1998年 2月 北京航空航天大学学报 February 1998
第24卷 第1期 Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics Vol. 24 No. 1

沟槽面湍流减阻研究综述

王晋军
(北京航空航天大学 飞行器设计与应用力学系)

摘 要 对近20年来沟槽面湍流边界层特性、湍流拟序结构、湍流减阻及其机理的研究进展进行了综述. 内容涉及沟槽面平板、旋成体、机翼等在压、跨、超音速流动情况下的实验研究成果; 压力梯度、攻角、侧滑角等的影响; 湍流猝发特性、紊动特性、近壁区带条结构的特征及减阻机理等方面的工作. 为更有效地减少表面摩阻, 必须深入开展对沟槽面湍流边界层特性、湍流拟序结构及湍流减阻机理等方面的研究.

关键词 湍流边界层; 减阻; 湍流结构; 沟槽面
分类号 O 357.54; V 211.19

节约能源消耗是人类一直追求的目标, 其主要途径之一就是在各种运输工具的设计中, 尽量减少表面摩擦阻力. 表面摩阻在运输工具的总阻力中占有很大的比例, 例如: 常规的运输机和水上船只, 其表面摩阻约占总阻力的50%; 对于水下运动的物体潜艇, 这个比例可达到70%; 而在长距离的管道输送中, 泵站的动力几乎全部用于克服表面摩擦阻力. 在这些运输工具表面的大部分区域, 流动都处于湍流状态, 所以研究湍流边界层减阻意义重大, 已引起了广泛的重视, 并已被NASA 列为21世纪的航空关键技术之一.

有关减阻的研究可追溯到本世纪30年代, 但直到60年代中期, 研究工作主要是减小表面粗糙度, 隐含的假设是光滑表面的阻力最小. 70年代阿拉伯石油禁运和由此引起的燃油价格上涨激起了持续至今的湍流减阻研究的高潮. NASA 兰利研究中心的工作是这一时期的代表, 他们发现顺流向的微小沟槽表面能有效地降低壁面摩阻, 突破了表面越光滑阻力越小的传统思维方式. 为了更有效地对物体表面进行湍流减阻设计, 人们对沟槽面湍流边界层特性及其减阻机理进行着不懈的探索.

1 沟槽面阻力特性研究

1.1 沟槽平板

NASA 兰利研究中心的Walsh 及其合作者最先开展了沟槽平板湍流减阻的研究[1~4], 他们研究了几种类型的沟槽表面, 天平测力结果表明最佳的设计是一种对称的V 型沟槽面, 当其高度 h 和间距 s 的无量纲尺寸 $h^+ \leq 25$ 和 $s^+ \leq 30$ 时具有减阻特性, 减阻效果最佳时沟槽的尺寸为 $h^+ = s^+ = 15$, 这时可减阻8%. 此后的工作都是在沟槽无量纲尺寸为10~30间进行的.

Bacher 和Smith[5]通过对流速分布的测量, 利用边界层动量积分公式得到了25% 的净减阻. 采用同样的方法, Gallagher 和Thomas[6]的研究结果表明只在沟槽板的后半部分阻力有所减小, 但总的阻力几乎不变. Coustols[7]得到了10%~15% 的减阻, 且当侧滑角 $\beta \leq 20$ 时仍有较好的减阻效果. Park 和Wallace[8]用热线风速仪详细测量了沟槽内的流向速度场, 通过对沟槽壁切应力的积分, 得到了大约4% 的减阻. Gaudet[9]在 $Ma = 1.2$ 的沟槽面湍流边界层的研究中得到了7% 的减阻.

Wang[10]研究了沟槽面对边界层转捩的影响, LDV (激光测速仪) 测量结果表明, 沟槽面不仅使层流边界层区域增大, 且使转捩为湍流的雷诺数约增大4倍, 从而降低了平板边界层的阻力.

1.2 旋成体

Neumann 和Dinklacker[11]对头部为椭圆旋成体的圆柱体的研究表明, 可减阻9%, 而在转捩区得到了13% 的减阻. 对于类似的模型, Coustols[7]在 $Ma = 0.3 \sim 0.815$ 的跨音速流动中得到了7%~8% 的减阻.

