



·强激光物理与技术·

激光真空传输通道及光学舱应力补偿技术*

鲜玉强, 陈永亮, 刘雪婷, 钟强, 崔鼎

(中国工程物理研究院应用电子学研究所, 四川绵阳 621900)

摘要: 介绍了真空通道应力补偿结构的基本工作原理; 研究了大温差环境下, 激光束长距离真空传输通道的真空负压应力和热胀冷缩应力的自适应补偿技术和光学舱结构变形抑制技术; 在整个光学系统上, 开展了现场安装调试和真空负压应力考核, 并进行环境温差变化情况下的光路传输稳定性试验验证。试验结果表明: 解决了超长激光束真空传输通道在真空负压和大温差环境下的真空负压应力和热胀冷缩应力的自适应补偿问题和光学舱结构变形抑制问题; 实现了传输通道真空负压应力自动平衡; 消除了真空负压应力造成的光束漂移; 实现了大温差环境下的真空负压通道结构热胀冷缩应力的自由释放; 达到了光路长时间保持稳定的实际效果。

关键词: 真空通道; 应力补偿; 热胀冷缩; 真空负压; 激光束

中图分类号: TN012; O436

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202335.230115

Technology of vacuum channel stress compensation for laser beam propagation

Xian Yuqiang, Chen Yongliang, Liu Xueting, Zhong Qiang, Cui Ding

(Institute of Applied Electronics, CAEP, Mianyang 621900, China)

Abstract: The basic working principle of the vacuum channel stress compensation structure is introduced. The adaptive compensation technology and the optical cabin structure deformation suppression technology subjected to the vacuum negative pressure stress, thermal expansion and cold contraction stresses of the laser beam long-distance vacuum transmission channel in large temperature difference environments are investigated. The installation, debugging and evaluation of the vacuum channel stress compensation structure are carried out with the whole optical system, and the optical transmission stability is verified by some experiments with ambient temperature difference. The experimental results show that the problem of adaptive compensation for vacuum negative pressure stress and thermal expansion and cold contraction stress in the ultra-long laser beam vacuum transmission channel under vacuum negative pressure and large temperature difference environments, and the problem of deformation suppression of the optical cabin structure are solved. The automatic balance of vacuum negative pressure stress in the transmission channel is achieved, and the laser beam drift caused by vacuum negative pressure stress is eliminated. The release of thermal expansion and cold contraction stresses in the vacuum negative pressure channel structure under large temperature difference environments is achieved, the actual effect of maintaining stability of the optical path for a long time is achieved.

Key words: vacuum channel, stress compensation, thermal expansion and cold contraction, vacuum negative pressure, laser beam

在高能激光研究和应用领域中, 众所周知, 高能量激光在大气中传输时, 其中有小部分能量会被大气中水蒸汽、二氧化碳分子或气溶胶颗粒吸收, 导致传输路径上的空气被加热, 使气体介质的密度和折射率发生变化, 产生负透镜效应, 从而造成激光束的畸变和发散, 降低激光能量集中度。事实上, 当激光在密封的管道内传输时, 尽管传输距离较短, 但由于光束直径较细、激光功率密度相对较高、且密封的管道中没有横向切变气流的冷却作用, 因此激光束与传输通道中的水蒸汽、二氧化碳分子等气体介质之间的热相互作用可能会非常强烈, 使得介质温度升

* 收稿日期: 2023-05-06; 修订日期: 2023-08-18

联系方式: 鲜玉强, yuqiang2000@sina.com。

通信作者: 钟强, qzhong@mail.ustc.edu.cn。

高,进而使其密度和折射率发生变化,反过来影响激光束的传输,导致远场光束产生畸变。因此,在实践中通常将近场传输和矫正光路密封在真空通道和强光光学舱内的真空条件下或者置换成高纯氮气的环境中传输,以尽可能减轻空气中水蒸汽、二氧化碳分子等介质对光束质量的影响^[1-3]。

在复杂或者大型的高能激光系统中,激光束从激光器到发射器,传输距离长达数十米,传输通道存在真空负压不平衡和通道结构热胀冷缩影响,极易造成光路漂移和不稳定。在高压激光真空传输通道和光学舱系统设计中,通常面临三个比较棘手的问题:一是不对称结构受真空负压应力对光学传输中的光机结构变形的影响;二是环境温度温差变化较大时,长距离真空通道结构热胀冷缩应力对光学传输中的光机结构变形的影响;三是真空光学舱中矫正光路镜架安装平台在真空负压情况下结构变形对矫正光路稳定性的影响。

