

## 热轧制镁基叠层复合材料的力学性能

杨婷慧, 张新平, 顾春飞, 罗秀芳, 郁伟恒, 廖益传

(南京理工大学 材料科学与工程学院, 南京 210094)

**摘 要:** 采用热轧制备 7075Al/MGY/7075Al 叠层复合材料, 材料的拉伸强度达 300 MPa。基于经典叠层板理论计算该材料的首层失效强度, 其计算结果与试验结果吻合较好, 表明经典叠层板理论可用于预测轧制制备的叠层复合材料首层失效强度。结果表明: 随着铝合金厚度的增加, 镁基叠层复合材料的拉伸强度、弯曲刚度、压缩强度和弯曲比强度增加, 弯曲比刚度和拉伸比强度先增加后降低, 且 7075Al/MGY/7075Al、7075Al/AZ31/7075Al 和 3003Al/MGY/3003Al 叠层复合材料的拉伸比刚度增加, 但 3003Al/AZ31/3003Al 叠层复合材料的拉伸比刚度逐渐减小。

**关键词:** 轧制复合; 镁基叠层复合材料; 力学性能

**中图分类号:** TG335.81; TG115.21

**文献标志码:** A

## Mechanical properties of magnesium-based laminates composites produced by hot rolling

YANG Ting-hui, ZHANG Xin-ping, GU Chun-fei, LUO Xiu-fang, YU Wei-heng, LIAO Yi-zhuan

(School of Materials Science and Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

**Abstract:** The tensile and bending properties of an 7075Al/MGY/7075Al tri-metallic laminates fabricated by hot rolling were investigated at quasi-static strain rates. The first layer failure strength of the laminates is larger than 300 MPa. Based on the classical laminate theory, the mechanical properties of the laminate were calculated. The prediction results of first layer failure strength agree with the experimental results, indicating that the first layer failure strength of the tri-metallic laminate can be the predicted by the classical laminate theory with the maximum stress criterion. The tensile modulus, bending rigidity, bending strength and specific compressive strength of 7075Al/MGY/7075Al, 7075Al/AZ31/7075Al, 3003Al/MGY/3003Al and 3003Al/AZ31/3003Al laminates increase with the increase of relative thickness of Al alloy layer. The specific bending rigidities of 7075Al/MGY/7075Al, 7075Al/AZ31/7075Al and 3003Al/MGY/3003Al laminates increase with the increase of relative thickness of Al alloy layer while that of 3003Al/AZ31/3003Al laminate decreases with the increase of relative thickness of Al alloy layer.

**Key words:** rolling cladding; magnesium-based laminate composite; mechanical properties

镁合金耐腐蚀性差是限制其广泛应用的原因之一<sup>[1-3]</sup>, 若在镁合金表面覆盖一层耐腐蚀性好的铝合金形成叠层复合材料, 则在保护镁合金的同时又能发挥镁合金比强度高的优点。现已有镁基叠层复合材料研究出来, 如 Al/Mg-Li<sup>[4]</sup>、AZ31B/Al6061<sup>[5]</sup>、Mg/Cu 与 Mg/Pd<sup>[6]</sup>和 Mg-Ni-Mg<sub>2</sub>Ni<sup>[7]</sup>等叠层复合材料。轧制作为

一种高效的复合方法也大量地应用在叠层复合材料制备中<sup>[6,8]</sup>。

叠层复合材料各组元层保持相对的独立性, 通过科学的选择材料组元, 合理设计复层结构, 可满足各种需求<sup>[9-15]</sup>。金属叠层状复合材料的特点之一是可进行材料设计以获得所需的性能。关于镁基叠层复合材

**基金项目:** 南京理工大学紫金之星计划资助项目; 中国空间技术研究院 CAST 基金资助项目(CAST200742)

**收稿日期:** 2009-09-01; **修订日期:** 2010-05-12

**通信作者:** 张新平, 博士, 副教授; 电话: 025-84303983; E-mail: zxp\_0517@163.com

料的现有研究主要集中在制备与性能表征方面<sup>[4-7]</sup>,有关该材料的性能设计尚未见到报道。本文作者拟采用经典叠层复合材料理论研究几种轧制复合镁基叠层复合材料室温下准静态刚度和强度,并实际制备镁基叠层复合材料,测量其强度,验证其计算结果。本研究工作对于镁基叠层复合材料研制与设计具有指导意义。

