

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2024.07.013

玻纤增强 PA6 焊机外壳性能的影响因素数值模拟

张守会^{1,2}, 孟凡涛¹

(1. 山东理工大学材料科学与工程学院, 山东淄博 255049; 2. 山东奥太电气有限公司, 济南 250100)

摘要: 深入探讨了玻璃纤维增强聚酰胺 6 在焊机外壳应用中的性能表现, 并基于 ANSYS 软件平台, 进行了静力学仿真和落球冲击仿真分析, 旨在揭示玻纤含量、玻纤长径比以及玻纤取向等关键参数对焊机外壳性能的影响。静力学分析显示, 当外壳承受 2 500 N 的拉力时, 玻纤含量的增加对焊机外壳应力强度的影响较小, 但能够降低了外壳变形程度。当玻纤质量分数超过 25% 时, 等效应力趋于稳定(约 51 MPa)。此外, 玻纤的取向对焊机外壳性能具有显著影响。当纤维沿 X 轴和 Z 轴取向且各占 50% 时(方向向量为 a_2), 外壳的等效应力达 54.6 MPa, 同时变形量最小, 仅为 0.5 mm, 这一性能与玻纤质量分数为 40% 的外壳相当。而玻纤长径比的增加对等效应力的影响并不显著, 但有助于减少变形。进一步, 通过落球冲击分析发现, 随着玻纤含量的增加, 外壳的等效应力逐渐增大, 变形逐渐减小, 这一趋势与静力学分析结果高度一致。当玻纤质量分数低于 20% 时, 焊机外壳在冲击下易出现破裂; 然而, 当玻纤质量分数为 20%~35% 时, 外壳表现出了优异的冲击性能, 未出现开裂现象。

关键词: 玻璃纤维; 聚酰胺 6; 外壳性能; 复合材料; 仿真分析

中图分类号: TQ323.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2024)07-0087-07

Numerical simulation for factors influencing performance of glass fiber reinforced PA6 welder shell

ZHANG Shouhui^{1,2}, MENG Fantao¹

(1. School of Materials Science and Engineering, Shandong University of Technology, Zibo 255049, China;

2. Shandong Aotai Electric Co., Ltd., Jinan 250100, China)

Abstract : Performance of glass fiber reinforced polyamide 6 in welder housing applications was taken an in-depth look. Based on the ANSYS software platform, detailed static simulation and falling ball impact simulation analysis were carried out, aiming to reveal the influence of key parameters such as glass fiber content, glass fiber length-diameter ratio and glass fiber orientation on the performance of the welder shell. In the static analysis, the results show that when the shell is subjected to a tensile force of 2 500 N, the increase of glass fiber content has little effect on the stress strength of the welder shell, but it can reduce the deformation degree of the shell. In particular, when the glass fiber content exceeds 25%, the equivalent stress tends to be stable (about 51 MPa), showing an excellent reinforcement effect. In addition, the orientation of the glass fibers has a significant impact on the performance of the welder housing. When the fibers are oriented along the X axis and the Z axis and each account for 50% (the direction vector is a_2), the equivalent stress of the shell reaches 54.6 MPa, and the deformation is the smallest, only 0.5 mm, which is comparable to the shell with 40% glass fiber content. However, the increase of the aspect ratio of glass fiber has no significant effect on the equivalent stress, but it helps to reduce the deformation. Furthermore, through the impact analysis of falling balls, it is found that with the increase of glass fiber content, the equivalent stress of the shell gradually increases, and the deformation gradually decreases. It is particularly noteworthy that when the glass fiber content is less than 20%, the welder shell is prone to crack under the impact. However, when the glass fiber content is between 20% and 35%, the shell exhibits excellent impact performance and no cracking.

Keywords : glass fiber ; polyamide 6 ; shell performance ; composite ; simulation analysis

纤维增强聚酰胺(PA)复合材料因其出色的强度和流动性, 现已在电子设备外壳制造中占据重要地

位, 符合工程师对于电子产品轻量化和薄型化的需求。特别是在移动电子设备领域, 基于玻璃纤维

通信作者: 孟凡涛, 副教授, 硕士生导师, 主要研究方向为复合材料

收稿日期: 2024-05-05

引用格式: 张守会, 孟凡涛. 玻纤增强 PA6 焊机外壳性能的影响因素数值模拟[J]. 工程塑料应用, 2024, 52(7): 87-93.

