

# 表面机械研磨 (SMAT) 技术对玻璃纤维增强 铝金属层板 (GLARE) 拉伸性能的影响\*

万云<sup>1</sup>, 王振清<sup>1</sup>, 周利民<sup>2</sup>, 章继峰<sup>1</sup>

(1. 哈尔滨工程大学 航天与建筑工程学院, 哈尔滨 150001;  
2. 香港理工大学 机械工程系, 香港)

(我刊编委王振清来稿)

**摘要:** 表面机械研磨 (SMAT) 技术是在短时间内通过振动发生器驱动大量硬度较大的小球以随机方向撞击金属材料, 使得材料晶粒尤其是表面晶粒细化, 从而达到增加材料强度的效果. 通过对铝合金板进行 SMAT 处理, 材料的极限强度和极限应变虽然有较小的降低, 但是其屈服应力有较大幅度的增加. 以 SMAT 处理后的铝合金板和玻璃纤维环氧树脂预浸料为原料, 通过热压工艺制备成新型 GLARE 层合板. 通过拉伸实验研究和理论计算分析了该 GLARE 材料的拉伸性能, 发现 SMAT 处理的铝合金板制成的 GLARE 的屈服强度提升明显.

**关键词:** 表面机械研磨; GLARE; 金属体积分数理论; 拉伸实验

**中图分类号:** O346 **文献标志码:** A

**doi:** 10.3879/j.issn.1000-0887.2014.10.005

## 引 言

纳米科技的发展为新型高强度、高韧性合金的研制提供了新思路, 一些新方法和新工艺也层出不穷, 但均匀的体纳米合金材料制备一直是一个难题. 表面机械研磨 (surface mechanical attrition treatment, SMAT) 制备表面纳米化合金的工艺方法可以很好地提升材料的强度<sup>[1-5]</sup>. 一种典型的 SMAT 工艺如图 1 所示. 在容器中放置大量的球形弹丸, 工作时弹丸在容器内受超声激励振动, 以随机的方向与样品发生碰撞, 促使样品表面晶粒滑移, 产生位错, 随着这种不同方向微观变形量的不断累积, 使得原始粗大晶粒逐渐细化成纳米晶与超细晶.

细化金属材料的晶粒大小是一种被普遍应用的可以很好提升金属材料力学性能的方法. Hall-Petch 公式给出了金属材料的屈服强度和材料晶粒大小的关系<sup>[6-7]</sup>:

$$\sigma_y = \sigma_0 + kd^{-1/2}, \quad (1)$$

式中,  $d$  为多晶体晶粒直径,  $\sigma_0$  为阻止位错滑移的摩擦力. 在纯金属中  $\sigma_0$  包括晶格阻力 (P-N

\* 收稿日期: 2014-04-08; 修订日期: 2014-08-20

**基金项目:** 国家自然科学基金 (11272096); 高等学校博士学科点专项科研基金 (20112304110015); 中央高校基本科研业务费 (HEUCF130216)

**作者简介:** 万云 (1985—), 男, 江西人, 博士生 (E-mail: wanyun0505@hrbeu.edu.cn);  
王振清 (1962—), 男, 黑龙江人, 教授, 博士, 博士生导师 (通讯作者. Tel: +86-451-82589364; E-mail: wangzhenqing@hrbeu.edu.cn).

力)、晶体内其它位错应力场对运动位错的阻力,在合金中还包括固溶强化等因素。 $k$  为相邻晶粒位向差对位错运动的影响系数。

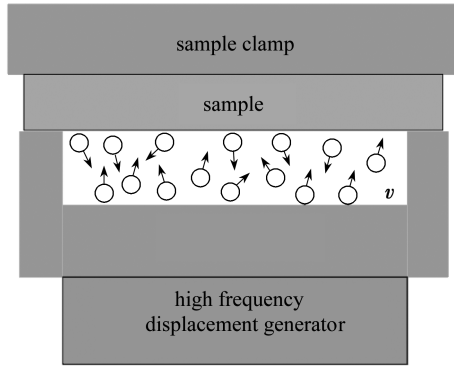


图 1 SMAT 工艺示意图

Fig.1 Schematic illustration of the SMAT technique

玻璃纤维增强铝合金层板(glass reinforced aluminum laminates, GLARE)是由铝合金和玻璃纤维增强复合材料组成的一种混杂结构材料,它继承了纤维增强复合材料的高强度和耐疲劳的特性,以及铝合金优异的加工性和抗冲击性,克服了铝合金材料的疲劳强度低,纤维增强复合材料延展性差、加工性差、冲击强度低以及成本高的缺点<sup>[8-11]</sup>,可用作飞行器机身材料等<sup>[12-13]</sup>。

