

# 钛管全位置氩弧焊接头力学性能数据分析

宋凡<sup>1</sup>, 唐磊<sup>2</sup>, 杨卫国<sup>1</sup>, 周宇浩<sup>2</sup>, 徐晓丹<sup>2</sup>

(1. 上海空间推进研究所, 上海 201112;

2. 上海空间发动机工程技术研究中心, 上海 201112)

**摘要:**为明确工艺件来源和规格因素对焊件性能合格率的作用,对五年来44批次的钛管焊接试验历史数据进行了分析。当生产批次不同时,母材抗拉强度和冲击韧性的波动程度分别可达 $\pm 19.1\%$ 和 $\pm 38.1\%$ ;当批次相同但出自不同根余料时,波动程度分别可达 $\pm 6.2\%$ 和 $\pm 13.6\%$ ;焊接热过程会使性能的均值降低且波动增大,相较而言冲击韧性改变更明显。当工艺件外径逐渐增大时,母材抗拉强度均值基本恒定,而冲击韧性均值逐渐提高,且波动程度先增大后减小;在经历相同焊接热过程后,只有小外径焊件的冲击韧性波动程度明显增大。提出了两类改进建议,一是将工艺件限定在同一根钛管上取材,二是将冲击韧性的合格指标从固定值改为与外径成正比的系列值。

**关键词:**钛管;全位置氩弧焊;力学性能;母材;波动程度

**中图分类号:** TG456.7    **文献标识码:** A    **文章编号:** 1672-9374(2020)04-0097-06

## Data analysis of mechanical performance for all-position TIG joints of Ti tube

SONG Fan<sup>1</sup>, TANG Lei<sup>2</sup>, YANG Weiguo<sup>1</sup>, ZHOU Yuhao<sup>2</sup>, XU Xiaodan<sup>2</sup>

(1. Shanghai Institute of Space Propulsion, Shanghai 201112, China;

2. Shanghai Engineering Research Center of Space Engine, Shanghai 201112, China)

**Abstract:** In order to clarify the effect of the source and specification of process parts on the qualification rate of weld performance, the historical data of all-position TIG joints of Ti tube during recent 5 years and 44 batches were analyzed. When the production batches are different, the fluctuation of the tensile strength and impact toughness for the base metal can reach  $\pm 19.1\%$  and  $\pm 38.1\%$ , respectively. When the tubes are from the same batches but different roots, the fluctuations can reach  $\pm 6.2\%$  and  $\pm 13.6\%$ , respectively. The heat process of welding will reduce the average value of the performance and increase the fluctuation, and the impact toughness will change more obviously. When the outer diameter of the process part gradually increases, the average tensile strength of the base material is constant, while the average impact toughness gradually increases first and then decreases. After experiencing the same heat process of welding, only the impact toughness fluctuations of small-diameter weldments increase signifi-

收稿日期:2019-12-29;修回日期:2020-03-17

基金项目:上海市科学技术委员会资助课题(17DZ2280800)

作者简介:宋凡(1989—),男,硕士,研究领域为空间推进系统激光焊接工艺

cantly. Two types of improvement suggestions are proposed. One is to limit the process parts to the same Ti tube, and the second is to change the qualification index of impact toughness from a fixed value to a serial values proportional to outer diameter.

**Keywords:** Ti tube; all-position TIG; mechanical performance; base metal; fluctuation

0 引言

由于质轻且塑韧性、焊接性和耐热性好,钛管在液推姿轨控动力系统所用的各类管路中占据了主要地位<sup>[1-4]</sup>。对于钛管之间的连接需求,目前一般采用自动全位置氩弧焊的方法来解决<sup>[5-9]</sup>。

在每一种钛管产品的正式焊接前,先用牌号和规格相同的工艺件进行焊接试验。焊后对工艺件接头进行表面成形、内部质量和力学性能检测,当所有指标都满足标准要求时方可焊接产品<sup>[10-16]</sup>。

