

高压氧气黄铜管路连接件设计与应用

孙志强, 李忠华, 程树伟

(西安航天动力研究所, 陕西 西安 710100)

摘 要: 根据高压氧气特殊的化学性质和高压氧气供应系统使用要求, 参考航天 QJ2889 系列 37° 导管连接件标准, 设计了 DN4, DN10 和 DN20 的黄铜球头、焊接直通等连接件, 并进行了强度校核、强度及密封性试验。系统建设后经正式应用验证, 确认黄铜连接件设计满足了高压氧气系统使用要求, 解决了黄铜管路与不锈钢管路互连的技术难题。

关键词: 高压氧气系统; 黄铜管路连接件; 设计应用

中图分类号: V434-34 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-9374 (2015) 02-0098-04

Design and application of adapting piece for high-pressure oxygen brass tube

SUN Zhi-qiang, LI Zhong-hua, CHENG Shu-wei

(Xi'an Aerospace Propulsion Institute, Xi'an 710100, China)

Abstract: According to the chemistry characteristics of high-pressure oxygen and its supplying system requirements, some brass balls of DN4, DN10, DN20 and straight adapting pieces were designed by referring to Chinese space industry standard QJ2889 series about the adapting piece for 37° conical surface tube. Strength assessment, strength test and encapsulation test of specimens were made. The brass tube adapting pieces were applied in the high-pressure oxygen supplying system and the result satisfied the requirements of the high-pressure oxygen system. The difficulty of connection between brass tube and stainless steel tube was solved.

Keywords: high-pressure oxygen supplying system; brass tube adapting piece; design and application

0 引言

铜及铜合金与高压氧气具有良好的相容性, 对氧气流速限制较低, 冲压发动机试验台高压

氧气系统大量使用 DN4, DN10 和 DN20 黄铜管件, 用于高压氧气储罐充气、排气及测试引压管等, 黄铜管路的可靠连接方式成为系统设计中的技术难点。

收稿日期: 2014-09-11; 修回日期: 2014-11-27

作者简介: 孙志强 (1982—), 硕士, 工程师, 研究领域为冲压发动机介质试验工艺

试验系统中常用的 QJ2889 标准 37° 不锈钢球头、焊接直通等导管连接件具有使用方便、密封可靠等优点, 但如果严格按照 QJ2889 标准尺寸, 只将连接件材质改为黄铜, 则连接件耐压等级只能达到 15 MPa, 不能满足高压氧气系统使用要求。参考航天 QJ2889 系列 37° 导管连接件标准, 重新设计了 DN4, DN10 和 DN20 的黄铜球头、焊接直通等连接件, 并进行了强度校核、强度及密封性试验, 系统建设后经正式应用验证, 确认黄铜连接件设计满足了高压氧气系统使用要求, 解决了黄铜管路与不锈钢管路互连的技术难题。

1 管路连接件设计方案

1.1 管路及连接件材料选择

氧气本身不燃烧, 但有强烈的助燃性, 是一种十分危险的火灾隐患。在大气环境中许多非易燃的物质, 如不锈钢制造的管件、阀门、容器等, 在高压富氧条件下可以剧烈燃烧。易燃材料更容易被点燃而且燃烧的更快、放热更多。氧气火灾的火焰传播通常伴随爆炸效果, 形成破坏力极大的爆燃。

国内外关于氧气管道系统的各类标准, 如 GB16912-2008《深度冷冻法生产氧气及相关气体安全技术规程》、IGC 欧洲工业气体协会《氧气管道系统规范》等文件, 对氧气管道的材料和氧气管道内的氧气流速有严格的限制。GB16912 规定, 压力大于 15 MPa 时, 不允许使用碳钢管道, 奥氏体不锈钢管道内氧气流速不得大于 4.5 m/s; 而铜和铜合金 (含铝铜合金除外)、镍及镍合金在 21 MPa 下无流速限制。

冲压发动机试验台高压氧气系统的设计压力 30 MPa, 最大使用压力达到 21 MPa。系统中高压氧气储罐在充气、排气时难以控制管路内高压氧气流速, 无法采用对氧气流速有严格限制的不锈钢管道。H62 黄铜含铜 60.5%~63.5%, 抗拉强度 390 MPa, 在黄铜合金中具有较好的强度和加工性能。综合考虑系统安全性、成本等因素, 冲压试验台高压氧气系统 DN4, DN10 和 DN20 的高压氧气管路及管路连接件, 采用 H62 黄铜进行加工制作。

1.2 管路连接件设计方案

黄铜管件需要与阀门、过滤器等产品进行对接, 通常这些设备预留的接口都是按照不锈钢的强度设计的, 黄铜强度较不锈钢低, 无法使用黄铜连接件直接与设备连接, 必须使用不锈钢转接件进行转接。黄铜管件与不锈钢转接段必须采用可反复拆卸的连接方式以方便设备维护和更换, 同时黄铜管件之间的连接也必须采用可反复拆卸的连接方式, 以方便管路处理和系统使用过程中的维修更换。

