

文章编号: 1000-8055(2007)11-1785-07

凹坑强化传热的研究进展回顾

刘高文, 张 丽, 郭 涛

(西北工业大学 动力与能源学院, 西安 710072)

摘 要: 基于涡流发生的凹坑强化换热是一种新型高效的强化换热和冷却技术, 其主要特点是传热强度大, 流动阻力小, 综合传热性能高. 通过近十年来凹坑强化换热研究工作的回顾, 介绍凹坑壁面的换热阻力特性和涡流结构, 并讨论凹坑形状、深度和雷诺数等参数的影响. 通过介绍凹坑在旋转通道、圆管和冲击靶面等不同情况下的换热阻力特性, 以及与肋等的综合传热性能对比, 旨在说明凹坑是一种很具潜力的新型强化换热结构, 具有十分广泛的应用前景.

关 键 词: 航空、航天推进系统; 凹坑; 强化换热; 涡流; 阻力

中图分类号: V231

文献标识码: A

Review of heat transfer enhancement for dimpled surface

LIU Gao wen, ZHANG Li, GUO Tao

(School of Power and Energy,

Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: The vortex-based dimple heat transfer enhancement was introduced as a new heat transfer enhancement and cooling technique. The major characteristics include high heat transfer coefficients, low friction factors and high overall thermal performances. After review of research work on heat transfer enhancement with dimple in the last decade, the heat transfer behavior, flow resistance and vortex structures of dimpled surface were presented, and the influence of parameters, such as dimple shape, depth, and Reynolds number, were also discussed. While the thermal performances of dimples in rotating channel, circular tube and impingement target surface were described and compared with that of trip strip, this paper provides a visibility into the dimpled surface, which is a new and potential heat transfer enhancement technology with wide applications.

Key words: aerospace propulsion system; dimple; heat transfer enhancement; vortex; flow resistance

航空发动机中最常见的内流冷却方式包括: 冲击、扰流柱、肋以及它们的组合等. 目前世界各国的传热工作者正致力寻找新的具有优良传热——流阻特性的冷却技术, 其中最具竞争力的就是基于涡或漩流的各种强化传热技术, 表面凹坑强化传热技术正是建立在产生有序和小而强有

力的涡旋流动结构上. 凹坑(Dimple)强化传热就是通过壁面上按一定的排列和间距加工出一定深度的凹坑来增强该壁面上的对流换热. 凹坑形状有球面和柱面等, 可采用机械或铸造等方法加工. 凹坑强化传热的主要特点是传热强度高, 流动阻力小. 凹坑强化传热技术研究起源于 20 世纪

收稿日期: 2006-11-06; 修订日期: 2007-01-20

基金项目: 航空科学基金(05C53014)

作者简介: 刘高文(1974-), 男, 四川广安人, 副教授, 博士, 主要从事涡轮叶栅中流动与换热的实验研究与数值模拟以及发动机热端部件先进冷却技术的研究.

80 年代的前苏联,俄罗斯人称其为“旋风式冷却”(Whirlwind cooling)^[1]. 苏联解体后这项技术才为欧美国家所知晓,并作为一项新的强化换热和冷却技术受到了越来越多的重视. 国内对凹坑强化换热的研究目前还未见公开报道,研究工作刚刚起步. 有关凹坑强化传热的流动换热特性和应用研究归纳起来主要集中在以下四个方面.

1 矩形通道内的凹坑传热与流动特性

在矩形通道内表面上布置多排多列凹坑的强化换热结构主要模拟涡轮叶片内冷通道的流动换热情况,典型的矩形通道内球面凹坑结构尺寸如图 1 所示^[2],这类通道的高度小,主流雷诺数高,流动一般处于充分发展的湍流状态.

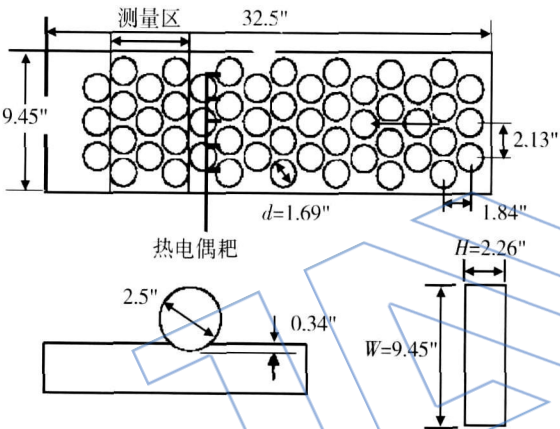


图 1 矩形通道内凹坑面的结构尺寸^[2]
Fig. 1 Geometry of dimpled rectangular channel^[2]