钛管工艺件一般用当前产品的余料来现场制取,当余料不足时则向其他产品借用。上述方式可能导致工艺件出现生产批次和取材根号混杂的现象,所以有必要明确该类因素对焊接性能的影响程度,若两种材料因素的影响程度较为明显,则可加强相关技术状态的控制力度。此外,对于不同尺寸规格的钛管自动氩弧焊过程,一直存在着力学性能一次合格率有所差异的问题,因此需要通过历史大数据分析来揭示相关原因,为后续的设计、工艺和质量改进打下技术基础。

1 试验方法

钛管材料牌号为 TA1,具体化学成分如表 1 所示。

表 1 TA1 导管主要化学成分  
Tab. 1 Main composition of TA1 tube

单位:Wt%							
成分	Ti	Fe	C	N	H	O	其他
质量比/%	余	0.2	0.08	0.03	0.015	0.18	0.4

钛管工艺件采用平头对接的形式进行装配、定位和焊接,且在焊前须进行酸洗、清洗和烘干等预处理。

每次试验使用同一批次的 18 件钛管工艺件,其中 6 件不进行焊接,直接用于测试母材的力学性能

(分为抗拉强度和冲击韧性两组),另外 12 件两两配套进行焊接,焊后用于测试焊件的力学性能(同样分为两组)。根据航天行业导管焊接技术条件的要求,焊件抗拉强度和冲击韧性的下限值应分别不低于母材对应下限值的 80% 和 40%。

2 结果与讨论

2.1  $\phi 6 \times 1$  mm 钛管

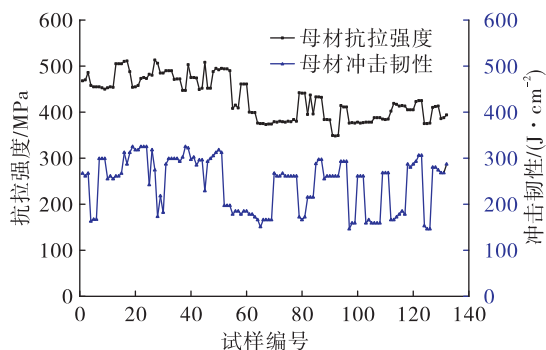
连续测量记录了五年来 44 批次的力学性能试验数据,将这些数据按来源和表征进行分类,并按时间顺序进行罗列,如图 1 所示。

观察图 1(a) 和图 1(b) 可知,当生产批次不同或虽批次相同但出自不同根余料时,母材工艺件的力学性能差别明显,且表现为抗拉强度波动较小而冲击韧性波动较大。若以生产批次为对比对象,则抗拉强度波动程度为  $\pm 19.1\%$ ,冲击韧性波动程度为  $\pm 38.1\%$ ;若以所属根号为对比对象,则抗拉强度波动程度为  $\pm 6.2\%$ ,冲击韧性波动程度为  $\pm 13.6\%$ 。分析上述数据可知,批次因素对母材力学性能的影响程度大于根号因素。

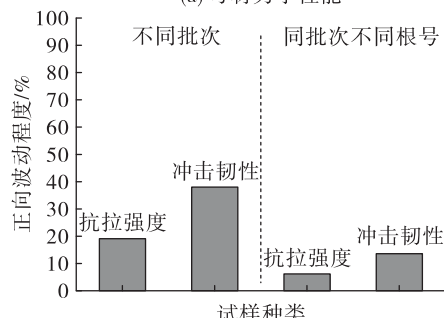
对比图 1(a) 和图 1(c) 可知,钛管在经历焊接热过程后,其抗拉强度的均值和波动程度变化较小,而冲击韧性的均值降低且波动程度增大。从图 1(d) 可以看出,冲击韧性的波动程度从 38.1%/13.6% 增加到了 62.3%/44.4%。

