

一种基于菱形蜂窝构型的夹层板及其基本性能

谢 勇

(湖南工业大学 包装与印刷学院, 湖南 株洲 412008)

摘 要: 指出现有六边形蜂窝纸板结构所存在的缺陷, 提出一种新型的准菱形蜂窝夹芯结构。通过分析和计算, 确定了这种菱形蜂窝纸芯的成型方法和基本尺寸参数。定性分析和实验结果表明: 较之六边形蜂窝纸板, 菱形蜂窝纸板的缓冲性能和折叠性更好, 适合用作缓冲包装材料和制成折叠蜂窝纸箱。

关键词: 包装材料; 蜂窝纸板; 蜂窝夹芯; 准菱形结构; 力学性能

中图分类号: TB484.1

文献标识码: A

文章编号: 1673-9833(2008)06-0001-05

A Composite Sandwich Plate Based on Rhombic Honeycomb Configuration and its Basic Performance

Xie Yong

(School of Packaging and Printing, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412008, China)

Abstract: In this paper, the limitation is pointed out about honeycomb fiberboard in existence. A novel structure of quasi-rhombic sandwich core is developed for honeycomb fiberboard. Forming way of the sandwich core is analyzed and its basic dimension parameters are calculated. The qualitative analysis and the tested results indicate that the performances of cushion and foldable of quasi-rhombic honeycomb fiberboard are better than that of hexagonal honeycomb fiberboard, so as to used for cushion packaging material and to made foldable honeycomb paper box.

Key words: packaging material; honeycomb fiberboard; honeycomb core; rhombic structure; mechanical properties

0 引言

蜂窝纸板是近年来世界上兴起的新型绿色包装材料, 它具有强度高、刚度大、质量轻等众多优点, 在国内外包装市场的应用极其广泛。我国于20世纪90年代初期开始研制用于包装行业的蜂窝纸板生产线以及小规模生产蜂窝纸板产品, 至1998年美国宣布对中国的木制包装材料实行新的规定后, 在国内掀起了开发和应用蜂窝纸板热潮。但由于生产设备、生产工艺、原材料, 特别是正六边形蜂窝纸芯结构的局限等多方面的原因, 蜂窝纸板存在制造成本高、不能折叠、初始缓冲性能差、印刷适性差等缺陷, 严重制约了其在包装领域中的应用。

为此, 本文针对正六边形蜂窝纸板结构的不足, 提出了一种从正六边形蜂窝夹芯结构演变而来的准菱

形蜂窝夹芯结构, 试图为包装用蜂窝纸箱的制造提供新的解决方案。

1 蜂窝纸板的现状分析

1.1 蜂窝纸板的主要缺陷

蜂窝纸板的主要性能缺陷可以归结为以下几个方面^[1-4]:

- 1) 蜂窝纸板外观粗糙, 印刷适性差;
- 2) 蜂窝纸板易发生翘曲变形;
- 3) 蜂窝纸芯为六边形结构, 蜂窝纸板纵横方向具有明显的各向异性特征, 且边压强度低, 纸箱堆码性能弱;
- 4) 蜂窝纸板刚性大, 不易变形, 初始缓冲性能差, 难压痕, 难制成折叠纸箱, 不便储运;

