

酸洗工艺对铸钢 S-04 和 S-08 氢脆倾向性影响

金作花, 陈玉强, 刘 伟
(西安航天发动机厂, 陕西 西安 710100)

摘 要: 通过酸洗后试件含氢量测定和试样氢脆延迟破坏试验, 对 S-04 和 S-08 两种低铬不锈钢材料在不同化学酸洗工艺参数下产生的氢脆性影响进行了研究。研究表明 2 种低铬不锈钢材料可以采用化学酸洗法去除氧化皮, 且随着酸洗时间的延长、酸洗液温度和浓度的升高, 材料含氢量会增加, 但不会产生脆性断裂。另外, 还确定了适合 S-04 和 S-08 这 2 种材料表面酸洗的工艺规范, 并对盐酸-硫酸混合溶液对基体材料的腐蚀性进行了研究。研究表明该酸洗液浸蚀能力较强, 必须添加缓蚀剂来减轻对金属基体的腐蚀。

关键词: 酸洗工艺; 高强不锈钢; 氢脆; 工艺研究

中图分类号: V261-33 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-9374 (2016) 01-0050-08

Effect of pickling process on hydrogen embrittlement tendentiousness of S-04 and S-08 cast steel

JIN Zuohua, CHEN Yuqiang, LIU Wei
(Xi'an Space Engine Factory, Xi'an 710100, China)

Abstract: The effect of different chemical pickling process parameters on the hydrogen embrittlement of S-04 and S-08 low chromium stainless steel was studied based on the hydrogen content measurement and hydrogen embrittlement delayed destruction test of pickled specimen. The results indicate that chemical pickling can be used for the descaling of the two stainless steel materials, whose hydrogen content may increase with the prolongation of pickling time, and rise of temperature and solution concentration during pickling, but brittle fracture can not occur. Besides, optimal process specifications for the surface pickling of S-04 and S-08 materials were determined with the study on corrosivity of hydrochloric acid-sulfuric acid mixed solution. Therefore, some inhibitor must be added to the mixed solution to reduce the erosion to the metallic matrix because the mixed solution has strong erosion capability.

Keywords: pickling process; high strength stainless steel; hydrogen embrittlement; process study

收稿日期: 2015-01-06; 修回日期: 2015-12-20

基金项目: 航天支撑技术项目(617010429)

作者简介: 金作花 (1978—), 女, 工程师, 研究领域为表面处理电化学

0 引言

在某型号发动机的研制中, 大量采用了铸钢 S-04 和 S-08 等 S 系列高强不锈钢材料。涡轮增压器的离心轮采用铸钢 S-04 材料制造, 涡轮增压器的低压壳体采用铸钢 S-08 材料制造。根据技术要求, 这些材料在铸造热处理后必须去除表面氧化皮。去除氧化皮使用最广泛的方法为机械法和化学酸洗法。马氏体不锈钢和耐热钢工件在热处理后一般不宜采用酸洗的方法去除氧化皮, 以防止材料吸氢和腐蚀。S-04 和 S-08 这 2 种材料在化学酸洗后能产生多大吸氢量? 化学酸洗对材料的力学性能产生什么样的负面影响? 由于对这些问题尚不清楚, 必须进行深入的表面处理研究。

本文研究的主要内容是铸钢 S-04 和 S-08 的表面酸洗, 比较酸洗过程产生吸氢量的大小, 研究酸洗工艺对上述材料产生的氢脆性影响, 确定酸洗质量合格、吸氢影响较小的酸洗溶液、合理的表面清洗工艺规范及有效的除氢措施, 以保证发动机研制和生产的需要。