按航天行业导管焊接技术条件的要求考察焊件力学性能的合格情况,得到  $\phi 6 \times 1$  mm 钛管母材与焊接力学性能对比如图 2 所示。

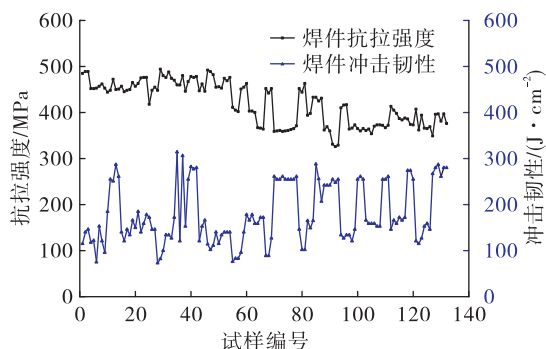
可以看出,五年来只有极少部分焊件的力学性能未达到标准的要求,其中抗拉强度的不合格率为 0,冲击韧性的不合格率为 9.1%,如图 3 所示。根据前述分析可知,钛管母材之间的力学性能有显著差异,此后又引入了焊接热过程的不利作用,所以偶尔会出现冲击韧性下降较多的现象。



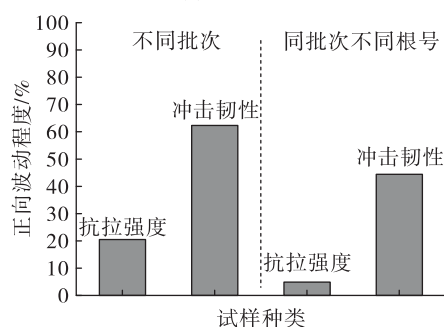
(a) 母材力学性能



(b) 母材力学性能波动程度



(c) 焊件力学性能

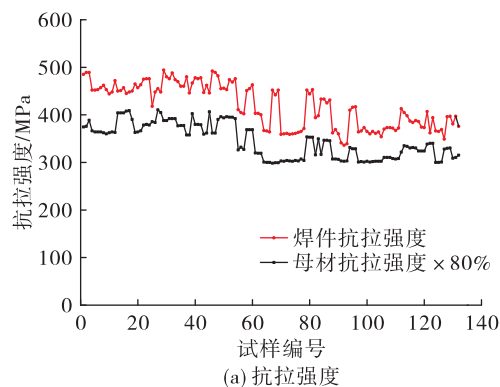


(d) 焊件力学性能波动程度

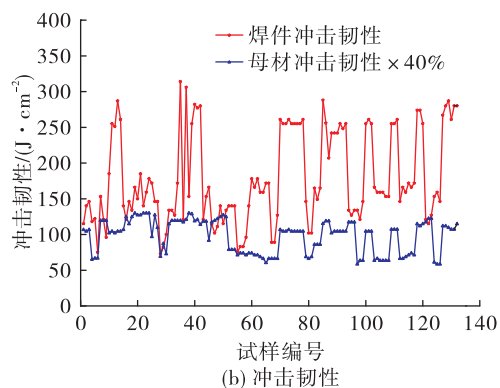
图1  $\phi 6 \times 1$  mm 钛管焊接试验力学性能数据Fig. 1 Mechanical performance data of  $\phi 6 \times 1$  mm Ti tube welding test

为了证明性能的波动确与生产批次和所属根号有关,在同一根钛管上截取制作了24件工艺件,其中12件测试抗拉强度,另外12件测试冲击韧性,所得结果如图4所示。可以看出,当批次和根号因

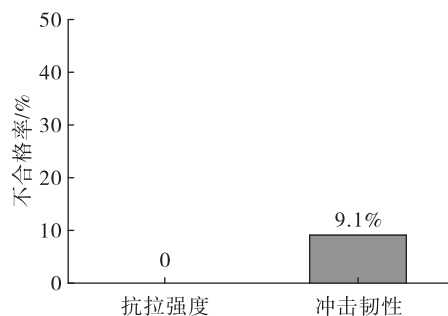
素被剔除后,各项数据的波动程度小于1%,证明钛管原料的力学性能极其稳定。



(a) 抗拉强度



(b) 冲击韧性

图2  $\phi 6 \times 1$  mm 钛管母材与焊件力学性能数据对比情况Fig. 2 Comparison of mechanical performance data of  $\phi 6 \times 1$  mm Ti tube base-metal and weldment图3  $\phi 6 \times 1$  mm 钛管焊接试验合格率Fig. 3 Qualification rate of  $\phi 6 \times 1$  mm Ti tube welding test