ZHANG Shouhui, MENG Fantao. Numerical simulation for factors influencing performance of glass fiber reinforced PA6 welder shell[J].

Engineering Plastics Application, 2024, 52(7): 87-93.

(GF)增强PA复合材料卓越的力学性能,采用该类材料可显著降低设备外壳的厚度,在保证强度的前提下,其厚度约为聚碳酸酯(PC)和丙烯腈-丁二烯-苯乙烯塑料(ABS)材料的2/3^[1-2]。在国内外研究中,样条实验是研究纤维增强PA复合材料性能的主要手段,有关结果显示,纤维的含量、种类、在基体中的残余长度与分布状态以及纤维与基体间的界面结合强度,均对复合材料的性能产生深远影响^[3-6]。然而,实际应用中,外壳的厚度、形状和固定方式各不相同,因此上述因素对不同外壳性能的影响是否一致尚待探究。鉴于此,笔者以焊机外壳为例,借助仿真分析手段,深入研究了GF含量、GF长径比以及GF取向对焊机外壳性能的影响。通过这一研究,成功找到了既经济又能获得高强度的材料配方和工艺方法,为产品设计提供了指导。这一发现不仅使得焊机外壳更加轻便,强度更佳,同时分析得到的数据也为其他电气设备的设计提供了参考,有助于进一步改善和优化产品性能。

1 复合材料参数模型

对于承担较大载荷的复合材料结构件,在模型制备之前进行有限元分析仿真可以极大地提高产品设计效率。通过优化设计方法,可以给出良好的设计空间和材料分布,从而优化结构的性能。在进行有限元分析仿真时,材料模型的定义非常重要,其直接影响数值模拟的精度和可靠性。在本研究中,复合材料参数通过Ansys软件中的Material Designer功能模块进行仿真分析得出。Material Designer功能模块可以帮助设计人员定义复合材料的材料模型,提供了多种模型可供选择,包括各种

复合材料的各向异性和非线性行为^[7]。通过该功能模块,可以输入复合材料的材料参数,如拉伸弹性模量、泊松比、屈服强度等。然后利用这些参数进行有限元分析仿真,评估复合材料结构件在不同载荷条件下的性能。借助Material Designer功能模块,获得了不同复合材料的力学参数,具体见表1~表4。其中表2是GF质量分数为5%~40%时复合材料的参数值;表3是GF质量分数为30%但长径比不同复合材料参数,长径比分别为10,20,30,40;表4是GF质量分数为30%但取向不同的复合材料参数。由于纤维张量分量会随着坐标系的变化而变化,因此总是存在某个方向上只有法向分量,没有切向分量的情况,因此分析中设定的纤维取向张量见公式(1), $\mathbf{a}_0$ 表示纤维在三维空间中随机取向(纤维沿X轴/Y轴/Z轴取向,且分别占1/3); $\mathbf{a}_1$ 表示纤维沿Y轴和Z轴取向,且分别占50%; $\mathbf{a}_2$ 表示纤维沿X轴和Z轴取向,且分别占50%; $\mathbf{a}_3$ 表示纤维沿X轴和Y轴取向,且分别占50%。

$$\begin{aligned} \mathbf{a}_0 &= \begin{bmatrix} 1/3 & 0 & 0 \\ 0 & 1/3 & 0 \\ 0 & 0 & 1/3 \end{bmatrix} & \mathbf{a}_1 &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1/2 & 0 \\ 0 & 0 & 1/2 \end{bmatrix} \\ \mathbf{a}_2 &= \begin{bmatrix} 1/2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1/2 \end{bmatrix} & \mathbf{a}_3 &= \begin{bmatrix} 1/2 & 0 & 0 \\ 0 & 1/2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (1) \end{aligned}$$

表1 材料基本参数

Tab. 1 Basic parameters of materials

Sample	Diameter/ μm	Density/ ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	Young modulus/MPa	Shear modulus/MPa
GF	11	2.6	7 300	2 991
PA6		1.14	1 111	411

