段压力升高,且随着粗糙度增加吸力面边界层逐渐增厚,高速区下游形成沿流向扩展的低速带范围逐渐扩大。

参 考 文 献

- [1] 陈海生,李泓,徐玉杰,等. 2024年中国储能技术研究进展[J]. 储能科学与技术, 2025, 14(6): 2149-2192.
CHEN H S, LI H, XU Y J, et al. Research progress on China's energy storage technology in 2024[J]. Energy Storage Science and Technology, 2025, 14(6): 2149-2192.
- [2] 王星,李文,朱阳历,等. CAES轴流涡轮弯导叶优化设计与流动损失控制机理[J]. 储能科学与技术, 2021, 10(5): 1524-1535. DOI: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2021.0338.
WANG X, LI W, ZHU Y L, et al. Optimal design and flow loss reduction mechanism of bowed guide vane in a CAES axial flow turbine[J]. Energy Storage Science and Technology, 2021, 10(5): 1524-1535. DOI:10.19799/j.cnki.2095-4239.2021.0338.
- [3] 平艳,钟主海,江生科,等. 表面粗糙度对透平叶片气动特性的影响研究[J]. 热力透平, 2021, 50(3): 166-172. DOI:10.13707/j.cnki.31-1922/th.2021.03.004.
PING Y, ZHONG Z H, JIANG S K, et al. Analysis on influence of surface roughness on aerodynamic characteristics of turbine blades[J]. Thermal Turbine, 2021, 50(3): 166-172. DOI:10.13707/j.cnki.31-1922/th.2021.03.004.
- [4] 何磊,黄启鹤,赵连会,等. 重型燃气轮机透平叶片表面粗糙度对换热的影响[J]. 动力工程学报, 2019, 39(9): 711-716, 746. DOI: 10.3969/j.issn.1674-7607.2019.09.004.
HE L, HUANG Q H, ZHAO L H, et al. Effect of surface roughness on heat transfer characteristics of heavy duty gas turbine airfoils [J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2019, 39(9): 711-716, 746. DOI:10.3969/j.issn.1674-7607.2019.09.004.
- [5] 王昊冉. 气膜冷却涡轮的气热耦合数值研究[D]. 太原: 中北大学, 2024.
WANG H R. Numerical study of gas-thermal coupling in an air-film cooled turbine[D]. Taiyuan: North University of China, 2024.
- [6] 卜学兵,付平,孙中国,等. 考虑表面粗糙度影响的低温涡轮泵特性与动静间隙流动分析[J]. 西安交通大学学报, 2024, 58(6): 77-89. DOI:10.7652/xjtub202406008.
BU X B, FU P, SUN Z G, et al. Cryogenic turbopump performance under the effects of surface roughness and analysis of rotor-stator centripetal flow[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2024, 58(6): 77-89. DOI:10.7652/xjtub202406008.
- [7] 王磊,霍文浩,唐国庆,等. 壁面粗糙度对超临界二氧化碳透平性能影响数值研究[J]. 热力发电, 2023, 52(11): 57-66.
WANG L, HUO W H, TANG G Q, et al. Numerical investigation on the wall roughness of a supercritical carbon dioxide axial turbine[J]. Thermal Power Generation, 2023, 52(11): 57-66.
- [8] 霍鑫睿. 低雷诺数涡轮气热耦合数值仿真研究[D]. 太原: 中北大学, 2023.
HUO X R. Numerical simulation study of low Reynolds number turbine gas-thermal coupling[D]. Taiyuan: North University of China, 2023.
- [9] 王英杰,戴韧. 透平叶栅模化时粗糙度和雷诺数对性能的影响及修正方法[J]. 工程热物理学报, 2022, 43(1): 91-97.
WANG Y J, DAI R. Influences of surface roughness and Reynolds number on performance of scaled turbine vane and correction method[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2022, 43(1): 91-97.
- [10] YU X J, ZHAO S Y, AN G F, et al. Experimental investigations on the effects of surface roughness for compressor cascades with different roughness magnitude and location[J]. Journal of Turbomachinery, 2024, 146(3): 031007. DOI:10.1115/1.4063973.
- [11] VÁZQUEZ R, TORRE D. The effect of surface roughness on efficiency of low pressure turbines[J]. Journal of Turbomachinery, 2014, 136(6): 061008. DOI:10.1115/1.4025571.
- [12] WANG M Y, LU X G, YANG C W, et al. Numerical investigation of distributed roughness effects on separated flow transition over a highly loaded compressor blade[J]. Physics of Fluids, 2021, 33(11): 114104. DOI:10.1063/5.0066615.
- [13] NARDINI M, JELLY T O, KOZUL M, et al. Direct numerical simulation of transitional and turbulent flows over multi-scale surface roughness-part II: The effect of roughness on the performance of a high-pressure turbine blade[C]// ASME Turbo Expo 2023: Turbomachinery Technical Conference and Exposition, June 26 - 30, 2023, Boston, Massachusetts, USA. 2023 DOI:10.1115/GT2023-102671.
- [14] CHENG H Z, WANG M Y, ZHOU C X, et al. Influence of surface roughness on a highly loaded axial compressor stage performance at low Reynolds number[J]. International Journal of Aerospace Engineering, 2021, 2021(1): 1208492. DOI: 10.1155/2021/1208492.
- [15] 邸娟,王顺森,蒋希航,等. 透平末级叶片材料抗水蚀特性的数值研

- 究[J]. 西安交通大学学报, 2021, 55(2): 38-46.
- DI J, WANG S S, JIANG X H, et al. Numerical research on water erosion resistance characteristics of the substrate material of last stage blades in steam turbine[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2021, 55(2): 38-46.
- [16] 窦翔宇. 涡轮工作叶片型面换热特性研究[D]. 沈阳: 沈阳航空航天大学, 2018.
- DOU X Y. Study of heat transfer characteristics of turbo blades surface[D]. Shenyang: Shenyang Aerospace University, 2018.
- [17] 李本威, 李冬, 沈伟, 等. 涡轮叶片粗糙度对其性能衰退的影响研究[J]. 航空计算技术, 2009, 39(5): 26-29, 34. DOI: 10.3969/j.issn.1671-654X.2009.05.007.
- LI B W, LI D, SHEN W, et al. Research on turbine lamina roughness influence on its performance declination[J]. Aeronautical Computing Technique, 2009, 39(5): 26-29, 34. DOI: 10.3969/j.issn.1671-654X.2009.05.007.
- [18] 姚君, 刘红. 叶片表面粗糙度对透平叶栅气动性能影响的试验研究[J]. 燃气轮机技术, 2008, 21(2): 28-31. DOI: 10.3969/j.issn.1009-2889.2008.02.006.
- YAO J, LIU H. The experimental research of effects of roughness on the turbine cascade loss coefficients[J]. Gas Turbine Technology, 2008, 21(2): 28-31. DOI: 10.3969/j.issn.1009-2889.2008.02.006.
- [19] 王立松. 叶片表面粗糙度对压气机性能衰退影响的实验与数值研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2023.
- WANG L S. Experimental and numerical studies on the effect of blade surface roughness on compressor performance degradation[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2023.
- [20] 王立松, 孙玮琪, 孙涛, 等. 粗糙度对压气机叶栅性能影响研究[J]. 热能动力工程, 2022, 37(12): 20-28. DOI: 10.16146/j.cnki.rndlgc.2022.12.003.
- WANG L S, SUN W Q, SUN T, et al. Research on the effect of roughness on the performance of compressor cascade[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2022, 37(12): 20-28. DOI: 10.16146/j.cnki.rndlgc.2022.12.003.