

Numerical Investigation of Film Cooling with Crossing Jets on a Flat Plate

楊雅惠、吳佩學

E-mail: 9707380@mail.dyu.edu.tw

ABSTRACT

This study employs computational fluid dynamics simulation to investigate the flat-plate film cooling performance with cross-injection coolant jets from double-row holes of different arrangements. The parameters and their values in this study are the following. The distance between the first (upstream) row and the second (downstream) row is 2.5D, 4D, or 5.5D. The separation distance between each pair of holes in the cross stream direction is 0D (Configuration 1), 1.5D (Configuration 2), 3D (Configuration 3), and 4.5D (Configuration 4). The blowing ratios are $M = 0.5, 1.0, \text{ and } 2.0$. All the film cooling holes have an inclination angle of 30° . The orientation angle is for the first-row holes and for the second-row holes. The standard k-model was used in the computation. Temperature distribution on the flat plate, the local cross-stream averaged film cooling effectiveness, and the temperature distribution in the boundary layer are reported. In addition, the effect of different blowing ratios from these two rows on the cross-injection cooling performance is also investigated. Results show that the cooling performance is the best when the distance between these two rows is 2.5D, followed by 4D. When $M = 0.5$ and 1, Configuration 2 has the best cooling results, while Configuration 1 performs the best when $M = 2$. Overall, it is seen from the temperature distribution in the boundary layer that the film effectiveness for low blowing ratios is basically determined by the interaction of individual coolant jet with the main flow. At high blowing ratio, the effect of cross injection from paired holes becomes more important. When the blowing ratio is different from each row, it is more beneficial to have higher blowing ratio at the upstream-row holes. Keywords: simulation, double-row holes, cross injection, boundary layer.