表2 GF含量不同的复合材料参数

Tab. 2 Parameters of composite with different glass fiber contents

Sample	Density/($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	Young modulus /MPa			Poisson's ratio			Shear modulus /MPa		
		X	Y	Z	XY	YZ	XZ	XY	YZ	XZ
PA6+5%GF	1.17	1 294	1 296	1 290	0.33	0.34	0.34	478	480	481
PA6+10%GF	1.21	1 482	1 486	1 480	0.33	0.33	0.33	547	551	553
PA6+15%GF	1.25	1 700	1706	1 689	0.32	0.32	0.33	628	634	637
PA6+20%GF	1.28	1 926	1 925	1 917	0.32	0.32	0.32	720	726	725
PA6+25%GF	1.33	2 183	2 182	2 171	0.31	0.32	0.32	819	825	825
PA6+30%GF	1.37	2 459	2 458	2 445	0.31	0.31	0.31	925	933	932
PA6+35%GF	1.42	2 776	2 775	2 759	0.30	0.30	0.30	1 047	1 057	1 056
PA6+40%GF	1.47	3 127	3 126	3 107	0.30	0.30	0.30	1 182	1 194	1 193

2 分析模型及分析设置

2.1 分析模型

焊机外壳是焊机主体结构的一部分,位于主体结构的前部和上部,为矩形框架结构,这种设计可

以有效提高焊机的强度和稳定性。在矩形框架结构的中间部分,有一个通风窗口,主要作用是进行外观装饰,同时也具有一定的防护功能。本研究中,外壳与焊机主体有两处连接,总共使用了4颗螺

表3 GF长径比不同的复合材料参数

Tab. 3 Parameters of composite with different length-to-diameter ratios of glass fiber

Sample	Density/(g·cm ⁻³)	Young modulus/MPa			Poisson's ratio			Shear modulus/MPa		
		X	Y	Z	XY	YZ	XZ	XY	YZ	XZ
PA6+30%GF-10	1.37	1 982	1 990	1 970	0.32	0.32	0.33	735	742	746
PA6+30%GF-20	1.37	2 459	2 458	2 445	0.31	0.31	0.31	925	933	932
PA6+30%GF-30	1.37	2 755	2 754	2 737	0.30	0.30	0.30	1 039	1 050	1 049
PA6+30%GF-40	1.37	2 932	2 931	2 911	0.30	0.30	0.30	1 107	1 119	1 118

表4 GF取向不同的复合材料参数

Tab. 4 Parameters of composites with different glass fiber orientations

Sample	Density/(g·cm ⁻³)	Young modulus/MPa			Poisson's ratio			Shear modulus/MPa		
		X	Y	Z	XY	YZ	XZ	XY	YZ	XZ
PA6+30%GF- α_0	1.37	2 459	2 458	2 445	0.31	0.31	0.31	925	933	932
PA6+30%GF- α_1	1.37	1 767	3 375	3 374	0.18	0.32	0.18	560	1 273	561
PA6+30%GF- α_2	1.37	3 375	1 767	3 374	0.35	0.18	0.32	560	561	1 273
PA6+30%GF- α_3	1.37	3 375	3 374	1 767	0.32	0.35	0.35	1 273	561	560

钉。其中,下部的两颗螺钉直接将外壳固定在焊机主体上,这样可以确保外壳的稳定性。上部的两颗螺钉则穿过把手和外壳后与内部的钣金件进行固定,这样既可以保证外壳的位置不会发生移动,也可以确保内部的钣金件不会受到外部的影响(如图1所示)。在导入ANSYS之前,必须及时剔除不必要的特征。根据图2所示,在本次研究中,删除了焊机外壳正面不必要的圆角和造型,保留了焊机外壳3个主要的结构部分,分别是上部和下部的矩形框以及中间部分的通风窗。同时,边框的尺寸、通风窗的位置和尺寸,以及固定孔的位置和尺寸都与简化前保持一致。