收稿日期: 2008-09-22

作者简介: 谢 勇(1964-), 男, 湖南攸县人, 湖南工业大学教授, 主要研究方向为功能包装材料, 机器视觉检测和防伪技术。

- 5) 蜂窝纸板脆性大, 受冲击易断裂;
6) 生产效率低, 制造成本高。

1.2 影响六边形蜂窝纸板质量和性能的原因

作为一般运输包装用材, 蜂窝纸板的核心问题在于: 刚性过大, 承载能力过剩, 边压强度严重不足。

一般认为, 影响蜂窝纸板质量和性能的原因很多(如原材料、生产工艺水平等), 但根源仍在于纸芯特殊的六角形结构。

稳定的六角形结构具有优异的承受轴向载荷的能力, 因而纸板的刚性非常大。蜂窝纸板的平压强度主要是由纸芯的强度决定的, 因此其平压强度高, 承载能力强^[5]。

蜂窝纸板的边压强度主要由面纸的强度决定, 纸芯对边压强度的贡献较小, 故其纵横向的边压强度都较低^[6]。

蜂窝纸板的刚性大, 则难变形、易断裂、不耐折, 从而造成蜂窝纸板不能如瓦楞纸板那样制成折叠纸箱, 大大限制了蜂窝纸板的应用领域。

因此, 为使蜂窝纸板具有更好的包装适性, 变革现有纸芯结构是解决问题的根本途径。

2 菱形蜂窝夹芯结构的提出

2.1 菱形蜂窝夹芯纸板的基本构型

与传统的六边形蜂窝纸板相比, 菱形蜂窝纸板的最大不同之处在于, 其芯子结构为菱形, 而不是六边形。菱形蜂窝芯子的演变及其截面形状如图1所示。

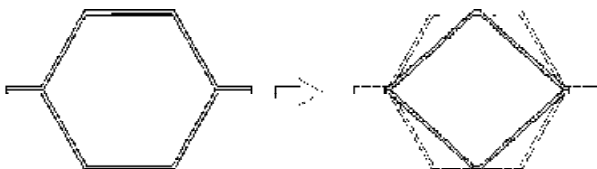


图1 菱形蜂窝芯的演变

Fig. 1 Evolution of rhombic honeycomb core

由图1可知, 芯子的理想形状为正菱形, 但为保证芯子间具有足够的粘结牢度, 以便后续的拉伸成型, 胶条由直线演变为窄矩形。因此, 菱形芯子也可以理解为通过减小正六边形芯子上胶边长度演变而来, 其形状近似菱形(准菱形)。但因胶条宽度较小, 为了区别六边形蜂窝, 仍称其为菱形蜂窝, 且当对角为 90° 时视其为正菱形。同样地, 与六边形蜂窝相似, 菱形蜂窝芯子在拉伸过程中, 很难拉伸成正菱形, 也存在“欠拉伸”或“过拉伸”现象, 因此, 成型后的蜂窝芯子不会是严格意义上的“正菱形”。

菱形蜂窝纸板的成型方法与传统的六边形蜂窝纸板的成型方法相似, 其基本结构如图2所示。定义蜂窝芯的拉伸方向为 x 方向, y 为纸板的宽度方向, z 为纸板的厚度方向, t 为面纸厚度, h 为纸芯厚度, H 为

纸板厚度($H = h + 2t$, 忽略两胶层厚)。

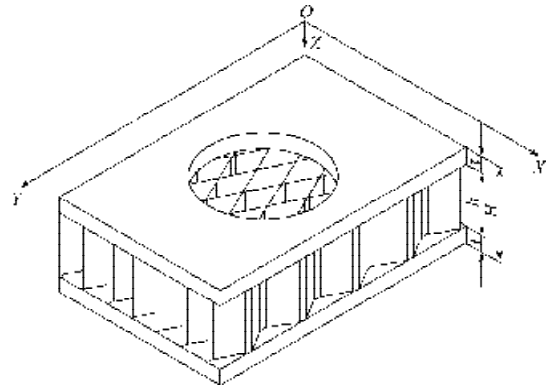


图2 菱形蜂窝纸板的基本结构

Fig. 2 The basic structure of rhombic honeycomb fiberboard

2.2 菱形蜂窝芯的结构参数

设在半径为 a 的圆内分别作一正菱形和一正六边形, 得到正菱形蜂窝胞元的截面形状(粗实线部分)及其几何尺寸关系如图3所示。图中, a 为六边形边长, b 为菱形边长, c 为胶条宽度。

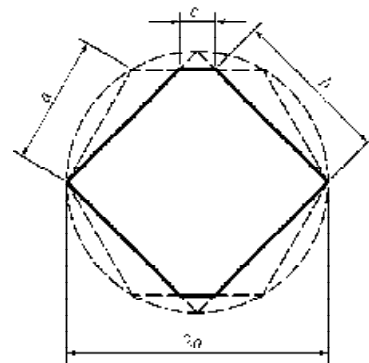


图3 菱形蜂窝胞元尺寸的几何关系

Fig. 3 The geometrical relation of rhombic honeycomb core size

$$\text{由图2可知: } b = \frac{a \sin 60^\circ}{\sin 45^\circ} = \frac{\sqrt{6}}{2} a \approx 1.225a, \quad (1)$$

