

薄膜熔融挤出吹塑工艺的钢架结构静力学分析与优化设计

许丰¹, 何强²

(1. 广东金明精机股份有限公司, 广东 汕头 515098;

2. 华中科技大学材料科学与工程学院材料成形与模具技术全国重点实验室, 湖北 武汉 430074)

摘要: 以薄膜熔融挤出吹塑工艺的多层钢架平台为载体, 对其进行了静态特性分析。构建 Q235 钢简化模型, 考虑自重、设备荷载等, 发现主立柱 1~7 层应力超设计值 (215 MPa), 3、9 层主横梁挠度过大。通过加直角撑、十字撑及立柱等优化, 应力降至 174.12 MPa 以下, 挠度降低 46% 以上, 满足了规范要求, 提升了结构安全性与稳定性。

关键词: 钢架结构; 静力学分析; 应力集中; 挠度控制; 结构优化设计

中图分类号: TQ320.66

文献标识码: B

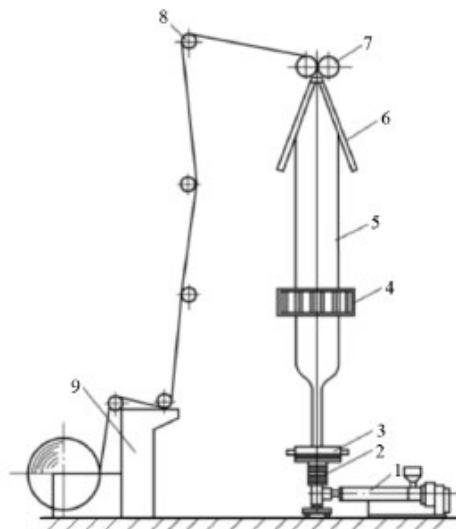
文章编号: 1009-797X(2025)07-0062-07

DOI:10.13520/j.cnki.rpte.2025.07.013

薄膜熔融挤出吹塑工艺是一种广泛应用于塑料薄膜生产的成型方法, 尤其在聚乙烯 (PE)、聚丙烯 (PP)、聚氯乙烯 (PVC) 等热塑性塑料的制备中占据重要地位^[1]。薄膜熔融挤出吹塑工艺因其高效、低成本、生产速度快等优点而被广泛应用于各个领域, 特别是在保鲜、防潮食品包装、隔离保温建筑材料、医用袋管等医疗器械产品方面有着广泛的应用^[2-6]。

在这一工艺中, 吹胀薄膜的方向有上吹和下吹之分, 本文研究的钢架对应的生产工艺为薄膜挤出上吹吹塑工艺, 如图 1 所示, 因此在实际生产过程中, 除挤出机、挤出膜头和收卷机放置在地面上外, 其他设备都需要安置在钢架上, 因此钢架的强度对于安全生产至关重要。

尧晶^[7]等人在 ANSYS Workbench 软件平台上建立游泳升降钢架结构力学模型, 依据钢结构在载荷作用下的强度和变形情况, 通过 GDO 优化得到了钢材矩形截面尺寸的最优设计点; 钱路燕^[8]以汽车前处理涂装线的多层钢结构平台为载体, 在 Inventor 软件中通过数值模拟分析, 确保了钢平台的承载要求; 赵顺^[9]等人运用 ANSYS 对移动式混凝土搅拌站钢架结构有限元模型进行了力学性能分析, 得出了主钢架结构应力的位移分布, 并通过实验验证了分析结果的准确性; 王勇^[10]利用 ANSYS 对垂直升降类立体车库的



1—挤出机; 2—挤出膜头; 3—风环; 4—稳泡器;
5—膜管; 6—人字板; 7—牵引辊; 8—导辊; 9—收卷机

图 1 HDPE 吹膜生产工艺流程示意图

横移栽车架、升降平台以及大轿箱式立体车库的搬运机器进行了力学模拟和结构优化, 得到了符合规范的优化设计结果; 谢茜^[11]使用 ANSYS 对超高层建筑塔

作者简介: 许丰 (1993—), 男, 本科, 机械工程师, 主要负责推进吹膜设备产品模块化和零部件标准化发展工作, 曾荣获中国轻工业联合会科学技术进步奖“高性能功能化包装膜共挤吹塑先进装备研发与应用”一等奖。