1.3 翼型及压力梯度的影响

Coustols[7]对LC100D 翼型在攻角 $\alpha = 0 \sim 6°$ 的阻力特性进行了研究. 实验中, 仅上表面 $x/c = 0.2 \sim 0.95$ 的区域为沟槽面, 通过测量 $x/c = 1.5$

收稿日期: 1996-12-13 第一作者 男 33岁 教授 100083 北京

处的尾流得到 $\alpha \leq 3$ 时可减阻2 7%. Sundaram 等[12]对上下翼面 $x/c = 0.12 \sim 0.96$ 区域为沟槽面的NACA 0012翼型的研究表明, 在攻角 $\alpha \leq 6$ 的范围内有16%的减阻

对于跨音速流动, McLean 等[13]把3M 公司的沟槽薄膜贴在T-33机翼上表面的部分区域, 实验马赫数为 $Ma = 0.45 \sim 0.7$, 得到了6%的减阻 Coustols 和 Schmitt[14]对CAST7机翼在 $Ma = 0.65 \sim 0.76$ 的实验结果表明, 摩擦阻力减小7%～8%. Viswanath 和 Mukund[15]将沟槽薄膜贴在ADA-S1超临界翼型上下翼面 $x/c > 0.15$ 的区域, 实验攻角为 $\alpha = -0.5 \sim 1.0°$, 得到了6%～12%的减阻

Debisschop 和 Nieuwstadt[16]研究了逆压梯度对沟槽平板的影响, 结果表明逆压梯度增加了沟槽板的减阻效果, 他们得到了13%的减阻, 比相应的零压梯度情形多减阻7%.

1.4 应用研究

大量的研究工作表明了沟槽面减阻的可靠性和可应用性, 国外的研究已进入工程实用阶段, 空中客车公司将A320试验机表面积的70%贴上沟槽薄膜, 达到了节油1%～2%的效果 NASA 兰利中心对Learjet 型飞机的飞行试验表明减阻6%的量级 在国内, 李育斌[17]等在1-12的运七模型具有湍流流动的区域顺流向粘贴沟槽薄膜后, 实验表明可减少飞机阻力5%～8%.

2 沟槽面湍流边界特性研究

2.1 猝发特性

已有研究成果表明, 沟槽面湍流猝发强度低, 但对沟槽面湍流猝发频率的影响如何, 仍有不同的看法, 详见表1.

表1 猝发频率检测结果

研 究 者	检测方法	与光滑面结果的比较
Gallagher 和 Thomas[6]	VITA 法	- 30%
Walsh[2]	VITA 法	基本不变
Bacher 和 Smith[5]	流动显示	不变
Choi[18]	条件采样	增加
Schwarz-van Manen 等[19]	象限法	- 30%
Savill[20]	流动显示	- 30%
Pulles 等[21]	VITA 法	(u) + 20% (v) - 20%
Tang 和 Clark[22]	条件采样	+ 10%
Tardu 等[23]	VITA 法	- 10%～- 20%
Hefner 等[1]		不变

注: (u)、(v) 表示根据 u、v 向脉动速度计算得到的结果

2.2 紊动特性

Schwarz-van Manen 等[19]、Hooshmand 等[24]、Pulles 等[21]、Choi[25]和 Hefner 等[1]的研究表明, 在近壁区 (u/U_0) 的减少与减阻表面联系在一起 Tang 和 Clark[22]、Tardu[23]等的研究表明, $(u/U_*)_{max}$ 分别降低7%和5%～8%. Choi[25]指出, 在 $y^+ < 70$ 内, 3个方向的湍流强度均减小10%, 而雷诺应力减小20%. Tardu 等[23]还得到在 $y^+ < 15$ 内平坦系数和偏斜系数增大, Taylor 和 Liepman 尺度不受沟槽的影响, 但在粘性底层内沟槽使大尺度涡旋的能量减弱