## 1 计算与实验方法

### 1.1 镁基叠层复合材料刚度的理论计算

镁基叠层复合材料为对称结构,且Al合金、Mg合金可认为各向同性,如图1所示, $t_1$ 和 $t_2$ 分别是铝合金与镁合金单层板的厚度。根据经典叠层复合材料理论,对于各向同性材料,刚度表达为<sup>[8-9]</sup>

$$\begin{cases} A_{ij} = \sum_{k=1}^n (\bar{Q}_{ij})_k (z_k - z_{k-1}) \\ B_{ij} = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^n (\bar{Q}_{ij})_k (z_k^2 - z_{k-1}^2) \\ D_{ij} = \frac{1}{3} \sum_{k=1}^n (\bar{Q}_{ij})_k (z_k^3 - z_{k-1}^3) \end{cases} \quad (1)$$

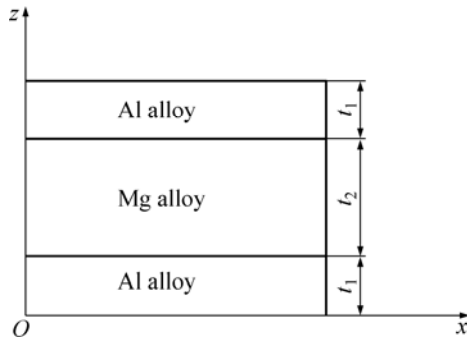


图1 Al/Mg/Al 叠层复合材料示意图

Fig.1 Schematic diagram of Al/Mg/Al laminate composite

式中: $z_k$ 从第1层到第 $k$ 层的总厚度; $n$ 为板的总层数; $Q_{ij}$ 是刚度矩阵系数, $Q_{11}=E/(1-\nu^2)$ , $Q_{12}=\nu E/(1-\nu^2)$ , $Q_{66}=G=E/2(1+\nu)$ ;  $E$ 为弹性模量; $G$ 为剪接模量; $\nu$ 为泊松比; $A_{ij}$ 是面向内力与中面应变有关的刚度系数,统称为拉伸刚度; $D_{ij}$ 是内力矩与曲率及扭曲率有关的刚度系数,统称为弯曲刚度; $B_{ij}$ 表示弯曲和拉伸间的耦合关系,统称耦合刚度。因本研究均基于平面应力假设,所以 $B_{ij}$ 耦合刚度为0。

### 1.2 镁基叠层复合材料强度的计算方法

实测结果表明该材料在拉伸过程中发生铝合金板或者镁合金板断裂后承载能力急剧下降的情况,如图2所示。因此,本研究只计算首层失效强度(First layer

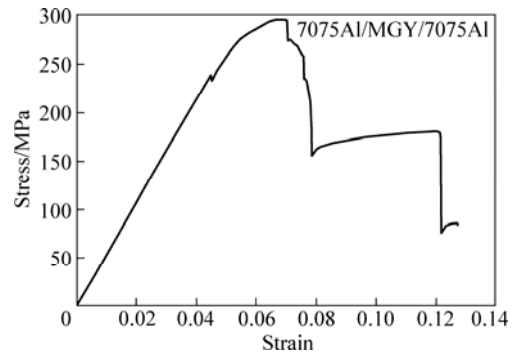


图2 镁基叠层复合材料的典型拉伸曲线

Fig.2 Typical tensile curve of Mg-based laminate composite

failure strength)<sup>[8]</sup>。

具体计算过程为<sup>[8-9]</sup>

1) 由原始数据计算 $Q_{ij}$ 和 $A_{ij}$

$$\begin{cases} Q_{1,3} = \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & 0 \\ Q_{12} & Q_{11} & 0 \\ 0 & 0 & Q_{66} \end{bmatrix}_{1,3} \\ Q_2 = \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & 0 \\ Q_{12} & Q_{11} & 0 \\ 0 & 0 & Q_{66} \end{bmatrix}_2 \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} A_{ij} = (Q_{ij})_{1,3} 2t_1 + (Q_{ij})_2 t_2 \\ A = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & 0 \\ A_{12} & A_{22} & 0 \\ 0 & 0 & A_{66} \end{bmatrix} \end{cases} \quad (3)$$