综合上述试验和分析结果可知,产品焊前的工艺试验要求有待改进。具体来说,由于每次试验所用的12件工艺件自身就存在着较大的性能差别,因此在随机选定母材和待焊工艺件时,可能出现母材工艺件性能整体优良,而待焊工艺件性能相对较差的情况。在此基础上进行焊接,即使焊接热过程的不利作用较小,由于基础冲击韧性相差悬殊,仍然

可能出现焊件冲击韧性不合格的现象。因此,相应的改进方案是严控工艺件的来源,将其限定在同一根钛管上取材,如此可真实地测出焊接热过程对力学性能的弱化程度,实现焊接试验的本质目的。

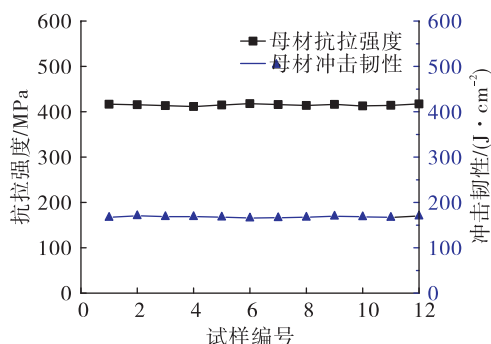


图 4  $\phi 6 \times 1$  mm 钛管同根工艺件力学性能数据

Fig. 4 Mechanical performance data of  $\phi 6 \times 1$  mm Ti tube from the same root

## 2.2 其他外径钛管

本节针对其他规格钛管的试验数据进行分析,以探寻外径因素对钛管母材及焊接接头力学性能的影响规律。

先以壁厚为常量(0.8 mm),外径为变量(6、8、10、12、14 mm),将母材力学性能数据进行罗列,所得结果如图 5 所示。

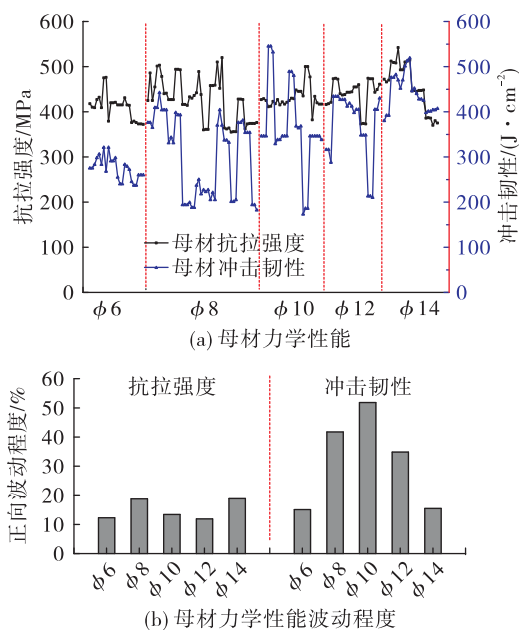


图 5 不同外径钛管母材力学性能数据

Fig. 5 Mechanical performance data of base-metal of Ti tube with different outer diameters

从图 5(a)可以看出,对于任意外径的钛管母材,其力学性能都会因批次、根号因素的变化而波动,且冲击韧性的波动程度同样更大。根据图 5(b)所示的量化值,当钛管外径逐渐增大时,母材抗拉强度的波动程度依次是  $\pm 12.3\%$ 、 $\pm 18.8\%$ 、 $\pm 13.4\%$ 、 $\pm 11.9\%$  和  $\pm 18.9\%$ ,母材冲击韧性的波动程度依次是  $\pm 15.1\%$ 、 $\pm 41.7\%$ 、 $\pm 51.8\%$ 、 $\pm 34.8\%$  和  $\pm 15.5\%$ 。统计可知,抗拉强度的波动现象基本只受批次、根号因素的影响,而冲击韧性的波动现象还额外与尺寸因素有关。具体为当管径介于 8 ~ 12 mm 之间时,批次、根号因素的影响程度会被明显放大。