1 材料特点及现行工艺介绍

不锈钢根据其含铬量的不同可以分为高耐蚀性的不锈钢 (含铬量不小于 18%)、一般耐蚀性的不锈钢 (含铬量为 13%~18%) 和低耐蚀性的不锈钢 (含铬量小于 13%) 3 类。铸钢 S-04 ($\sigma_b \geq 1\,230\text{ MPa}$, 铬含量 12.5%~13.5%) 和铸钢 S-08 ($\sigma_b \geq 930\text{ MPa}$, 铬含量 13%~15%) 都属奥氏体-马氏体过渡型不锈钢, 是低含铬量的不锈钢。它们经热处理后的氧化层中含有大量的镍、铬、铁及其他合金元素和杂质的氧化物。不锈钢材料的高温氧化皮通常采用机械法、化学法或电化学法以及它们的组合来去除。有效和使用广泛的 2 种方法为机械法和化学酸洗法。在生产中, 由于一些零件的尺寸在热处理前已加工到位, 其氧化层的去除只能采用化学酸洗法。

本文中化学酸洗采用的是专用的低铬不锈钢酸洗工艺。该酸洗工艺由除油、松动氧化皮、预浸蚀、化学酸洗及除腐蚀残渣等工序组成。其中松动氧化皮主要是借助氧化剂的作用, 使低价格

铁氧化物等转变为相应的高价氧化物, 转变过程中氧化物的结构发生变化, 附着力降低, 然后通过骤然冷却使氧化物受震动和内应力的作用而纷纷脱落。盐酸-硫酸预浸蚀和化学酸洗是借助强酸的浸蚀、溶解和松动作用, 使氧化皮从金属基体上去除。经化学酸洗后零件表面常覆盖着一层粉状的不溶于酸的腐蚀残渣, 用低压空气加水混合成的气水流进行冲洗。盐酸-硫酸预浸蚀 (总时间 $\leq 10\text{ min}$) 和化学酸洗 (20~60 min) 这 2 道加工工序是材料表面处理后吸氢的主要来源。氢脆主要由进入材料内部缺陷处的氢发生多种形式的反应, 在拉伸应力的作用下产生。

2 金属材料酸洗渗氢理论

零件在酸洗处理过程中, 氢离子在零件上发生还原反应, 生成氢原子, 氢原子很容易向金属内部扩散, 这是因为原子态的氢具有最小的体积, 可以通过金属的晶格间隙、位错、晶界及内部缺陷等进入金属的内部, 进入金属内部缺陷处的氢原子会发生多种形式的反应, 在拉伸应力作用下向应力集中的部位扩散聚集, 由原子变为分子。氢分子聚集的部位会产生体积膨胀效应, 促进零件局部发生塑性变形, 使零件在低于材料屈服强度的应力下就能使局部塑性变形达到临界值而引起氢脆开裂, 导致氢脆现象的发生。氢进入材料内部的过程是原子态的氢在浓度梯度作用下向材料内部扩散的过程^[3]。氢鼓泡、氢致开裂、氢蚀等都是氢脆的不同表现形式。

渗入到金属内部的氢, 在各处的分布是不相同的, 材料中某处的氢浓度与该处的应力状态有关。从热力学的角度出发可导出氢浓度分布与应力大小的关系式, 即:

$$C = C_0 e^{\frac{\sigma_b V_H}{RT}} \quad (1)$$

式中: C 为有应力区域内的氢浓度; C_0 为无应力区域内的氢浓度; σ_b 为应力区内的应力值, 拉应力取正值; V_H 为氢的摩尔体积; R 为热力学常数; T 热力学温度^[2]。

由式 (1) 可知, 拉应力大的区域, 氢在其中富集, 若在该区域内存在大晶界或间隙, 则渗

人的氢复合成氢分子,在其中产生巨大的氢压,这种氢压会使裂纹尖端的应力强度因子非常高,当其超过材料的断裂韧性时,微裂纹就会扩散,成为多种形式断裂的裂纹源。引起裂纹扩散的氢压称为临界氢压 (P_{H_2Cr})。对于电化学反应渗氢,金属内部的平衡氢压 (P_{H_2}) 与析氢过电位 (η) 的关系如下:

$$P_{H_2} = K e^{\frac{2F\eta}{RT}} \quad (2)$$

式中: K 为玻耳兹曼常数; F 为法拉第常数。

由式 (2) 可知,过电位 η 越高,内部平衡氢压越高,当 $P_{H_2} > P_{H_2Cr}$ 时,就会引起内部微裂纹的扩散。如在材料内部有一个 100 埃的间隙,氢渗入其中后,由于原子氢复合成分子氢,在间隙处产生了巨大的氢压,据计算该压力值可达 10^4 大气压,实际测得的结果也在 200~300 大气压的范围内。这样大的内压,会使缝内裂纹尖端的应力强度因子非常大,当其数值超过了材料的断裂韧性时,微裂纹就会扩散,形成裂纹源。可见析氢过电位越高,平衡时内部氢压越高。当其值超过 P_{H_2Cr} 时,导致内部裂纹的扩展。如果氢渗入到金属内部后参与反应,如形成金属氢化物或其中的碳反应生成 CH_4 ,则不一定遵循上述规律^[9]。

3 检测技术及方法

材料氢脆的产生一般具备 3 个条件: 1) 材质对氢敏感; 2) 有拉伸应力存在; 3) 材料中含氢量超过一定值 (该值大小与材质种类、组织结构等因素有关)。不论何种形式的氢脆,其发生的特点都与材料中的含氢量密切相关。含氢量的多少,直接影响到材料性能改变的程度。目前对材料的氢脆性检测通常有 2 种方法: 含氢量检测和延迟破坏试验。

3.1 含氢量检测

对材料含氢量测试的部位说法较多,有的倾向于测材料表层,有的采用剥离表层而测材料轴心的氢含量。由于本文关心的是材料酸洗后的氢含量,而酸洗后的氢大多以表面吸氢为主。况且材料表面吸氢与试样的表面积有极大的关系,为此,本文采用的试样比较薄,大小一致 (10

mm×5 mm×1 mm), 这样测定得到的数据能比较客观地反映材料的表面吸氢情况。

含氢量检测设备是美国 LECO 公司的 RH600 氢测定仪。在氢的测定中,该仪器具有灵敏度高、数据稳定的特点,其检测限可达 0.01 ppm。

3.2 延迟破坏试验

3.2.1 试验原理

高强度钢和结构钢由于吸收氢和施加应力的作用,在小于屈服强度的静载荷下持续一定时间,发生早期的脆性断裂。

3.2.2 拉伸试样

延迟破坏试样的形状如图 1 所示^[9]。

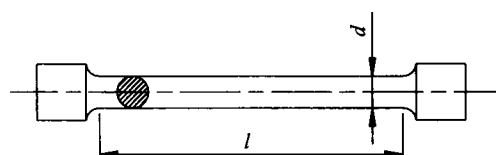


图 1 氢脆延迟破坏试样

Fig. 1 Specimen for hydrogen embrittlement delayed destruction test

3.2.3 试验方法

试样进行延迟破坏试验时所承受的载荷等于未酸洗试样缺口截面积乘以其缺口试样抗拉强度的 75%, 加载后记录断裂时间。未酸洗试样的缺口抗拉强度取 3 个未酸洗试样的平均值。如果 3 个试样的缺口抗拉强度值相差太大,应再取 3 个试样重新试验。

3.2.4 试验结果评定

在规定的静载荷下 200 h 不断裂,则认为该工艺或产品的氢脆性合格。如果有一个试样断裂时间小于 200 h 则认为氢脆性不合格。

4 技术方案及工艺试验

4.1 表面酸洗工艺试验

4.1.1 试片准备

根据试验需要,准备 S-04 工艺试片 48 个,规格 $\Phi 28 \times 1$ mm; S-08 工艺试片 48 个,规格 $\Phi 28 \times 1$ mm。

