

1Cr11Ni2W2MoV 不锈钢螺栓脆性断裂故障失效分析

李亚非^{1,3}, 刘凤坤², 龙开琳², 高 军³

(1. 张家界航空工业职业技术学院, 湖南张家界 427000; 2. 贵阳职业技术学院, 3. 中国航发贵阳发动机设计研究所, 贵阳 550081)

摘要: 针对某型航空发动机在整机装配过程中发生的 1Cr11Ni2W2MoV 不锈钢螺栓断裂故障, 按照零件失效分析的一般方法, 进行了故障件理化检测和批次零件制造质量检查, 包括对故障件进行断口宏观与显微 SEM 检查, 对零件热处理工艺参数与材料标准、热处理执行标准参数进行比照, 并对存在质疑的回火脆性问题开展了不同回火温度与冷却速度下的验证试验。结果表明: 故障件断口主要由扩展区与瞬断区组成, 主要特征为沿晶+准解理, 失效模式为一次性大应力脆断; 致使零件脆性的原因在于回火温度 640 °C 处于第 2 类回火脆性区间; 回火后快速冷却可缓解脆性, 但无法消除。避免回火脆性是解决螺栓装配断裂的根本途径, 因此要求螺栓零件选择回火温度时应避开脆性区间, 冷却时快速通过该区间。

关键词: 1Cr11Ni2W2MoV 螺栓; 沿晶断口; 回火脆性; 冷却速度; 航空发动机

中图分类号: V263.6

文献标识码: A

doi: 10.13477/j.cnki.aeroengine.2022.04.020

Failure Analysis for Brittle Fragile Fracture of 1Cr11Ni2W2MoV Stainless Steel Bolt

LI Ya-fei^{1,3}, LIU Feng-kun², LONG Kai-lin², GAO Jun³

(1. Zhangjiajie Aviation Technology College, Zhangjiajie Hunan 42700, China; 2. Guiyang Technology College, Guiyang 550081, China; 3. AECC Guiyang Aero-Engine Research Institute, Guiyang 550081, China)

Abstract: In order to solve the problem of fracture failure of 1Cr11Ni2W2MoV stainless steel bolts during aeroengine assembly, examination of the failed parts and quality investigation of lot production process were carried out according to the general failure analysis procedure, including fracture surface macro and SEM examination, comparison of the heat treatment process parameters with parameters from material standards and implemented heat treatment standards, and verification tests of different tempering temperatures and cooling rates for the suspicious temper embrittlement problem. The results show that the fracture surface is mainly composed of stretch zone and final fast overload, the fracture characteristics are intergranular & quasi cleavage, and the failure mode is quick overlord brittle fracture. The reason for the brittleness is that the tempering temperature 640 °C is in the type II temper brittleness region. Rapid cooling after tempering relieves brittleness but does not eliminate it. Avoiding temper embrittlement is the approach to fundamentally solve the problem, so it is required that bolt parts should avoid the brittleness region when choosing tempering temperature, and pass through the region quickly when cooling.

Key words: 1Cr11Ni2W2MoV bolt; intergranular fracture surface; temper brittleness; cooling velocity; aeroengine

0 引言

1Cr11Ni2W2MoV 不锈钢是仿制型低铬不锈钢, 具有高的强度与韧性、良好的加工工艺性能与耐高温性能, 以及低于 550 °C 的较好的耐腐蚀性^[1]。由于综合性能优良, 因而研发至今在飞机、发动机、燃气轮机等诸多领域得到广泛运用。早期型号航空发动机的压气机段(冷端)大量零件, 含盘、压气机叶片等关键零

件均选用该不锈钢^[2-3]制造, 现代先进燃气涡轮发动机仍然采用该不锈钢作为螺栓、螺钉等承力件使用。虽然中国航空发动机制造行业内的 1Cr11Ni 2W2MoV 不锈钢的应用时间较长, 但该材料零件失效故障仍然时有发生。其中, 高温回火脆性(第 2 类回火脆性)导致的零件失效占有很高比重^[4]。

近年, 国内外专家学者针对马氏体不锈钢第 2 类回火脆性的形成原因与预防措施开展了大量研究工

收稿日期: 2020-05-04

作者简介: 李亚非(1986), 男, 硕士, 高级工程师, 从事航空发动机选材、工艺、腐蚀防护研究工作; E-mail: liyafei628@163.com。

引用格式: 李亚非, 刘凤坤, 龙开琳, 等. 1Cr11Ni2W2MoV 不锈钢螺栓脆性断裂故障失效分析[J]. 航空发动机, 2022, 48(4): 122-126. LI Yafei, LIU Fengkun, LONG Kailin, et al. Failure analysis for brittle fragile fracture of 1Cr11Ni2W2MoV stainless steel bolt [J]. Aeroengine, 2022, 48(4): 122-126.

