

碳纤维增强环氧复合材料机械臂 结构设计与性能研究

隋显航^{1*} 郭 辉¹ 李显华² 林凤森¹ 李光友¹

(1.威海光威复合材料股份有限公司,威海 264200;2.威海拓展纤维有限公司,威海 264200)

摘 要 通过有限元分析方法对碳纤维增强环氧复合材料(CFRP)机械臂进行力学分析计算,确定了变壁厚 CFRP 机械臂轻量化的设计方案。变壁厚 CFRP 机械臂在满足强度及刚度的要求下,重量相对于铝合金材质的机械臂降低了 90.9%。

关键词 机械臂,碳纤维复合材料,铺层设计,性能研究

中图分类号 TQ327.3

文献标识码 A

文章编号 1006-3536(2020)07-0235-03

DOI 10.19817/j.cnki.issn 1006-3536.2020.07.053

Study on structure design and performance of CFRP robot arm

Sui Xianhang¹ Guo Hui¹ Li Xianhua² Lin Fengsen¹ Li Guangyou¹

(1.Weihai Guangwei Composites Co.,Ltd., Weihai 264200;

2.Weihai Tuozhang Fiber Co.,Ltd., Weihai 264200)

Abstract As the core componet of industrial robots, the lightweight design of robot arm has been widely concerned by researchers.The finite element method was used to analysis the carbon fiber reinforced epoxy composite (CFRP) robot arm.Meanwhile,the lightweight design of CFRP robot arm with variable wall thickness was determined. The weight of CFRP robot arm was decreased 90.9% than that of aluminium alloy robot arm on the premise of meeting the requirements of strength and stiffness.

Key words robot arm,carbon fiber composite,layer design,property research

机器人在工业制造领域有着十分广泛的应用,其轻量化不仅有助于提升动力性、操控性等整体机械性能,而且在减重的同时有利于节能减排、降低生产成本^[1]。轻量化技术在工业用机器人的应用是一个庞大而复杂的系统工程,涉及到产品的结构设计、材料选择和工艺制造等各个方面,最终轻量化的设计方案要综合考虑产品性能、重量、加工工艺和成本等多种因素。机械臂作为工业用机器人的核心部件,其轻量化设计一直以来受到科研人员的广泛关注。如何在满足强度和刚度等性能要求的前提下,最大限度地降低机械臂的重量,是研究人员不断追求的目标。

碳纤维增强树脂基复合材料(CFRP)因具有可设计性强、高强轻质、耐腐蚀和便于整体成型等优点,近年来已在航空航天、石油化工、高速列车、工业机械、体育用品、风力发电和电子等领域得到了广泛的应用^[2-3]。本研究利用有限元分析法对 CFRP 机械臂结构设计和铺层进行优化,以降低机械臂重量,

不仅可以提高机器人动力性、经济性和安全可靠性能,还可以降低产品原材料和能源的消耗、减少环境污染^[4]。同时,有利于进一步推动我国碳纤维复合材料在工业机械领域中的推广和应用,助力我国从机械大国向机械强国转变。

1 机械臂结构设计与铺层优化

原有的机械臂为 7075 铝合金材质,重量较重,使用工况为后端固定,前端加载 950g,要求变形量小于 7mm,结构如示意图图 1 所示。为了进一步降

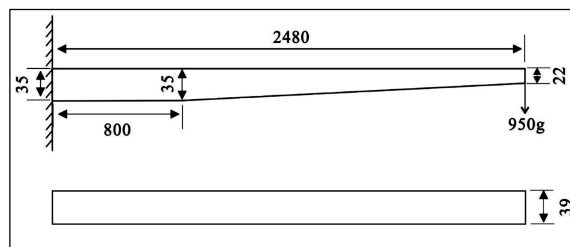


图 1 机械臂结构示意图

低产品重量,在满足原有产品性能要求的前提下将铝合金材质更换为 CFRP。

1.1 材料选择

综合性能和成本的考虑,纤维选用通用级 T300 碳纤维和 M40J 高模量碳纤维,树脂选用威海光威复合材料有限公司的 7901 型环氧树脂。铝合金和 CFRP 性能指标对比如表 1 所示。