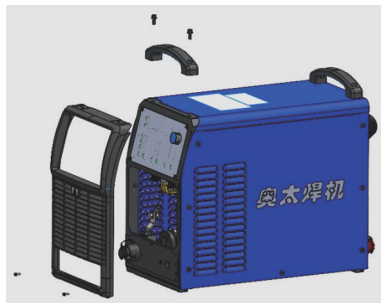


图1 焊机外观图

Fig. 1 Appearance of welding machine

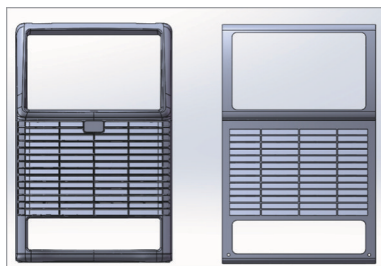
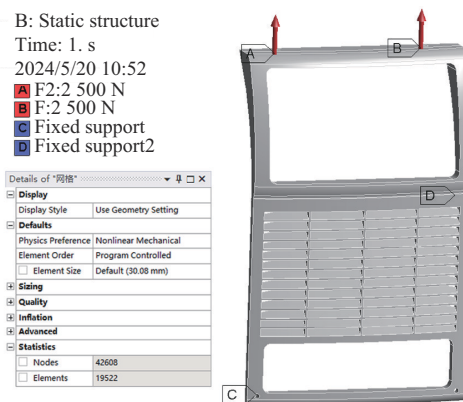


图2 焊机外壳简化模型

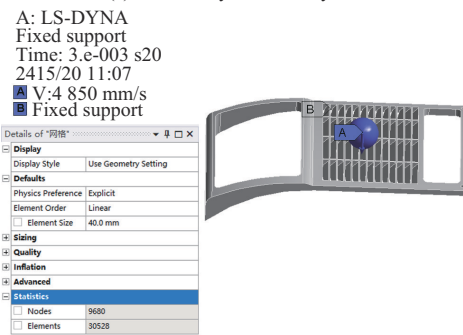
Fig. 2 Simplified model of welder shell

2.2 分析设置

根据简化后的模型,在静力学分析和落球冲击分析之前需要进行网格划分和模型设置,这些设置将为进一步的分析和评估提供基础,并有助于了解焊机外壳在不同加载条件下的性能,如图3所示。对于静力学分析,模型共有42 608个节点和19 522个单元。根据焊机实际使用要求,模型把手被固定,并承受2 500 N的拉力。百叶窗螺钉处被设置为固定支撑(具体示意图见图3a)。对于落球冲击分



(a) Static analysis boundary conditions



(b) Falling ball impact analysis boundary conditions

图3 仿真分析设置

Fig. 3 Simulation analysis settings

析,采用默认的网络设置,网格尺寸为40 mm。对受冲击位置进行了局部加密。整个模型共有9 680个节点和30 528个单元(具体示意图3b)。根据GB 15579.1-2013的要求,落球的质量设定为0.8 kg,跌落高度为1.2 m,冲击速度为4 850 mm/s。外壳背面被设置为固定面。

3 结果与讨论

3.1 焊机外壳静力学分析结果

图4为不同GF含量对焊机外壳性能的影响。由图4可知,增加GF含量对焊机外壳应力强度的影响较小且变化不大,当GF质量分数超过25%时,其等效应力趋于稳定,为51 MPa;同时焊机外壳未出现任何裂纹或破坏现象,可以认为焊机外壳具有良好的耐久性和结构完整性。这是由于当外壳承受2 500 N的拉力时,外壳的应力远小于复合材料的拉伸强度,并且复合材料的高强度和优异的力学特性,使焊机外壳能够有效地抵抗拉力带来的应力集中现象,从而保持其结构的完整性和稳定性。此外,随着GF含量的逐渐增加,焊机外壳的变形逐渐减小^[8-9]。分析结果显示GF增强复合材料在抵抗外部加载时具有较好的性能和变形控制能力。这是因为GF增强复合材料具有良好的刚性和高强度特