凹坑的换热特性结果一般整理为换热增强因子 Nu/Nu_0 , 它表示凹坑面与光滑表面的换热 Nu 数之比, Nu 数和 Re 数的定性尺度都为通道水力直径. 阻力特性结果一般整理为阻力增大因子 f/f_0 , 它表示凹坑面与光滑表面的范宁摩擦系数之比. 为了全面展示凹坑的换热阻力特性, 试验结果还可进一步整理为综合传热性能增强因子 $(Nu/Nu_0)/(f/f_0)^{1/3}$, 它表示在风机或泵功率一定的情况之下, 凹坑面与光滑表面的传热性能之比.

1.1 球面凹坑的换热与阻力特性

有关凹坑传热和流动的早期研究都来自前苏联和俄罗斯人, 他们主要研究通道内表面上的单个或多个球面凹坑内部及其下游的流动和传热情况. 1993 年 Afanasyev^[3] 对顺排球面凹坑进行了传热和流动测量, 在相对于光滑壁面的流动阻力没有明显增加的情况下, 获得了换热增强 30% ~

40% 的结果.

欧美国家对凹坑传热研究报道始于 1995 年, Schukin^[4] 将凹坑强化传热应用于涡轮冷却, 并分别在收缩和扩张通道内表面上的单个凹坑下游测量了平均换热系数, 研究了来流湍流度的影响. Chyu^[5] 研究了 Re 数对表面叉排凹坑的局部换热影响, 凹坑形状为球面和泪滴 (Tear-drop) 形, 两种凹坑面的换热增强都在 2.5 倍左右, 而压力损失只有肋结构的一半. Moon^[6] 用液晶测温技术研究了通道高度对凹坑传热和流动的影响, 指出换热的增强和压力损失的增加在所研究的通道高度范围内几乎保持常数, 换热增强 2.1 倍左右, 凹坑上游的换热弱, 下游的换热强.

Mahmood^[7] 用红外热像仪测量了凹坑换热面上的局部换热系数, 并得到了如图 2 所示的换热增强因子分布. 可以看到凹坑内背风面的换热相对较弱, 迎风面的换热强; 平板面上的换热增强幅度都在 1.8 倍以上, 其中凹坑下游边缘附近的换热最强, 换热增强因子可达 2.8.

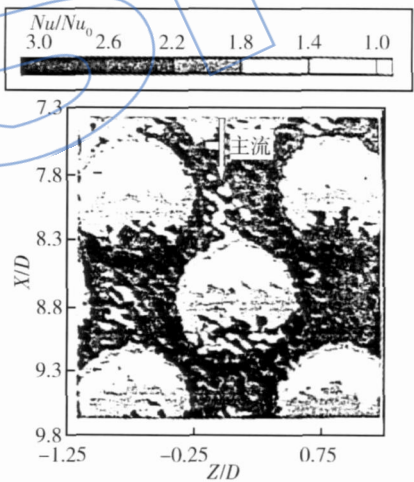


图 2 凹坑面上的局部换热增强因子分布^[7]
Fig. 2 Local Nu/Nu_0 distributions on dimpled surface^[7]

图 3 给出了不同凹坑深度 δ/D 和通道高度 H/D 的换热增强与阻力增大因子随 Re 数的变化^[8], 可以看到换热增强因子在 1.5~2.5 之间变化, 凹坑深度大的换热增幅大; 阻力增大因子在 1~3 之间变化, 凹坑深度大的阻力系数也大, 综合传热性能以凹坑深度大的较好. 主流 Re 数和通道高度的影响不明显.