楼防护架进行静力特性研究,分析在不同工况下有无风荷载控制作用架体的应力和变形特性,验证了架体结构受力的合理性。

本文采用 ANSYS 软件,对钢架进行静力学分析,研究结构的受力特点和大小,根据分析结果,对结构进行相应的优化,进而提高结构的承载能力和稳定性。

1 分析模型的建立

1.1 模型前处理

公司主营业务为薄膜吹塑机组、流延机组等塑料机械设备的研发、生产和销售,钢架的原始模型来源于公司的模型装配图,但是原始模型不能直接用于结构模拟,需要对模型前处理。

模型前处理主要包括去除多余的部件和特征等。只保留主要受力的结构,去除一些不对主体力学结构造成影响的结构,如楼梯及扶手、螺栓、台板、角铁、垫片等;去除螺纹孔、倒角、倒圆等特征,简化几何模型。模型处理前后的模型示意图如图 2 所示。

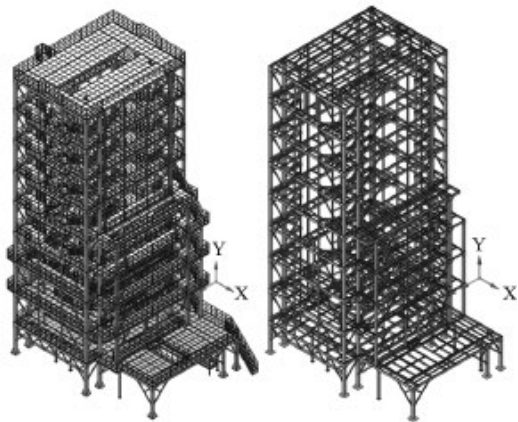


图 2 钢架原始模型

钢架总高度为 36 m,平均高度每层 4 m,前处理后的模型每层的主要受力结构如图 3 所示,每层的主要受力结构尺寸为 15 m×11 m,每层都包含有主立柱、主横梁和次立柱,本文主要对主立柱和主横梁进行强度和刚度分析,主立柱和主横梁的横截面尺寸如图 4 所示。

1.2 钢架载荷的确定

根据《GB50068—2018_建筑结构可靠性设计统一标准》,基本组合的效应设计值按下式中最不利值确定:

$$S_d=S(\sum_{i=1}^n \gamma_{Gi} G_{ik} + \gamma_P P + \gamma_{Q1} \gamma_{L1} Q_{1k} + \sum_{j=2}^n \gamma_{Qi} \psi_{cj} \gamma_{Lj} Q_{jk}) \quad (1)$$

式中: $S(\cdot)$ — 作用组合的效应函数;

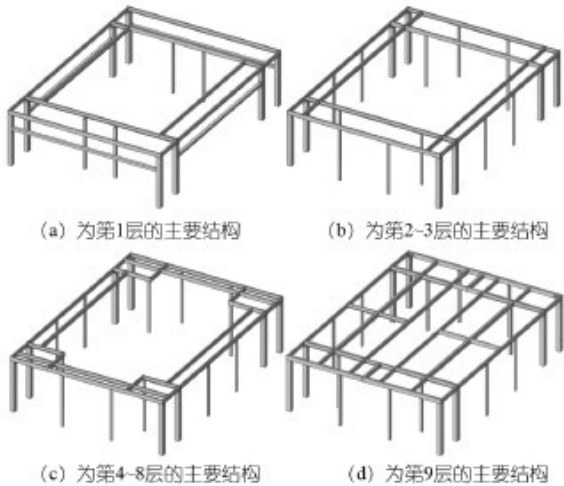


图 3 前处理后的模型每层主要受力结构图

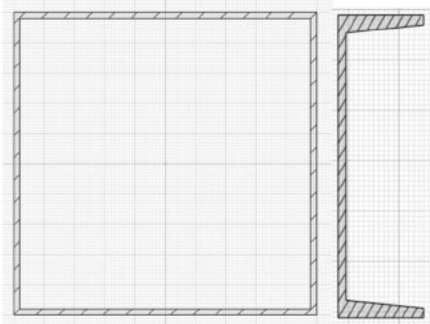


图 4 主立柱,主横梁截面尺寸图

- G_{ik} — 第 i 个永久作用的标准值;
- P — 预应力作用的有关代表值;
- Q_{1k} — 第 1 个可变作用的标准值;
- Q_{jk} — 第 j 个可变作用的标准值;
- γ_{Gi} — 第 i 个永久作用的分项系数;
- γ_P — 预应力的分项系数;
- γ_{Q1} — 第 1 个可变作用的分项系数;
- γ_{Qj} — 第 j 个可变作用的分项系数;
- γ_{L1} 、 γ_{Lj} — 第 1 个和第 j 个考虑结构使用年限的荷载调整系数;
- ψ_{cj} — 第 j 个可变作用的组合值系数。