本文针对上述问题,并结合实际应用,从总体结构一体化设计角度出发,利用波纹管补偿原理,研究了真空负压结构变形补偿技术、热胀冷缩应力自适应补偿技术,设计了一种真空通道的应力补偿器,并结合波纹管的应用,圆满解决了真空负压对光学舱内光路镜架安装平台的变形问题、长距离真空传输通道真空负压应力和热胀冷缩应力引起的结构变形问题。试验结果表明,该研究技术实现了真空管道负压应力的自动平衡,热胀冷缩应力的自由释放,达到了光路长时间保持稳定的实际应用效果。

1 结构设计和工作原理

1.1 无负压应力真空光学舱

为了减轻空气中水蒸汽、二氧化碳等介质对光束质量的负面影响,在高压激光系统研究中,通常将近场自适应光学矫正器等重要部分光路及光学镜架、镜面一并安装在可密封的光学舱中,一方面可以检验激光束在真空环境下的传输特性,另一方面又可以通过置换干燥空气或高纯度的氮气考核激光束在不同介质环境条件下的传输性能。但在光学舱抽真空过程中,真空负压应力难免会对光路光学镜面的镜架安装平台造成形变,进而造成传输光束的偏移,引入误差。

在具体实践中,通常做法是增加光学舱中镜架安装平台的刚度,提高其抗变形能力,如图1所示,这种方法对于光斑直径不大、镜架口径较小、光路简单、占地面积小的矫正光路而言,实现难度不太大。但对于光斑和镜面直径大、光路复杂且占地面积较大的光路来说,工程实现技术难度就很大,效果也不一定很理想,而且经济成本也将大大增加。为此,本文研究了一种无负压应力真空光学舱并通过实际工程应用检验了其可行性。

1.1.1 工作原理

在无负压应力真空光学舱中,增加了光学舱负压底板结构,并通过支撑立柱将镜架安装平台和承受负压的光学舱负压底板独立开来,即通过支撑立柱将镜架安装平台支撑在镜架支撑平台上,同时利用波纹管作为密封结构,在镜架安装平台和镜架支撑平台之间构成真空密封通道,光学舱负压底面和波纹管只负责“承受负压”和“密封”,允许变形;支撑立柱穿过波纹管,将镜架安装平台通过立柱支撑在镜架支撑平台上,负责光学系统“稳定”;镜架支撑平台与负压底板、气密舱体等组装为一体,再安装在光学平台上,形成一个完整的光学传输气密舱^[4],如图2所示。

1.1.2 数值计算与分析

(1) 建立对比分析结构模型

为了与实际研制的无负压应力真空光学舱试验测试数据进行比对分析,本文基于“六相同”原则,即光学舱内所受负压面积基本相同,舱体体积基本相同,无负压应力真空光学舱支撑立柱数量相同,立柱密封波纹管直径相同,镜架安装平台内部加强筋结构相同,以及模拟光路的镜架之间的安装距离基本相同,对实物模型进行了适当简化,删除了安装螺孔、定位孔、倒角等细小结构,构建了常用真空光学舱和无负压应力真空光学舱数值分析结构模型和光路传输基本模型,其中,分析模型中用以模拟变形造成光路光束偏移的每两块镜架之间的距离与实际真空光学舱基本一致,约为1.25 m,如图3所示。