1.2 凹坑引起的涡流结构及其强化换热机理

凹坑附近的三维流动和涡流结构如图 4 (a)^[9] 和 (b)^[7] 所示, 可以看到在壁面上设置凹坑

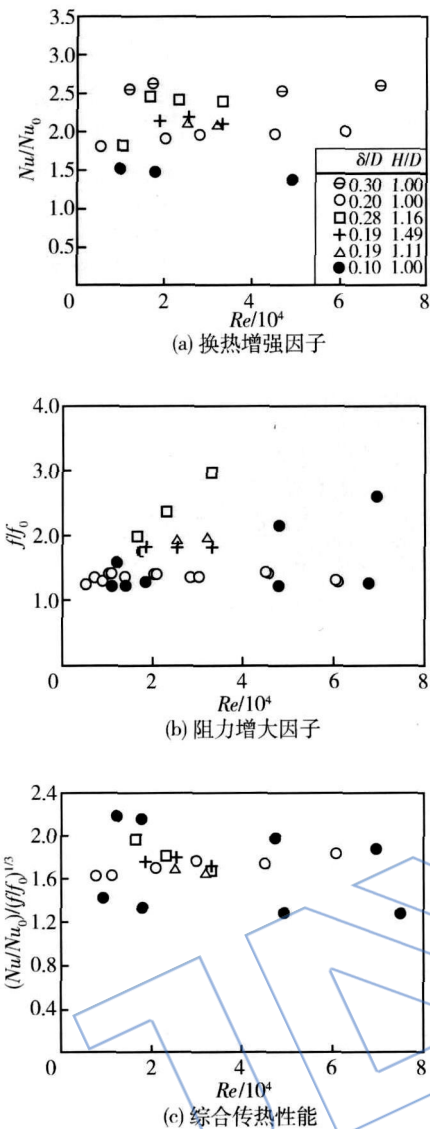


图 3 矩形通道内凹坑面的换热阻力特性^[8]
Fig. 3 Normalized Nusselt numbers and friction factors of dimpled rectangular channel^[8]

能够强化传热的主要原因是凹坑通过壁面的下陷破坏来流边界层,并诱导形成不同尺度的涡旋,这些涡旋加快了通过对流方式带走壁面热量的速率,从而达到增大壁面对流换热系数的目的。凹坑内的背风面由于气流分离换热系数较低,迎风面由于气流的再附着和三维涡旋而换热较强。由于凹坑在壁面上的排列是有序的,其诱发形成的不同尺度涡旋也是有序的,并且其凹坑深度一般较小,影响区域主要局限在边界层附近,因此这种方式在大幅度增强换热的同时,不会明显地增加流动阻力^[7]。

Ligrani^[10]用烟流场显示技术得到了如图 4(c)所示的涡结构,它是在凹坑下游截面不同时刻拍摄到的瞬态流场图。可以明显地看到截面流动

呈强三维特性,并有涡旋产生,这些涡旋正是凹坑下游平壁上换热得到强化的主要原因。不同时刻的涡旋图案是不同的,并具有周期性,呈现了明显的非稳态特性。这很类似于扰流圆柱体下游所产生的卡门涡街。

Khalatov^[11-12]用水流和颜料显示了单个凹坑所产生的涡流结构,如图 4(d)和(e)所示。可以明显地看到坑内产生了一对涡旋,其尺寸大小与凹坑半径相当,旋向相反,这对涡旋在凹坑下游壁面上发展破裂。Khalatov 还观察到凹坑下游的流线并不对称分布,而是有周期性地摆动,呈现出非稳态特性,在柱面凹坑流显实验中也出现了类似的现象。

研究者还通过数值计算来揭示凹坑引起的流动结构和强化换热机理。Lin^[13]对 Chyu^[5]的模型进行了数值计算, Lin^[14]和 Won^[15]采用商业软件 Fluent 对有多排凹坑表面的流动和换热进行了数值模拟,得到了凹坑引起的涡流结构。

1.3 不同参数对凹坑换热阻力特性的影响

凹坑的换热阻力特性受凹坑形状、深度、间距、雷诺数、湍流度和表面曲率等多种参数的影响,图 5 给出了部分参数的影响。

Burgess^[16,8]研究了凹坑深度的影响,结果如图 5(a)和(b)所示。可以看到随着凹坑深度的增大,换热增强因子接近线性地增大。阻力增大因子在凹坑深度 δ/D 为 0.1 和 0.2 时都很接近 1,并随 Re 数的增大变化很小,但深度从 0.2 增大 0.3 时阻力迅速增大,并随 Re 数的增大而接近线性地增大。

Ligrani^[10]研究了来流湍流度的影响,结果如图 5(c)所示,可以看到随着来流湍流度的增大,凹坑面上的换热强度变化很小,而阻力系数则有所增大。Syred^[17]研究了表面曲率对凹坑强化传热的影响,如图 5(d)所示,可以看到在凹面上设置凹坑比在凸面设置凹坑的传热效果要好得多, Syred^[17]指出在一定的雷诺数范围内,凹坑表面的换热增强与流阻增大的倍率同步,是接近一次方的线性关系。