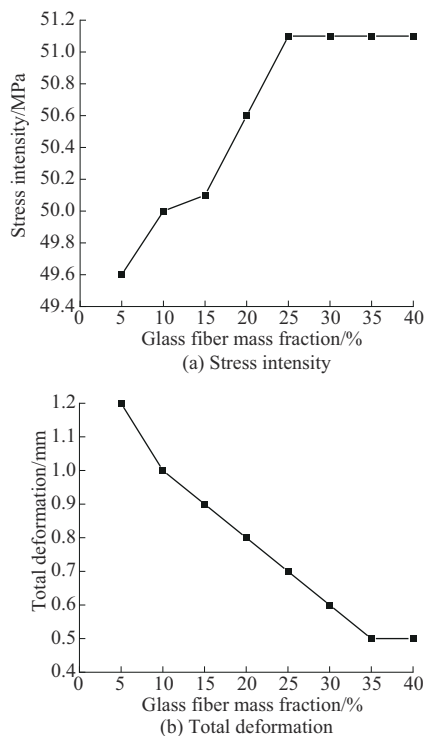


图4 不同GF含量对焊机外壳性能的影响

Fig. 4 Effect of different glass fiber content on performance of welder shell

性,能够有效地分散和传递应力,减少材料的变形^[10-11]。因此,焊机外壳通过增加GF含量,能够更好地抵抗外部加载带来的变形。

图5为不同GF取向对焊机外壳性能的影响。由图5结果可知,GF取向对焊机外壳性能影响显著,当方向向量为 a_2 时,等效应力为54.6 MPa,总变形最小,为0.5 mm,此时其增强效果与GF质量分数为40%时相当。这是因为纤维增强的聚合物复合材料除了通过纤维上下表面(与载荷方向垂直)与基体之间的界面进行应力传递外,还通过纤维侧表面(与载荷方向平行)与基体之间的界面进行应力传递^[12]。当垂直于受力方向取向时,以纤维表面与基体之间的界面传递为主,当裂纹产生时,不会在纤维之间传递,因此拉伸强度降低。相反,平行于受力方向纤维越多,对复合材料的拉伸性能提升越明显。因此,在实际应用中,通过工艺控制纤维取向方向,能够有效的提高产品性能。

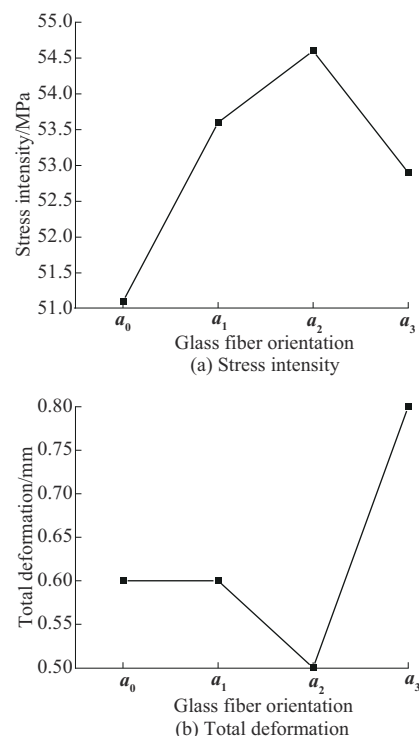


图5 不同GF取向对焊机外壳性能的影响

Fig. 5 Effect of different glass fiber orientation on performance of welder shell

图6为不同GF长径比对焊机外壳性能的影响。由图6分析结果可知,随着GF长径比增加,焊机外壳应力强度变化不大,但变形量逐渐减小。这是由于GF与树脂基体的结合面积会随着GF长径比的增加而增大,其之间的相互作用也会随之增强,因

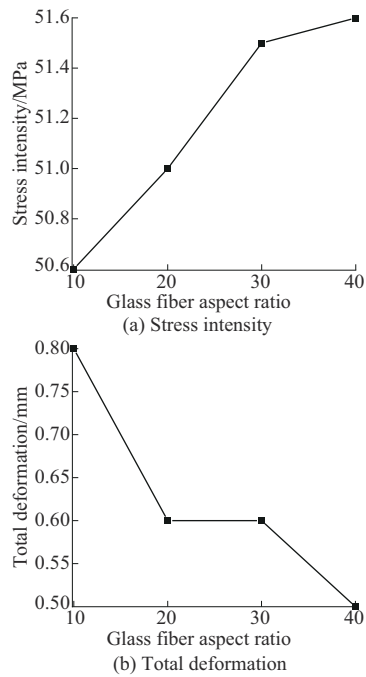


图6 不同GF长径比对焊机外壳性能的影响

Fig. 6 Effect of different glass fiber aspect ratio of glass fiber on performance of welder shell