$$c = 2a - 2a \sin 60^\circ \approx 0.268a \approx 0.219b. \quad (2)$$

式(2)将作为确定胶条宽度的计算依据。

2.3 蜂窝纸板的当量密度

蜂窝纸板是一种夹芯板, 夹芯板并不是材料, 而是一种结构, 本无“夹层板的密度”一说, 但因这种结构已被工程界视为一种结构“材料”, 应用中需从重量角度了解其单位体积的质量, 亦为了便于对不同结构的“材料”性能进行对比分析, 因此引入“当量密度”概念。所谓夹芯板的当量密度, 即将夹芯板结构等效为一块等体积的均质材料, 而这块均质材料的质量与体积之比就是其当量密度^[7]。蜂窝纸板的当量密度有时也称容重。

2.3.1 菱形蜂窝芯分析单元

不失一般性, 选取图4中由长方形虚线划出的范围与蜂窝芯高度形成的长方体为蜂窝芯的代表单元。设拉伸成型角为 θ , b 、 c 、 h 的含义同前, t 为芯纸厚度, 则长方体的长边长为 $(b\cos\theta+c)$, 长方形的短边长为 $a\sin\theta$ 。

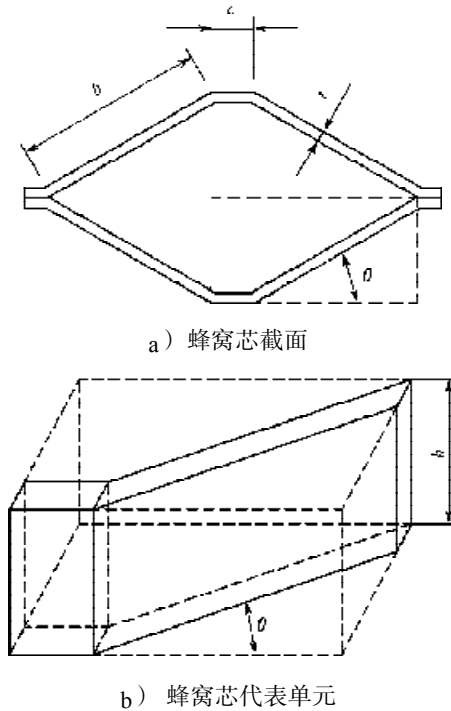


图4 菱形蜂窝纸芯代表性单元
Fig. 4 The representative cell of quasi-rhombic honeycomb core

2.3.2 菱形蜂窝纸芯的当量密度

$$\rho_c = \frac{W_c}{V_c} \quad (3)$$

式中: V_c 为代表性单元的体积, $V_c = h(b\cos\theta+c)b\sin\theta$;

W_c 为代表性单元中蜂窝芯的质量, 若蜂窝芯纸的密度为 ρ_0 , 则有 $W_c = \rho_0(b+c)ht$ 。于是有

$$\rho_c = \frac{W_c}{V_c} = \frac{\rho_0(b+c)ht}{h(b\cos\theta+c)b\sin\theta} = \frac{\rho_0(b+c)t}{(b\cos\theta+c)b\sin\theta} \quad (4)$$

对于式(4), 有2个特例:

a) 当 $b=c=a$, $\theta=60^\circ$ 时, 蜂窝芯子形状为正六

边形, 于是得到正六边形蜂窝芯子的当量密度 ρ_c' :

$$\rho_c' = \frac{\rho_0 2bt}{b^2(\cos 60^\circ + 1)\sin 60^\circ} = \frac{8}{3\sqrt{3}} \left(\frac{t}{b}\right) \rho_0 = 1.54 \left(\frac{t}{b}\right) \rho_0 \quad (5)$$

b) 当 $\theta=45^\circ$ 时, 蜂窝芯子形状为正菱形, 于是得到正菱蜂窝芯子的当量密度 ρ_c'' :

$$\rho_c'' = \frac{\rho_0(b+c)t}{(b\cos 45^\circ + c)b\sin 45^\circ} =$$

$$\frac{2\sqrt{2}(b+0.219b)t\rho_0}{(b\sqrt{2}+0.219b)b} \approx 2.11 \left(\frac{t}{b}\right) \rho_0$$