Moon^[18]对球面凹坑和柱面凹坑的传热效果作了对比,结果如图 5(e)所示,可以看到柱面凹坑的综合传热性能比球面凹坑要好, Moon^[18]在实验中发现柱面凹坑与球面凹坑相比换热系数高而流动阻力小。Mahmood^[7]给出了如图 5(f)所示气流进口温度与壁温之比对凹坑换热性能的影响,可以看到这两个温度的差别越大,凹坑强化换热的效果越好。

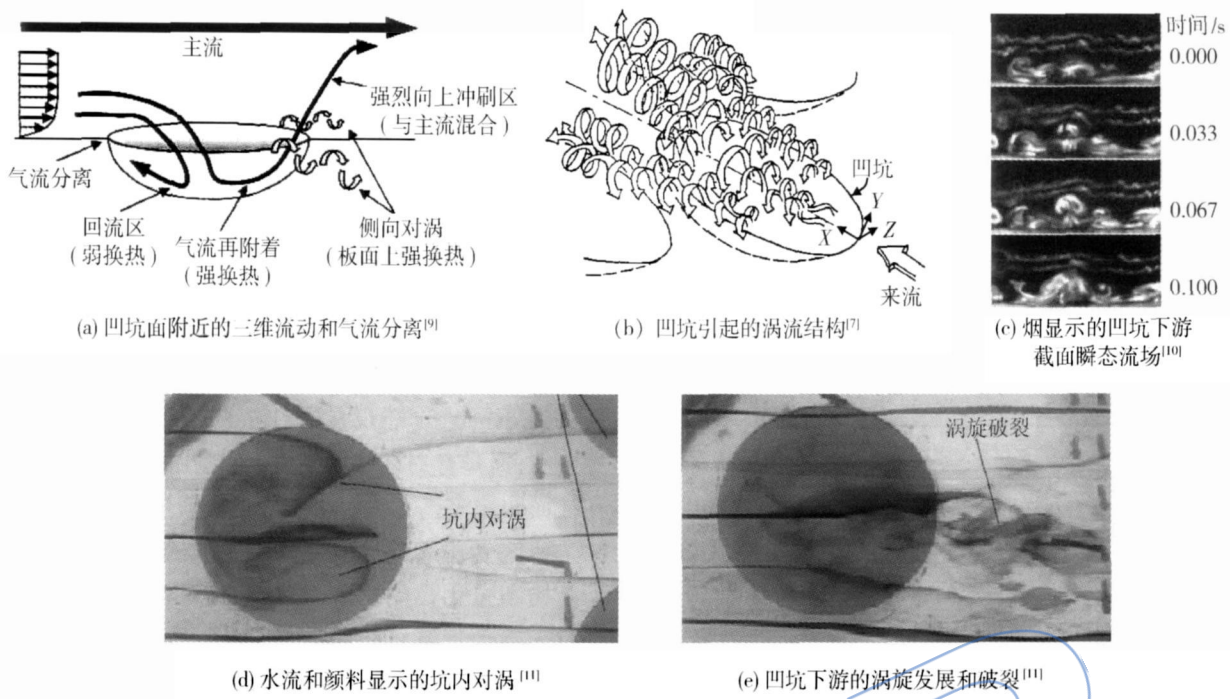


图 4 球面凹坑引起的涡流结构

Fig. 4 Vortexes created by spherical dimples

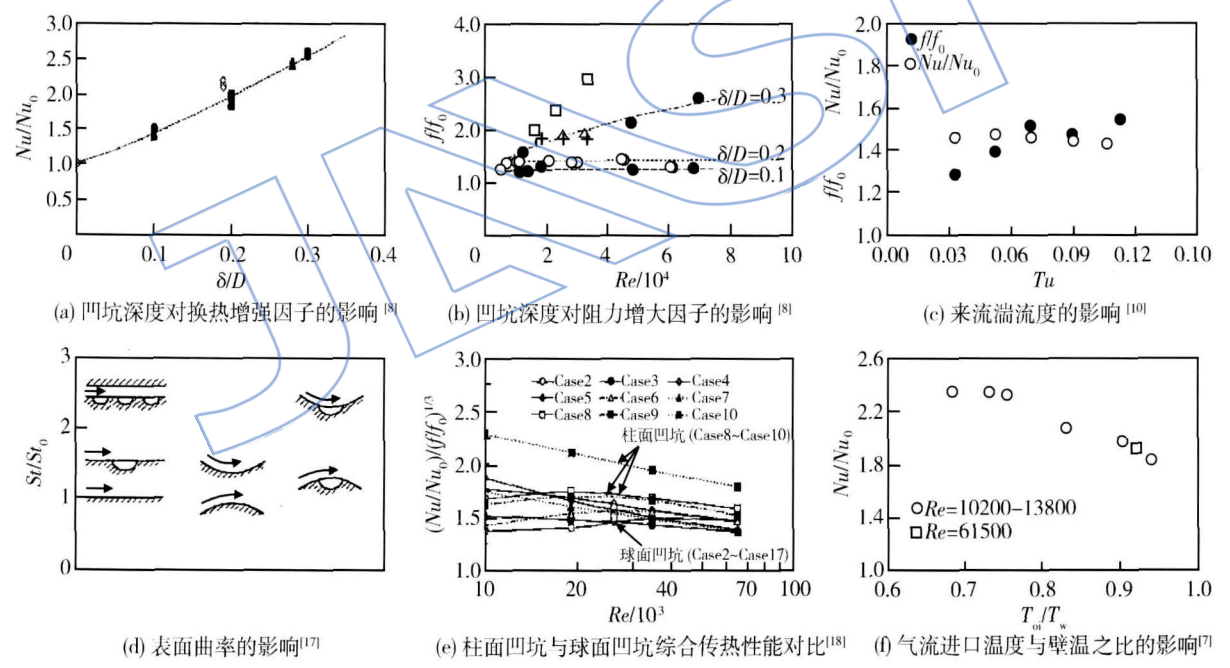


图 5 不同参数对凹坑面的换热阻力特性影响

Fig. 5 Influence of variant parameters on the heat transfer and flow resistance of dimpled surfaces

1.4 与肋等其它强化换热方式的对比

Kim^[2] 在高雷诺数下对比了冲击、肋和凹坑 3 种强化传热方式的换热和流阻性能,如图 6 所示,可以看到相对于光滑壁面,冲击的换热增强 4~ 6 倍,流阻增大 200 倍左右;肋的换热增强 2~ 3 倍,流阻增大 6~ 10;凹坑的换热增强 2~ 3 倍,流阻增大 1~ 4 倍.在相同风机功率条件下的综合传热