此当复合材料承受拉伸载荷时,增加GF长径比有利于提高复合材料抵抗变形的能力,减小了产品的变形量^[13-15]。

图7为PA6+40%GF复合材料焊机外壳分析结果。由图7等效应力分布云图和总变形分布云图可以看出,当焊机外壳承受拉应力时,最大应力集中在固定孔位置,约为51 MPa,总变形在受力平面处,约为0.5 mm。

3.2 焊机外壳冲击性能结果分析

表5为不同GF含量对冲击性能的影响。由表5可知,随着GF含量的增加,焊机外壳的应力强度逐渐增加,变形逐渐减小,与静应力分析结果一致。并且当GF质量分数小于20%时,焊机外壳均出现破裂,随着GF含量继续增加,当质量分数大于等于20%,且小于等于35%时焊机外壳无开裂现象出现,但当继续增加GF质量分数到40%,焊机外壳出现破裂,这是因为在外加载荷的作用下,随着应力的

表5 不同GF含量对焊机外壳冲击性能的影响

Tab. 5 Effect of different glass fiber content on impact performance of welder shell

Performance	PA6+5%GF	PA6+10%GF	PA6+15%GF	PA6+20%GF	PA6+25%GF	PA6+30%GF	PA6+35%GF	PA6+40%GF
Stress intensity/MPa	64	79	90	105	110	115	122	152
Total deformation/mm	9.5	8.7	8.3	7.2	7.0	6.6	6.3	6.6
Damage (Yes/No)	Yes	Yes	Yes	No	No	No	No	Yes

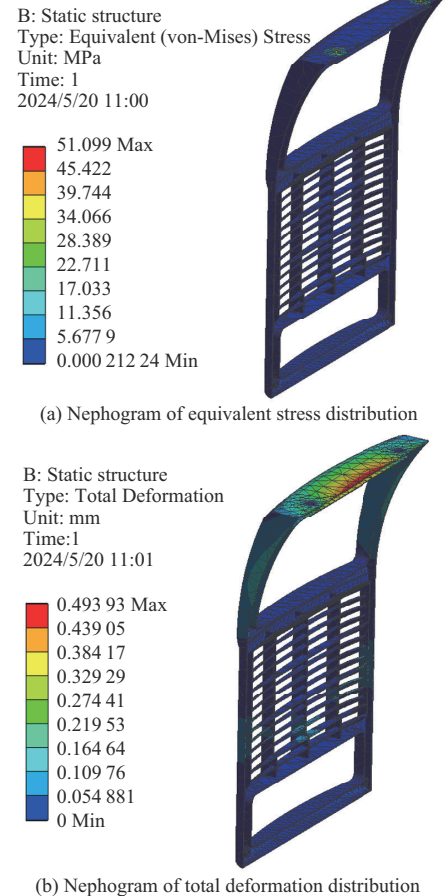


图7 PA6+40%GF复合材料焊机外壳分析结果

Fig. 7 Analysis results of welder shell made of PA6+40%GF composites

增加,GF与PA6基体存在形变差异,在GF末端会引起微裂纹。最初这些微裂纹可以通过载荷从基体传递到相邻的承载GF上,当外加载荷增加到一定程度后,纤维和基体不能再支持逐渐增加的载荷时,这些裂纹将会穿越最薄弱的地方,引起复合材料的断裂。随着GF含量的增加,复合材料的承载纤维增多,且GF与基体树脂的接触面积越来越大,这极大提升了外部载荷传递到纤维的效率。因此,GF对复合材料的冲击性能有着显著的增强作用。但是GF含量过高后,复合材料的韧性降低,受到冲击时,易出现局部应力集中造成产品的损坏^[16-18]。

表6和表7为不同GF取向和长径比对PA6+30%GF焊机外壳冲击性能的影响。由表6和表7分析结果可知,当GF沿X轴和Y轴取向且分别占50%时,焊机的冲击性能最好,变形最小;GF长径比的增加,有利于减小产品变形,其原因与静力学分析结果相同。同时发现,当GF长径比超过20后,焊机外壳的应力强度和变形改善效果不显著。综上分析,GF质量分数为20%时,GF增强PA6复合材料力学性能良好,可以满足焊机外壳的使用要求。