2.3.3 菱形蜂窝纸板的当量密度

菱形蜂窝纸板的结构包括上下面纸层、蜂窝芯和胶接层。若上面的板厚为 t_1 , 材料密度为 ρ_1 , 下面板厚度为 t_2 , 材料密度为 ρ_2 , 胶层厚度为 t_r , 胶层的密度为 ρ_r , 蜂窝芯的当量密度为 ρ_c , 则菱形蜂窝夹层板的当

$$\text{量密度} \rho = \frac{t_1\rho_1 + t_2\rho_2 - 2t_r\rho_r + h\rho_c}{t_1 + t_2 + 2t_r + h} \quad (7)$$

若上下面纸层采用相同材料, 则 $t_1=t_2=t_f$, $\rho_1=\rho_2=\rho_f$, 且当胶层较薄, $2t_r\rho_r$ 可以略去, 同时蜂窝芯的高度远远大于面板的厚度, 则

$$\rho = 2\frac{t_f}{h}\rho_f + \rho_c \quad (8)$$

将式(6)代入式(8)中, 即可得正菱形蜂窝纸板的当量密度,

$$\rho = 2\frac{t_f}{h} + 2.11 \left(\frac{t}{b}\right) \rho_0 \quad (9)$$

若使用相同的材料, 制造与正六边形蜂窝纸板当量密度相近的正菱形蜂窝纸板, 则有 $\rho_c' = \rho_c''$, 于是:

$$1.54 \left(\frac{t}{a}\right) \rho_0 = 2.11 \left(\frac{t}{b}\right) \rho_0, \quad b \approx 1.37a \quad (10)$$

2.3.4 菱形蜂窝纸芯结构的尺寸规格

考虑到我国现有的六边形蜂窝纸芯边长和厚度规格系列^[8], 利用式(10)和(2), 取整后可得到菱形蜂窝纸芯边长和胶条宽度规格系列, 列于表1, 其它尺寸规格取标准值。

表1 蜂窝纸芯尺寸系列

Table 1 The series sizes of honeycomb core		
正六边形 蜂窝纸芯边长 a	正菱形蜂窝纸芯	
	边长 $b \approx 1.37a$	胶条宽 $c \approx 0.219b$
6	9	2.0
8	12	2.5
10	14	3.0
12	16	3.5
15	20	4.5

3 菱形蜂窝纸板的基本性能

3.1 定性分析

看似简单的结构演变, 却对蜂窝纸板内部的力学性能产生了本质的变化。

与六边形蜂窝纸芯相比, 单个菱形纸芯蜂窝胞元的垂直受力侧壁数量由6个减少为4个(因宽度小, 忽略胶棱壁的作用), 一方面降低了芯子高度方向的结构稳定性和纸板的平压强度, 但在满足承载能力的前提下, 提高了纸板的缓冲性能, 使纸板更易于进行压

痕折叠；另一方面纸板中的菱形夹芯层非常类似建筑中常用的桁架梁结构，改善了纸芯网架的结构稳定性，增大了纸芯对边压强度的贡献率，提高了纸板纵横方向的边压强度。图5简单演示了2种芯子结构的侧压受力情况。由图5不难看出，菱形蜂窝纸板具有理想的正交各向同性特征。

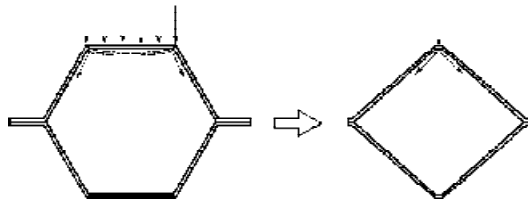


图5 蜂窝芯侧压受力状态的比较

Fig. 5 Comparison of edgewise compression state of honeycomb core

若将菱形蜂窝夹芯结构视为桁架梁，则可定性地得到如下性能特点^[7]：

1) 各杆件受力均以单向拉、压为主，水平方向的拉、压内力可实现自身平衡，整个结构不对支座（下方菱形网架）产生水平推力。

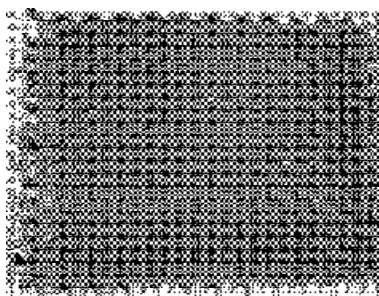
2) 在抗弯方面，由于将受拉与受压的截面集中布置在上下两端，增大了内力臂，使得以同样的材料用量，实现了更大的抗弯强度，从而在结构上增强了纸箱的承载能力。