含氢量检测前，用线切割方法统一将试样切成仪器测量标准试样大小（10 mm×5 mm×1 mm）。

4.1.2 化学酸洗工艺试验

进行试验用的工艺试片和氢脆延迟破坏试样，按下述工艺流程进行表面酸洗（每一组酸洗都用 3 个试片，试验结果取平均值）：

化学除油——热水洗——冷水洗——松动氧化皮——冷水洗——热水洗——水枪冲洗——盐酸-硫酸预浸蚀——冷水洗——化学酸洗——冷水洗——水枪冲洗——低压空气吹干。现行低铬不锈钢化学酸洗工艺规定预浸蚀时间≤10 min，

化学酸洗时间 20~60 min，产品允许返修 2 次。本文试片预浸蚀时间 10 min，化学酸洗时间分别为 2 h，4 h，6 h，8 h 及 16 h。氢脆延迟破坏试样预浸蚀时间分为 10 min 和 30 min 2 组，化学酸洗时间定为 3 h。

4.1.3 试片化学酸洗后的表面状态

经过不同的酸洗时间、酸洗温度和溶液浓度下酸洗的试片，S-04 钢试片表面颜色由金属光泽向略有金属光泽、灰白、灰色转变；S-08 钢试片表面颜色未见明显变化见表 1~表 3。2 种试片均未出现明显的过腐蚀现象。

表 1 酸洗时间对材料表面状态的影响

Tab. 1 Effect of pickling time on material surface state

酸洗时间/h		原始状态	2	4	6	8	16
材料牌号	S-04	金属光泽	灰白	灰白	灰色	灰白	灰白
	S-08	金属光泽	金属光泽	金属光泽	金属光泽	金属光泽	金属光泽

注：试验是在硝酸浓度为 100 g/L；温度为 15 ℃的环境下进行

表 2 酸洗温度对材料表面状态的影响

Tab. 2 Effect of pickling temperature on material surface state

酸洗温度/℃		原始状态	10	20	30	40
材料牌号	S-04	金属光泽	灰白	灰白	灰白	灰白
	S-08	金属光泽	金属光泽	金属光泽	金属光泽	金属光泽

注：试验是在硝酸溶液浓度为 100 g/L；化学酸洗时间为 1 h 的环境下进行

表 3 溶液浓度对材料表面状态的影响

Tab. 3 Effect of solution concentration on material surface state

酸洗浓度/(g/L)		原始状态	70	90	110	130
材料牌号	S-04	金属光泽	灰白,略有金属光泽	灰白,略有金属光泽	灰白	灰白
	S-08	金属光泽	金属光泽	金属光泽	金属光泽	金属光泽

注：试验是在溶液温度为 21 ℃；化学酸洗时间为 1 h 的环境下进行

4.2 表面酸洗后氢含量的测定

由表 4 和图 2 可以看出, 经过不同的酸洗时间 (2 h, 4 h, 6 h, 8 h 及 16 h), S-04 钢试片

表面含氢量有明显的变化, S-08 钢试片表面含氢量没有明显的变化。

表 4 酸洗时间对 S-04 钢和 S-08 钢材料表面含氢量的影响

Tab. 4 Effect of pickling time on hydrogen content on S-04 and S-08 steel surfaces						
时间/h	原始状态	2	4	6	8	16
S-04 钢含氢量/ppm	0.2	0.39	1.1	1.3	1.6	2.0
S-08 钢含氢量/ppm	0.2	0.17	0.50	0.56	0.67	0.60

注: 试片规格 $\Phi 28 \times 1$ mm

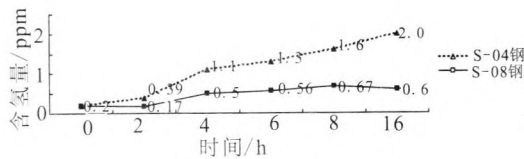


图 2 酸洗时间对 S-04 钢和 S-08 钢材料表面含氢量的影响

Fig. 2 Effect of pickling time on hydrogen content on S-04 and S-08 steel surfaces