薄膜的生产在室内进行,为保证薄膜质量,工作环境灰尘较少,因此钢架不考虑雪载荷、风载荷和积灰载荷。本文分析的钢架结构主要承受钢架自重、其上机械设备的重量及均布活荷载。按照上述公式及标准要求,载荷取值如下表 1 所示,其中每层的设备载荷在相应的面施加设备的重力,每层设备重力如下表 2 所示。

表 1 载荷和相关系数取值

载荷种类	分项系数	作用的标准值	使用年限的荷载调整系数
钢架自重	1.3	施加标准重力	无
设备自重	1.3	施加对应的力	无
均布活荷载	1.5	2 kN/m ²	0.95 (25 年)

表 2 每层台面放置的设备自重

层数	荷载标准值 /kN
1	133
2	102
3	215
4	26
5	150
6	20
7	0
8	0
9	330

1.3 模拟参数设置

钢架的材料是 Q235, 模拟时采用的材料属性如下: 密度 7 850 kg/m³, 泊松比 0.277, 杨氏模量 2.11×10¹¹ Pa, 屈服强度 235 MPa, 拉伸强度 460 MPa。

考虑到钢架的实体之间真实的连接绝大部分都为焊接与螺栓连接, 钢架中实体间的接触均设置为绑定接触, 接触自动生成, 为避免未有实际接触的实体间产生接触, 接触公差值设置为 1 mm, 生成了 5 880 对接触。

现有的钢架、钢结构、桁架等力学模拟大都采用梁单元和壳单元进行网格划分, 使用梁单元和壳单元可以在保证计算结果准确性的前提下显著减少对计算机性能的要求, 但是不考虑计算量的情况下, 采用实体单元能够更准确地模拟出结构的应力和位移^[12~15]。

由于本文模型简化后仍然存在许多不同类型的梁和柱以及斜撑、垫片和贴板, 结构比较复杂, 即使将垫片和贴板省去, 使用梁单元来代替梁、柱和斜撑, 在模型简化和梁与柱的接触设置上也存在不少的工作量, 因此本文中的网格均采用默认实体网格。设置整体网格尺寸为 100 mm, 网格数量为 1 151 045。

钢架底部固定在经过地基硬化的地面上, 不考虑钢架底部的位移, 因此对钢架底部三个方向的线位移和角位移均进行约束。

2 静力结果分析

2.1 强度和刚度的校核标准

分别根据《GB50017—2017 钢结构设计标准》中的 4.4.1 和附录 B, 对钢架的强度和刚度进行验算。

强度校核标准: 对于钢材厚度 ≤ 16 mm, Q235 结构构件的抗拉、抗压、抗弯的设计强度指标 $f=215$

MPa, 抗剪的设计强度指标 $f_v=125$ MPa。

刚度校核标准: 同时考虑永久和可变荷载标准值

产生的挠度的容许值时, 主梁的挠度容许值 $V_T=\frac{l}{400}$ 。

2.2 静态结果分析

2.2.1 强度分析

统计钢架 1~9 层主立柱的最大应力和剪切应力如表 3, 可以看出主立柱的最大应力在 1~7 层均超过设计强度指标 $f=215$ MPa, 如图 5, 其中 1~3 层的应力值明显大于 4~7 层, 这是因为 1~3 层位于低楼层承受着来自上层的压力, 同时这几个楼层放置的设备重力也比 4~7 层的大, 第 8~9 层的最大应力在设计强度指标内。第一层主立柱最大应力处的应力如图 6 所示, 主立柱处的受力变形如图 3-3 所示, 可以看出主立柱应力大的原因主要是其上的梁受较大的弯矩使得主立柱的一面受压导致应力集中, 且发生应力集中的主立柱均为 8 根立柱中间的 4 根。主立柱的最大剪切应力均在抗剪的设计强度指标 $f_v=125$ MPa 内。