性能凹坑最高. Ekkad^[19] 也对凹坑和肋的传热性能作了对比,同样得到凹坑的综合传热性能高于肋的结论.

2 凹坑与冲击等的组合强化换热

将凹坑强化传热与冲击冷却相结合,用凹坑壁作为冲击靶面,能够进一步强化换热,可用于叶

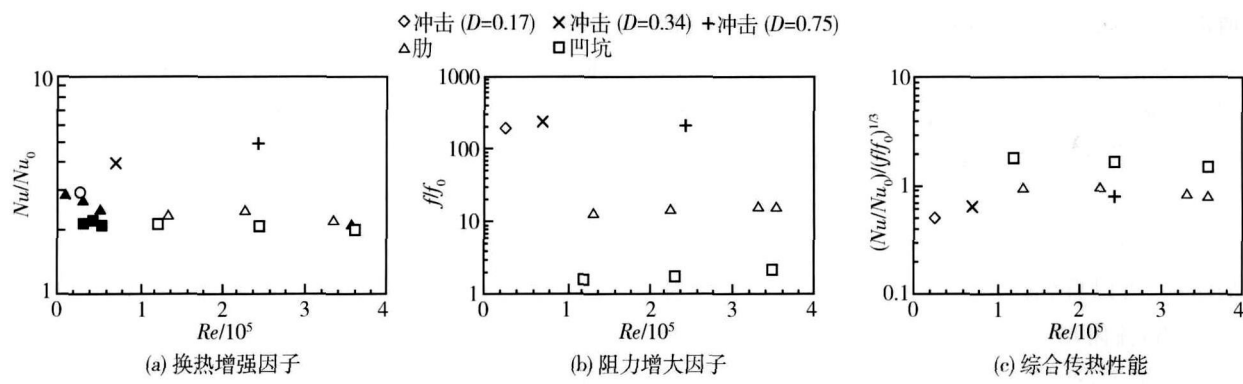


图 6 冲击、肋、凹坑的换热阻力特性对比^[2]

Fig. 6 Thermal performance comparison of trip strip/impingement/ dimple^[2]

片前缘等热负荷高的区域,如图 7 所示. Azad^[20]和 Anderson^[21]以凹坑表面作为冲击靶面进行传热实验,发现凹坑间距对冲击冷却效果的影响较大. Kanokjaruvijit^[22-24]给出了如图 8 所示的换热增强因子随冲击距离 H/D_j 和冲击 Re 数的变化,可以看到换热增强因子在冲击距离为 8 时有最大值 1.5;并且在较大的冲击距离下换热增强因子随 Re 数的增大而增大. Kanokjaruvijit 指出凹坑深度较浅时,冲击冷却的效果好;总压损失主要取决于 Re 数、冲击距离和横流大小,而对冲击靶面是光滑表面还是凹坑面,以及凹坑的具体结构尺寸不敏感,说明凹坑引起的附加阻力损失很小.