由表 5 和图 3 可以看出, 将不同的酸洗液温度下 (10 $^{\circ}\text{C}$, 20 $^{\circ}\text{C}$, 30 $^{\circ}\text{C}$ 及 40 $^{\circ}\text{C}$), S-04 和 S-08 试片表面含氢量均有明显变化。

表 5 温度对 S-04 钢和 S-08 钢材料表面含氢量的影响

Tab. 5 Effect of pickling temperature on hydrogen content on S-04 and S-08 steel surfaces				
温度/ $^{\circ}\text{C}$	10	20	30	40
S-04 钢含氢量/ppm	0.35	0.42	0.74	1.8
S-08 钢含氢量/ppm	0.45	0.78	1.1	1.3

注: 试片规格 $\Phi 28 \times 1$ mm

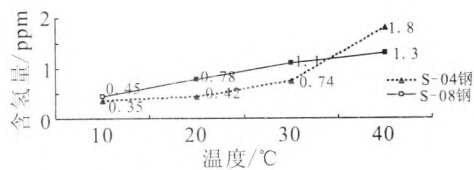


图 3 温度对 S-04 钢和 S-08 钢材料表面含氢量的影响

Fig. 3 Effect of pickling temperature on hydrogen content on S-04 and S-08 steel surfaces

由表 6 和图 4 可知, 不同酸洗液浓度下 (70 g/L, 90 g/L, 110 g/L 及 130 g/L), S-04 和 S-08 试片表面含氢量有逐渐变大的趋势, 但没有明显变化。

表 6 溶液浓度对 S-04 钢和 S-08 材料表面含氢量的影响

Tab. 6 Effect of solution concentration on the hydrogen content of S-04 and S-08 steel surfaces				
溶液浓度/($\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$)	70	90	110	130
S-04 钢含氢量/ppm	0.19	0.48	0.52	0.66
S-08 钢含氢量/ppm	0.41	0.51	0.75	0.96

注: 试片规格 $\Phi 28 \times 1$ mm

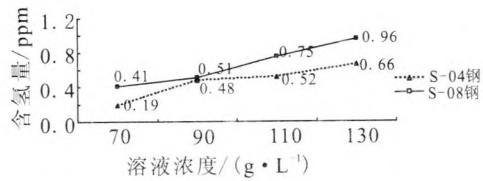


图 4 溶液浓度对 S-04 钢和 S-08 材料表面含氢量的影响

Fig. 4 Effect of solution concentration on hydrogen content of S-04 and S-08 steel surfaces

4.3 表面酸洗后氢脆延迟破坏试验

4.3.1 试样准备

准备两种材料的拉伸试样各 9 件。每种材料各取 3 件进行材料极限抗拉强度的测试, 确定未酸洗试样的极限抗拉强度。其余试样均分为 2 组 (每组每种材料各取 3 件) 按表 7 确定的化学酸洗工艺进行酸洗, 同槽对应酸洗 3 个试片, 以做含氢量的检测。

4.3.2 试验结果

24 ℃范围内进行预浸蚀和化学酸洗, 酸洗条件和结果见表 7。

将 2 种高强不锈钢材料的共 4 组试样在 22~

表 7 S-04 和 S-08 两种材料酸洗试验结果

Tab. 7 Pickling testing results of S-04 and S-08 materials

序号	材料	预浸蚀/min	化学酸洗/h	外观	含氢量/ppm
1	S-04	10	3	灰白	1.9
		30		灰色	1.4
2	S-08	10	3	金属光泽	0.78
		30		灰白, 略有金属光泽	0.34

注: 预浸蚀选择溶液为盐酸-硫酸混合溶液, 酸洗溶液为硝酸

在 RD2-3 金属蠕变及持久试验机上, 将上述 4 组试样加该材料极限抗拉强度的 75% 载荷, 持久 200 h 的试验件均未出现断裂, 参见表 8, 卸荷后观察试样缺口未发现任何缺陷, 所有试样的氢脆延迟拉伸试验合格, 表明 S-04 和 S-08 钢对氢脆不敏感。

