

文章编号: 1003-1480 (2022) 03-0010-04

# PH13-8Mo沉淀硬化不锈钢在航天火工装置中的应用

唐科, 李岩, 胡振兴, 吴会强

(北京宇航系统工程研究所, 北京, 100076)

**摘要:** 为解决航天火工装置中常用高强钢存在易氢脆、裂纹敏感等问题, 研究了回火温度分别为 540°C 及 595°C 2 种热处理制度下 PH13-8Mo 沉淀硬化不锈钢的力学性能和抗爆炸冲击能力。测试发现回火温度 540°C 状态的 PH13-8Mo 钢具有较高的强度和较好的冲击韧性, 能够代替 30CrMnSiA 或者 30CrMnSiNi2A 等常用高强钢材料。回火温度 595°C 状态的 PH13-8Mo 钢强度相对于回火温度 540°C 状态有所降低, 但冲击韧性进一步提高, 具有优异的抗爆炸冲击能力, 适用于爆炸冲击防护要求高、承载能力要求相对较低的环节。

**关键词:** 航天火工装置; 沉淀硬化不锈钢; 力学性能; 抗爆炸能力

中图分类号: TJ450.4 文献标识码: A DOI: 10.3969/j.issn.1003-1480.2022.03.003

## Application of PH13-8Mo Precipitation Hardening Stainless Steel in Aerospace Initiating Explosive Device

TANG Ke, LI Yan, HU Zhen-xing, WU Hui-qiang

(Beijing Institute of Astronautical Systems Engineering, Beijing, 100076)

**Abstract:** In order to solve the problems such as hydrogen embrittlement and crack sensitivity of high-strength steel commonly used in aerospace initiating explosive device, the mechanical properties and explosion impact resistance of PH13-8Mo precipitation hardening stainless steel, which was heat treated under 540°C and 595°C tempering temperature were evaluated. It is found that PH13-8Mo steel under 540°C tempering temperature has high tensile strength and good impact toughness, it can replace 30CrMnSiA or 30CrMnSiNi2A. The strength of PH13-8Mo steel treated under 595°C tempering temperature is lower than that under 540°C tempering temperature, but the impact toughness is further improved, which shows the excellent explosion impact resistance. It is suitable for links with high explosion impact protection requirements and relatively low bearing capacity requirements.

**Key words:** Aerospace initiating explosive device; Precipitation hardening stainless steel; Mechanical properties; Explosion resistance

针对航天型号的特殊需求和使用环境, 航天火工装置内部承载零件通常采用高强钢为材料, 高强钢需要具有承载能力高、低氢脆、耐腐蚀、耐爆炸冲击和易加工制造等特点。目前常采用 30CrMnSiA、30CrMnSiNi2A 等, 且多按照材料的力学性能上限使用。在使用过程中, 屡次暴露出脆性断裂、裂纹敏感断裂、

冲击载荷断裂等质量问题。

1948 年, 美国 Armco Steel 公司研制了马氏体沉淀硬化不锈钢 17-7PH, 随后又研制出了 15-5PH、17-4PH 和 PH13-8Mo 等钢种<sup>[1]</sup>。其中, PH13-8Mo 钢 (国内牌号为 0Cr13Ni8Mo2Al) 因具有高硬度、大截面可淬透好, 且纵、横向性能一致、耐蚀性、低氢脆

收稿日期: 2021-12-26

作者简介: 唐科 (1982-), 男, 高级工程师, 从事分离结构及火工品装置研究。

基金项目: 装备发展部共用技术 (41419110206)

等特点<sup>[2-5]</sup>, 能够满足航天火工装置的特殊需求。国内外学者对不同回火温度下的PH13-8Mo钢的显微组织进行了研究, 发现PH13-8Mo钢经540℃回火处理后显微组织为回火马氏体和弥散分布的析出相, 经595℃回火处理后显微组织为板条状马氏体和薄膜状逆转变奥氏体的双相组织, 钢的逆转变奥氏体含量增多, 使得韧性进一步加强<sup>[6-8]</sup>。

本文对不同热处理制度下的PH13-8Mo钢的力学性能及环境适应性进行了研究和测试, 获得了高承载或高冲击防护性能的热处理制度, 以满足不同的设计需求; 并通过与30CrMnSiA对比及装置级的结构强度裕度试验, 对PH13-8Mo钢的抗爆性能进行了研究。