国内氧气使用一般集中在冶金、化工、焊接、医疗等领域, 但使用压力一般不高于 4 MPa。化工、航天等部门高压氧气的使用则一般不高于 15 MPa, 国内市场上高压氧气管件及连接件十分缺乏, 对于铜管路与不锈钢管路的连接一般采用锥形套管的方式, 即将紫铜或黄铜管一端加热扩成锥形口, 用外套螺母压紧在不锈钢锥形接头上, 利用铜材料质地较软的特点进行密封。这种连接方式降低了铜管锥形口处的管壁厚度, 反复拆卸后极易断裂, 不能满足高压氧气系统的使用要求。

针对高压氧气系统的使用要求, 设计了黄铜管路连接件。表 1 为连接件关键尺寸。图 1 为黄铜管路连接件示意图。

表 1 黄铜管路连接件关键尺寸

Tab. 1 Key values of brass tube adapting piece

规格	内径/ mm	外径/ mm	连接 螺纹	球面半 径/mm	锥面开 口直径/ mm
DN4	4	9	M16×1.5	5.25	11.7
DN10	10	18	M30×2	15.25	21.7
DN20	20	30	M42×2	16	34

黄铜管路连接件设计参考航天 QJ2889 系列 37° 导管连接件标准, 设计压力 30 MPa。连接件由 37° 黄铜焊接直通、黄铜外套螺母和黄铜球头组成。使用时将焊接直通、球头分别与黄铜管路焊接后, 旋紧外套螺母与焊接直通, 即可实现管路连接和密封。将不锈钢转接件加工成相同尺寸

的焊接直通或球头，即可与黄铜连接件互相连接，解决了黄铜管路与不锈钢管路互连的技术难题。

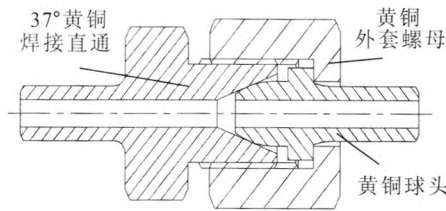


图 1 黄铜管路连接件示意图

Fig. 1 Schematic diagram of brass tube adapting piece

2 连接件强度和密封性能校核

2.1 强度校核

由图 1 可见，连接件耐压强度最薄弱处位于焊接段，此处内、外径与黄铜管路相同。根据公式 (1)：

$$\sigma=\frac{p_g \cdot d}{2\delta} \leq [\sigma]$$
 (1)

式中： p_g 为公称压力； d 为管路内径； δ 为管壁厚度； $[\sigma]$ 为许用应力。

根据公式 (2)

$$[\sigma]=\sigma_b/n$$
 (2)

式中： σ_b 为抗拉强度； n 为安全系数。

根据连接件的内径、壁厚及设计压力，可计算连接件的许用应力，通过与 H62 黄铜抗拉强度的比值，计算连接件设计的安全系数^[9]。

表 2 黄铜管路连接件强度校核

Tab. 2 Strength check of brass tube adapting pieces						
规格	d/mm	外径/mm	δ/mm	σ _b /MPa	σ/MPa	n
DN4	4	9	2.5	390	24	16.25
DN10	10	18	4	390	37.5	10.4
DN20	20	30	5	390	60	6.5