(2) 单元网格划分及材料属性

采用3D四面体实体单元,类型为CTETRA(10),选用与实际光学舱相同的不锈钢材料(1Cr18Ni9Ti),弹性模

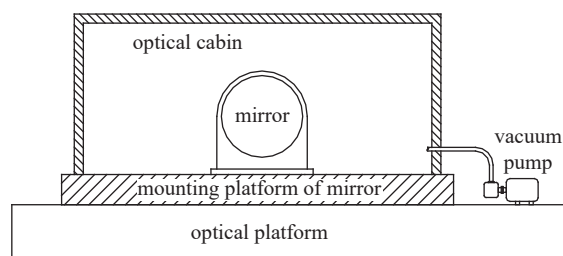


Fig. 1 Common vacuum optical cabin

图1 常用真空光学舱

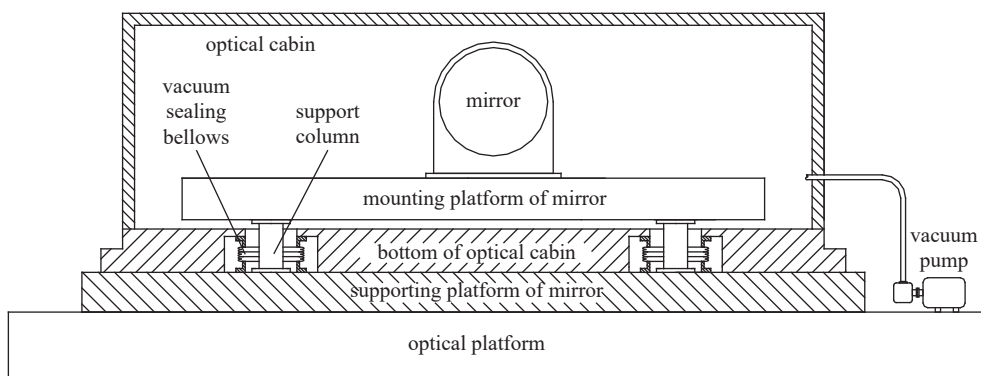


Fig. 2 Vacuum optical cabin without negative pressure

图 2 无负压应力真空光学舱

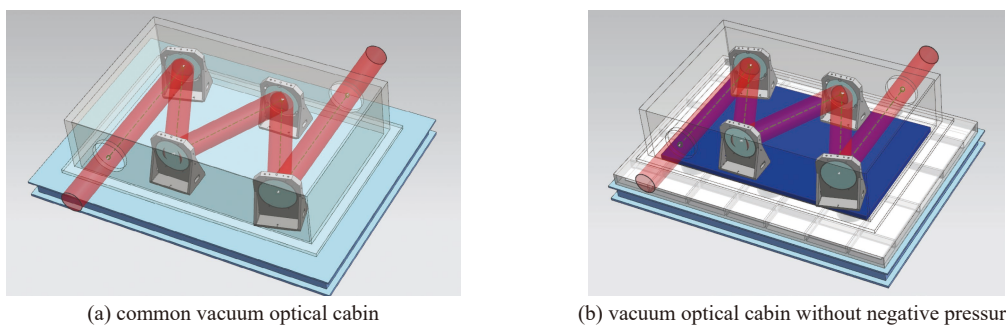


Fig. 3 Numerical analysis model of optical cabin

图 3 光学舱数值分析模型

量为 184 GPa, 密度 7.9 g/cm³。

(3) 计算边界条件

考虑光学舱结构自重对微小变形的贡献不可忽略, 重力加速度取 9.8 m/s²; 对抽真空时承受负压作用的光学舱六面舱壁施 0.1 MPa 大气压; 其中, 无负压应力真空光学舱内的负压舱底板和镜架支撑平台上与支撑立柱密封波纹管对应的区域同样施加 0.1 MPa 气压的负压载荷。约束方式与实际相同, 即常用真空光学舱四周与光学平台固定约束; 无负压应力真空光学舱镜架支撑平台只约束水平方向自由度, 放开 z 向自由度, 以观察支撑立柱密封波纹管对应的区域施加 0.1 MPa 的负压载荷产生的变形对镜架安装平台的影响; 负压舱底板结构上通过波纹管与镜架安装平台联结在一起, 且负压舱底板和镜架安装平台之间间隙充分, 不做约束处理, 允许负压舱底板自由变形, 只要变形后不与镜架安装平台发生干涉都是允许的。

(4) 仿真计算及结果分析

本文利用 Siemens PLM Software 公司出品的 UG NX13 有限元建模和分析工具, 利用 UG NX13 中 NX Nastran 求解器进行了有限元仿真分析。

计算结果表明, 常用光学舱镜架安装结构平面在抽真空时产生的最大变形量为 0.145 mm, 应力为 20.71 MPa, 变形云图和应力云图如图 4 所示, 由此可见, 受舱内真空负压的作用, 变形方向为向真空舱内“鼓出”, 造成镜架的