为了减少批次和根号因素的影响,探讨外径对钛管母材性能的真实作用规律,先将数据极值排除,然后再以壁厚值为常量、外径值为变量,将母材和焊件的性能数据进行罗列,所得结果如图 6 所示。

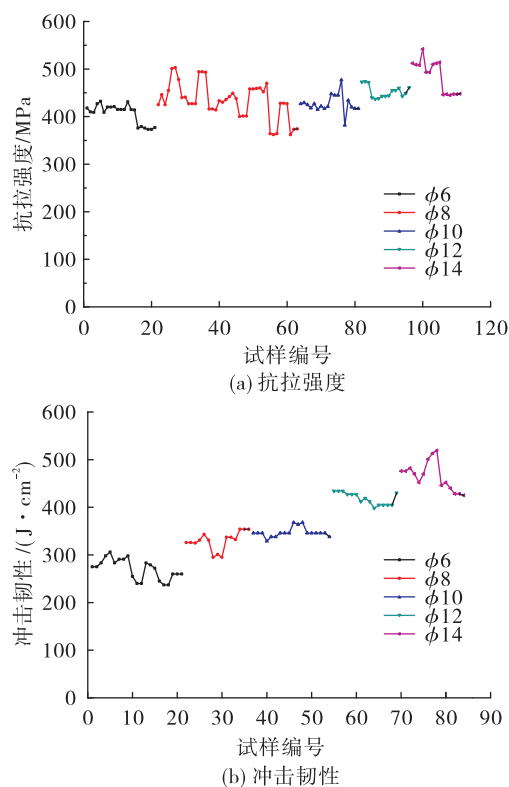


图 6 不同外径钛管母材力学性能数据(去极值)

Fig. 6 Mechanical performance data (without extreme values) of Ti tube base-metal with different outer diameters

由图 6 可知,钛管母材的抗拉强度受外径影响

很小,而冲击韧性受外径影响较大,且后者大致成正比关系。根据材料力学相关研究理论<sup>[17-19]</sup>可知,抗拉强度是与化学成分、组元构成、晶粒形态和加工工艺相关的材料固有属性,与工件结构并无定性关系;而冲击韧性不仅同样与前述四种因素有关,还与载荷大小、缺口造型、工件形状、结构尺寸等因素有较大关系,本次试验母材性能的表现与上述理论相符。将对应的焊件力学性能数据进行罗列,所得结果如图7所示。

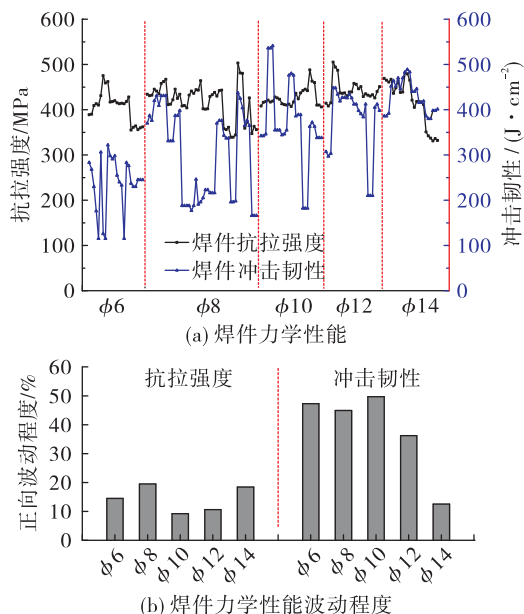


图7 不同外径钛管焊件力学性能数据

Fig. 7 Mechanical performance data of weldments of Ti tube with different outer diameters