## 1 PH13-8Mo 钢性能研究

### 1.1 2种回火温度下的力学性能

PH13-8Mo钢的热处理制度为“925℃固溶+不同温度的回火”, 以获得不同的性能。程志伟等<sup>[9]</sup>研究了回火温度对PH13-8Mo钢性能的影响, 研究结果如图1所示。

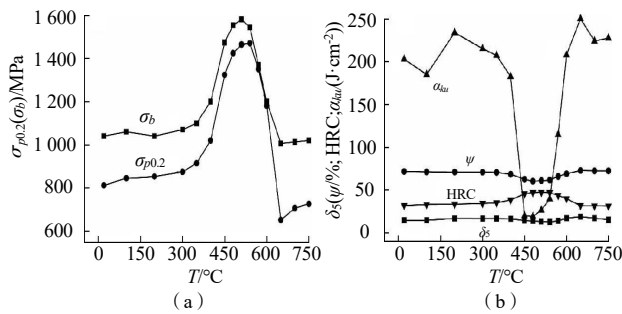


图1 不同回火温度下的性能测试

Fig.1 Performance test at different tempering temperatures

由图1可知: PH13-8Mo钢回火温度在510~610℃之间时, 具有较优异的承载和冲击防护的综合性能。当回火温度为540℃时, 具有较好的承载能力和较为优异的冲击韧性, 综合性能较好; 而回火温度为595℃时, 承载性能略有降低, 但冲击韧性明显提高。540℃和595℃回火温度下的力学性能见表1。对2种热处理制度下的PH13-8Mo试棒, 按照GB/T 228.1-2010金属材料拉伸试验第1部分: 室温试验方法和GB/T 229-2020金属材料夏比摆锤冲击试验方

法要求, 开展了拉伸力学性能和冲击吸收能量测试工作, 测试结果如图2所示。由图2可知, PH13-8Mo钢在回火温度540℃热处理制度下具有更高的强度和较好的冲击韧性, 回火温度595℃热处理制度下则具有更高的冲击韧性。

表1 PH13-8Mo 钢力学性能  
Tab.1 Mechanical properties of PH13-8Mo steel

热处理制度	抗拉强度 $\sigma_b$ /MPa	屈服强度 $\sigma_{p0.2}$ /MPa	断后伸 长率 $\delta_5$ /%	断面收 缩率 $\psi$ /%	洛氏硬 度HRC	冲击吸 收能量 KU <sub>2</sub> /J
回火温度 540℃	纵向	≥1 415	≥1 310	≥10	≥50	≥56
	横向	≥1 415	≥1 310	≥10	≥40	≥46
回火温度 595℃	纵向	≥1 035	≥930	≥14	≥50	≥120
	横向	≥1 035	≥930	≥14	≥50	≥100

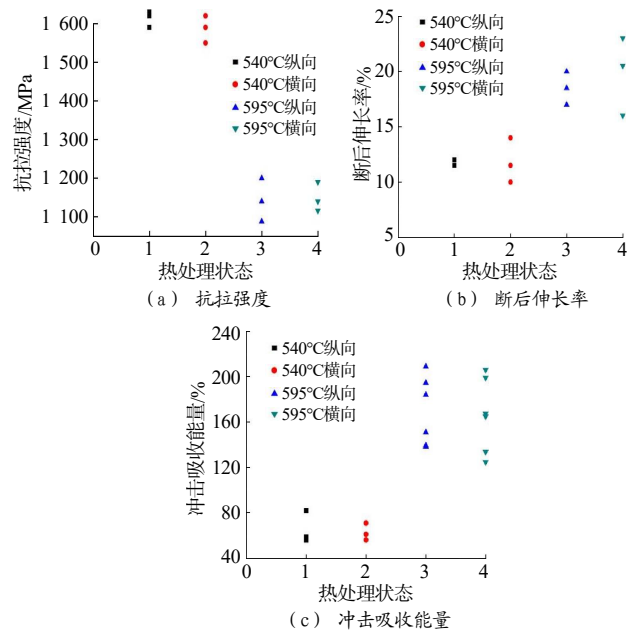


图2 2种回火温度下的力学性能

Fig.2 Mechanical properties at 2 tempering temperatures

### 1.2 环境适应性

将PH13-8Mo钢生产的零件装配到分离螺母装置中, 随分离螺母装置一起开展温度循环、盐雾、霉菌和温度-湿度-高度试验考核, 试验要求如表2所示。试验后对产品进行分解, 检查分瓣螺母状态, 如图3所示。