表 3 主立柱最大应力和最大剪切应力

层数	主立柱最大应力 /MPa	主立柱最大剪切应力 /MPa
1	633.06	44.122
2	476.79	41.81
3	516.32	34.84
4	312.35	34.58
5	304.85	25.246
6	257.63	19.701
7	239.51	19.648
8	64.665	26.884
9	60.542	27.206

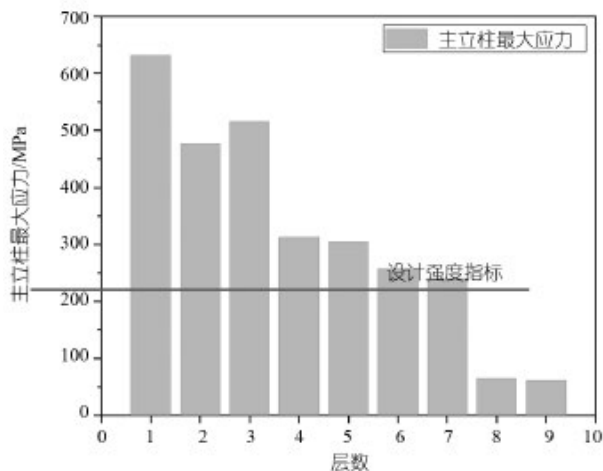


图 5 1~9 层主立柱的最大应力

2.2.2 刚度分析

钢架的整体位移结果如图 8 所示, 统计每层的主横梁的最大挠度和最大应力如表 4 所示, 如图 9 所示, 第 3 层的最大挠度接近挠度容许值, 第 9 层的最大挠

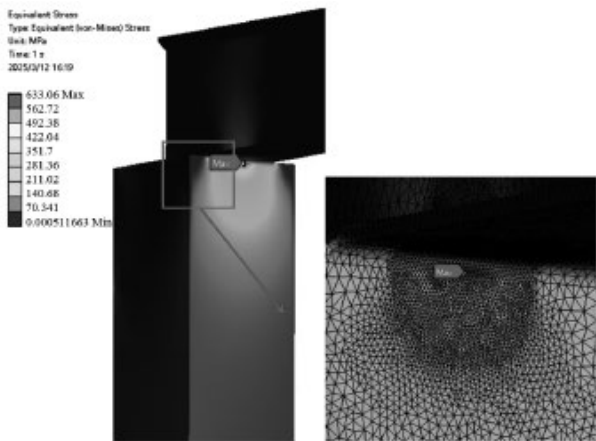


图 6 第一层主立柱的应力云图



图 7 第 1 层主立柱的受力变形情况（变形放大 100 倍）

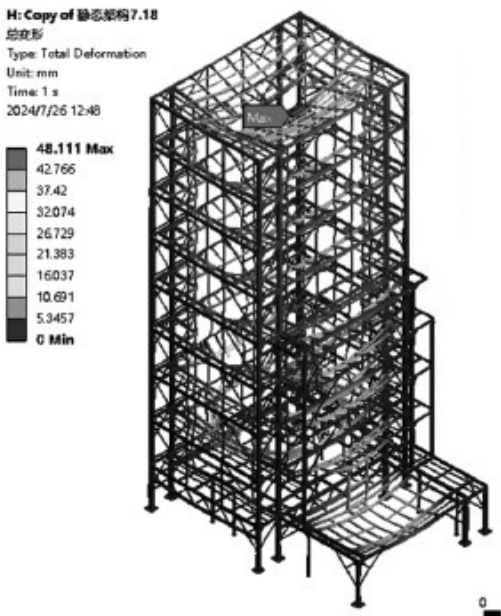


图 8 钢架整体位移云图（变形放大 49 倍）

度超过挠度容许值，如图 10、图 11 所示，第 3、9 层的主横梁的最大挠度显著大于其他层，通过对钢架主要受力结构的分析，发现这是因为这两层的主横梁上受力过大而且横梁下没有柱子支撑。第 3 层主横梁的最大应力值超过设计强度指标 $f=215 \text{ MPa}$ ，这是因为这一层的主横梁变形过大导致应力集中。

表 4 主横梁的最大挠度和最大应力		
层数	主横梁最大挠度	主横梁最大应力 /MPa
1	0.0004 2	155.86
2	0.0011 1	154.97
3	0.0024 1	327.45
4	0.0006 9	101.73
5	0.0013 9	143.16
6	0.0010 2	87.405
7	0.0010 0	88
8	0.0009 4	90.434
9	0.0025 3	117.25