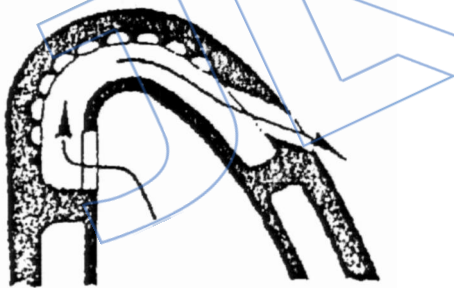


图 7 叶片前缘内表面的冲击+凹坑强化冷却^[17]

Fig. 7 Turbine blade leading edge internal cooling scheme: impingement on dimpled surface^[17]

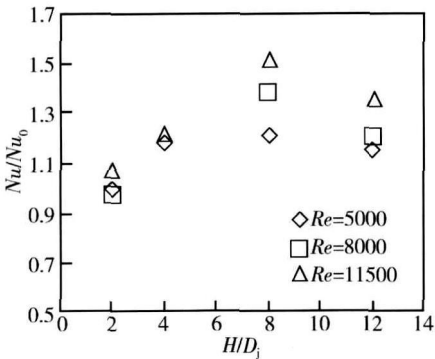


图 8 冲击靶面为凹坑面时的换热增强^[24]

Fig. 8 Heat transfer enhancement of impingement on dimpled surface^[24]

Lauffe^[25]尝试将凹坑与肋两种强化换热方式组合起来,并在一个矩形通道的内壁中部布置凹坑,而在四个角区布置肋,结果发现这种组合能够有效地强化换热,而所产生的阻力损失不大.

3 旋转通道内的凹坑强化换热

涡轮转子叶片内旋转通道的换热强化一般采用肋结构,也可采用凹坑来强化换热. Zhou^[26]和 Griffith^[9]测量了带凹坑的旋转通道内壁换热,图 9 给出了换热增强因子随旋转数的变化,并对凹坑壁和带肋壁进行了对比,可以看到在旋转状态下的凹坑面比光滑壁面的换热增强一般都在 2 倍以上,并随旋转数的增大而增强. 凹坑的强化换热效果要比肋差一些,但凹坑的阻力要小得多.

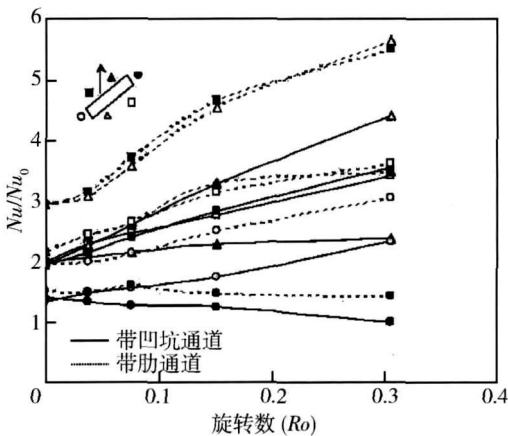


图 9 旋转通道内凹坑面的换热增强^[9]

Fig. 9 Normalized Nusselt numbers in dimpled rotating channel^[9]

4 圆形管道内的凹坑强化换热

如图 10 所示的带凹坑圆形换热管可用于换热器的强化换热. Belen'kiy^[27]将内表面布置了叉排凹坑的圆形管道应用到管壳式热交换器中,相对于光滑管道,换热可以增强 2~2.5 倍,阻力

增加 2~ 4 倍。Chen^[28] 用水流进行了带凹坑圆管的换热和流动实验,发现在恒定泵功率情况下,凹坑管的换热相对于光滑管增强 1.15~ 1.84 倍。Garvin^[29] 将凹坑强化传热应用到化学处理工业中,得到了换热和流阻实验关系式。Bunker^[1] 研究了凹坑布置密度 f 的影响,给出了如图 11 所示的结果,可以看到凹坑管相对于光滑管换热增强 1~ 2 倍,流阻增大 2~ 7 倍,并且随着凹坑布置密度 f 的增大,换热系数和阻力系数都相应增大。