由 $A' = A - 1/|A|$ 得:

$$\begin{cases} A'_{11} = A_{22} A_{66} / |A| = A'_{22} \\ A'_{12} = -A_{12} A_{66} / |A| \\ A'_{66} = (A_{11} A_{22} - A_{12}^2) / |A| \\ A'_{16} = A'_{26} = 0 \end{cases} \quad (4)$$

2) 求 $\varepsilon_x^0$ 、 $\varepsilon_y^0$ 和 $\gamma_{xy}^0$

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A'_{11} & A'_{12} & 0 \\ A'_{12} & A'_{11} & 0 \\ 0 & 0 & A'_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} N_x \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

3) 求各层应力

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix}_{1,3} = \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{bmatrix}_{1,3} = Q_{1,3} \begin{bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_1 \\ b_1 \\ c_1 \end{bmatrix} \frac{N_x}{t} \\ \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix}_2 = \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{bmatrix}_2 = Q_2 \begin{bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} \frac{N_x}{t} \end{cases} \quad (6)$$

4) 采用最大应力法求拉伸强度

同样也可以求出剪切强度和弯曲强度。

优质的结构材料应具有较高的比强度和比刚度，才能以较小的截面满足强度要求，同时大幅度减轻结构体本身的质量。因此，本研究中主要考察材料的比强度和比刚度。

1.3 实验材料与过程

热轧方式轧制复合 7075Al/MGY/7075Al 叠层复合材料，预热温度为 400~500 ℃，单道次轧制，压下率为 50%。在复合轧制过程中由于镁和铝层变形的不均匀性，不同区域的各板材厚度比不一致，因此，在拉伸实验前测量试样各层厚度，并计算单层铝合金的相对厚度。这也是只有一个压下率却有多个单层铝合金相对厚度的原因。室温拉伸性能采用三思万能实验机测试，应变速率为  $5 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 。AZ31 镁合金与 3003Al 合金的密度  $\rho$ ，纵向拉伸强度  $R_m$ ，纵向压缩强度  $R_{bc}$  和剪切强度  $R_b$  如表 1 所列。其中 7075 铝合金与 Mg12Gd3Y0.5Zr 镁合金(MGY)的  $R_m$ 、 $R_{bc}$  和  $T_b$  为实测值。

2 结果与分析

2.1 镁基叠层复合材料的拉伸强度验证

7075Al/MGY/7075Al 叠层复合材料的拉伸强度实测结果如图 3 所示，在实验范围内拉伸强度达到了 300 MPa，最高达 370 MPa，高于常见的镁合金。随着单层铝合金板厚度的增加，拉伸强度增加。

该复合材料的拉伸强度计算与实验结果的对比如图 3 所示，最大误差为 19%，总体上接近理论值，说明采用经典叠层板理论可计算轧制复合制备的铝/镁/铝叠层复合材料拉伸强度。

误差原因分析如下：

1) 基板的质量

在经典叠层板理论中假设叠层板各单层之间粘结良好，可作为一整体结构板，且粘结层很薄，各单层板之间变形连续。这在轧制制备的叠层复合材料中难以完全保证。实验发现同一块叠层复合材料不同部位时结合强度差异较大。

2) 层间应力

计算时假设叠层复合材料各单层之间粘结良好，但实际叠层复合材料中存在着层间应力，层间应力是引起脱层失效的一种形式，所以也影响着拉伸强度，最终影响计算精度。

3) 基板的不均匀性

经典叠层板理论中假设整个叠层板等厚度，但轧制制备的叠层复合材料合金板各处厚度不一致。

2.2 镁基叠层复合材料的拉伸刚度

各叠层复合材料的拉伸刚度随单层铝合金板厚度的变化情况如图 4(a)所示，这里只给出了  $A_{11}$  结果，其它方向的与这类似。由图 4(a)可看出，在相同厚度分布下，7075Al 增强的叠层复合材料拉伸刚度相同，且随铝合金厚度的增加，叠层复合材料的拉伸刚度逐渐增加。3003Al 增强的叠层复合材料拉伸刚度也有相同的规律，但各叠层复合材料的拉伸刚度均高于相应的镁合金的。