Keywords : Film Cooling

Table of Contents

目錄封面內頁 簽名頁 授權書 iii 中文摘要 iv 英文摘要 iii 誌謝 vii 目錄 vii 圖目錄 ix 表目錄 xiv 符號說明 xiv 第一章 緒論 1.1 前言 1 1.2 研究動機與背景 2 1.3 研究目的 3 第二章 國內外相關文獻之研究 5 第三章 研究方法與進行的步驟 3.1 基本架構 12 3.2 數值模擬之程序 13 3.2.1 建立幾何模型 13 3.2.2 模型之網格構建與網格品質檢查 14 3.2.3 流場數學模型之選用及數學計算方法 14 3.2.4 邊界條件設定 17 3.2.5 收斂條件設定 17 第四章 結果與討論 4.1 底板溫度分布 25 4.2 交叉噴流之二次流場 26 4.3 冷卻孔配置位置對膜冷卻之影響 27 4.3.1 吹氣比 $M=0.5$ 27 4.3.2 吹氣比 $M=1.0$ 29 4.3.3 吹氣比 $M=2.0$ 29 4.4 相異吹氣比交叉噴流之影響 30 第五章 結論 57 參考文獻 58 圖目錄 圖1.1 實驗系統示意圖 4 圖2.1 近端壁二次流動模式Wang et al. [5] 11 圖2.2 近端壁二次流動模式Langston et al. [7] 11 圖3.1 成對孔間距離位置配置圖 19 圖3.2 膜冷卻孔位置配置1 [4] 20 圖3.3 膜冷卻孔位置配置2 [4] 20 圖3.4 膜冷卻孔位置配置3 [4] 21 圖3.5 膜冷卻孔位置配置4 [4] 21 圖3.6 研究方法與步驟流程 22 圖3.7 膜冷卻孔位置示意圖 23 圖3.8 網格數與平均膜冷卻有效性 23 圖3.9 數值模擬之邊界條件 24 圖4.1 膜冷卻孔下游出口位置示意圖 31 圖4.2 線 值與吹氣比 $M=0.5$ 關係圖 32 圖4.3 線 值與吹氣比 $M=1.0$ 關係圖 33 圖4.4 線 值與吹氣比 $M=2.0$ 關係圖 33 圖4.5 渦旋對示意圖(4D、 $M=2.0$ 、孔配置1) 34 圖4.6 模擬條件1 成對孔間距2.5D、 $M=0.5$ 、孔配置1，溫度邊界層分布圖 34 圖4.7 模擬條件 2 成對孔間距2.5D、 $M=0.5$ 、孔配置2，溫度邊界層分布圖 35 圖4.8 模擬條件 3 成對孔間距2.5D、 $M=0.5$ 、孔配置3，溫度邊界層分布圖 35 圖4.9 模擬條件 4 成對孔間距2.5D、 $M=0.5$ 、孔配置4，溫度邊界層分布圖 36 圖4.10 模擬條件 13 成對孔間距2.5D、 $M=1.0$ 、孔配置1，溫度邊界層分布圖 36 圖4.11 模擬條件 14 成對孔間距2.5D、 $M=1.0$ 、孔配置2，溫度邊界層分布圖 37 圖4.12 模擬條件 15 成對孔間距2.5D、 $M=1.0$ 、孔配置3，溫度邊界層分布圖 37 圖4.13 模擬條件16 成對孔間距2.5D、 $M=1.0$ 、孔配置4，溫度邊界層分布圖 38 圖4.14 模擬條件 25 成對孔間距2.5D、 $M=2.0$ 、孔配置1，溫度邊界層分布圖 38 圖4.15 模擬條件 26 成對孔間距2.5D、 $M=2.0$ 、孔配置2，溫度邊界層分布圖 39 圖4.16 模擬條件27 成對孔間距2.5D、 $M=2.0$ 、孔配置3，溫度邊界層分布圖 39 圖4.17 模擬條件 28 成對孔間距2.5D、 $M=2.0$ 、孔配置4，溫度邊界層分布圖 40 圖4.18 模擬條件5 成對孔間距4D、 $M=0.5$ 、孔配置1，溫度邊界層分布圖 40 圖4.19 模擬條件9 成對孔間距5.5D、 $M=0.5$ 、孔配置1，溫度邊界層分布圖 41 圖4.20 模擬條件18 成對孔間距4D、 $M=1.0$ 、孔配置2，溫度邊界層分布圖 41 圖4.21 模擬條件22 成對孔間距5.5D、 $M=1.0$ 、孔配置2，溫度邊界層分布圖 42 圖4.22 模擬條件30 成對孔間距4D、 $M=2.0$ 、孔配置2，溫度邊界層分布圖 42 圖4.23 模擬條件31 成對孔間距4D、 $M=2.0$ 、孔配置3，溫度邊界層分布圖 43 圖4.24 模擬條件34 成對孔間距5.5D、 $M=2.0$ 、孔配置2，溫度邊界層分布圖 43 圖4.25 模擬條件35 成對孔間距5.5D、 $M=2.0$ 、孔配置3，溫度邊界層分布圖 44 圖4.26 模擬條件32 成對孔間距4D、 $M=2.0$ 、孔配置4，溫度邊界層分布圖 44 圖4.27 吹氣比 $M=0.5$ 、 $X/D=1$ 之線值.....45 圖4.28 吹氣比 $M=1.0$ 、 $X/D=1$ 之線 值.....45