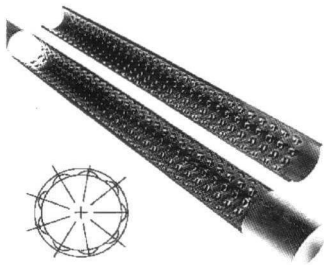
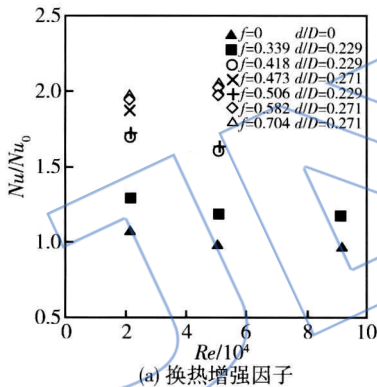
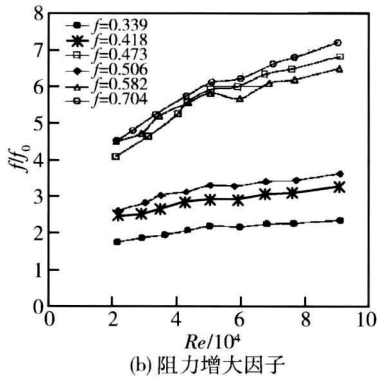


图 10 机械加工的凹坑管^[12]

Fig. 10 Machined circular tube with dimples^[12]



(a) 换热增强因子



(b) 阻力增大因子

图 11 凹坑管的换热阻力特性^[1]

Fig. 11 Normalized Nusselt numbers and friction factors of dimpled circular tube^[1]

5 凹坑强化换热技术的应用前景分析

凹坑作为一种新型的强化传热和冷却技术,

具有换热强度高、流动阻力小、综合传热性能高的特点,在燃气涡轮热端部件冷却和高效换热器的换热强化等领域具有广泛的应用前景,可能的应用有:

(1) 替换现有涡轮叶片内冷通道的肋强化换热方式。由于凹坑的换热性能和肋相当,但阻力小得多,可以用来替换肋强化换热方式,如现有的导叶和动叶的带肋通道壁面可以改用带凹坑的壁面。采用精铸技术,加工成本不会增加,对强度影响也不大,还可以适当减轻重量。

(2) 与冲击冷却相结合,用凹坑壁面代替光滑壁面作为冲击靶面,应用到叶片前缘热负荷最高区域的强化冷却。

(3) 在需要冷却的光滑壁面上设置凹坑可以提高冷却效果,但不会明显增大阻力。如燃烧室壁与二次流冷气换热的壁面、涡轮盘壁面等,都可根据需要设置凹坑强化冷却。

(4) 加工成带凹坑的换热管道或者换热板面应用到各型高效热交换器中。

参考文献:

[1] Bunker R S,Donnellan K F. Heat transfer and friction factors for flows inside circular tubes with concavity surfaces [R]. ASME Paper GT2003 38053, 2003.

[2] Kim Y W, Arellano L, Vardakas M, et al. Comparison of trip strip/ impingement/ dimple cooling concepts at high reynolds number [R]. ASME Paper GT2003 38935, 2003.

[3] Afanasyev V N, Chudnovsky Y P, Leontiev A I, et al. Turbulent flow friction and heat transfer characteristics for spherical cavities on a flat plate [J]. Exp Therm Fluid Sci. , 1993, 7(1): 1- 8.

[4] Schukin A V, Koslov A P, Agachev R S. Study and application of hemispherical cavities for surface heat transfer augmentation [R]. ASME Paper No. 95- GT- 59, 1995.

[5] Chyu M K, Yu Y, Ding H, et al. Concavity enhanced heat transfer in an internal cooling passage [R]. ASME Paper No. 97- GT- 437, 1997.

[6] Moon H K, O' Connell T, Glezer B. Channel height effect on heat transfer and friction in a dimpled passage [J]. ASME J. Eng. Gas Turbines Power, 2000, 122: 307- 313.

[7] Mahmood G I, Hill M L, Nelson D L, et al. Local heat transfer and flow structure on and above a dimpled surface in a channel [J]. ASME J. of Turbomachinery, 2001, 123 (1): 615- 123.