根据表 2 计算结果，各规格黄铜管路连接件设计安全系数最低为 6.5，高于管道设计安全系数 3~6 的基本要求，可以保证设计压力下的使用安全。

2.2 密封性能校核

采用理论计算结合数值模拟分析的方法，对黄铜管路连接件进行了密封性设计复核。复核结果表明连接件设计合理，能够满足设计压力下的使用要求。

图 2 和图 3 分别为 DN20 黄铜管路连接件数值模拟计算的连接件接触截面 Mises 应力和接触压力分布图。

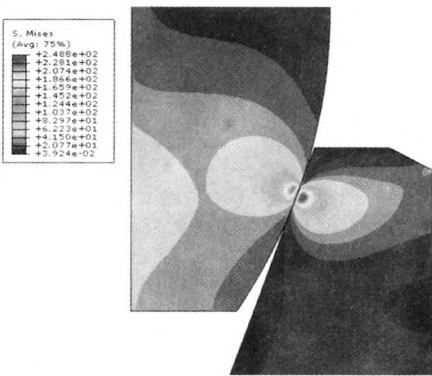


图 2 接触面 Mises 应力分布云图

Fig. 2 Mises stress distribution of sealing surface

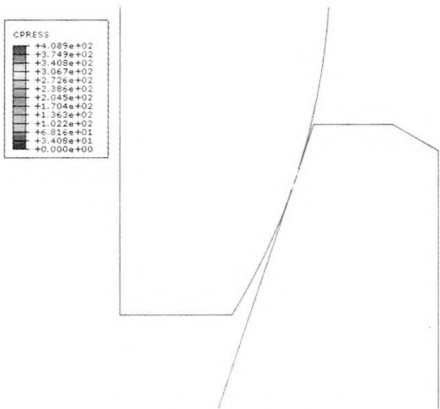


图 3 接触压力分布图

Fig. 3 Contact pressure distribution of sealing surface

图4 和图 5 分别为最大接触应力和 Mises 应力随轴向力变化的趋势曲线图以及接触长度随轴向力变化的趋势曲线图。Mises 应力是基于剪切应变能的一种等效应力，即塑性材料校核时的屈服应力。由图 4 和图 5 可见，当轴向力达到 2 000 N 左右时最大接触压力可达 200 MPa，此时球形接头与焊接直通 37°锥面接触面长度只有 0.13 mm，可保证在 30 MPa 使用压力下形成可靠

的线密封; 此时最大 Mises 应力值为 124 MPa, 小于 H62 黄铜的屈服强度, 不足以使黄铜球头或焊接直通结构发生塑性变形, 即黄铜管路连接件可以进行反复拆卸, 并在使用压力下保持良好的密封性能。

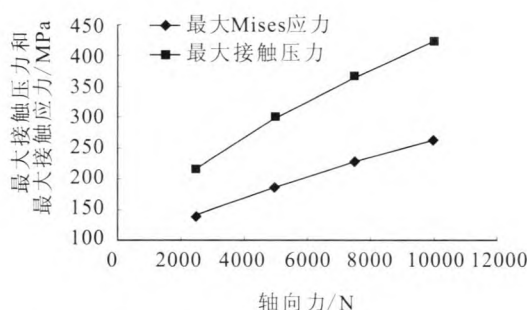


图 4 最大接触压力和 Mises 应力随轴向力的变化趋势

Fig. 4 Max contact pressure and Mises stress vs axial strength

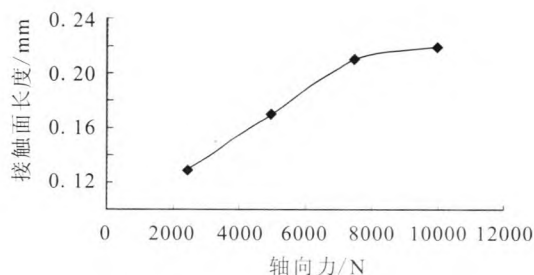


图 5 接触面长度随轴向力的变化趋势

Fig. 5 Variation of sealing surface length with axial strength

3 强度及密封性试验

黄铜连接件设计完成后, 设计加工了试验件, 通过变径将 DN4, DN10 和 DN20 连接件互相连接, 并在一端预留打压接口, 另一端使用堵头进行封堵。试验件构造如图 6 所示。

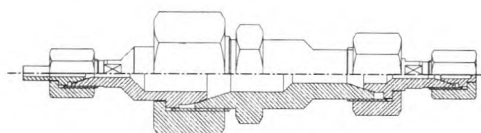


图 6 试件连接示意图

Fig. 6 Schematic diagram for link of test specimen

使用水打压机进行 1.5 倍使用压力水压强度试验。试验过程中对试件进行了反复的打压和拆卸共 20 次, 以验证反复拆卸时密封面挤压、摩擦对连接件密封性能的影响。进行了快速升压和降压试验, 打压压力迅速上升至 45 MPa, 然后快速泄压, 重复 5 次, 其中最后一次快速上升到 60 MPa, 以验证介质冲击和超压情况下连接件的安全性。

试验过程中, 试件未出现泄漏和明显变形; 分解检查试件各密封面, DN10 和 DN20 连接件未发现明显损伤, 但 DN4 连接件黄铜球头凸缘与焊接直通之间的间隙消失, DN10 连接件焊接直通和外套螺母上的 M30×2 螺纹均有一定变形, 试验结束后用手很难旋紧。根据试验结果, 将 DN4 连接件焊接直通锥面开口直径由 13 mm 缩小到 11.7 mm, 将 DN10 连接件焊接直通上的 M30×2 螺纹长度和外套螺母长度加长 5 mm, 改善了螺纹受力情况。