圖4.29 吹氣比 $M=1.0$ 、 $X/D=1$ 之線 值.....46 圖4.30 孔配置1、 $M=0.5$ 、 $X/D=1$ 切面上溫度分布圖 46
圖4.31 孔配置2、 $M=0.5$ 、 $X/D=1$ 切面上溫度分布圖 47 圖4.32 孔配置3、 $M=0.5$ 、 $X/D=1$ 切面上溫度分布圖 47 圖4.33 孔配
置4、 $M=0.5$ 、 $X/D=1$ 切面上溫度分布圖 48 圖4.34 孔配置1、 $M=1.0$ 、 $X/D=1$ 切面上溫度分布圖 48 圖4.35 孔配置2
、 $M=1.0$ 、 $X/D=1$ 切面上溫度分布圖 49 圖4.36 孔配置3、 $M=1.0$ 、 $X/D=1$ 切面上溫度分布圖 49 圖4.37 孔配置4、 $M=1.0$
、 $X/D=1$ 切面上溫度分布圖 50 圖4.38 孔配置1、 $M=2.0$ 、 $X/D=1$ 切面上溫度分布圖 50 圖4.39 孔配置2、 $M=1.0$ 、 $X/D=1$
切面上溫度分布圖 51 圖4.40 孔配置3、 $M=2.0$ 、 $X/D=1$ 切面上溫度分布圖 51 圖4.41 孔配置4、 $M=2.0$ 、 $X/D=1$ 切面上溫度
分布圖 52 圖4.42 相異吹氣比($M=1.0$ 、 $M=0.5$)膜冷卻壁溫分布 52 圖4.43 相異吹氣比($M=1.0$ 、 $M=2.0$)膜冷卻壁溫分布 53
圖4.44 相異吹氣比($M=0.5$ 、 $M=1.0$)膜冷卻壁溫分布 53 圖4.45 相異吹氣比($M=2.0$ 、 $M=1.0$)膜冷卻壁溫分布 54 圖4.46 模擬
條件 37 $X/D=1$ 切面溫度分布 54 圖4.47 模擬條件 38 $X/D=1$ 切面溫度分布 55 圖4.48 模擬條件 39 $X/D=1$ 切面溫度分布 55
圖4.49 模擬條件 40 $X/D=1$ 切面溫度分布 56 圖4.50 成對膜冷卻孔之相異吹氣比之關係 56 表目錄 表3.1 模擬控制參數與模
擬編號 18 表4.1 成對相異孔間不同吹氣比之模擬編號與模擬控制參數 31