叠层复合材料的拉伸比刚度随单层铝合金板厚度的变化情况如图 4(b)所示。由图 4(b)可看出，随铝合金厚度的增加，3003Al/ AZ31/3003Al 叠层复合材料的拉伸比刚度逐渐减小，其它 3 种叠层复合材料的拉伸比刚度则逐渐增加。

2.3 镁基叠层复合材料的弯曲比刚度

叠层复合材料的弯曲刚度随单层铝合金板厚度的变化情况如图 5(a)所示，这里只给出了  $D_{11}$  的结果，其它方向的与这类似。在相同厚度分布下，7075Al 增强的镁基层复合材料弯曲刚度相同，且随着铝合金厚度的增加，弯曲刚度逐渐增加。3003Al 增强的镁基层

表 1 实验用的铝合金和镁合金的性能

Table 1 Properties of Al and Mg alloys

Alloy	$\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	$E/\text{MPa}$	$\nu$	$G/\text{MPa}$	$R_m/\text{MPa}$	$R_{bc}/\text{MPa}$	$R_b/\text{MPa}$
7075Al	2 810	71 700	0.33	26 900	502	560	317
Mg12Gd3Y0.5Zr(MGY)	2 000	45 000	0.35	17 000	295	502	165
AZ31	1 770	45 000	0.35	17 000	290	180	160
3003Al	2 730	68 900	0.33	26 000	200	200	68.9

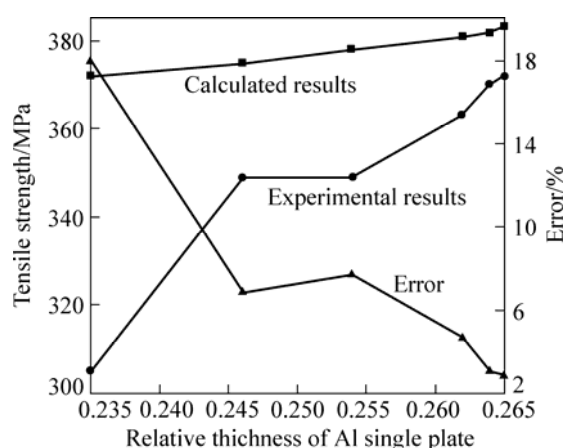


图 3 7075Al/MGY/7075Al 叠层复合材料拉伸强度计算结果与实验结果的比较

Fig.3 Comparison of calculated tensile strength with experimental results of 7075Al/MGY/7075Al laminate composite

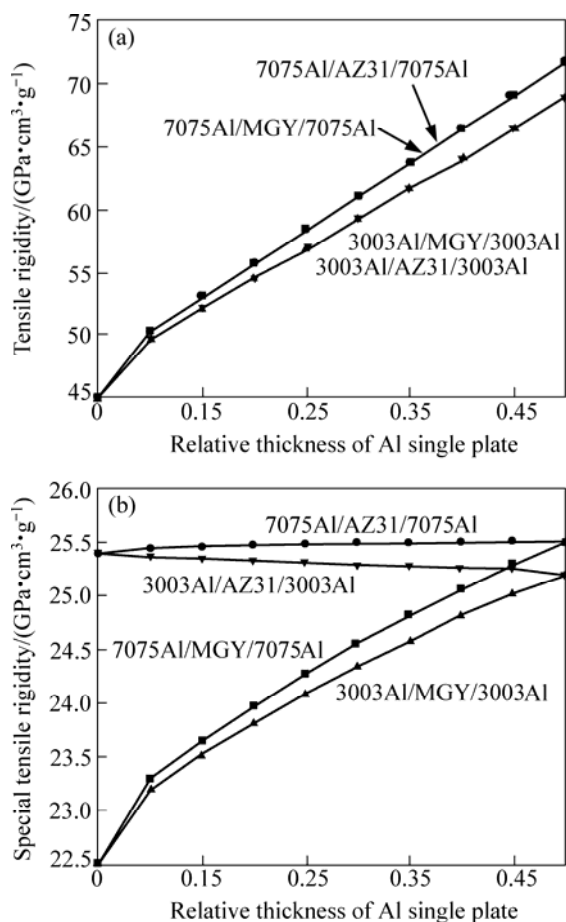


图 4 镁基叠层复合材料拉伸刚度、拉伸比刚度随单层铝合金板厚度变化

Fig.4 Variations of tension rigidity (a) and special tension rigidity (b) of Al/Mg/Al laminate composites with relative thickness of Al single plate