3) 在抗剪方面，菱形布置的腹杆结构能够将剪力逐步传递给支座。这样，无论是抗弯还是抗剪，菱形桁架结构都能够使材料强度得到充分发挥，更重要的意义还在于，它将横弯作用下的实腹梁内部复杂的应力状态转化为桁架杆件内简单的拉压应力状态，使人们能够直观地了解力的分布和传递。

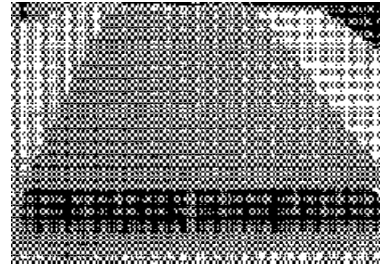
综上所述，菱形蜂窝纸板不仅继承了普通纸蜂窝夹层结构的质量轻、抗弯刚度大、承载能力强、不污染环境等优点，而且大大改善了纸板的压痕折叠性和侧压抗压能力，因而更有利于制造折叠蜂窝纸箱。

3.2 初步试验

为了验证菱形蜂窝纸板的性能，试验采用丝网上胶、手工拉伸和贴面的方法，完成了菱形蜂窝纸板试样的制备（如图6所示），并对菱形蜂窝和六边形蜂窝2种纸板进行了静态压缩性能、动态缓冲性能、边压强度及压痕特性的初步对比试验。



a) 纸芯

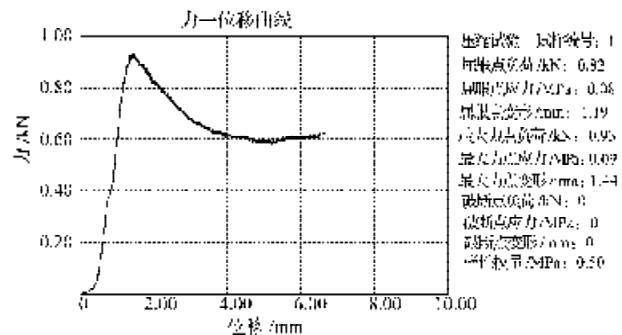


b) 纸板

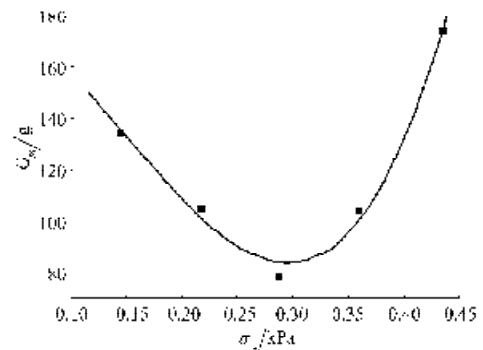
图6 菱形蜂窝纸芯及纸板试样实物照片

Fig. 6 The sample photos of quasi-rhombic honeycomb core and fiberboard

这里仅将菱形蜂窝纸板的静态压缩性能、动态缓冲性能的测试结果列于图7。试样的基本参数为菱形边长9 mm，胶条宽2 mm，板厚10 mm，制芯及制板用胶黏剂均为白乳胶。



a) 静态压缩试验曲线



b) 动态冲击 $G_m - \sigma_s$ 曲线

图7 试验结果示例

Fig. 7 The examples of test results

初步的实验结果表明，在相同耗纸量的情况下^[9-10]：

1) 菱形蜂窝纸板的平压强度低于六边形蜂窝纸板，但仍远高于5层瓦楞纸板；

2) 六边形蜂窝纸板发生屈曲（蜂窝壁压溃）前为刚性板，并不具有缓冲性能，一般只能用于重型产品的缓冲包装，而菱形蜂窝纸板在发生屈曲前，已具有优良的缓冲性能，适用于包装中型产品（<100 kg），也可以用于轻质易损商品；

3) 相对于六边形蜂窝纸板，菱形蜂窝纸板更易于压痕折叠，便于制造折叠蜂窝纸箱；

4) 菱形蜂窝纸板纵向(拉伸方向)边压强度与六边形蜂窝纸板相比,理论值提高了16%~23%(未记胶层的作用),实验值提高了约24%~35%(与胶条宽度、拉伸角度或孔径比有关),因此,菱形蜂窝纸板的堆码强度优于六边形蜂窝纸箱;