表 8 S-04 和 S-08 两种材料拉伸试验结果

Tab. 8 Tensile testing results of S-04 and S-08 materials

材料牌号	件数	P 载荷/N	加载 200 h
S-04	3	24 429	未断裂
S-08	3	22 743	未断裂

4.4 试验结果分析

4.4.1 试验数据分析

通过试片对现行工艺中盐酸-硫酸预浸蚀的条件进行试验。从表 7 中的数据可以看出, S-04 和 S-08 材料还表现出浸蚀 30 min 比浸蚀 10 min 的试片的含氢量略低, 这应与表面腐蚀有关。因为金属材料析氢是原子态的氢在浓度梯度作用下向材料内部扩散的过程, 因此就存在氢含量从材料表面向基体内部有递减的现象。金属材料在酸性溶液作用下, 表层最先被腐蚀、疏松、溶解, 残留的灰质被后续的清洗去除干净。材料原始表面已受到损伤, 材料的含氢量也受到影响, 但不同材料表现出的程度不同。材料表面氢含量与腐蚀溶解程度的关系需进一步研究。

从表 8 中的数据可以看出, 2 种材料的延迟拉伸试验结果均为合格。试样在经过 200 h 载荷试验后, 未发生断裂, 也未发现裂纹。从而说明在现行工艺规程许可的预浸蚀 30 min, 化学酸洗 3 h 条件下, S-04 和 S-08 两种材料的含氢量都小于它们的临界氢浓度, 因为在延迟拉伸试验中试件没有产生氢脆断裂。临界氢浓度需要用慢拉伸试验法确定, 本文不作探讨。同时这 2 种材料还表现出浸蚀 10 min 比浸蚀 30 min 的试片的含氢量略高, 但增加的幅度不大, 只多出零点几 ppm, 都在一个数量级, 又由于拉伸试验周期较长, 因此未对 2 种材料预浸蚀 10 min, 化学酸洗 3 h 条件下的试样进行延迟拉伸试验。

对盐酸-硫酸预浸蚀, 硝酸化学酸洗试样外观观察, 发现不论是预浸蚀, 还是化学酸洗, 由于都是强酸性介质, 对金属都会产生一定的腐蚀, 因此在产品生产中不仅要考虑酸洗工艺中的氢脆倾向问题, 同时还要避免零件表面显著腐蚀现象的产生。从表 1~表 3 和表 7 可以看出: S-08 比 S-04 耐腐蚀; 酸洗时间、酸洗温度及溶液浓度变化对 S-08 表面状态影响不大, 但预浸蚀时间长的 S-08 试样表面颜色有明显变化。说明盐酸-硫酸混合溶液对 S-08 的浸蚀能力要明显强于硝酸溶液。由前面得到的 S-08 比 S-04 耐腐蚀结论以及表 1 和表 7 可以看出, 盐酸-硫酸混合溶液对 S-04 和 S-08 的浸蚀能力要明显强于硝酸溶液。

从图 2~图 4 可以看出, S-04 和 S-08 材料进行酸洗时, 随着酸洗时间的延长、酸洗液温度的升高、酸洗液浓度的增加, 材料的含氢量会有所增加, 但增加的幅度不大。

4.4.2 控制氢脆的方法

这 2 种材料对酸洗渗氢不是很敏感, 但对于薄壁零件, 还是要重视的。可以从 3 个方面着手减轻材料的氢脆: 一是化学酸洗前消除或降低材料因机械加工带来的内应力; 二是化学酸洗过程中抑制原子氢对材料内部的渗入; 三是化学酸洗后低温除氢热处理, 消除或降低材料内部氢含量。具体可通过以下措施降低产生氢脆的可能性。