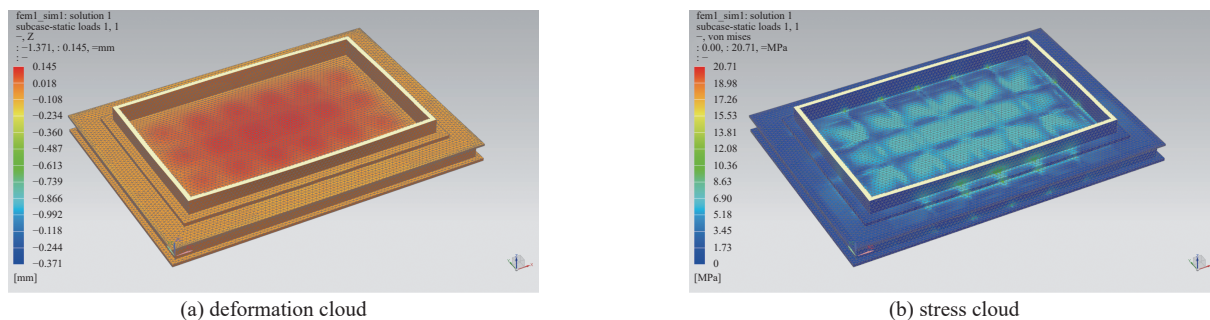


Fig. 4 Numerical analysis results of common vacuum optical cabin

图 4 常用真空光学舱分析结果

微小位置变化,反映在光路上则会引起光束的较大偏移,变形引起的光轴偏移最大可达0.116 mrad。

无负压应力真空光学舱在抽真空时,真空负压主要作用在光学舱负压底板上,所产生的变形量为0.287 mm,应力为41.72 MPa,如图5(a)和图5(b)所示;而镜架安装平台通过支撑立柱支撑在镜架支撑平台上,镜架安装平台变形量不超过0.003 mm,真空应力也非常小,不超过1.81 MPa,如图5(c)和图5(d)所示;反映在光束上,镜架安装平台变形引起的光轴偏移约为2.4 μ rad,由此可见,真空负压变形对光轴偏移的影响微乎其微,几乎可以忽略。

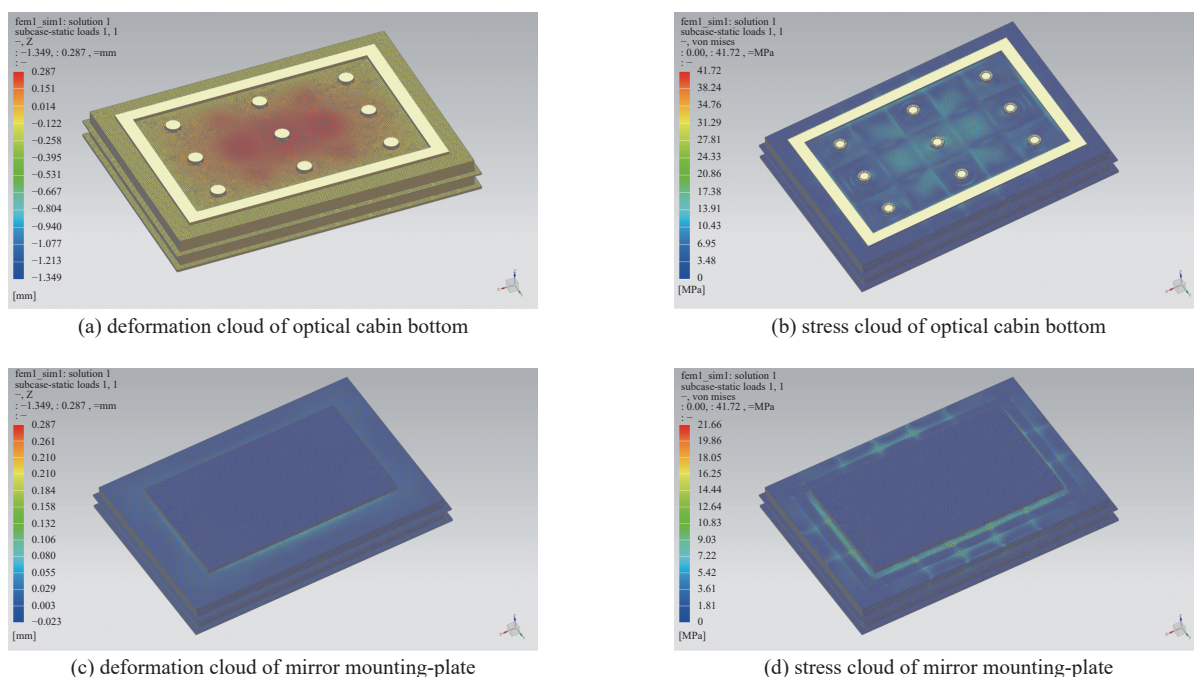


Fig. 5 Numerical analysis results of vacuum optical cabin without negative pressure