5) 相对于六边形蜂窝纸板,菱形蜂窝芯的粘结用胶量少,因此,菱形蜂窝纸板更轻,生产成本更低。

4 结语

本文针对六边形蜂窝纸板所存在的不足,提出了菱形蜂窝纸板的构想,讨论了准菱形蜂窝夹芯结构的设计,确定了描述纸芯结构的基本参数,为后续试样的制作、纸板的性能测试、工艺设计以及理论研究等提供了基础数据。文中对菱形蜂窝纸板的力学性能进行了定性的预测和分析,并给出了初步试验结果。

菱形蜂窝纸板作为一种新型的包装材料,其主要优势在于其优良的缓冲性能和易折叠性,即可作为一种新型的缓冲包装材料,也可用于制作蜂窝折叠纸箱,具有较好的市场应用前景。

致谢: 在本文的研究过程中,湖南工业大学材料加工工程专业硕士研究生周晟同学、包装工程专业04级郭立忠、白宇、汤成超、陈亭延、贺志及04级付应海等同学协助完成了全部试样的制作及相关测试工

作。特别感谢本校包装与印刷学院包装测试实验室赵德坚老师所提供的试验技术支持。

参考文献:

[1] 叶柏彰,唐小军. 蜂窝纸板在空调包装上的应用和常见质量问题分析[J]. 包装工程, 2004, 25(1): 131-133.
 [2] 李永梅,骆光林. 瓦楞纸板和蜂窝纸板的发展方向[J]. 中国包装工业, 2005(4): 28-30.
 [3] 关言. 蜂窝纸板行业存在的问题及解决对策[J]. 中国包装工业, 2006(2): 47.
 [4] 王冬梅,王志伟. 纸质结构型包装材料缓冲性能研究进展[J]. 材料导报, 2007, 21(6): 43-46.
 [5] 平幼妹,余本农,邵文泉. 蜂窝纸板平压实验的研究[J]. 包装工程, 2005, 26(5): 115-117.
 [6] 计宏伟,徐革玲,李俊超,等. 蜂窝纸板侧压强度试验研究[J]. 包装工程, 2006, 27(6): 90-112.
 [7] 中国科学院北京力学研究所固体力学研究室板壳组. 夹层板壳的弯曲、稳定和振动[M]. 北京: 科学出版社, 1997.
 [8] BB/T 0016-1999, 包装材料—蜂窝纸板[S].
 [9] 汤成超. 菱形蜂窝纸板成型方法及其动态缓冲性能的研究[D]. 株洲: 湖南工业大学, 2008.
 [10] 白宇. 菱形蜂窝纸板成箱性能的研究[D]. 株洲: 湖南工业大学, 2008.

(责任编辑: 张亦静)



《湖南工业大学学报》征稿启事

湖南工业大学是一所以工科为主,理工结合,文理渗透,以包装科技和包装高等教育为特色,各学科协调发展的多科性大学。《湖南工业大学学报》旨在携手广大孜孜学人、莘莘学子,传播科学,探索真知,把握时代脉搏,关注学术前沿。“携手”,这个充满人文关怀的词语,蕴含着激情,折射出力量,意味着人与人之间的交流与尊重、和谐与友好、拼搏与前进。在这里携手,知识和理想将汇聚成激荡奔腾的心河;在这里携手,学子的才情将折射出绚烂夺目的光芒;在这里携手,千里良骏将交遇到伯乐的目光。我们崇尚创新,无论是专家教授的宏篇之作,还是初出茅庐的稚啼之声,这里将为你敞开学术思想驰骋的原地,将为你搭起学术成长的阶梯;我们崇尚创新,提倡独立探索,自由对话,只要有利于学术灵感的产生,学术观点的碰撞,学术信息的整合,我们将本着“百花齐放,百家争鸣”的精神为你开道;我们崇尚真理,提倡学术诚信,反对学术腐败,力争营造一种健康的学术环境。

希望通过我们大家的共同努力,《湖南工业大学学报》能成功地搭建起一处当代中国学人交流、共勉之平台,以收获中国科学发展、进步的硕果。自忖以中华文明之久远,以炎黄子孙之智慧,通过诚挚合作,必能实现我们共同的宏愿。