Lü(吕坚)的团队对钢材的 SMAT 处理进行了一系列工作<sup>[14-16]</sup>。Cho 等研究了 2024 铝进行喷丸处理<sup>[17]</sup>对材料的影响,Wu 等研究了 SMAT 对 7075 铝进行 SMAT 处理后对材料性能的影响<sup>[18]</sup>。但是极少有人把经 SMAT 处理后的铝合金板用于 GLARE 板的制备中。本文首先分析了 SMAT 处理对 2024-T3 铝合金的拉伸性能影响,并进一步以经过 SMAT 处理的铝合金为原材料制备成新型 GLARE 材料,最后对比了实验和理论值的屈服强度和极限强度。

## 1 实 验

### 1.1 原材料

2024-T3 铝合金因为其轻质高强的特点,主要被应用于航空航天领域。表 1 给出了材料的其它主要成分。实验中 2024-T3 铝片的厚度分别为 0.3 mm。GLARE 材料中的复合材料层是由单向玻璃纤维环氧树脂预浸料制成,其单层厚度为 0.155 mm,其极限强度为 1 900 MPa,弹性模量为 54 GPa。

表 1 2024-T3 铝合金的其它主要成分(质量分数(%))

Table1 Other compositions of 2024-T3 (weight ratio (%))

	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti
6061-T6	0.4~0.8	≤0.7	0.15~0.4	≤0.15	0.8~1.2	0.04~0.35	≤0.25	≤0.15
2024-T3	0.5	0.5	3.8~4.9	0.3~0.9	1.2~1.8	0.10	0.25	0.15

### 1.2 对铝合金板进行 SMAT 处理以及 GLARE 板的制备

SMAT 主要是靠小球对材料进行不同方向的撞击,并使材料尤其是表面发生塑性变形,从而达到增加材料屈服应力和材料强度的目的。在实验中选用直径为 2 mm 的陶瓷圆球来撞击铝合金板。这是因为在实验中陶瓷圆球有较合适的硬度以及能够获得较合理的动能,这样就不会对材料本身造成破坏性的损伤。如图 1 所示,实验中 600 个直径为 2 mm 的陶瓷球被置于容器

中,在受到激励幅度为 30% 的超声激励器驱动后,圆球以 10 m/s 的速度随机方向撞向铝合金板.实验中对铝合金板两面分别进行 SMAT 处理 1 min .

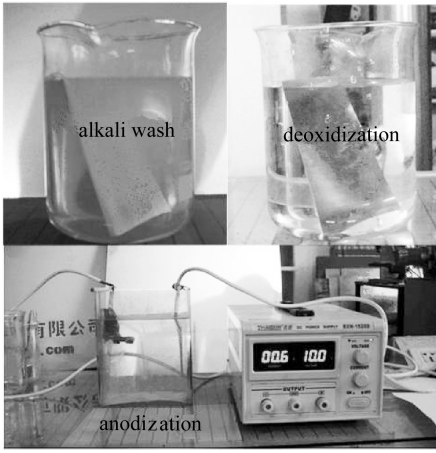


图2 碱洗酸洗以及阳极氧化处理(直流电压 10 V)

Fig.2 Alkali wash, deoxidization and anodization(DC 10 V)

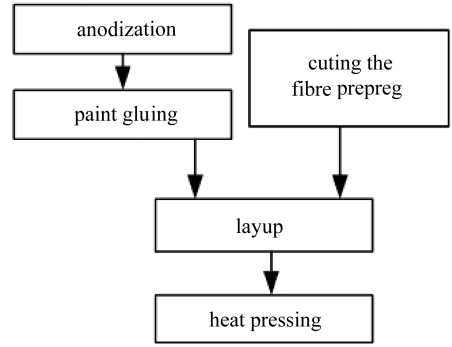


图3 GLARE 层板制备工艺

Fig.3 Fabrication process of GLARE

表2 铝合金阳极化处理步骤

Table 2 The steps of anodizing treatment on aluminium alloy

step	reagent	condition
1 cleaning	acetone	wiping
2 alkali wash	NaOH: 25~30 g/L; Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> : 25~30 g/L	50~60 °C; 0.5~1 min
3 rinse	clean water	2~5 min
4 deoxidization	HNO <sub>3</sub> : 300~500 g/L	room temp; 2~5 min
5 rinse	clean water	2~5 min
6 anodization	H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> : 120~140 g/L	temp: 25±5 °C, DC: 10±1 V, time: 20±1 min
7 rinse	water	5 min
8 wetting	-	60 °C; 15 min