图 5 无负压应力真空光学舱分析结果

上述对比数值分析结果表明,利用无负压应力真空光学舱设计原理,可以最大限度消除抽真空对光学舱镜架安装面的负压应力和结构变形,降低抽真空对光束传输稳定性的影响,维护光学系统稳定性。

1.2 真空负压应力补偿器

现有常用于通道环境应力补偿的结构元件为波纹管,又叫波纹补偿器或波纹膨胀节,主要功能除了补偿热胀冷缩应力外,还具有位移补偿、振动衰减、对轴向或径向间隙补偿等功能。这种波纹管适合于通道安装时的轴向或径向间隙补偿,在通道内无真空负压并解锁撑杆锁紧螺母时,可用于实现管道的热胀冷缩应力和结构变形的补偿。

在长度达数十米同时又处在真空负压和大温差环境下使用的激光真空传输通道和光学舱系统中,在激光真空传输通道和光学舱系统内部抽真空的条件下,通道系统 A、B 两端外侧受大气压的“挤压”作用,波纹补偿器撑杆必须锁死才能保证激光传输光路的稳定性;但当温差变化大时,管道热胀冷缩应力又会造成通道“伸长”或“缩短”,造成两端光学舱结构变形引起光束漂移,如图6所示。理论上,可依靠调节撑杆预紧力大小,来适应“热胀”

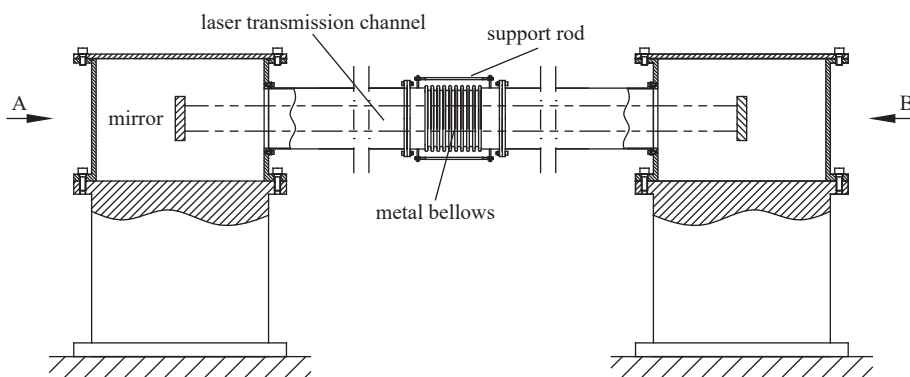


Fig. 6 Metal bellows

图 6 金属波纹管

或“冷缩”应力, 保持光路稳定, 但在光学传输腔体内时而负压、时而常压时, 这个力度是很难把握的。

1.2.1 应力补偿器设计

针对常用波纹补偿器在激光真空传输通道应用中存在不足, 设计了真空传输通道应力补偿器。该补偿器由支撑立柱、波纹管外圈、内圈及两端法兰、连接软管构成, 中间为激光真空传输通道, 波纹管一端法兰与激光真空传输通道固定联结, 另一端法兰与支撑立柱联结, 如图 7 所示。

1.2.2 工作原理

真空传输通道应力补偿器利用在气压相同情况下, 相同面积所受压力相同的原理。在设计补偿器时, 波纹管外圈、内圈构成的圆环腔体截面积 S_2 与激光传输通道横截面积 S_1 相等, 安装时将补偿器一端固定约束在地面, 调试用软管将补偿器圆环腔体与真空通道连通, 使得圆环腔体内的气压与激光传输通道内气压相等, 从而实现传输通道在真空负压状态下, 通道 A、B 两端的负压力大小相等, 方向相反, 进一步实现了光学舱左右两侧的外力平衡, 且这种平衡不会因为通道内负压的大小变化而被打破, 达到负压应力自动平衡的效果^[9], 如图 8 所示。