4 使用及维护情况

黄铜连接件通过焊接方式与黄铜管路连接, 焊接后进行了 45 MPa 水压强度试验, 并根据标准要求进行了脱脂处理, 检查合格后进行安装。黄铜连接件应用于冲压试验台高压氧气系统后, 长期处于 15~21 MPa 高压纯氧环境下, 未出现氧气泄漏情况。使用一年后, 将部分连接件分解, 检查连接件内壁面、密封面及螺纹。经检查, 各规格连接件内壁面光滑无变色, 未发现氧化脱锌现象; 密封面无损伤变形, 螺纹连接可靠。将分解的管路重新安装, 进行了 25 MPa 气检, 用皂泡法检查未发现泄漏。

5 结论

1) 参考航天 QJ2889 系列 37°导管连接件标准, 重新设计了 DN4, DN10 和 DN20 的黄铜球头、焊接直通等连接件, 设计压力 30 MPa。通过强度和密封性校核, 证明连接件设计合理, 强度、密封性满足使用要求。

(下转第 113 页)

参考文献:

- [1] 杨晶晶. 磁场对霍尔推力器低频振荡的影响 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2009
- [2] HOFER R R, GALLIMORE A D. The role of magnetic field topography in improving the performance of high- voltage hall thrusters, AIAA 2002-4111[R]. USA: AIAA, 2002.
- [3] BEITING E J, POLLARD J E. Electromagnetic emissions to 60 GHZ from a BPT-4000 EDM Hall thruster, IEPC-03-29 [R]. [S.l.]: IEPC, 2003.
- [4] BEITING E J, POLLARD J E, KHAYMS V, et al. Electro-magnetic Emissions to 60 GHZ from a BPT-4000 EDM Hall Thruster, IEPC-03-129[C]// 2003 International Electric Propulsion Conference. Toulouse, France: [s.n.], 2003: 11-18.
- [5] THOMPSON R, GRAY H. The xenon regulator and feed system for electric propulsion systems, IEPC-2005-066 [C] //Proceedings of International Electric Propulsion Conference. Princeton, NJ: [s.n.], 2005: 111-120.
- [6] 赵一男. 霍尔推力器高频电磁辐射的实验研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2009.
- [7] 李自然, 周进, 吴建军. 脉冲等离子体推力器电磁辐射干扰诊断[J]. 高电压技术, 2008, 34(6): 1244-1248.
- [8] BEITING E J, EAPEN X L, POLLARD J E. Electromagnetic emissions from PPS 1350 Hall thruster, IEPC-03-29 [R]. [S. l.]: IEPC, 2003.
- [9] MANZELLA D, SARMIENTO C, SANKOVIC J, et al. Performance evaluation of the SPT-140, IEPC-97-059 [C]// Proceedings of 25th International Electric Propulsion Conference. Cleveland, Ohio: IEPC, 1997: 359-364.
- [10] BEITING E J, GARRET M L, POLLARD J E. Spectral and temporal characteristics of electromagnetic emissions from the BPT-4000 Hall thruster, AIAA-2006-5154[R]. USA: AIAA, 2006.
- [11] BEITING E J, GARRET M L, POLLARD J E, et al. Temporal characteristics of radiated emission from SPT-100 Hall thrusters in the L- S-, and C-bands, IEPC2005-222 [R]. Princeton, NJ: IEPC, 2005.
- [12] BEITING E J, SPEKTOR R, GARRETT M L. Experimental investigation on the origin of the 1~ 8 GHz radiated emission from Hall thrusters, ISPC-2008-070[R]. Crete, Greece: ISPC, 2008.
- [13] BEITING E J, SPEKTOR R, EAPEN X L. On the origin of the L-, S- and C-bands (1 - 8 GHz) Emission from Hall Thrusters, IEPC-2009-072[R]. Ann Arbor, MI: IEPC, 2009.
- [14] BEITING E J. Design and performance of a facility to measure electromagnetic emissions from electric satellite thrusters, AIAA-2001-3344[R]. Salt Lake City: AIAA, 2001.

(编辑: 陈红霞)

(上接第 101 页)

2) 设计试验件进行了水压强度试验和密封性试验, 根据试验结果对设计进行了局部修正, 并投入使用。

3) 系统应用情况表明, 黄铜连接件能够满足 21 MPa 高压纯氧环境下黄铜管件及设备连接要求, 使用方便、密封可靠、能够反复拆卸。

4) 解决了黄铜管道与不锈钢管道的对接问题, 可以在其他高压氧气系统中推广使用。

参考文献:

- [1] 贾德训. 对氧气管道安全问题的探讨[J]. 钢铁技术, 2002 (3): 45-49.
- [2] 崔海莉. 氧气管道安全运行措施的分析[J]. 管道技术与设备, 2010 (4): 15-17.
- [3] 江坚. 氧气管道设计及安装质量控制[J]. 化工设备与管道, 2007, 44(1): 56-59.
- [4] 第一汽车制造厂设备修造分厂生产组. 机械工程材料手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 1970.

(编辑: 王建喜)