复合材料弯曲刚度也有相同的规律。

各叠层复合材料的弯曲比刚度随单层铝合金板厚度的变化如图 5(b)所示。由图 5(b)可看出,随铝合金板厚度的增加,弯曲比刚度先增加后降低。MGY 基叠层复合材料的弯曲比刚度在镁合金厚度约占总厚度的 1/2 时达到最大值,而 AZ31 基叠层复合材料在镁合金厚度约占总厚度 40%时达到最大值。这一结果对于某些需要更高弯曲比刚度具有指导性意义。

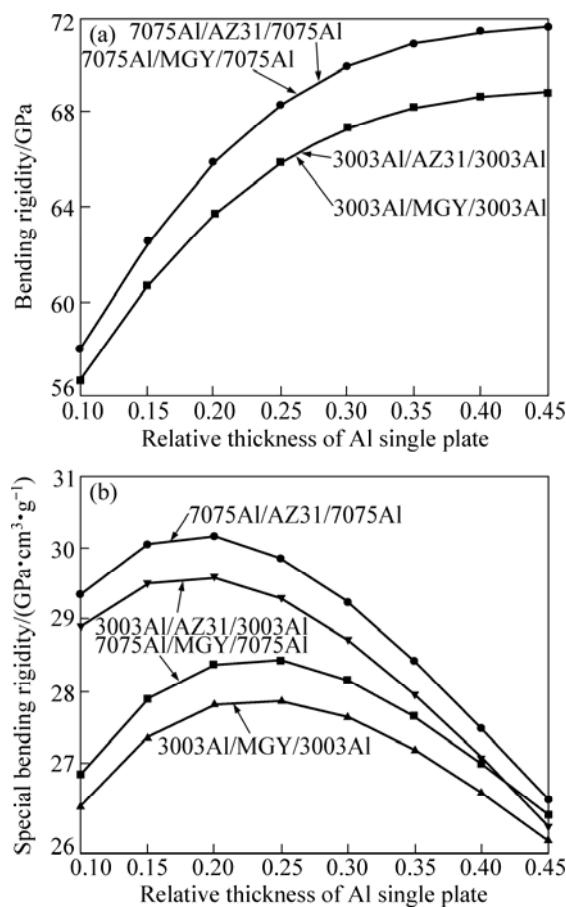


图 5 镁基叠层复合材料的弯曲刚度、弯曲比刚度随单层铝合金板厚度的变化

Fig.5 Variations of bending rigidity (a) and special bending rigidity (b) of Al/Mg/Al laminate composites with relative thickness of Al single plate

## 2.4 叠层复合材料的强度

叠层复合材料的压缩、拉伸、弯曲比强度随单层铝合金板厚度的变化如图 6 所示。由图 6 可看出,随铝合金板厚度的增加,叠层复合材料的压缩、弯曲比强度增加,且基本上是线性增加;拉伸比强度则先增加后减少。7075Al 增强的镁基层复合材料拉伸比强度在镁合金厚度约占总厚度的 1/2 时达到最大值,而 3003Al 增强的镁基层复合材料拉伸比强度则在镁合