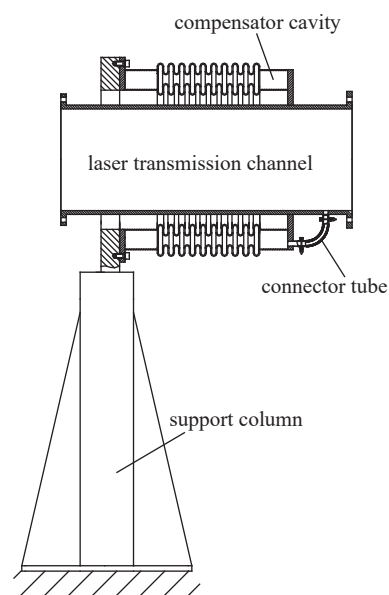


Fig. 7 Structure diagram of vacuum negative pressure compensator
图 7 真空负压补偿器结构图

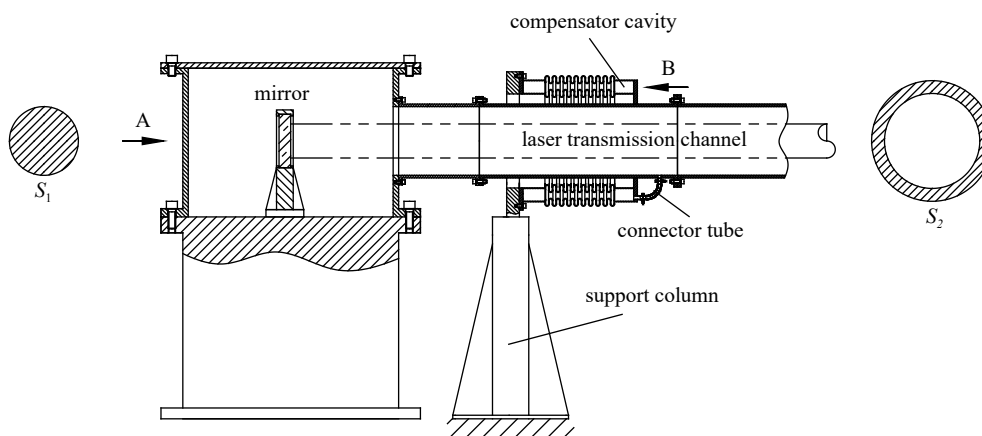


Fig. 8 Operating principle of vacuum negative pressure compensator
图 8 真空负压补偿器工作原理

2 具体应用举例

2.1 无负压应力真空光学舱实际应用效果

无负压应力真空光学舱主要用于光斑和镜面直径大、光路复杂且占地面积较大的强光传输系统中, 因强光传输系统结构较为复杂, 加工精度要求较高。而对于光斑直径不大、镜架口径较小、光路简单、占地面积小的光路, 宜采用常用真空光学舱结构设计。

在具体实践中, 采用无负压应力真空光学舱结构设计, 获得了良好的效果, 如图 9 所示。该实践所涉及的光学舱受负压面积为 15.8 m^2 , 光学舱采取无负压应力真空光学舱结构设计, 镜架安装平台采用 13 个直径为 160 mm 的支撑立柱将其支撑在镜架支撑平台上, 考虑到支撑点较多, 对镜架支撑平台刚度进行了适当加强处理。综合镜架安装平台及镜架等自重对真空负压造成的镜架支撑平台变形的抵消作用后, 实际工况下抽真空对光束传输漂移的影响约为 $5 \mu\text{rad}$, 大幅度提高了光束稳定性; 同比另一个样机项目中, 采用常用真空光学舱结构设计研制的光学舱, 长×宽为 $2.55 \text{ m} \times 1.85 \text{ m}$, 受负压面积约为 4.75 m^2 , 其在实际抽真空状态下, 由于负压造成光学镜架安装平台的变形所带来的光束漂移为 $50 \sim 60 \mu\text{rad}$; 相比之下, 无负压应力真空光学舱对解决负压应力对光学舱内镜架安装平台变形问题具有良好效果和独特作用。