对比图5和图7可知,在经历焊接热过程后,焊件抗拉强度的均值和波动程度相比母材同样变化较小,而冲击韧性方面的变化情况较为复杂,具体来说,仅φ6接头发生了可见的均值降低和波动放大的现象,而更大外径的接头基本未受影响。分析认为,在所需熔透的壁厚相同时,不同外径钛管需要的热输入线能量非常接近,而尺寸较小的焊接接头散热效果显著更差,因此其热影响区的晶粒粗大情况更严重,导致冲击韧性劣化的可能性更高,表现为波动程度的大幅提高<sup>[20]</sup>。按航天行业导管焊接技术条件的要求考察焊件力学性能的合格情况,制作了如图8所示的对比图。

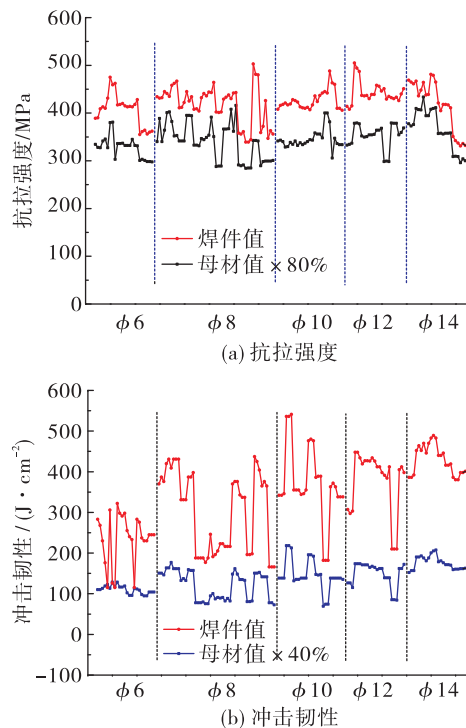


图8 不同外径钛管母材与焊件力学性能数据对比情况

Fig. 8 Comparison of mechanical performance data of Ti tube base-metal and weldments with different outer diameters

可以看出,当钛管外径有别时,焊件抗拉强度的不合格率全部为0,而冲击韧性仅在外径为6的接头中出现12.5%的不合格率,如图9所示。

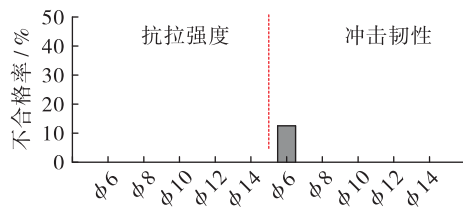


图9 不同外径钛管焊接试验合格率

Fig. 9 Qualification rate of Ti tube welding test with different outer diameters

综合上述试验和分析结果可知,产品焊前的工艺试验要求有待改进。具体来说,对于不同外径的钛管产品,冲击韧性的合格指标不应固定为40%,最好设定成与外径成正比的系列值,如此可更真实地体现出焊接热过程的影响程度,避免相同质量的焊接参数在不同产品上得到迥异的合格率。

针对以上研究结论,得出对应的优化措施,例如将工艺件限定在同一根钛管上取材,将冲击韧性的合格指标从固定值(40%)改为与外径成正比的系列值。在贯彻上述措施后,焊接力学性能试验的一次合格率从72.7%提升至90.9%。

### 3 结论

1)当取材来源足够广泛时,钛管工艺件母材之间的力学性能存在明显差异。具体来说,当生产批次不同时,抗拉强度和冲击韧性的波动程度分别可达 $\pm 19.1\%$ 和 $\pm 38.1\%$ ;当批次相同但出自不同根余料时,两种性能的波动程度分别可达 $\pm 6.2\%$ 和 $\pm 13.6\%$ 。

2)焊接热过程既会使力学性能的均值降低,也会使力学性能的波动程度增大。相较而言,抗拉强度受此影响很小,而冲击韧性受此影响较大。

3)当工艺件外径逐渐增大时,母材的抗拉强度均值和波动程度几乎不变,而冲击韧性均值逐渐提高,且波动程度先增大后减小。在经历同样的焊接热过程后,小外径焊件的冲击韧性波动程度明显增大。

4)可对试验细节进行改进,例如将工艺件限定在同一根钛管上取材,如此可去除比较基准的波动影响。同时建议对试验要求进行细化,例如将冲击韧性的合格指标从固定值(40%)改为与外径成正比的系列值(40%~50%)。