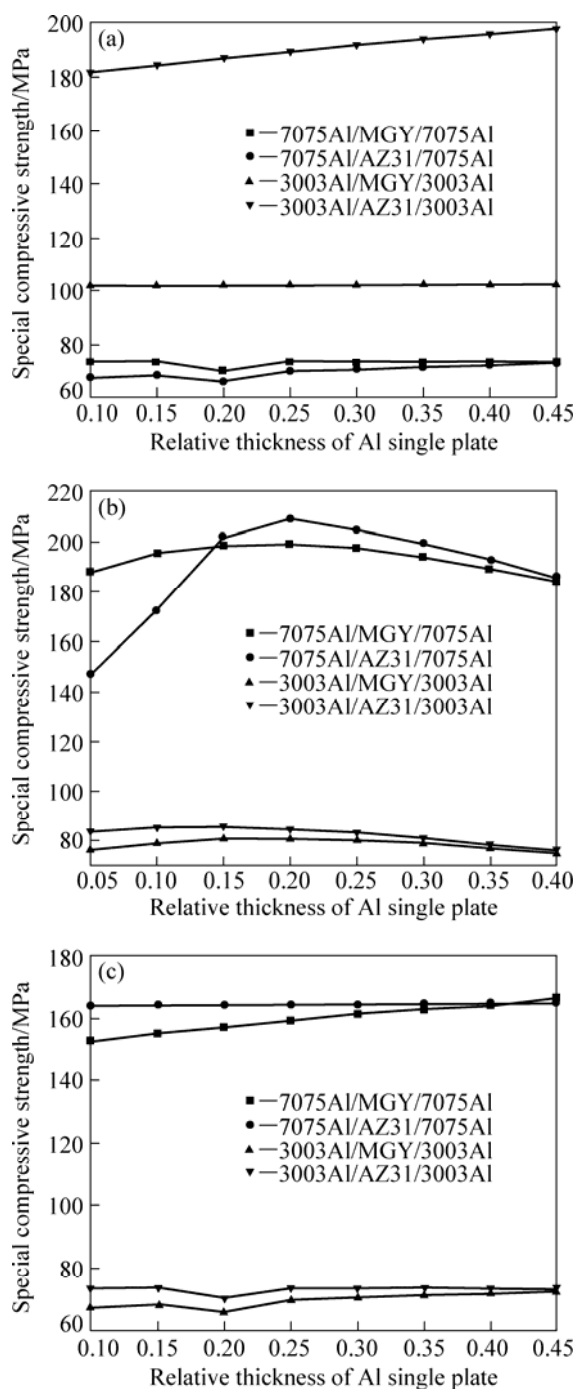


图6 镁基层复合材料的压缩、拉伸、弯曲比强度随单层铝合金板厚度的变化

Fig.6 Variations of special compressive strength (a), special tensile strength (b) and special bending strength (c) of Al/Mg/Al laminate with relative thickness of Al single plate

金厚度约占总厚度的40%时达到最大值。

在上述叠层复合材料中,7075Al/MGY/7075Al叠层复合材料的压缩比强度均高于其它3种叠层复合材料。这主要是因为Mg12Gd3Y0.5Zr的压缩强度远高于

于AZ31的。这说明如果需要叠层复合材料有较高的压缩比强度,则需要选择高压缩比强度的合金复合。同样地,7075Al增强的镁基层复合材料的拉伸比强度和弯曲比强度高于3003Al增强镁基层复合材料的。

叠层材料的整体性能取决于各层板材的性能和各层板厚的分布。以叠层复合材料的拉伸刚度 $A_{11}$ 为例,由式(2)可知,当单层铝合金板占总厚度百分比为 $x$ 时, $A_{11}$ 可表示为

$$A_{11} = 2x(Q_{11,Al} - Q_{11,Mg}) + Q_{11,Mg} \quad (7)$$

对 $x$ 求导,则

$$\frac{dA_{11}}{dx} = 2(Q_{11,Al} - Q_{11,Mg}) \quad (8)$$

对于给定的体系,式(8)右边是个固定的常数。可见,拉伸刚度随单层铝合金板相对厚度的变化具有单调性。从图4(a)也可以看出,随单层铝合金板厚度的增加,叠层复合材料的拉伸刚度也单调增加。另外,当式(8)右边大于0时,则拉伸刚度随单层铝合金板厚度的增加而增加。采用表1中的数据,式(8)的右边均为正数,因此拉伸刚度随单层铝合金板厚度的增加而增加。采用同样的方法,可以分析出其它比刚度和比强度等性能参数随单层铝合金板相对厚度的变化规律。

### 3 结论

1) 采用热轧制备了7075Al/MGY/7075Al叠层复合材料,在实验范围内,材料的拉伸强度达到300 MPa以上,最高达370 MPa,高于常见镁合金的。

2) 采用经典叠层板理论计算了轧制制备的7075Al/MGY/7075Al叠层复合材料的拉伸强度,最大误差为20%,表明采用经典叠层板理论可以预测轧制制备的镁基叠层复合材料的拉伸强度。