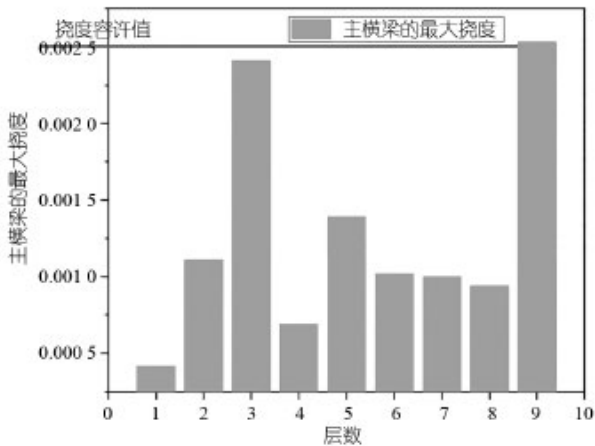


图 9 1~9 层主横梁的最大挠度

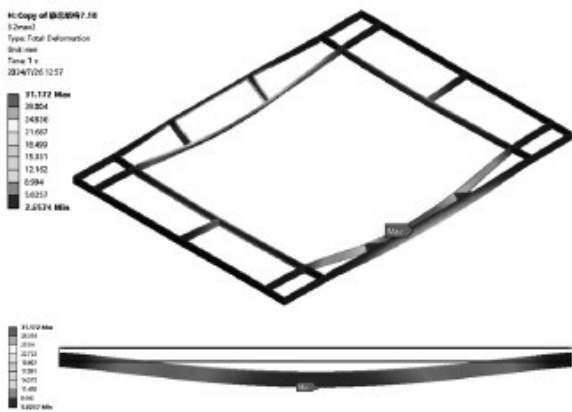


图 10 第 3 层主横梁位移云图（变形放大 26 倍）

3 钢架结构优化

3.1 钢架强度优化

钢架的主立柱最大应力过大的原因是其上的梁对主立柱一面的应力集中，因此考虑在主立柱和梁应力

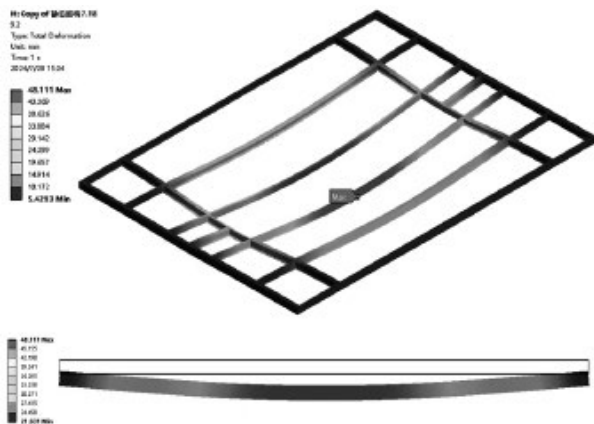


图 11 第 9 层主横梁位移云图 (变形放大 21 倍)

集中处加入一个直角撑保障主立柱的安全性, 同时为了保障直角撑和主立柱的安全性, 在主立柱内部焊接一个十字支撑, 如图 12 所示。

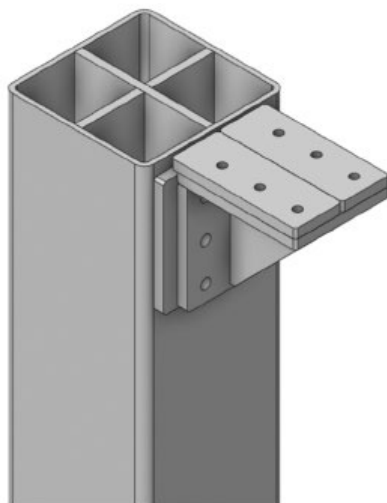


图 12 立柱加固示意图

根据模拟结果的应力特点对主立柱进行加固: 对 1~3 层中间 4 根主立柱, 将其厚度增加至 10 mm, 并且添加直角撑和十字撑; 对 4~7 层中间 4 根主立柱, 保持立柱厚度不变, 添加直角撑和十字撑; 对 8~9 层的立柱不做处理。