Fig. 9 Vacuum optical cabin without negative pressure

图9 无负压应力真空光学舱

2.2 真空负压应力平衡实现

在具体高能激光光路传输系统中,通常包括激光输入光学舱、光学矫正光学舱、激光输出光学舱等部分。光学舱之间通常通过真空传输通道连接,传输通道和光学舱抽真空条件下,左端应力补偿器密封法兰与支撑立柱上端法兰固定联结,支撑立柱下端法兰通过地脚螺栓与地面固定,当对激光真空传输通道抽真空时,激光输入光学舱的A向侧面对应于应力补偿器B向与内腔体的圆环截面积相等的面积所受的压力相等,从而实现激光输入光学舱左右所受真空压力大小相等、方向相反,进而实现镜架基座保持稳定,实现了光学反射镜及输入激光的稳定。同理,右端矫正光学舱也可以连接真空负压补偿器而在真空负压情况下,实现C、D两端面真空压力大小相等、方向相反,维持了光学矫正光学舱的稳定^[5],如图10所示。

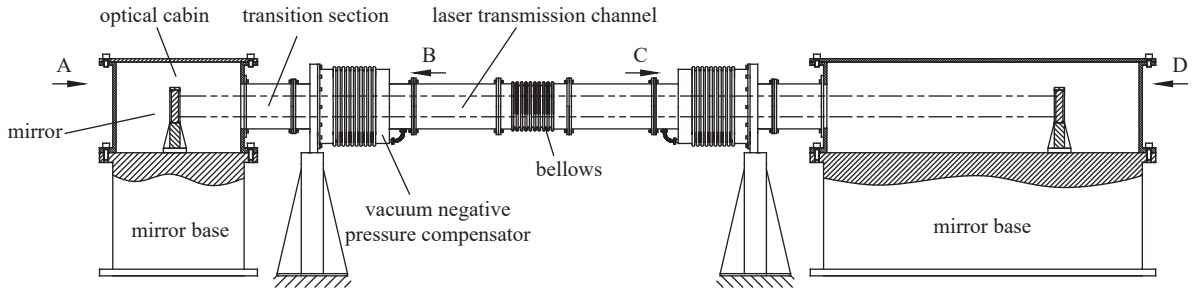


Fig. 10 Principle of vacuum negative pressure stress automatic balance

图10 真空负压应力自动平衡应用

例如:真空传输通道内径400 mm,当光学舱体受负压力不对称时,密封端面受到1.25 t的外力,这个外力直接作用在光学舱体上,对整个光机系统稳定性也是不可忽略的。

2.3 热胀冷缩应力补偿实现

当光束传输距离和通道较长时,激光真空传输通道的热胀冷缩效应将是影响光束稳定性的重要因素,导致光束的漂移将难以避免。在真空传输通道和光学舱都为真空且环境温度变化范围也较大的条件下,应力补偿器对热胀冷缩应力造成的结构“伸长”或“缩短”具有自动补偿功能,如前所述,真空负压应力可随真空负压大小实现自动平衡,波纹管左端的光学舱、过渡连接段、补偿器、传输通道主体相互之间为法兰刚性联结,光学舱通过底座置于地面,环境温度较大时,左端应力补偿器一端与地面固定,另一端可自由伸缩,波纹管也可自由伸缩,进而消除了热胀冷缩应力对右端输入光学舱及内部光路影响^[5],如图11所示。

例如:某系统主光路真空传输通道仅直线传输端长度约为30 m(不含矫正光路和发射器内部折转段光路),不锈钢按照膨胀率 $17.5 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 计,当温度变化 20°C 时,热胀冷缩变化量约为10.5 mm,这个变形量对强光光路而言,也难以承受。利用上述原理设计制作的光路真空传输通道应力补偿器已在实际工作中实现了应用,解决了光路系统稳定性问题,如图12所示。

3 结论

在激光系统研究和应用中,激光传输通道和光学舱负压应力、热胀冷缩应力造成的结构变形,是威胁光路传输稳定性的隐形因素,也是造成激光光斑漂移和光束质量下降的主要原因之一。本文研究了真空传输通道及