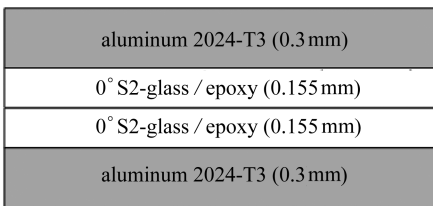


图4 GLARE 2 2/1 结构示意图

Fig.4 Schematic of the GLARE 2 specimens in 2/1 configuration

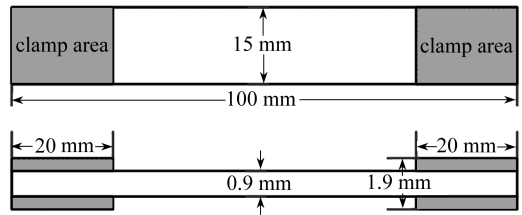


图5 拉伸实验试件参数实验示意图

Fig.5 Illustration of the experimental set-up for the tensile test

SMAT 处理过后,需要对铝合金板进行表面处理,参考中华人民共和国航空工业标准 HB/Z197-91 对 2024-T3 铝合金板进行磷酸阳极化处理,如图 2 所示.阳极化表面处理的具体细节如表 2 所示.完成对铝合金板的阳极化处理之后,进行铺层和热压的加工,主要工艺流程如图 3 所示.图 4 给出了尺寸模型示意图,GLARE 材料是由上下两层 0.3 mm 厚的 2024-T3 和 0.155 mm 厚的两层玻璃纤维环氧树脂层板组成,其纤维铺层方式为[0°/0°],由树脂复合材料拉伸

性能的试验标准 ASTM D3039/D3039M 制定了如图 5 所示的试件,试件厚度为 0.9 mm 的 100 mm × 15 mm 的长方体,并在试件两侧粘有长度为 20 mm 的铝合金片,拉伸实验在 MTS 拉伸试验机上进行,其最大拉伸力为 50 kN,图 6 给出了拉伸试验示意图。

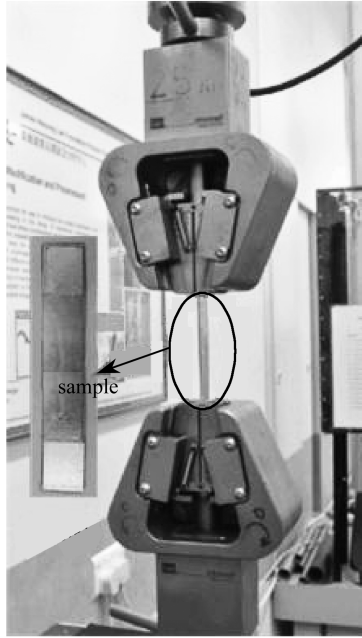


图 6 拉伸示意图

Fig.6 Illustration of the tensile test

## 2 结果与讨论

### 2.1 SMAT 处理对铝合金层的拉伸性能的影响

文献[18]中可以看出在对铝进行 SMAT 处理后,在距离材料表面 60 μm 范围内的晶粒尺寸发生变化。材料表面晶粒尺寸细化到 10 nm,晶粒尺寸随着晶粒离材料表面深度增加呈现近似线性增加,在距离表面 60 μm 处,晶粒尺寸达到 300 nm。图 7 给出了 0.3 mm 厚的 2024-T3 铝合金板经过 SMAT 处理后,拉伸性能与没有经过处理材料的拉伸性能对比。从图 7 可以看出经 SMAT 处理虽然会使得材料的极限应力和极限应变有非常小幅度的减少,但是经 SMAT 处理后可以很明显地增加材料的屈服应力,屈服应力的增加是由于材料表面附近晶粒的细化,而由于材料在经过 SMAT 处理后不可避免地会有一些小缺陷以及残余应力,这些都会降低材料的延展性。SMAT 处理虽然会略微减小 2024-T3 的极限强度,并且会减少材料的延展性,但是可以显著增加材料的屈服应力,在某些特殊的场合可以获得更好的效果。