为了深入了解沟槽内的流动特性, Vukoslavcevic 等[26]、Park 和 Wallace[8]、Suzuki 和 Kasagi[27]等在实验中选用了较大尺度沟槽和较低来流速度进行研究, 以满足表面减阻设计要求 Vukoslavcevic 等[26]得到, 在沟谷 $(u/U_*)_{max}$ 减少约17%, 而在沟槽尖顶处, $(u/U_*)_{max}$ 约减少5%, 但其出现的位置分别为 $y/\delta = 6.5\%$ 和2%, 平坦系数和偏斜系数在近壁区均增大, 但在 $y/\delta \geq 4\%$ 的区域不受沟槽的影响 Park 和 Wallace[8]得到3个方向的湍流强度及雷诺应力在沟槽尖顶垂线上增大, 而在沟谷垂线上则减小, 但这些影响只限于 $y^+ < 40$ 的区域 Suzuki 和 Kasagi[27]采用三维粒子示踪测速技术对沟槽面湍流的研究表明, 3个方向的湍流强度和雷诺应力都减小, 沟槽的影响限于 $y/h < 2$ 内

Choi[28]、Debisschop 和 Nieuwstadt[16]等研究了压力梯度的影响 Choi[28]得到 $(u/U_0)_{max}$ 最大降低5%～13%, 且顺压梯度比逆压梯度的作用要明显; 对于零压梯度, $(u/U_0)_{max}$ 减少8%. 平坦系数和偏斜系数在逆压梯度时的数值比零压和顺压梯度时的值要大, 但沟槽仅影响 $y^+ < 16$ 的区域 Debisschop 和 Nieuwstadt[16]在逆压梯度情形下得到近壁区 u 的减小和摩阻速度 U_* 的减小为同一量级 对于NACA 0012翼型, 实验攻角为 $\alpha = 0° \sim 6°$, Sundaram 等[12]得到 $y^+ < 40$ 内, u/U_* 比光滑面降低10%～15%.

由此可见, 沟槽面仅影响近壁区的流动 对于减阻表面, 在近壁区流向湍流强度总是降低的, 而偏斜系数和平坦系数则总是增加的

2.3 带条结构

对于光滑壁面, 在近壁区存在低速带条结构, 其无量纲间距遵循对数正态分布, 在粘性底层内, 其平均值约为100 而对于沟槽面, 不同学者得到的结果如表2

表2　带条结构观测结果

研　究　者	观测方法	与光滑面结果的比较
Gallagher 和 Thomas[6]	展向相关分析	+ 15%～ + 30%
Hooshmand 等[24]	流动显示	不变
Bacher 和 Smith[5]	流动显示	+ 40%
Tang 和 Clark[22]		增加
Pulles 等[21]		减少
Suzuki 和 Kasagi[27]	相关分析	不变

3　减阻机理研究

近几年来, 为了有效地设计减阻表面, 人们的注意力集中到沟槽面湍流减阻机理的研究. 许多学者从不同角度对减阻机理进行探讨, Gallagher 和 Thomas[6]认为是由粘性底层厚度的增加造成的, Bacher 和 Smith[5]归结为反向旋转的流向涡与沟槽尖顶形成的小的二次涡的相互作用, 认为二次涡减弱了与低速带条相联系的流向涡, 并在沟槽内保留低速流体(图1); 流动显示结果表明, 注入的染色液的展向扩散限于沟槽内, 相邻沟槽间的相互作用较弱. Choi[18]认为不仅仅是一种机制, 但最主要的是沟槽限制了流向涡的展向运动, 引起壁面猝发变弱, 导致了壁面摩阻的减少. Walsh[29]认为狭窄的V 型沟槽的沟谷保留有具有低摩阻的低速安静流体, 因而降低了总的阻力,