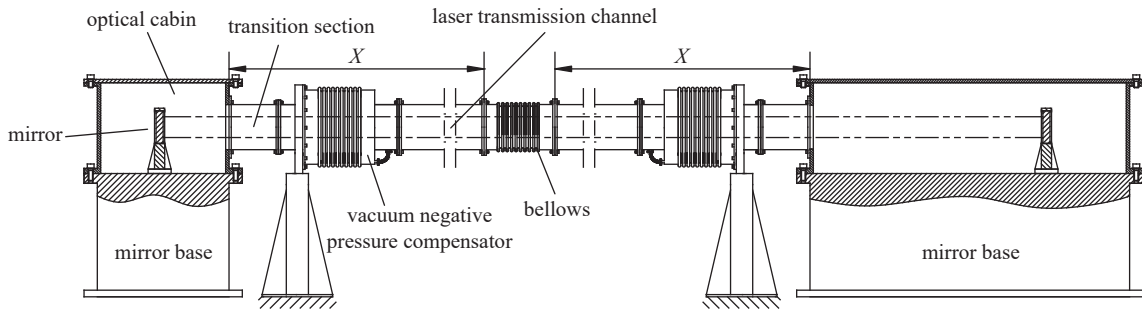
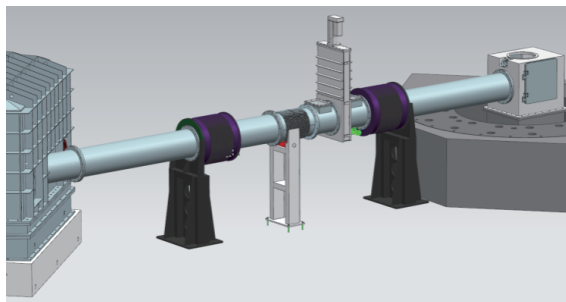
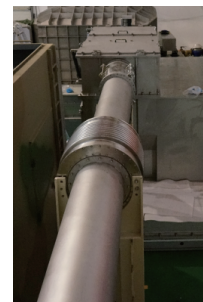


Fig. 11 Stress compensation principle of thermal expansion and cold contraction

图 11 热胀冷缩应力补偿原理



(a) verification device 3D diagram



(b) photo of physical objects

Fig. 12 Practical application of stress compensation principle of thermal expansion and cold contraction

图 12 热胀冷缩应力补偿原理应用

光学舱应力补偿技术, 设计了无负压应力真空光学舱、真空负压应力补偿器、激光真空传输通道及不同情况下的补偿方法应用^[5], 解决了光学舱负压应力变形、长距离真空传输通道真空负压应力自动平衡, 热胀冷缩应力的自由释放等问题, 达到了光路长时间保持稳定。

该设计技术解决了真空负压和大温差环境下的真空负压应力和热胀冷缩应力的自适应补偿问题和光学舱结构变形抑制问题, 实现了传输通道真空负压应力自动平衡, 实现了大温差环境下的真空负压通道结构热胀冷缩应力的自由释放。利用补偿器并将双层腔体与激光传输真空通道连通, 实现了真空负压应力的自动平衡, 同时波纹管无需加撑杆, 解决了热胀冷缩应力的自由释放问题。

参考文献:

- [1] 刘顺发, 金钢, 柳建, 等. 激光通道传输热特性对远场光束质量的影响[J]. 强激光与粒子束, 2004, 16(6): 703-706. (Liu Shunfa, Jin Gang, Liu Jian, et al. Effect of thermal characteristics in laser transmitting channel on far-field beam quality[J]. High Power Laser & Particle Beams, 2004, 16(6): 703-706)
- [2] 吕可, 郑威, 华卫红. 激光内通道传输气体热效应对光束质量的影响[J]. 光学工程, 2012, 39(9): 119-124. (Lü Ke, Zheng Wei, Hua Weihong. Thermal effects on laser beam quality in the inner channel propagation[J]. Opto-Electronic Engineering, 2012, 39(9): 119-124)
- [3] 孙运强, 习锋杰, 陈洪斌, 等. 内通道气帘的设计与分析[J]. 激光与光电子学进展, 2011, 48: 051404. (Sun Yunqiang, Xi Fengjie, Chen Hongbin, et al. Design and analysis on gas curtain of beam path indoor[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2011, 48: 051404)
- [4] 鲜玉强, 刘雪婷, 陈永亮, 等. 无负压应力真空光学舱: 113981409B[P]. 2022-03-15. (Xian Yuqiang, Liu Xueting, Chen Yongliang, et al. Non-negative pressure stress vacuum optical cabin: 113981409B[P]. 2022-03-15)
- [5] 鲜玉强, 陈永亮, 刘雪婷, 等. 真空通道的应力补偿装置、激光真空传输通道及补偿方法: 115037367B[P]. 2022-11-01. (Xian Yuqiang, Chen Yongliang, Liu Xueting, et al. Stress-compensation device for vacuum channel, laser vacuum transferring channels and compensation method: 115037367B[P]. 2022-11-01)