### 2.2 SMAT 铝合金制备的 GLARE 材料的拉伸性能

关于纤维-金属层板的拉伸研究, Volt 等<sup>[19]</sup>提出了金属体积分数(metal volume fraction, MVF)理论:

$$\varphi_{\text{met}} = \frac{\sum_1^p t_{\text{al}}}{t_{\text{lam}}}, \quad (2)$$

式中,  $\varphi_{\text{met}}$  为金属体积分数,  $t_{\text{al}}$  为单层铝合金板的厚度;  $t_{\text{lam}}$  为 GLARE 层板的总厚度;  $P$  为铝合

金板的层数。

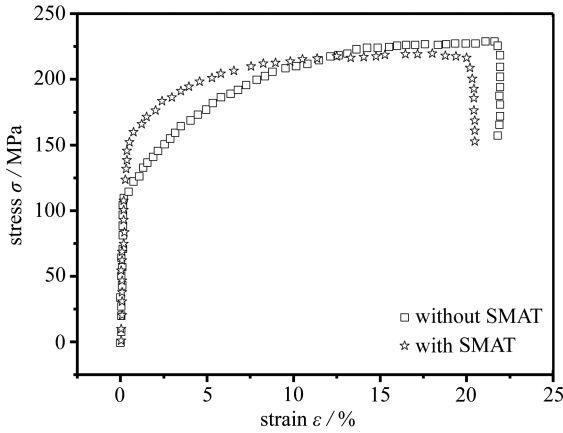


图 7 有无 SMAT 处理 0.3 mm 厚 2024-T3 铝合金的应力-应变曲线对比

Fig.7 Stress-strain curves of the specimens (0.3 mm-thick Al-2024) with/without SMAT

对于 GLARE 层板的主要拉伸性能参数如下:

$$E_{\text{lam}} = \varphi_{\text{met}} E_{\text{met}} + (1 - \varphi_{\text{met}}) E_{\text{FRP}}, \quad (3)$$

$$\sigma_{y,\text{lam}} = \left[ \varphi_{\text{met}} + (1 - \varphi_{\text{met}}) \frac{E_{\text{FRP}}}{E_{\text{met}}} \right] \sigma_{y,\text{met}}, \quad (4)$$

$$\sigma_{\text{ult},\text{lam}} = \varphi_{\text{met}} \sigma_{\text{ult},\text{met}} + (1 - \varphi_{\text{met}}) \sigma_{\text{ult},\text{FRP}}, \quad (5)$$

式中,  $E_{\text{FRP}}$  和  $E_{\text{met}}$  分别为玻璃纤维复合材料和铝合金的弹模量,  $\sigma_{y,\text{met}}$ ,  $\sigma_{\text{ult},\text{met}}$  和  $\sigma_{\text{ult},\text{FRP}}$  分别为铝合金的屈服强度、极限强度以及玻璃纤维复合材料的极限强度。

这里 GLARE 板的金属体积分数可以通过图 4 的材料尺寸代入式(2)算出为 66%, 将表 3 的材料属性代入到式(3), (4) 和(5), 得出是否经过 SMAT 处理 2024-T3 铝合金板的 GLARE 的主要拉伸性能的实验和理论值如表 3 和 4 所示。

表 3 2024-T3 铝合金板在经过 SMAT 处理前后和复合材料的拉伸性能主要指标的实验值

Table 3 The tested tensile properties of the specimens of Al-2024-T3 with/without SMAT and epoxy glass fiber composite

specimen	ultimate stress ( $\sigma_{\text{ult}}/\text{MPa}$ )	ultimate strain ( $\varepsilon/\%$ )	elasticity modulus ( $E/\text{GPa}$ )	yield stress ( $\sigma_y/\text{MPa}$ )
non-SMATed 2024-T3	230.6	18.5	56.4	113.4
SMATed 2024-T3 for 1 min	224.3	16.5	59.1	151.0
epoxy glass fiber composite ( $0^\circ$ )	1 900	-	54	-

表 4 GLARE 的拉伸性能主要参数的理论值

Table 4 The theoretical tensile properties of GLARE

specimen	ultimate stress $\sigma_{\text{ult}}/\text{MPa}$	elasticity modulus $E/\text{GPa}$	yield stress $\sigma_y/\text{MPa}$
GLARE with non-SMATed 2024-T3 aluminium	798.2	55.6	111.8
GLARE with SMATed 2024-T3 aluminium	794.0	57.4	146.6