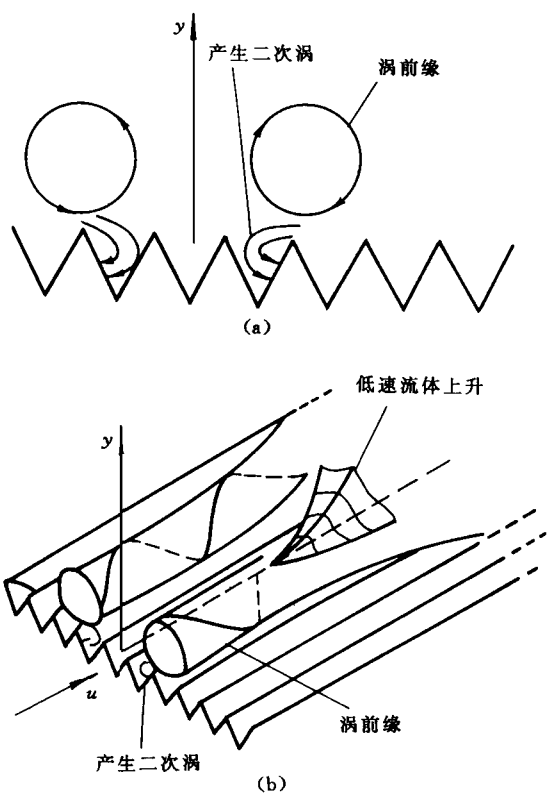


图1　流向涡和沟槽表面尖峰的相互干扰

这一点被 Park 和Wallace[8]对沟槽侧面摩阻的精细测量所证实, 他们得到侧壁上面1/4部分的摩阻与光滑面大致相等, 其余3/4部分比光滑面小, 从而导致了总摩阻的降低. Vukoslavcevic 等[26]通过测量沟槽尖顶和低谷垂线上的流速分布得到在尖顶处摩阻增加85%, 而在低谷摩阻降低很多. Schwarz-van Manen 等[19]得到了类似的结果.

由于缺乏对低速带条结构系统的和细致的研究, 低速带条的变化与减阻的关系还不太清楚.

4　结 束 语

湍流是一种非常复杂的流动, 近100年来研究工作者进行了大量的不懈的探索, 但对其了解的还相当有限. 关于沟槽面湍流减阻的研究还不到20年, 对沟槽面湍流边界层特性, 湍流拟序结构及湍流减阻机理等的研究有待深入开展. 只有对沟槽面湍流边界层特性及其拟序结构深入了解, 才能使表面减阻设计上升到理论指导实践的高度.

参 考 文 献

1　Hefner J N, Bushnel D M, Walsh M J. Research on non-planar wall geometries for turbulence control and skin-friction reduction. 8th U. S. -FRG DEA-Meeting, Viscous and interacting flow field effects, Gottingen, 1983. 1～10

2　Walsh M J. Riblets as a viscous drag reduction technique. AIAA Journal, 1983, 21(4): 485～486

3　Walsh M J. Turbulent boundary layer drag reduction using riblets. AIAA-82-0169, 1982

4　Walsh M J, Lindemann A M. Optimization and application of riblets for turbulent drag reduction. AIAA-84-0347, 1984

5　Bacher E V, Smith C R. A combined visualization-anemometry study of the turbulent drag reducing mechanisms of triangular micro-groove surface modifications. AIAA-85-0548, 1985

6　Gallagher J A, Thomas A S W. Turbulent boundary layer characteristics over streamwise grooves. AIAA-84-2185, 1984

7　Coustols E. Behavior of internal manipulators: "riblet" models in subsonic and transonic flows. AIAA-89-0963, 1989

8　Park S R, Wallace J M. Flow alteration and drag reduction by riblets in a turbulent boundary layer. AIAA Journal, 1994, 32(1): 31～38

9　Gaudet L. Properties of riblets at supersonic speed. Applied Scientific Research, 1989, 46(3): 245～254

10　Wang J J, Lan S L, Lian Q X. Effect of the riblets surface on the boundary layer development. Chinese Journal of Aeronautics, 1996, 9(4): 257～260

11　Neumann D, Dinkelacker A. Drag measurements on V-grooved surfaces on a body of revolution in axial flow. Applied Scientific Research, 1991, 48(1): 105～114

12　Sundaram S, Viswanath P R, Rudrakumar S. Viscous drag

reduction using riblets on NACA 0012 airfoil to moderate incidence. AIAA J, 1996, 34(4): 676～682