3) 随着铝合金厚度的增加,叠层复合材料的拉伸和弯曲刚度逐渐增加,且拉伸刚度均高于相应镁合金的。随着铝合金厚度的增加,3003Al/AZ31/3003Al叠层复合材料的拉伸比刚度逐渐减小,其它3种叠层复合材料的则逐渐增加,但上述4种镁基叠层复合材料的弯曲比刚度均先增加后降低。MGY系叠层复合材料的弯曲比刚度在镁合金厚度约占1/2时达到最大值,而AZ31系叠层复合材料的则在镁合金厚度约占40%时达到最大值。

4) 随着铝合金板厚度的增加,镁基叠层复合材料的压缩和弯曲比强度增加,而拉伸比强度则先增加后减小。

## REFERENCES

- [1] ZHANG X P, ZHAO Z P, WU F M, WANG Y L, WU J. Corrosion and wear resistance of AZ91D magnesium alloy with and without microarc oxidation coating in Hank's solution[J]. *J Mater Sci*, 2007, 42(20): 8523–8528.
- [2] 祁庆琚. 含稀土镁合金的摩擦磨损性能[J]. *中国有色金属学报*, 2006, 16(7): 1219–1226.
- QI Qing-ju. Friction and wear characteristics of rare earth-containing magnesium alloy[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2006, 16(7): 1219–1226.
- [3] LIU F C, LIANG W, LI X R. Improvement of corrosion resistance of pure magnesium via vacuum pack treatment[J]. *J Alloys Compd*, 2008, 461(1/2): 399–403.
- [4] MATSUMOTO H, WATANABE S, HANADA S. Fabrication of pure Al/Mg–Li alloy clad layer and its mechanical properties[J]. *J Mater Process Technol*, 2005, 169(1): 9–15.
- [5] ZHAO L M, ZHANG Z D. Effect of Zn alloy interlayer on interface microstructure and strength of diffusion-bonded Mg–Al joint[J]. *Scripta Mater*, 2008, 58(4): 283–286.
- [6] TAKEICHI N, TANAKA K, TANAKA H. Hydrogen storage properties of Mg/Cu and Mg/Pd laminate composites and metallographic structure[J]. *J Alloys Compd*, 2007, 446/447: 543–548.
- [7] UEDA T T, TSUKAHARA M, KAMIYA Y, KIKUCHI K. Preparation and hydrogen storage properties of Mg–Ni–Mg<sub>2</sub>Ni laminate composites[J]. *J Alloys Compd*, 2005, 386: 253–257.
- [8] JIANG Y, PENG D S, LU D. Analysis of clad sheet bonding by cold rolling[J]. *J Mater Process Technol*, 2000, 105(1/2): 32–37.
- [9] AZMIR M A, AHSAN A K. Investigation on glass/epoxy composite surfaces machined by abrasive water jet machining[J]. *J Mater Process Technol*, 2008, 198(1/3): 122–128.
- [10] LI Y L, LIU P, WANG J. XRD and SEM analysis near the diffusion bonding interface of Mg/Al dissimilar materials[J]. *Vacuum*, 2008, 82(1): 15–19.
- [11] GUEDES R M, ALCIDES S. Numerical analysis of singly curved shallow composite panels under three-point bend load[J]. *Compos Struct*, 2008, 83(2): 212–220.
- [12] CHEN P H, XIONG J J, SHEN Z. Thickness effect on the contact behavior of a composite laminate indented by a rigid sphere[J]. *Mech Mater*, 2008, 40(4/5): 183–194.
- [13] KAM T Y, SHER H F. Nonlinear and first-ply failure analyses of laminated composite cross-ply plates[J]. *J Compos Mater*, 1995, 29(4): 463–482.
- [14] YOKOZEKI T, AOKI Y, OGASAWARA T. Experimental characterization of strength and damage resistance properties of thin-ply carbon fiber/toughened epoxy laminates[J]. *Compos Struct*, 2008, 82(3): 382–389.
- [15] LANGDON G S, CANTWELL W J, NURICK G N. Localized blast loading of fibre-metal laminates with a polyamide matrix[J]. *Compos Part B: Eng*, 2007, 38(5): 902–913.

(编辑 李艳红)