4.4.2.1 消除零件的内应力

材料内应力大的区域在进行化学酸洗处理工序时, 零件表面容易渗氢。因此, 在进行这些工序之前, 对机械加工的零件应进行消除应力处理, 或让表面呈压应力状态。在不影响材料性能的前提下, 通过低温热处理是降低零件内应力的有效方法。该方法既可以最大限度地消除应力, 同时又不影响材料的硬度。一般是在 200~240 ℃ 下保温 1~3 h, 强度级别高的材料在 150~180 ℃ 下保温 5 h 以上^[1]。

4.4.2.2 控制氢的生成

氢的产生多是在水溶液中经电化学还原反应所致。零件在酸洗时, 溶液中的氢离子被还原成氢原子引起渗氢。为避免渗氢, 就应避免减少氢的还原。采用阳极除油、酸洗溶液中添加缓蚀剂、降低析氢过电位等都有利于减少氢的渗入。在实际操作中, 不允许长时间 (超过工艺规定时间) 浸泡, 防止造成人为的大量渗氢。当零件的氧化皮过厚时, 也可以采用喷砂的方法加以去除。在实际中, 视零件表面具体状态采用相应的处理方法, 可真正达到减少渗氢的目的。

4.4.2.3 除氢热处理

进行化学酸洗处理工序后, 零件表面总会有不同程度的渗氢现象, 根据零件的用途, 决定是否需要进行除氢热处理, 以满足零件的使用功能^[9]。

在一定温度下加热零件并保温一段时间, 使渗入到材料内部的氢再扩散出来, 形成氢气逸出。这样可以在一定程度上减少材料内部的氢含

量。对于有些产品薄壁 ($D \leq 1 \text{ mm}$)、弹性、高强度的零件, 可在酸洗后进行除氢热处理, 避免酸洗过程对材料的氢脆影响, 同时提高产品质量和可靠性。除氢时保温时间的长短与材料的强度有关, 材料强度越高, 保温时间越长。一般高强度钢的除氢热处理规范与除氢热处理的工艺规范相同, 除氢温度: 190~210 ℃, 时间具体见表 9。

表 9 低温除氢热处理工艺时间
Tab. 9 Time duration for low temperature dehydrogenization heating processing

极限抗拉强度 R_m/MPa	除氢时间/h
$1\ 050 < R_m < 1\ 450$	8
$1\ 450 < R_m < 1\ 800$	18
$R_m > 1\ 800$	24

有关资料表明: 酸洗后在室温下放置 2~3 个月进行自然时效也可达到消除和避免氢脆的目的, 通过在室温下长期停放, 将氢脱出, 使其恢复塑性, 可避免氢脆的产生。

对于酸洗后电镀, 镀后至开始除氢之间间隔时间越长, 镀层中氢向钢基体内扩散的数量可能越多, 从而引起氢脆破坏的危险越大。所以原则上是镀后应立即除氢。新的国际标准规定“最好是在镀后 1 h 之内, 但不迟于 3 h”开始除氢热处理^[2]。但考虑生产工序周转, 参照国外同类标准, 规定了 $\sigma_b < 1\ 300 \text{ MPa}$ 的钢件在 10 h 之内和 $\sigma_b \geq 1\ 300 \text{ MPa}$ 的钢件在 4 h 之内进行除氢处理的规定是合理和可行的^[3]。

5 结 论

综合上述验证试验和分析, 本文给出了结论:

- 1) 对 S-04 和 S-08 材料进行酸洗时, 随着酸洗时间的延长、酸洗液温度的升高、酸洗液浓度的增加, 材料的含氢量会有所增加, 但不足以产生脆性断裂, 这说明这 2 种材料对本文规定的酸洗工艺的氢脆倾向不明显。

2) 在本文规定的工艺流程中, 盐酸-硫酸混合溶液对 S-04 和 S-08 的腐蚀能力要明显强于硝酸溶液, 因此, 盐酸-硫酸混合溶液中的缓蚀剂-六次甲基四胺必不可少, 它可以降低金属的析氢过电位, 同时还可减轻溶液介质对金属基体的腐蚀程度。