图 8 给出了由经过 SMAT 处理和没有经过 SMAT 处理的 2024-T3 铝合金制备的 GLARE 的拉伸位移曲线对比。在表 5 中, 给出了这两种 GLARE 的屈服应力和极限应力实验同理论值的比较。由表中可以看出由 SMAT 处理过的 2024-T3 制备的 GLARE 的屈服强度要高 20% 以上, 而极限强度减少不到 7%。通过实验可以看出铝合金的屈服强度提升有助于 GLARE 材料整

体屈服强度的提升,这一实验结果同式(4)的理论思想是相符的,实验结果与理论结果相比较都要偏小,都在可接受范围内,出现这种情况可能是材料制备过程中存在缺陷或者理论模型不够准确造成。

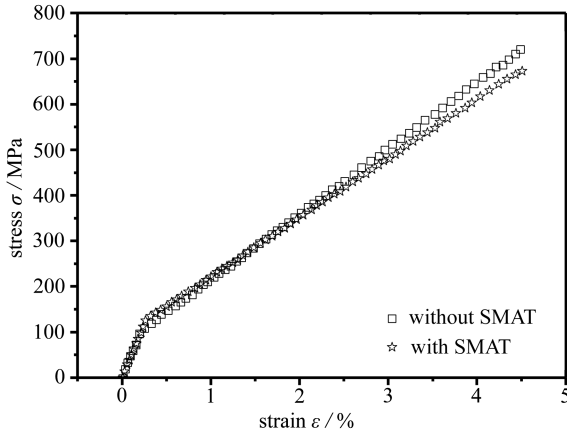


图8 有无 SMAT 处理 2024-T3 铝合金 GLARE 拉伸实验应力-应变曲线

Fig.8 Strain-stress curves from the tensile tests of GLARE of 2024-T3 aluminium with/without SMAT

表5 两种 GLARE 的屈服应力和极限应力实验值与理论值的比较

Table 5 Comparison of yield stress and ultimate stress between the theoretical and experimental results

GLARE	ultimate stress $\sigma_{ult}$ /MPa			yield stress $\sigma_y$ /MPa		
	theoretical result	experimental result	percentage of error	theoretical result	experimental result	percentage of error
non-SMATed	798.2	720	10.9	111.8	101	10.7
SMATed	794.0	673	18	146.6	124.5	17.8
percentage of increase or decrease	↓ 0.5	↓ 6.5		↑ 31.1	↑ 23.3	

### 3 结 论

1) 通过对 2024-T3 铝合金板进行合理的 SMAT 处理,使得铝合金板在极限强度和极限应变损失很小的前提下,有效地提高了材料的屈服强度。

2) 在 GLARE 材料体系中引入经过 SMAT 技术处理的铝合金板,通过理论计算和实验分析可知 SMAT 处理后的铝合金板的引入能较大幅度地增强整体 GLARE 材料的拉伸屈服强度。

#### 参考文献 (References):

- [1] Chen X H, Lu J, Lu K. Tensile properties of a nanocrystalline 316L austenitic stainless steel [J]. *Scripta Materialia*, 2005, **52**(10): 1039-1044.
- [2] Zhao Y H, Liao X Z, Cheng S, Ma E, Zhu Y T. Simultaneously increasing the ductility and strength of nanostructured alloys[J]. *Advanced Materials*, 2006, **18**(17): 2280-2283.
- [3] Waltz L, Rehrig D, Roos A, Olier P. Combination of surface nanocrystallization and co-rolling: creating multilayer nanocrystalline composites[J]. *Scripta Materialia*, 2009, **60**(1): 21-24.
- [4] Chen A Y, Li D F, Zhang J B, Song H W, Lü J. Make nanostructured metal exceptionally