表6 不同GF取向对焊机外壳冲击性能的影响

Tab. 6 Effect of different orientation of glass fibers on impact performance of welder shell

Performance	PA6+ 30%GF- a_0	PA6+ 30%GF- a_1	PA6+ 30%GF- a_2	PA6+ 30%GF- a_3
Stress intensity/MPa	115	142	167	181
Total deformation/mm	6.6	8.8	7.0	6.2
Damage (Yes/No)	No	Yes	No	No

表7 不同GF长径比对焊机外壳冲击性能的影响

Tab. 7 Effect of different aspect ratios of glass fibers on impact performance of welder shell

Performance	PA6+ 30%GF-10	PA6+ 30%GF- 20	PA6+ 30%GF- 30	PA6+ 30%GF- 40
Stress intensity/MPa	110	115	118	119
Total deformation/mm	7.2	6.6	6.4	6.3
Damage (Yes/No)	No	No	No	No

由图8 PA6+40%GF复合材料焊机外壳等效应力分布云图和总变形分布云图可以看出,当焊机外壳受落球冲击时,最大应力在落球接触位置处约为

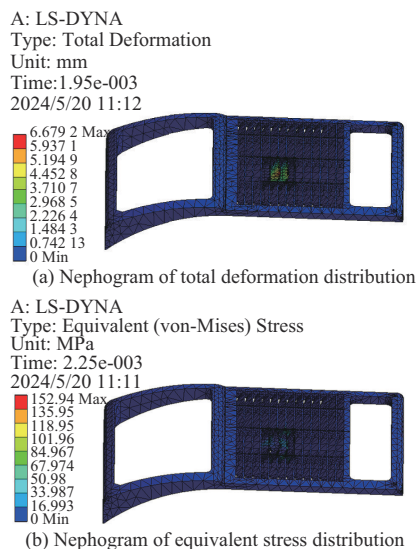


图8 PA6+40%GF焊机外壳落球冲击分析结果

Fig. 8 Results of welder shell made of PA6+40%GF falling ball impact analysis

153 MPa,总变形在受力平面处,约为6.6 mm。

4 结论

根据仿真分析结果,研究发现GF含量、GF长径比和GF取向对焊机外壳性能有显著影响。增加GF含量、增加GF长径比和控制GF取向,可以明显提高复合材料的力学性能,并减小产品的变形量。具体而言,发现GF含量为20%时,GF增强PA6复合材料具有良好的力学性能,与常用的PA6+30%GF复合材料相比,质量降低了6%,其成本可降低约5%,可以作为焊机外壳的最优方案之一。同时还发现,在GF含量一定的情况下,在工程应用中通过调整注塑工艺,使GF取向垂直于受力方向,也有利于提高产品的抗冲击性能。综上研究得到的数据,设计人员可以作为参考,以改善电气设备产品的性能,使其达到更优化的状态。

参考文献

- [1] 包建宁. 小型移动电子设备外壳中玻纤增强尼龙材料应用[J]. 中国高科技, 2019(22):93-95.
- [2] 张弛, 江茗宇, 李永宁. 玻璃纤维对复合材料力学性能的影响研究[J]. 造纸装备及材料, 2023, 52(9):62-64.
- [3] 储梦飞. 注塑成型玻璃纤维增强PA66复合材料的各向异性力学性能[D]. 上海: 东华大学, 2020.
- [4] 薛飞彪. 连续玻璃纤维/无机颗粒共增强尼龙6复合材料的制备与性能研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2022.
- [5] 葛冬冬, 王进, 胡天辉, 等. 玻璃纤维增强APA6复合材料的研究及应用进展[J]. 广州化工, 2022, 50(24):27-32.
- [6] 张坤伦, 潘锋, 韩勇, 等. 短纤维增强复合材料的力学性能仿真研究[J]. 机械设计与制造, 2020(12):212-215, 220.