表2 环境试验项目

Tab.2 Environmental test items

环境项目	试验要求
温度循环试验	按 GJB 2034-1994 中的方法 202 进行试验, 温度范围-45 ~ +71℃。
盐雾试验	按 GJB 150.11A-2009 执行。
霉菌试验	按 GJB 150.10A-2009 执行, 试验周期 28d。
温度-湿度-高度	按 GJB 334A-2005 中 4.5.17 的规定进行试验, 试验周期 28d。

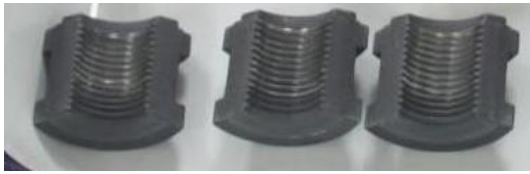
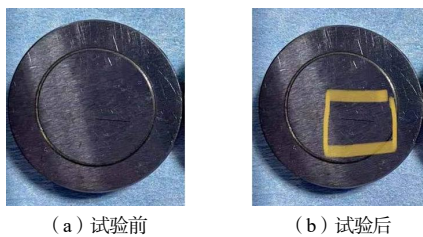


图3 环境试验后的零件状态

Fig.3 Part status after environmental test

由图3可见:分瓣螺母表面 MoS<sub>2</sub> 镀层无锈蚀等异常现象,表明 PH13-8Mo 钢能够适应航天火工装置常见的自然环境要求。

为了研究航天火工装置机构产品中,PH13-8Mo 基体喷涂磁控溅射 MoS<sub>2</sub> 的减摩擦性能和磨损寿命,以及装配到分离螺母装置后的真空极端温度环境下的解锁性能,开展了试块级摩擦磨损试验和分离螺母装置级气动解锁试验。在-100~+120℃真空环境下进行了球-盘式摩擦磨损试验,结果其动摩擦系数与温度关系不大,保持在 0.06~0.08 之间,表明 PH13-8Mo 基体和 MoS<sub>2</sub> 涂层组合在真空极端高低温下,仍具有稳定的减摩擦性能,试验前后的磨痕情况见图4。此外在-120~+120℃真空环境下进行了分离螺母装置气动解锁性能测试,结果分离螺母装置均能够正常气动解锁<sup>[10]</sup>。上述试验结果表明,在 PH13-8Mo 基体上喷涂 MoS<sub>2</sub> 涂层的摩擦性能稳定,具有良好的真空适应性和极端温度适应性。



(a) 试验前 (b) 试验后

图4 摩擦磨损试验前后磨痕

Fig.4 Wear marks before and after friction-wear test

## 2 抗爆炸冲击性能

### 2.1 与 30CrMnSiA 的抗爆性能对比

为了对比航天火工装置常用的 30CrMnSiA 高强度钢和 PH13-8Mo 钢的抗爆炸冲击能力,进行圆柱试验考核<sup>[11]</sup>。试验工装及安装形式如图5所示,实物状态如图6所示。圆柱材料分别选用 30CrMnSiA (HRC 33~38) 和 PH13-8Mo (回火温度 540℃)。圆柱的外径尺寸  $\Phi D$  从起爆端起(从右向左)依次为:  $\Phi 7.6\text{mm}$ 、

$\Phi 7.8\text{mm}$ 、 $\Phi 8\text{mm}$ 、 $\Phi 8.2\text{mm}$ 、 $\Phi 8.4\text{mm}$ 、 $\Phi 8.6\text{mm}$ 、 $\Phi 8.8\text{mm}$ 、 $\Phi 9\text{mm}$ 、 $\Phi 9.2\text{mm}$ 、 $\Phi 9.4\text{mm}$ , 对应圆柱试验件壁厚分别为 1.8mm、1.9mm、2.0mm、2.1mm、2.2mm、2.3mm、2.4mm、2.5mm、2.6mm、2.7mm。圆柱同炉试样的力学性能试验结果见表3。由表3可知,PH13-8Mo 钢具有更高的硬度和强度。