作, Ma 等^[5]、黄春峰等^[6]认为第2类回火脆性存在的前提是存在 As、Bi 等杂质元素, 上述杂质元素只有在晶界富集时, 才会造成塑性损失。换言之, 提高冶炼水平可有效避免第2类脆性的发生。另外, 陈宗霖等^[7]、钟培道等^[8]认为只要避开回火脆性温度区间(590~660 ℃), 并且快速通过该区间即可避免脆性, 无需考虑冶炼水平。航空材料手册与工艺标准^[9]规定其第2类回火脆性温度区间为 620~660 ℃, 这与中国《航空制造工程手册》和《航空材料手册》中的给定范围存在较大区别, 猜测可能是由于各国对不锈钢中各合金元素控制水平不同有关。综合来看, 1Cr11Ni2W2MoV 等马氏体不锈钢回火脆性与钢的冶炼方式、化学成分(尤其是 S、P 元素质量分数)、回火温度、冷却方式等多种因素有关^[10]。

本文综合考虑原材料化学成分、零件热处理工艺参数, 结合故障件断口形貌, 提出 1Cr11Ni2W2MoV 不锈钢零件在热处理过程中与第2类回火脆性相关的影响因素, 并采用热处理工艺试验进行验证。

1 故障件组织检查

1.1 断口低倍检查

某型航空发动机在整机装配过程中发生 MR6 螺栓断裂故障。经检测, 故障螺栓的化学成分符合标准要求, 螺栓与标准化学成分对照结果见表 1。

表 1 螺栓与标准化学成分对照结果 wt%

	C	Cr	Ni	W	Mo
螺栓	0.12	11.50	1.50	1.80	0.45
标准	0.10~0.16	10.50~12.00	1.40~1.80	1.50~2.00	0.35~0.50
	Cr	V	S	P	Mn
螺栓	11.50	0.20	0.005	0.012	0.25
标准	0.18~0.30	10.50~12.00	≤0.025	≤0.03	≤0.60

故障螺栓断口宏观形貌如图 1 所示。从图中可见, 整个断面较为平齐, 局部存在反光小刻面。在断口边缘可见大量的放射棱线, 汇聚于断口中心。在体视显微镜下观察发现, 断面上分布较多的反光小平面, 局部位置存在颗粒状。整体断面呈明显的一次性大应力条件下的脆性断口特征。



图 1 故障螺栓断口宏观形貌

螺栓装配时承受预紧拉应力, 在工作过程中承受剪切应力与振动应力。兼顾考虑强度与韧性, 选用 1Cr11Ni2W2MoV 不锈钢(设计要求硬度 HRC=25~35)。该不锈钢螺栓的正常断口组织应为大面积的纤维状断面+少量放射棱线, 虽然不乏由于韧性不足而发生零件断裂故障, 但是如此的脆断断口仍属于反常现象^[11]。

1.2 断口显微检查

对于 1Cr11Ni2W2MoV 马氏体不锈钢而言, 材质因素、热处理过程、加载因素均可能造成宏观断口呈现脆性^[10]。为排查故障原因, 对断口进行显微组织检查。螺栓断口扫描电子显微镜(Scanning Electron Microscope, SEM)形貌如图 2 所示。