表 1 材料(树脂质量分数为 33%)基本性能指标

材料	密度/ ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	泊松比	纵向拉 伸模量/ GPa	横向拉 伸模量/ GPa	剪切 模量/ GPa
铝合金 7075	2.81	0.33	72	72.0	26.9
T300/7901	1.60	0.03	130	9.0	4.7
M40J/7901	1.60	0.30	186	5.4	4.2

1.2 结构与铺层设计

原有机械臂为等壁厚铝合金矩形空箱截面结构,将材质换为 CFRP 等壁厚结构(方案 I)。 0° 和 $\pm 45^\circ$ 铺层采用 M40J 碳纤维预浸料,以充分发挥其高模量的特点; 90° 铺层选用通用级 T300 碳纤维预浸料,预浸料单层厚度为 0.1mm。同时,为了进一步降低机械臂的重量,充分发挥复合材料可设计性的优势,改变原有的等壁厚设计,采用变壁厚设计,将机械臂的铺层沿轴向分为六段(方案 II),铺层划分如图 2 所示。

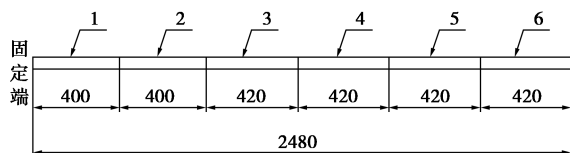


图 2 机械臂沿轴向铺层划分示意图

复合材料铺层设计一般采用对称铺层,要求同一角度铺层相邻不超过 4 层,连续减层不超过 3 层,最终方案 I 和方案 II 的具体铺层设计方案如表 2 和表 3 所示。

表 2 CFRP 机械臂铺层方案 I

层数/层	厚度/mm	角度/($^\circ$)	层数/层	厚度/mm	角度/($^\circ$)
1	0.1	90	1	0.1	-45
4	0.4	0	3	0.3	0
1	0.1	45	1	0.1	45
3	0.1	0	4	0.4	0
1	0.1	-45	1	0.1	90
3	0.3	0			

表 3 CFRP 机械臂铺层方案 II

序号	第一段	第二段	第三段	第四段	第五段	第六段
1	90	90	90	90	90	90
2	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	—
4	0	0	0	0	—	—
5	0	0	—	—	—	—
6	45	45	45	45	45	45
7	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	—
9	0	0	0	—	—	—
10	0	—	—	—	—	—
11	-45	-45	-45	-45	-45	-45
12	0	0	0	0	0	0
13	0	0	0	0	—	—
14	0	0	—	—	—	—
15	0	0	—	—	—	—
16	-45	-45	-45	-45	-45	-45
17	0	0	0	0	0	0
18	0	0	0	0	0	—
19	0	0	0	—	—	—
20	0	—	—	—	—	—
21	45	45	45	45	45	45
22	0	0	0	0	0	0
23	0	0	0	0	0	—
24	0	0	0	0	—	—
25	0	0	—	—	—	—
26	90	90	90	90	90	90
总层数	26	24	20	18	15	11

2 结果与讨论

2.1 性能分析

机械臂在实际使用过程中主要承受端部(950g)和自身重力载荷。经过有限元计算分析,CFRP 等壁厚机械臂的整体应力云图如图 3 和图 4 所示。CFRP 机械臂整体应力水平较低,所受最大应力为

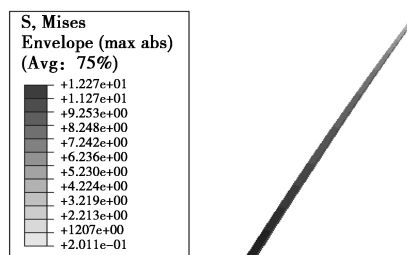


图 3 CFRP 等壁厚机械臂应力云图

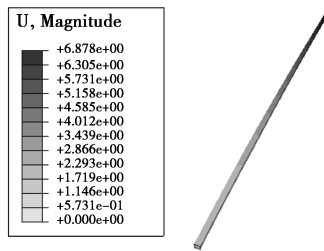


图 4 CFRP 等壁厚机械臂位移云图

12.27MPa, 远低于材料强度。此时, CFRP 机械臂的最大位移为 6.878mm, 满足小于 7mm 变形量的结构刚度要求。

CFRP 变壁厚机械臂的整体应力云图如图 5 和图 6 所示。由图可见, CFRP 机械臂整体应力水平较低, 所受最大应力为 9.693MPa, 远低于材料强度。此时, CFRP 机械臂的最大位移为 6.814mm, 也满足小于 7mm 变形量的结构刚度要求。