将加固的模型网格局部细化重新进行模拟后得到如下结果: 第 1 层主立柱加固后的应力云图如图 13 所示, 忽略由尖角导致的计算应力奇异, 经过加固后主立柱的最大应力值降为 174.12 MPa, 在设计强度指标 $f=215$ MPa 内; 第 4 层主立柱加固后的应力云图如图 14 所示, 经过加固后主立柱的最大应力值降为 115.97 MPa, 在设计强度指标 $f=215$ MPa 内。

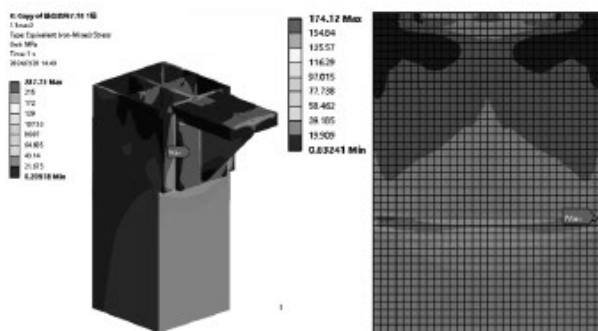


图 13 加固后第 1 层主立柱应力云图

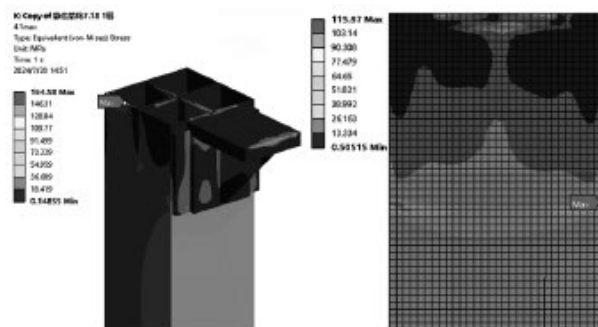


图 14 加固后第 4 层主立柱应力云图

3.2 钢架刚度优化

钢架主横梁挠度过大的原因是主横梁上载荷过大且下方没有立柱进行支撑, 因此考虑在主横梁下方添加立柱减小梁的变形。根据结构刚度分析, 分别在第 3 层和第 9 层的横梁下添加立柱, 如图 15 所示, 第 9 层由于第 8 层结构的限制, 如图 3 所示, 不能直接将立柱放置于主横梁下方。

将加固后的模型模拟后得到如下模拟结果: 第 3 层主横梁优化后位移结果云图如图 16 所示, 经过优化后主横梁的最大挠度降为 0.001 3, 降低了 46%, 大幅小于挠度容许值 $V_T = \frac{l}{400}$, 并且由于该层挠度的减小, 主横梁的最大应力值也降为 179.15 MPa, 达到安全标准; 第 9 层主横梁优化后位移结果云图如图 17 所示, 经过优化后主横梁的最大挠度降为 0.002 497, 降低了 1.3%, 勉强在挠度容许值 $V_T = \frac{l}{400}$ 内。



图 15 第 3 层加立柱的位置 (左) 和第 9 层加立柱的位置 (右) (高亮显示的立柱为添加的立柱)

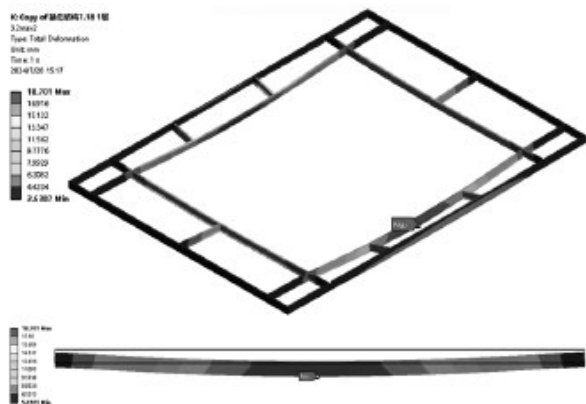


图 16 优化后第 3 层主横梁位移云图 (变形放大 51 倍)

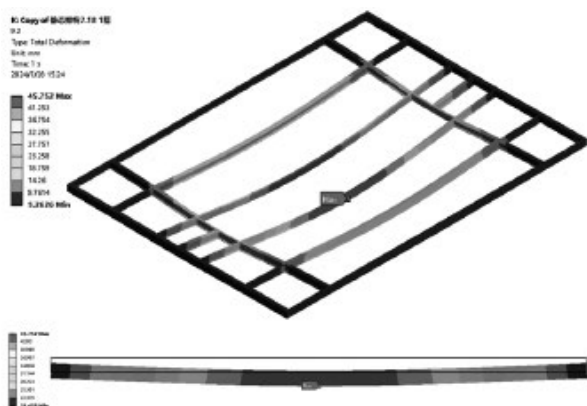


图 17 优化后第 9 层主横梁位移云图 (变形放大 26 倍)