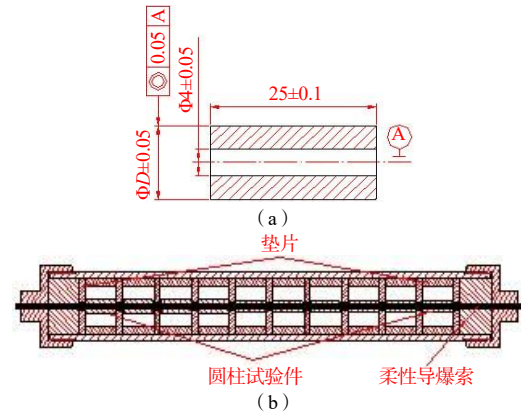


图5 圆柱试验件示意图

Fig.5 Schematic diagram of cylindrical test



图6 测试工装

Fig.6 Test tooling

表3 试样力学性能

Tab.3 Mechanical properties of sample

材料	抗拉强度 $\sigma_b/\text{MPa}$	屈服强度 $\sigma_{p0.2}/\text{MPa}$	断后伸 长率 $\delta_5/\%$	断面收 缩率 $\psi/\%$	冲击吸收 能量 $KU_2/\text{J}$
30CrMnSiA (HRC33~38)	961~983	786~809	17.5~19.5	57~58	84~93
PH13-8Mo (回火温度 540℃)	1570~1580	1320~1460	12~13	55~56	56~61

在试验工装内穿入柔性导爆索,进行相同药量下 2 种材料试验件的破坏程度对比试验。用电雷管从工装右端起爆,柔性导爆索药量分别为 3.0g/m、3.6g/m。试验件工作后状态对比见表4,实物图见图7。由表4及图7可知,在相同药量下,PH13-8Mo 圆柱工作后的结构完整性优于 30CrMnSiA 圆柱,说明 PH13-8Mo 具有更优的抗爆炸冲击能力。

表4 圆柱试验件工作后状态对比

Fig.4 Comparison of working states of cylindrical test pieces

材料	药量 ( $\text{g}\cdot\text{m}^{-1}$ )	试验件工作后状态										完整圆柱数量
		圆柱壁厚/mm										
		1.8	1.9	2.0	2.1	2.2	2.3	2.4	2.5	2.6	2.7	
30CrMnSiA	3.0	▲	△	△	△	△	△	△	◇	●	●	3
	3.6	▲	▲	▲	△	△	△	△	◇	◇	●	1
PH13-8Mo	3.0	△	△	●	●	●	●	●	●	●	●	8
	3.6	△	△	△	●	●	●	●	●	●	●	7