REFERENCES

- [1] Kawaike, K., Anzai, S., Takehara, T., Sasada, T., and Matsuzaki, H.,1993, " Advanced Cooling Design of Turbine Blades with Serpentine Cooling Passages, " 20 . International Congress on Combustion Engines, paper G12.
- [2] Gritsch, M., Schulz, A., and Wittig, S., 2003, " Effect of Internal Coolant Crossflow in the Effectiveness of Shaped Film-Cooling Holes, " ASME Journal of Turbomachinery, Vol. 125, pp. 547-554 [3] Goldstein, R.J.,1991, " Film Cooling " in Advances in Heat Transfer, Academic Press, eds. T. F. Irvine, Jr. and J. P. Hartnett, Vol. 7, pp. 321-379, 1971.
- [4] Ahn, J., Jung, I.S., and Lee, J. S., " Film cooling from two rows of holes with opposite orientation angles: injectant behavior and adiabatic film cooling effectiveness, " International Journal of Heat and Fluid Flow, Vol. 24, pp. 91-99, 2003.
- [5] Wang, H.P., Olson, S.J., Goldstein, R.J., and Eckert E.R.G., " Flow Visualization in a Linear Turbine Cascade of High Performance Turbine Blades, " Journal of Turbomachinery, Vol. 119, pp.1-8, 1997.
- [6] Sieverding, C.H., and Van Den Bosche, P., " The use of Coloured Smoke to Visualize Secondary Flows in a Turbine-Blade Cascade, " Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, Vol. 107, pp. 248-257, 1983.
- [7] Langston, L.S., " Crossflow in A turbine Cascade Passage, " ASME Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, Vol. 109, pp. 866-874,1980.
- [8] 吳佩學、鐘道雄、謝佳佑, 「靜葉片端壁區域流場受背向進口台階影響之可視化觀察」, 中國機械工程學會第二十屆全國學術研討會」, Paper 10659, 2003.
- [9] Sharma, O.P., and Butler, T.L. " Predictions of Endwall Losses and Secondary Flows in Axial Flow Turbine Cascades, " Journal of Turbomachinery, Vol. 109, pp. 229-236,1987.
- [10] Chung, J.T., and Simon, T.W., " Three-Dimensional Flow Near the Blade/Endwall Junction of a Gas Turbine:Visualization in a Large-Scale Cascade Simulator, " ASME paper 90-WA/HT-4, 1990.
- [11] Chung, J.T., Simon, T.W., and Buddhavarapu, J., " Three-Dimension Flow Near the Blade/Endwall Junction of a Gas Turbine:Application of a Boundary Layer Fence, " ASME paper 91-GT-45, 1991.
- [12] Takeishi, K., Matsuura, M., Aoki, S., Sato, T, " An Experimental Study of Heat Transfer and Film Cooling on Low Aspect Ratio Turbine Nozzles, " ASME Journal of Turbomachinery, Vol. 112, pp.488-496.,1990.
- [13] Takeishi, K., Matsuura, M., Aoki, S., Sato, T, " An Experimental Study of Heat Transfer and Film Cooling on Low Aspect Ratio Turbine Nozzles, " ASME Journal of Turbomachinery, Vol. 112, pp.488-496.,1990..
- [14] Ekkad, S. V., Zapata, D., Han, J. C., 1997, " Film Effectiveness Over a Flat Surface With Air and CO₂ Injection Through Compound Angle Holes Using a Transient Liquid Crystal Image Method, " ASME Journal of Turbomachinery, Vol. 119, pp.587-593.
- [15] Wanda Jiang, H. and Han, J.C., " Effect of film Hole Row Location on Film Effectiveness on Gas Turbine Blade, " Journal of Heat Transfer, Vol. 118, pp.327-333., 1996.
- [16] Cho, H.H. and Goldstein, R.J., " Heat (Mass) Transfer and Film Cooling Effectiveness With Injection Through Discrete Hole:Part I - Within Holes and on the Back Surface, " Journal of Turbomachinery, Vol. 117,pp.440-450. , 1995.
- [17] Cho, H.H. and Goldstein, R.J., " Heat (mass) Transfer and Film Cooling Effectiveness With Injection Through Discrete Holes:Part II - On the Exposed Surface, " Journal of Turbomachinery, Vol. 117, pp.451-460, 1995.
- [18] Schwarz, S. G. and Goldstein, R. J., " The Two-Dimensional Behavior of Film Cooling Jets on Concave Surfaces, " ASME J. of Turbomachinery, Vol. 111,pp.124-130,1989.
- [19] Findlay, M. J., Salcudean, M., and Gartshore, I. S., " Jets in a Flow Effects of Geometry and Blowing Ratio " ,R. of Fluids Engineering, Vol. 121, pp.373-378,1999.
- [20] LI Li, Xiao-Feng Peng, Bu-Xuan.Wang, " Influence of density ratio and velocity ratio upon the cooling effect of flat panel film " , Journal of Aerospace Power, Vol. 9, Scpt. 2007.

- [21] Hale, C. A., Plesniak, M. W., and Ramadhyani, S., " Film Cooling Effectiveness for Short Film Cooling Holes Fed by a Narrow Plenum, " ASME Journal of Turbomachinery, Vol. 122, pp.553-557., 2000.
- [22] Rhee, D. H., Y. S., and Cho, H. H., " Film Cooling Effectiveness Holes, " ASME Paper No. 02-GT-168.,2002 [23] 吳政源, 2005, 「渦輪葉片新型冷卻保護膜是研究」, 國防大學中正理工學院國防科學研究所博士論文研究計畫書。
- [24] 陳宗榮, 1997, 「具橫向流之三維紊流雙噴射撞擊平板數值模擬與分析」, 中原大學機械工程研究所碩士論文。
- [25] 吳佩學、黃詠萱, 2006, 「雙排孔交叉噴射對平板薄膜冷卻效果之數值模擬」, 中華民國力學學會第三十屆全國力學會報。
- [26] Launder, B.E., and Spalding, D.B., " Lectures in Mathematical Model of Turbulence, " Academic Press, London, England.