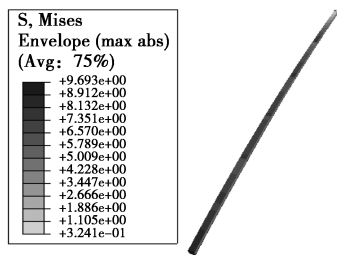


图 5 CFRP 变壁厚机械臂应力云图

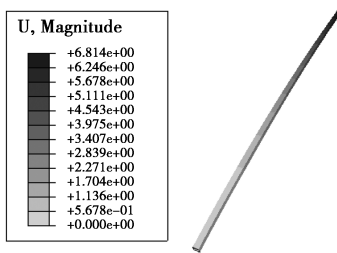


图 6 CFRP 变壁厚机械臂位移云图

2.2 性能对比分析

铝合金和 CFRP 机械臂所受应力、位移和壁厚对比如表 4 所示。由表 4 可以看出, 在满足产品性能要求的前提下, 铝合金机械臂的壁厚最厚, 达到 7.8mm。而此时, CFRP 机械臂的壁厚可以控制在 3mm 以内。

表 4 铝合金和 CFRP 机械臂应力、位移和壁厚对比

参数	铝合金	CFRP 等壁厚	CFRP 变壁厚
最大应力/MPa	6.447	12.270	9.693
最大位移/mm	6.995	6.878	6.945
壁厚/mm	7.8	2.3	1.1~2.6

铝合金和 CFRP 机械臂重量对比如图 7 所示, 由图可见, 在满足 7mm 变形量的要求下, 相同结构等壁厚 CFRP 和铝合金机械臂相比, 重量可减轻 89.4%, 减重效果十分明显。通过对铺层的进一步优化, 变壁厚 CFRP 机械臂比等壁厚 CFRP 机械臂的重量进一步降低 14.3%, 相比较于等壁厚的铝合金机械臂重量显著降低了 90.9%。

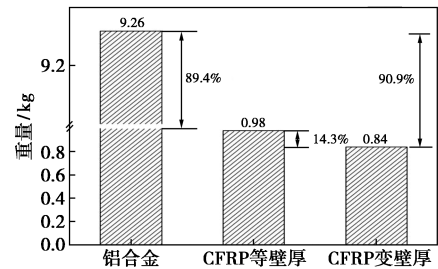


图 7 铝合金和 CFRP 机械臂重量对比

变壁厚 CFRP 机械臂由于过渡区域的铺层变化明显, 相对于等壁厚铝合金和 CFRP 机械臂更容易产生应力集中现象(图 4)。同时, CFRP 结构在第二段和第三段截面的突然变化导致应力集中更加明显, 如图 8 所示。因此, 在实际的结构设计和使用过程中这一点必须加以注意。

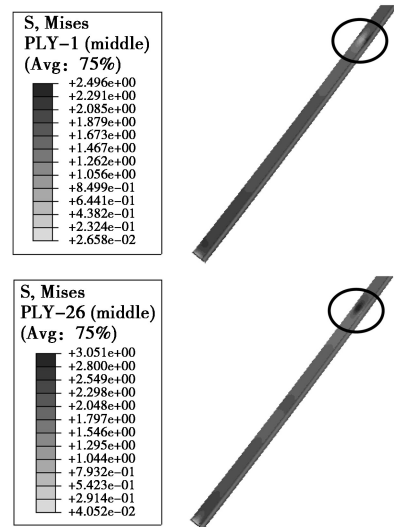


图 8 CFRP 机械臂 90°铺层应力云图

[(a)内侧 90°铺层; (b)外侧 90°铺层]

3 结论

在满足机械臂强度和刚度等技术指标的前提下, 通过材料选择、铺层设计等对工业用机械臂进行了有限元分析, 优化机械臂结构重量, 最终确定了 CFRP 变壁厚的机械臂设计方案。

(下转第 243 页)