4 结论

本文以薄膜熔融挤出吹塑工艺的多层钢架平台为载体, 对其进行了静态特性分析, 结合分析结果, 优化了钢架的安全性和稳定性, 通过分析得出了如下主要结论:

(1) 钢架主立柱的最大应力从第 1~9 层应力逐渐减小, 且主立柱的最大应力在 1~7 层均超过设计强度指标 $f=215$ MPa, 其中 1~3 层的应力值明显大于 4~7 层, 第 8~9 层的最大应力在设计强度指标内; 钢架的主横梁在第 3、9 层的最大挠度显著大于其他层, 第 3 层的最大挠度接近挠度容许值 $V_T=\frac{l}{400}$, 第 9 层的最大挠度超过挠度容许值。

(2) 经过对结构的优化, 钢架第 1 层和第 4 层主立柱的最大应力分别降低为 174.12 MPa 和 115.97 MPa, 满足设计强度指标 $f=215$ MPa 的要求, 钢架第 3 层和第 9 层的主横梁的最大挠度分别降为 0.001 3 和 0.002 497, 满足挠度容许值 $V_T=\frac{l}{400}$ 的要求。

参考文献:

- [1] 杨超永, 郭金强, 王富玉, 等. 高性能塑料薄膜制备方法及改性研究进展. 中国塑料, 2022,36(9):167-179.
- [2] 张玉霞. 吹塑薄膜技术进展. 塑料包装, 2007(3):38-46.
- [3] D.Phothisarattana, P.Wongphan, K.Promhuad, et al. Blown film extrusion of PBAT/TPS/ZnO nanocomposites for shelf-life extension of meat packaging[J]. Colloids and Surfaces B: Biointerfaces, 2022, 214:112 472.
- [4] P.Priyadarsini, M.Biswal, S.Gupta, et al. Development and characterization of ester modified endosper micguargum/polyvinylalcohol(PVA) blownfilm: Approach towards greener packaging. Industrial Crops and Products, 2022, 187: 115 319.
- [5] J.G.Han, S.J.Park. Fabrication of PBAT/polyethylene blends mulching film via blown film extrusion process. Korea-Australia Rheology Journal, 2020, 32(1):79-86.
- [6] J.Fehlberg, S.McKay, L.M.Matuana, et al. Use of orange juice processing waste to produce films using blown film extrusion for food packaging. Journal of Food Engineering, 2023, 341:111 337.
- [7] 尧磊, 王存堂. 泳池升降平台钢架结构的优化设计. 机电工程, 2017,34(8):870-874.
- [8] 钱路燕. 基于 Inventor 分析的多层钢平台设计. 工程建设与设计, 2016(13):27-29.
- [9] 赵顺, 王玉玲, 徐君飞, 等. 基于 ANSYS 的移动式混凝土搅拌站主钢架结构力学性能分析. 青岛理工大学学报, 2014,35(1):89-93+130.
- [10] 王勇. 垂直升降类立体车库关键结构优化设计研究[D]. 电子科技大学, 2023.
- [11] 谢茜. 超高层建筑塔楼防护架的设计和施工技术研究[D]. 西安工业大学, 2024.
- [12] 李英明. ANSYS 梁单元与实体单元分析比较. 中国科技信息, 2015(2):146-147.
- [13] 石广斌. 实体单元与梁单元数值分析的差异性剖析及应用. 西北水电, 2012(1):61-65.
- [14] 严万双, 郭挺. 基于两种单元的 V 形墩桥梁地震响应对比分析. 工程与建设, 2020,34(3):518-520.
- [15] 邱德阳, 袁航, 唐艺航. 钢引桥梁单元模型和实体单元模型建模分析. 港口科技, 2020(11):35-40.

Static analysis and optimization design of steel frame structure for thin film melt extrusion blow molding process

Xu Feng¹, He Qiang²

(1. Guangdong Jinming Precision Machinery Co. LTD., Shantou 515098, Guangdong, China;

(R-03)

(R-03)