注:按照破坏程度由重到轻,分为碎片(■)、断裂(▲)、分裂(△)、损伤(◇)和完整(●)5个级别。

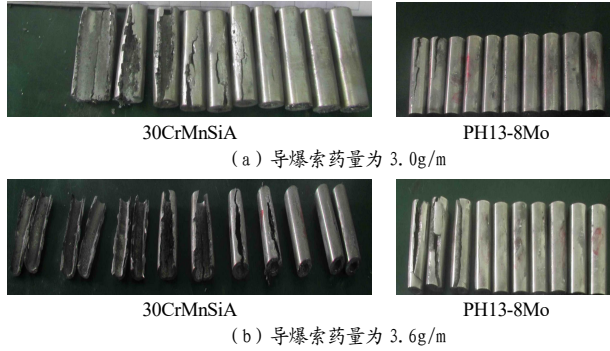


图7 圆柱试验结果

Fig.7 Cylindrical test results

## 2.2 不同热处理状态下分离装置抗爆性能对比

为进一步检验不同热处理制度下的PH13-8Mo钢的抗爆炸冲击能力,进行装置级的结构强度裕度试验。以某聚能切割索分离装置防护罩壳体为试验对象,该壳体选用回火温度540℃和回火温度595℃ 2种热处理制度的PH13-8Mo钢为材料。聚能切割装置直径为300mm,采用环向背部填药形式,设计装药为23g塑-4炸药,防护罩壳体需要承受其工作时产生的巨大爆炸冲击载荷。对该聚能切割装置进行“低温-45℃、120%大药量装药”的结构强度裕度试验考核,试验结果见图8。由图8可知,2种热处理状态的分离装置均正常切割分离,回火温度540℃状态的壳体出现了碎裂问题,回火温度595℃状态的壳体保持结构完整,表明回火温度595℃状态下,PH13-8Mo钢冲击韧性进一步加强,具有优异的抗爆炸冲击能力,更适用于火工装置防护罩壳体爆炸冲击防护。

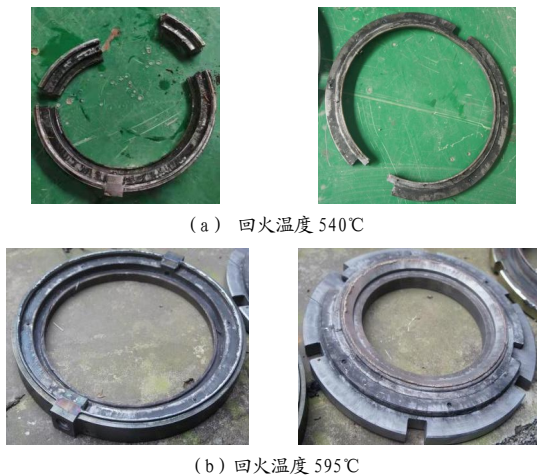


图8 2种热处理状态下的结构强度裕度试验结果

Fig.8 Test results of structural strength margin under 2 heat treatment conditions

## 3 结论

(1) 回火温度540℃状态的PH13-8Mo钢具有较高的强度和较好的冲击韧性,综合性能较优异。

(2) 回火温度595℃状态的PH13-8Mo钢相对于回火温度540℃状态的强度有所降低,但冲击韧性进一步提高,具有优异的抗爆炸冲击能力,适用于爆炸冲击防护要求高、承载能力要求相对较低的环节。

(3) 相对于30CrMnSiA钢,PH13-8Mo钢具有更高的硬度和强度以及更优的抗爆炸冲击能力,更适用于航天火工装置的爆炸冲击防护。

## 参考文献:

- [1] 王玲奇.国产和进口PH13-8Mo钢的组织 and 力学性能[J].热处理,2018,33(3):18-22.
- [2] 刘天琦,支敏学,朱杰远,等.热处理制度对0Cr13Ni8Mo2Al钢组织和性能的影响[J].材料工程,2002(5):26-29.
- [3] Sato K. Improving the toughness of ultrahigh strength steel[D]. Berkeley: University of California Berkeley, 2002.
- [4] 中国航空材料手册编辑委员会.中国航空材料手册:结构钢,不锈钢[M].北京:中国标准出版社,2002.
- [5] 孙志华,张晓云,汤智慧,等.马氏体沉淀硬化不锈钢0Cr13Ni8Mo2Al的腐蚀性能[J].腐蚀与防护,2006,27(12):629-631.
- [6] 李小宁,王亚,杜兵,等.逆变奥氏体对0Cr13Ni5Mo钢热处理恢复断裂韧性的作用[J].焊接,2007(10):47-49.
- [7] 张良,雍歧龙,梁建雄,等.PH13-8Mo高强不锈钢在不同温度时效后的析出相及其对力学性能的影响[J].机械工程材料,2017,41(3):19-23.
- [8] 杨晓辉,李兴东,张繁,等.热处理工艺对04Cr13Ni8Mo2Al钢逆变奥氏体含量的影响[J].机械材料工程,2018,42(7):23-27.
- [9] 程志伟,金建军,鲁世强,等.热处理工艺对PH13-8Mo钢的组织 and 性能的影响[J].材料热处理学报,2013,34(11):48-54.
- [10] 唐科,胡振兴,李辰,等.真空极端温度环境下不同MoS<sub>2</sub>涂层分离螺母装置解锁性能影响研究[J].火工品,2021(3):12-15.
- [11] 王友,李柠芮,等.一种量化柔性导爆索输出威力的验收装置及方法:CN,112284599A[P].2021-01-29.