[8] Burgess N K, Ligrani P M. Effects of dimple depth on nusselt numbers and friction factors for internal cooling in a channel [R]. ASME Paper GT2004- 54232, 2004.

[9] Griffith T S, Hadhrami L A, Han J C. Heat transfer in rotating rectangular cooling channels (ar = 4) with dimples

- [R]. ASME Paper GT 2002 30220, 2002.
- [10] Ligrani P M, Burgess N K, Won S Y. Nusselt numbers and flow structure on and above a shallow dimpled surface within a channel including effects of inlet turbulence intensity level[R]. ASME Paper GT 2004 54231, 2004.
- [11] Khalatov A, Byerley A, Ochoa D, et al. Flow characteristics within and downstream of spherical and cylindrical dimples on a flat at low reynolds numbers[R]. ASME Paper GT 2004 53656, 2004.
- [12] Khalatov A, Byerley A, Vincent R. Flow characteristics within and downstream of a shallow cylindrical and spherical dimple: Effect of pre-dimple boundary layer thickness [R]. ASME Paper GT 2005 68050, 2005.
- [13] Lin Y L, Shih T I P, Chyu M K. Computations of flow and heat transfer in a channel with rows of hemispherical cavities[R]. ASME Paper No. 99 GT-263, 1999.
- [14] Lin Y L, Shih T I P. Flow and heat transfer induced rows of hemispherical cavities[J]. Int. Journal of Transport Phenomena, 2001, 3: 1-11.
- [15] Won S Y, Ligrani P M. Numerical predictions of flow structure and local nusselt number ratios along and above dimpled surfaces with different dimple depths in a channel [J]. Numerical Heat Transfer; Part A: Applications, 2004, 46(6): 549-570.
- [16] Burgess N K, Oliveira M M, Ligrani P M. Nusselt number behavior on deep dimpled surfaces within a channel[J]. Journal of Heat Transfer, 2003, 125(1): 11-18.
- [17] Syred N, Khalatov A. Effect of surface curvature on heat transfer and hydrodynamics within a single hemispherical dimple[J]. ASME Journal of Turbomachinery, 2001, 123(3): 609-613.
- [18] Moon S W, Lau S C. Turbulent heat transfer measurements on a wall with concave and cylindrical dimples in a square channel[R]. ASME Paper GT 2002-30208, 2002.
- [19] Ekkad S V, Nasir H. Dimple enhanced heat transfer in high aspect ratio channels[J]. Journal of Enhanced Heat Transfer, 2003, 10(4): 395-405.
- [20] Azad G S, Huang Y, Han J C. Jet impingement heat transfer on dimpled surfaces using a transient liquid crystal technique[J]. AIAA Journal of Thermophysics and Heat Transfer, 2000, 14(2): 186-193.
- [21] Anderson A M, Chapin D M. The effects of dimpled surface geometry on heat transfer in an impinging jet flow[J]. ASME, Heat Transfer Division, (Publication) HTD, 2002, 372(2): 73-80.
- [22] Kanokjaruvijit K, Martinez B R F. Parametric effects on heat transfer of impingement on dimpled surface[J]. Proceedings of the ASME Turbo Expo 2004: Heat Transfer: General, 2004(3): 77-88.
- [23] Kanokjaruvijit K, Martinez B R F. Jet impingement on a dimpled surface with different crossflow schemes[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2005, 48(1): 161-170.
- [24] Kanokjaruvijit K, Martinez B R F. Heat transfer and pressure investigation of dimple impingement[R]. ASME Paper GT 2005 68823, 2005.
- [25] Lauffer D, Weigand B, Liebe R. A study on local heat transfer enhancement in a rectangular dimpled channel with a large aspect ratio [R]. ASME Paper GT 2005 68089, 2005.
- [26] Zhou F, Acharya. Mass/heat transfer in dimpled two-pass coolant passage with rotation [J]. Heat Transfer in Gas Turbine Systems, 2001: 424-431.
- [27] Belen'kiy M Y, Gotovskiy M A. Heat transfer augmentation using surface formed by a system of spherical cavities [J]. Heat Transfer Sov. Res., 1993, 25(2): 196-203.
- [28] Chen J, Muller S H, Duffy, G G. Heat transfer enhancement in dimpled tubes[J]. Applied Thermal Engineering, 2001, 21(5): 535-547.
- [29] Garvin J. Heat transfer and friction in dimple jackets[J]. Chemical Engineering Progress, 2001, 97(4): 73-75.