- [7] 郝好山,胡仁喜,康士廷. ANSYS12.0 LS-DYNA 非线性有限元分析从入门到精通[M]. 北京:机械工业出版社,2010.
HAO Haoshan, HU Renxi, KANG Shiting. ANSYS12.0 LS-DYNA nonlinear finite element analysis from beginner to proficient[M]. Beijing:China Machine Press, 2010.
- [8] 黄绍军,蒋似梅,梁小良,等. 玻纤含量对玻纤增强尼龙66复合材料性能的影响[J]. 工业技术创新, 2020, 7(6):6-9.
HUANG Shaojun, JIANG Simei, LIANG Xiaoliang, et al. Effect of glass fiber content on the properties of glass fiber reinforced nylon 66 composites[J]. Industrial Technology Innovation, 2020, 7(6):6-9.
- [9] 冯冰涛,王晓珂,张萌,等. 原位聚合法制备连续玻璃纤维增强尼龙6复合材料的改性和性能[J]. 高分子材料科学与工程, 2024, 40(1):25-33.
FENG Bingtao, WANG Xiaoke, ZHANG Meng, et al. Modification and properties of continuous glass fiber reinforced nylon 6 composites prepared by in-situ polymerization[J]. Polymer Materials Science & Engineering, 2024, 40(1):25-33.
- [10] 尹洪峰,薛飞彪,魏英,等. 连续玻璃纤维和玻璃微珠共增强尼龙6复合材料的抗冲击性能[J]. 复合材料学报, 2023, 40(2):761-770.
YIN Hongfeng, XUE Feibiao, WEI Ying, et al. Impact resistance of continuous glass fiber and glass beads co-enhanced nylon 6 composites[J]. Acta Materialiae Compositae Sinica, 2023, 40(2):761-770.
- [11] 曲日华,王立岩,张龙云,等. 玻璃纤维增强尼龙66复合材料的结构与性能[J]. 合成纤维工业, 2020, 43(1):27-31.
QU Rihua, WANG Liyan, ZHANG Longyun, et al. Structure and properties of glass fiber reinforced nylon 66 composites[J]. China Synthetic Fiber Industry, 2020, 43(1):27-31.
- [12] YANG M, KUBOKI T, WOOD J, et al. Effects of extruder screw configurations on thermal properties of glass fiber-reinforced polyamide 6 composites throughout the direct long-fiber-reinforced thermoplastics process[J]. Polymer Composites, 2019, 40(9):3500-3509.
- [13] 李睿,王国,刘美华,等. 长玻璃纤维增强尼龙6复合材料力学性能的研究[J]. 合成纤维工业, 2017, 40(5):28-32, 37.
LI Rui, WANG Guo, LIU Meihua, et al. Study on mechanical properties of long glass fiber reinforced nylon 6 composites[J]. China Synthetic Fiber Industry, 2017, 40(5):28-32, 37.
- [14] HAMANAKA S. Correlation between fiber orientation distribution and mechanical anisotropy in glass-fiber-reinforced composite materials[J]. Journal of Polymer Engineering, 2019, 39(7):653-660.
- [15] 陈佰全,陈智文,郑友明,等. 高含量玻璃纤维增强尼龙6复合材料的制备与性能[J]. 工程塑料应用, 2021, 49(8):31-36, 53.
CHEN Baiquan, CHEN Zhiwen, ZHENG Youming, et al. Preparation and properties of high content glass fiber reinforced nylon composites[J]. Engineering Plastics Application, 2021, 49(8):31-36, 53.
- [16] YU S, OH KYUNG H, HWANG J Y, et al. The effect of amino-silane coupling agent shaving different molecular structures on the mechanical properties of basalt fiber-reinforced polyamide 6, 6 composites[J]. Composites, 2019, 163(15):511-521.
- [17] 陈光剑,宋玉兴,金学斌,等. 连续玻璃纤维增强聚酰胺6复合材料的力学性能[J]. 工程塑料应用, 2019, 47(5):38-41, 47.
CHEN Guangjian, SONG Yuxing, JIN Xuebin, et al. Mechanical properties of continuous glass fiber reinforced polyamide 6 composites[J]. Engineering Plastics Application, 2019, 47(5):438-441, 47.
- [18] 郑骏驰,吴超,孟征,等. PA6/GF复合材料力学性能改进研究进展[J]. 工程塑料应用, 2019, 47(5):137-143.
ZHENG Junchi, WU Chao, MENG Zheng, et al. Research progress on improvement of mechanical properties of PA6/GF composites[J]. Engineering Plastics Application, 2019, 47(5):137-143.