- tough by introducing non-localized fracture behaviors[J]. *Scripta Materialia*, 2008, **59**(6): 579-582.
- [5] Cortes P, Cantwell W J. The prediction of tensile failure in titanium-based thermoplastic fibre-metal laminates[J]. *Composites Science and Technology*, 2006, **66**(13): 2306-2316.
- [6] Petch N J. The fracture of metals[J]. *Progress in Metal Physics*, 1954, **5**: 1-52.
- [7] Gleiter H. Nanocrystalline materials[J]. *Progress in Materials Science*, 1989, **33**: 223-315.
- [8] 陈勇, 庞宝君, 郑伟, 张志远. 纤维金属层板低速冲击实验和数值仿真[J]. 复合材料学报, 2014, **31**(3): 733-740. doi: 10.13801/j.cnki.fhclxb.2014.03.026. (CHEN Yong, PANG Bao-jun, ZHENG Wei, ZHANG Zhi-yuan. Experimental tests and numerical simulation on low velocity impact performance of fiber metal laminates[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2014, **31**(3): 733-740. doi: 10.13801/j.cnki.fhclxb.2014.03.026. (in Chinese))
- [9] 马玉娥, 胡海威, 熊晓枫. 低速冲击下 FML、铝板和复材的损伤对比研究[J]. 航空学报, 2014, **35**(1): 1-10. (MA Yu-e, HU Hai-wei, XIONG Xiao-feng. Comparison of damage in fibre metal laminates, aluminium and composite panel subjected to low-velocity impact[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2014, **35**(1): 1-10. (in Chinese))
- [10] Seo H, Hundley J, Hahn H T, Yang J M. Numerical simulation of glass-fiber-reinforced aluminium laminates with diverse impact damage[J]. *AIAA Journal*, 2010, **48**(3): 676-687.
- [11] Sadighi M, Parnanen T, Alderliesten R C, Sayeefatabi M, Benedictus R. Experimental and numerical investigation of metal type and thickness effects on the impact resistance of fiber-metal laminates [J]. *Applied Composite Materials*, 2012, **19**(3): 545-559.
- [12] 陈绍杰, 朱珊, 李萍. 纤维增强铝合金层板的发展与应用[J]. 航空学报, 1991, **12**(12): 589-597. (CHEN Shao-jie, ZHU Shan, LI Ping. Development and application of a fiber reinforced aluminium laminates[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 1991, **12**(12): 589-597. (in Chinese))
- [13] Alderliesten R C, Benedictus R. Fiber/metal composite technology for future primary aircraft structures[J]. *Journal of Aircraft*, 2008, **45**(4): 1182-1189.
- [14] Guo X, Leung A Y T, Chen A Y, Ruan H H, Lü J. Investigation of non-local cracking in layered stainless steel with nanostructured interface[J]. *Scripta Materialia*, 2010, **63**(4): 403-406.
- [15] Chen X H, Lü J, Lu L, Lu K. Tensile properties of a nanocrystalline 316L austenitic stainless steel[J]. *Scripta Materialia*, 2005, **52**(10): 1039-1044.
- [16] Zhang H W, Hei Z K, Liu G, Lü J, Lu K. Formation of nanostructured surface layer on AISI 304 stainless steel by means of surface mechanical attrition treatment[J]. *Acta Materialia*, 2003, **51**(7): 1871-1881.
- [17] Cho K T, Song K, Oh S H, Lee Y K. Surface hardening of aluminum alloy by shot peening treatment with Zn based ball[J]. *Materials Science and Engineering A*, 2012, **543**(13): 44-49.
- [18] Wu X, Tao N, Hong Y, Xu B, Lu J, Lu K. Microstructure and evolution of mechanically-induced ultrafine grain in surface layer of Al-alloy subjected to USSP[J]. *Acta Materialia*, 2002, **50**(8): 2075-2084.
- [19] Volt A, Gunnink J W. *Fiber Metal Laminates*[M]. Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 2001: 73-75.

# Effect of Surface Mechanical Attrition Treatment (SMAT) on the Tensile Performance of Fibre Reinforced Aluminium Laminates

WAN Yun<sup>1</sup>, WANG Zhen-qing<sup>1</sup>, ZHOU Li-min<sup>2</sup>, ZHANG Ji-feng<sup>1</sup>

(1. *College of Aerospace and Civil Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, P.R.China;*

2. *Department of Mechanical Engineering, Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong, P.R.China)*

(Contributed by WANG Zhen-qing, M. AMM Editorial Board)

**Abstract:** The surface mechanical attrition treatment (SMAT), as a technology that the metal sample surface is hit in random directions by a large amount of tiny hard balls in high frequency vibration within a short period of time, was applied to aluminium laminates. Then, the metal's grain sizes, especially those near the surface, got smaller; and therefor the metal's yield strength got enhanced. After the SMAT process, the aluminium laminates' ultimate stress and ultimate strain decreased a little, while the yield stress increased obviously. The glass fibre reinforced aluminium laminates were fabricated through heat pressing process with SMATed aluminium and glass fibre epoxy prepreg. From the tensile tests and theoretical calculation, the results show that the SMATed aluminium effectively improves the yield strength of the aluminium-based composite.

**Key words:** surface mechanical attrition treatment (SMAT); GLARE; metal volume fraction theory; tensile test

**Foundation item:** The National Natural Science Foundation of China(11272096)