13 McLean J D, George-Falvy D N, Sullivan P P. Flight-test of turbulent skin-friction reduction by riblets. Turbulent Drag Reduction by Passive Means. London: Royal Aeronautical Society, 1987. 408～428

14 Coustols E, Schmitt V. Synthesis of experimental riblet studies in transonic condition. In: Coustols E. Turbulence Control by Passive Means. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1990. 123～140

15 Viswanath P R, Mukund R. Turbulent drag reduction using riblets on a supercritical airfoil at transonic speeds. AIAA Journal, 1995, 37(5): 945～948

16 Debisschop J R, Nieuwstadt T M. Turbulent boundary layer in an adverse pressure gradient: Effectiveness of riblets. AIAA Journal, 1996, 34(5): 932～937

17 李育斌, 乔志德, 王志歧. 运七飞机外表面沟纹膜减阻的实验研究, 气动实验与测量控制, 1995, 9(3): 21～26

18 Choi K S. Near wall structure of turbulent boundary layer with riblets. Journal of Fluid Mechanics, 1989, 208: 417～458

19 Schwarz-van Manen A D, Nieuwenhuizen J. Friction velocity and virtual origin estimates for mean velocity profiles above smooth and triangular riblet surfaces. Applied Scientific Research, 1993, 50(3～4): 233～254

20 Savill A M. Effect on turbulent boundary layer structure of longitudinal riblets alone and in combination with outer devices. In: Charnay L. Flow Visualization IV. Hemishere, 1987

21 Pulles C J A, Prasad K K, Nieuwstadt F T M. Simultaneous flow visualization and LDV studies over longitudinal microgrooved surfaces. In: Coustols E. Turbulence Control by Passive Means. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1990. 97～108

22 Tang Y P, Clark D G. On near-wall turbulence generating events in a turbulent boundary layer on a riblet surface. Applied Scientific Research, 1993, 50(3～4): 215～232

23 Tardu S, Truong T V, Tanguay B. Bursting and structure of the turbulence in an internal flow manipulated by riblets. Applied Scientific Research, 1993, 50(3～4): 189～213

24 Hooshmand A, Youngs R A, Wallace J M. An experimental study of changes in the structure of a turbulent boundary layer due to geometry changes. AIAA-83-0230, 1983

25 Choi K S. Drag reduction mechanisms and near-wall turbulence structure with riblets. In: Gyr A. Structure of Turbulence and Drag Reduction. Berlin Heidelberg: Spring-Verlag, 1990. 553～560

26 Vukoslavcevic P, Wallace J M, Balint J L. Viscous drag reduction using streamwise-aligned riblets. AIAA Journal, 1992, 30(4): 1119～1122

27 Suzuki Y, Kasagi N. Turbulent drag reduction mechanism above a riblet surface. AIAA Journal, 1994, 32(9): 1781～1790

28 Choi K S. Effects of longitudinal pressure gradients on turbulent drag reduction with riblets. In: Coustols E. Turbulence Control by Passive Means. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1990. 109～121

29 Walsh M J. Viscous drag reduction in boundary layer. Progress in Astronautics and Aeronautics, 1990, 123: 203～261

Reviews and Prospects in Turbulent Drag Reduction over Riblets Surface

Wang Jinjun

(Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Dept. of Flight Vehicle Design and Applied Mechanics)

Abstract The experimental investigations of turbulent boundary layer flow, turbulent coherent structures, turbulent drag reduction and its mechanism have been reviewed. The experimental velocities cover subsonic, transonic and supersonic flows, and the content includes: (1) flow over flat plate, revolution body and wing with riblets surface at zero angle of attack; (2) the effect of pressure gradient, angle of attack and slide angle; (3) the burst characteristics, characteristics of turbulence, the streak structure in the near wall region and the drag reduction mechanism. In order to reduce the skin friction efficiently, more research works should be done on the characteristics of turbulent boundary layer, turbulent coherent structures and the mechanism of turbulent drag reduction for flow over riblets surfaces.

Key words turbulent boundary layer; drag reduction; turbulence structures; riblets surfaces