

## 平板-半无限长圆柱气动力特性研究\*

孟宝清 韩桂来 姜宗林

(中国科学院力学研究所, 100190)

详细摘要:

高超声速飞行器舵翼与机身的相互作用显著改变了单独部件机身及舵翼的流场结构。典型的研究有 Dolling 等人应用实验方法研究了钝翼所引起的三维激波-边界层相互作用, 关注了流场结构、压力分布以及油流实验所得到的表面流线分布。此外, 飞行器表面也可能安装各种几何外形的凸起物, 凸起物所引起的激波与当地边界层相互作用, 形成复杂的干扰流场。干扰区内激波、涡等结构呈现复杂的三维特性。该类问题的典型简化模型为平板-柱模型。针对该模型, 李等人研究了绕凸台的高超声速分离流动, 研究变量包括凸台与当地边界层比、凸台周边倾角, 关注了其对特定位置表面压力、纹影流场的影响。王等人研究了湍流分离流、分离激波运动及压力脉动等物理现象。马等人对直立圆柱、变高度圆柱的流场结构进行了数值计算分析。

现有研究中更多关注了平板-柱模型的流场结构、表面压力分布、热流等, 而对该模型各部件气动力干扰特性尚未有所研究。针对高超声速表面凸起物波系干扰问题, 本文建立圆柱极限高度情况下平板-半无限长圆柱模型, 研究直立圆柱引起平板的干扰区大小、平板及圆柱各自的气动力特性。此外, 圆柱倾角对流场以及气动力特性的影响也作了初步考虑。

以圆柱直径  $D$  为特征长度, 三维计算域选为平板-半无限长圆柱流场一半长度为  $40D$ , 宽度为  $20D$ 。李素循等指出, 当圆柱高度与直径比值  $H/D$  超过 2.2 时, 流场基本保持不变且压力等物理量值随  $H/D$  比值增加而增高, 因此计算域的高度选为  $5D$ 。圆柱为直立圆柱, 网格生成中首先生成底面平板二维网格, 之后对二维网格进行直立圆柱轴向拉伸得到三维网格。

控制方程采用三维 N-S 方程。应用有限差分方法, 对流项采用 NND 格式离散, 粘性项采用 NND 格式离散, 采用量热完全气体模型, 粘性计算应用 Sutherland 公式。计算工况为  $Ma=6.0$ ,  $p_0=2.2MPa$ ,  $T_0=2200K$ 。边界条件中, 平板、圆柱固壁按壁面无滑移条件赋值, 出口按流场值外插赋值。对于入口条件, 为了壁面平板前缘激波与圆柱壁面激波相互作用影响柱面压力分布, 采用先计算二维平板边界层流场, 将发展基本稳定的二维边界层流场赋值于三维流场。边界层计算域长度为半米, 与飞行器长度相当。二维计算域与三维计算域网格在  $Z$  向上保持一致。

本文首先关注了流场结构及干扰区大小。沿圆柱对称面流场计算结果表明从平板前缘起边界层发展基本稳定, 流场较为复杂的区域集中于圆柱根部。给出对称面内圆柱根部流场。圆柱脱体激波导致压力升高, 压力扰动沿边界层亚音速区域向边界层上游传播, 导致流动分离以及分离激波的形成。在圆柱周向有若干三维涡结构, 分离线以及再附线是涡结构边界。干扰区距离圆柱前缘  $3.5D$ , 在圆柱后缘对称面下游  $9.5D$  处, 干扰区距对称面  $9.5D$ 。

圆柱的存在对整个平板的流场造成干扰。干扰表征量随半径变化情况如下: 在圆柱根部值

\* 国家自然科学基金资助 (基金号 11472281、11532014)

迅速上升, 峰值处距离圆柱前缘约  $0.5D$ , 经历峰值后干扰表征量迅速下降。当  $R=20D$  时。干扰表征量值为  $1.11$ 。圆柱轴向力与圆柱对称面内流场密切相关。从圆柱根部向上, 圆柱面流场可分为根部分离涡区、高压区、脱体激波区。经过高压区, 柱面附近流线方向改变。因轴向力方向, 主要来源于壁面剪切作用。在圆柱底部, 存在尺度较小的涡结构, 无量纲轴向力首先向正向增加,  $0.5D$  高度处, 进入尺度较大的马蹄涡区域, 因流线方向再次改变, 曲线向负向变化。在  $z=D$  高度处, 轴向力达到负向最大值。之后随积分高度增加, 曲线逐渐向正向增加, 最终增加趋势非常缓慢, 基本保持不变, 这也与脱体激波区域二维流场特性及非常弱的壁面剪切作用保持一致, 亦说明在脱体激波区域流场基本保持二维特性。

圆柱流向力分布与圆柱前缘压力分布基本保持一致。从圆柱根部  $0.5D$  高度至  $1.0D$  高度柱面前缘压力迅速升高,  $1.0D$  高度至  $1.5D$  高度处, 压力缓慢下降。当轴向位置高于  $1.5D$  时, 压力基本保持不变。圆柱流向力沿轴向分布可分为两段, 从圆柱根部至  $1.5D$  高度处, 流向力呈现非线性分布, 平均阻力系数为  $0.97$ ; 当  $z > 1.5D$  时, 流向力随高度线性增加, 阻力系数  $C_d = 1.25$ 。应用牛顿理论得到的二维圆柱阻力系数  $C_d = 4/3$ , 与  $z > 1.5D$  时的阻力系数接近。

对于  $15^\circ$  后倾角情况下, 平板附近面的流场结构与直立圆柱情形相类似。圆柱根部位置仍然存在若干次流动分离与再附。最外缘的分离线同样构成了干扰区的外边界。干扰区距离圆柱前缘约  $3D$ , 相比直立圆柱有较大缩小。对于倾斜柱面, 激波后压力在柱面上作用力有负  $Z$  向的分量, 柱面  $Z$  向力由压力作用力与摩擦力共同影响。在柱面底部, 存在尺度更小的涡结构与马蹄涡相互作用, 柱面附近流线平行于柱面斜向上。同时, 由于压力分量的存在,  $Z$  向力呈现负向缓慢增加趋势。随积分高度增加, 马蹄涡的存在使得柱面附近流线平行柱面斜向下, 压力的负  $Z$  向分量与负  $Z$  向摩擦力叠加,  $Z$  向力随高度增加沿负向快速增加。经过高压区后, 流线与摩擦力方向均为平行柱面斜向上, 与压力在柱面上作用力分量方向相反。 $Z$  向力随高度增加沿负向仍然呈增大趋势, 增加速率略有所减小。在稳定的脱机激波区域, 曲线基本呈现直线形态。在量级方面, 由于压力分量的存在, 有倾斜角情况下  $Z$  向力远远大于直立圆柱, 二者相差两个数量级。对于有后倾角存在情况, 由于对称面内柱面迎风面流场结构与直立圆柱一致, 因此流向力变化趋势与直立圆柱类似。但非线性变化区域有所增加, 大约为  $1.7D$ , 该区域内平均阻力系数约为  $0.92$ 。在脱体激波区域内, 流向力随高度呈线性变化, 阻力系数约为  $1.1$ 。由于后倾角存在, 原有的脱体激波由正激波形态变为斜激波, 因此阻力系数有所降低。