3) 严格控制预浸蚀和化学酸洗时间, 可有效控制氢含量, 特别是盐酸-硫酸预浸蚀的时间, 目前文件中预浸蚀和酸洗工序规定如下: 盐酸-硫酸预浸蚀时间 3~5 min (总时间 ≤ 10 min); 化学酸洗时间 20~60 min; 温度为室温 (正常生产时, 夏季酸洗槽液最高温度可达到 35 $^{\circ}\text{C}$)。

上述参数可以满足铸钢 S-04 和 S-08 材料的化学酸洗要求。本文研究的工艺方案已纳入工艺文件, 经过了产品的生产实践, 并在发动机热试车中得到了检验。

参考文献:

- [1] 费敬银, 梁国正. 前处理对金属材料氢脆性能的影响及其控制措施[J]. 2005 (11): 24-26.
- [2] BROOM D P. 储氢材料: 储存性能表征[M]. 刘永锋, 潘洪革, 高明霞, 等译. 北京: 机械工业出版社, 2013.
- [3] 庄东汉. 材料失效分析[M]. 上海: 华东理工大学出版社, 2009.
- [4] PEREZ N. 电化学与腐蚀科学[M]. 朱永春, 曹中秋, 译. 北京: 化学工业出版社, 2012.
- [5] 于康, 谢荣华, 陈晓江. 表面张力贮箱电子束焊接工艺研究[J]. 火箭推进, 2015, 41(5): 89-94.
YU Kang, XIE Ronghua, CHEN Xiaojian. Study on electron beam welding process for surface tension tank [J]. Journal of rocket propulsion, 2015, 41(5): 89-94.
- [6] 包耳, 田绍洁. 真空热处理[M]. 辽宁: 辽宁科技出版社, 2013.

(编辑: 马 杰)

(上接第 49 页)

槽几何结构尺寸与密封环液膜压力和剪切应力之间的关系, 由此得到了高性能旋转动密封环设计准则, 采用该设计准则设计、制造的高性能旋转动密封环通过了坦克专用传动系统密封试验台密封性能和密封可靠性试验, 高性能旋转动密封环密封性能实测结果满足设计和使用要求, 由此表明, 采用 ANSYS 软件平台数值仿真分析与计算高性能旋转动密封环流场的数学模型是合理和正确的, 由数值仿真结果研究得出的高性能旋转动密封环设计准则是正确的。

参考文献:

- [1] 刘艳梅, 孙扬, 宋鸿达. 某涡喷发动机密封环研制[J]. 推进技术, 1999, 20(6): 45-47.
- [2] 李闪, 张宏壮, 施江天, 等. 重载车辆用填充 PTFE 材料密封环[J]. 机械工程材料, 2003, 27(2): 50-51.
- [3] 崔玉瑛. 履带式钻车涨圈连接的改进[J]. 工程机械,

1989 (5): 47-51.

- [4] 韩鹏, 郭二军, 王丽萍, 等. 涨圈材料弹性模量及横向断裂韧性的研究[J]. 黑龙江冶金, 2007 (7): 1-3.
- [5] 彭拾义. 旋转密封装置[M]. 北京: 国防工业出版社, 1976.
- [6] 宫燃. 传动装置动密封环失效分析及试验研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2008.
- [7] 李涛. 涨圈型旋转密封装置及其性能研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2007.
- [8] 李宝彦, 李淑华, 马新民, 等. 高压旋转密封的研制与应用[J]. 润滑与密封, 2003 (6): 71-72, 75.
- [9] 胡纪滨, 姜超, 郭晓林. 胀圈旋转密封运动状态分析与实验研究[J]. 北京理工大学学报, 2007, 27(11): 965-968.
- [10] 马莹, 王良. U-E 密封设计研究 [J]. 火箭推进, 2015, 41 (3): 66-72.
MA Ying, WANG Liang. Design research of U-E-type metal sealing [J]. Journal of rocket propulsion, 2015, 41 (3): 66-72.

(编辑: 马 杰)