#### 参考文献:

- [1] 牛睿,朱文山,李利亮,等.高分五号卫星姿轨控分系统设计[J].上海航天,2019,36(S2):61-66.
- [2] 周剑敏,魏懿,曹永梅,等.高分三号卫星控制分系统设计与在轨验证[J].航天器工程,2017,26(6):93-98.
- [3] 刘万龙,牛向楠,李全令,等.一种姿轨控发动机地面试验控制系统设计[J].火箭推进,2015,41(2):114-117.
- LIU W L, NIU X N, LI Q L, et al. Design of a ground test control system for attitude and orbital control engine[J]. Journal of Rocket Propulsion, 2015, 41(2): 114-117.
- [4] 张彤,刘婷,王兵骁.高压管路快速连接件设计与应用[J].火箭推进,2017,43(4):76-79.
- ZHANG T, LIU T, WANG B X. Design and application of a quick connector for high pressure pipe[J]. Journal of Rocket Propulsion, 2017, 43(4): 76-79.
- [5] 孙维平,张宇轩,何康康.姿轨控系统高压气路全焊接结构可行性研究[J].航天制造技术,2017(2):23-25.
- [6] 黄哲云,丁国忠,马俊.钛合金导管的全位置氩弧焊工艺[J].上海航天,1999,16(6):56-60.
- [7] 张和平.钛合金薄壁导管钨极氩弧焊工艺[J].航天工艺,1993(5):28-30.
- [8] 刘颖,刘志富.TA16钛合金导管的自动钨极旋转氩弧焊[J].航空制造技术,2009(10):117-119.
- [9] 宋建岭,张晔,黄逸飞,等.小直径薄壁不锈钢导管全位置TIG焊数值模拟[J].焊接技术,2018,47(12):47-51.
- [10] 中国航天科技集团公司第六研究院七一〇三厂.导管焊接技术要求:QJ 2865A—2014[S].北京:国家国防科技工业局,2014.
- [11] 王晓光.X射线检测小径管探伤中的应用分析[J].山东工业技术,2018(19):125.
- [12] 吉楠,蒋浩泽,李为卫,等.管道环焊缝射线检测缺陷容限标准分析[J].石油管材与仪器,2018(6):84-88.
- [13] 刘国增.钛合金导管的涡流检测[J].火箭推进,2011,37(3):48-51.
- LIU G Z. Eddy current testing of Ti alloy ducts[J]. Journal of Rocket Propulsion, 2011, 37(3): 48-51.
- [14] 黄嘉琥.高压厚壁钛管对接焊工艺与焊接接头的性能试验[J].压力容器,1984,1(3):44-47.
- [15] 王建武,刘军生,陈少斌.球面型管路连接件密封性能分析及力学性能测试[J].火箭推进,2010,36(6):36-41.
- WANG J W, LIU J S, CHEN S B. Sealing performance analysis and mechanical property testing of spherical tube connector[J]. Journal of Rocket Propulsion, 2010, 36(6): 36-41.
- [16] 杜大华,穆朋刚,田川,等.液体火箭发动机管路断裂失效分析及动力优化[J].火箭推进,2018,44(3):16-22.
- DU D H, MU P G, TIAN C, et al. Failure analysis and dynamics optimization of pipeline for liquid rocket engine[J]. Journal of Rocket Propulsion, 2018, 44(3): 16-22.
- [17] 冯钊棠,谢仕强,苏腾太.ERW钢管焊缝冲击韧性影响要素分析[J].焊管,2004,27(5):22-24.
- [18] 茹成章,王新虎.HFW石油套管焊缝冲击韧性影响因素分析[J].热处理技术与装备,2010,31(6):33-36.
- [19] 任毅,陈连鹏.J55焊管韧性及其影响因素[J].鞍钢技术,2003(4):29-31.
- [20] 宋健,郑医,徐磊,等.不锈钢导管环焊的组织与性能[J].科技创新与应用,2014(15):108.