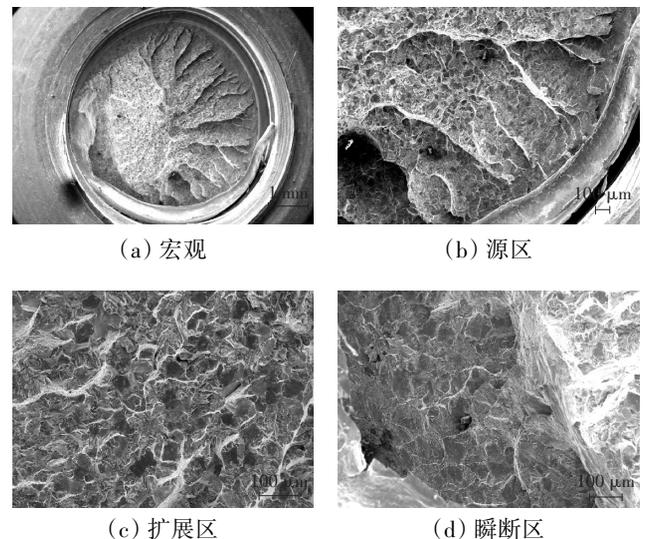


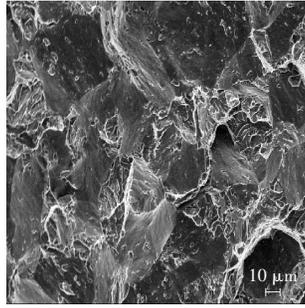
图 2 螺栓断口低倍(<200倍)SEM形貌

从图中可见, 螺栓断裂的起始位置位于零件表面右上方, 呈周向起裂。断口起源区域所占总面积的比例很小。裂纹通过放射棱线从源区扩展穿过螺栓右方大部分区域而进入瞬断区。瞬断区所占面积比例与扩展区域的相当。螺栓左方边缘为剪切唇。整个断口呈扭转断裂脆性断口特征。

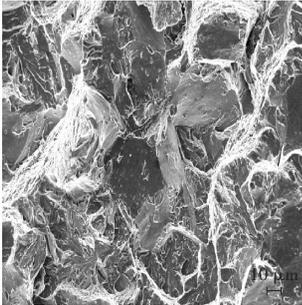
分别对螺栓断口的源区、扩展区与瞬断区进行 50 倍和 500 倍的显微检查, SEM 形貌如图 3 所示。从断裂源区的 50 倍 SEM 形貌来看, 其塑性变形痕迹的撕裂棱特征明显, 在局部区域可见解理断裂的河流花样, 整个区域分布拉拔形成“浅坑”。另外, 隐约可见疑似结晶状形貌。整个区域符合典型的准解理形貌特征。对该区进行能谱仪(Energy Dispersive Spectrometer, EDS)成分分析, 发现 Sb 元素质量分数为

0.01%、Sn元素质量分数为0.02%，存在有害元素富集的迹象。

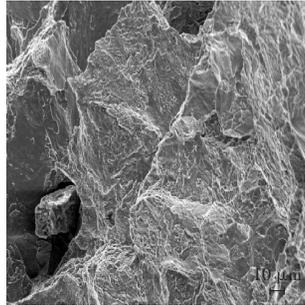
扩展区50倍SEM形貌主要呈现为结晶形貌和解理台阶，无明显可见的塑性变形痕迹。瞬断区可见结晶+韧窝形貌。



(a) 源区



(b) 扩展区



(c) 瞬断区

图3 螺栓断口高倍(500倍)SEM形貌

进一步对源区、扩展区与瞬断区进行500倍SEM检查发现,3个区域中均存在明显的“冰糖”状结晶断口形貌。这是沿晶断裂的显著特征,根据失效分析的经典理论,当存在液态金属致脆(如钎脆)、应力腐蚀疲劳、氢脆、回火脆性的情形时^[12-13],方可出现沿晶断裂特征。

对硬度HRC=25~35的1Cr11Ni2W2MoV不锈钢螺栓而言,由于工作环境中无液态金属与腐蚀介质,而该钢种对氢脆不敏感,因此初步判断回火脆性的可能性最大。

2 故障原因分析

2.1 工艺文件检查

对螺栓生产厂家的热处理工艺规程与材料标准GJB 2294-1994《航空用不锈钢及耐热钢棒规范》和热处理执行标准HB/Z 80-1997《航空用不锈钢与耐热钢热处理说明书》进行对照,具体结果见表2。

从表中可见,工艺规程规定的回火温度640~660℃不符合材料标准与热处理执行标准的要求(实际执行的回火温度为640℃,冷却方式为水冷)。根据文献[2]可知,1Cr11Ni2W2MoV不锈钢的第2类回火脆性处于630℃附近,一般而言应避免在600~660℃回火。从以往的使用经验来看,在600~630℃

表2 螺栓热处理规程与标准参数对照结果

热处理	工艺参数		
	工艺规程	GJB 2294-1994	HB/Z 80-1997
淬火	1010±10℃, 30 min, 油冷	1000~1020℃, 油冷或空冷	990~1010℃, 油冷或空冷
高温回火	660±20℃, 90 min, 水冷	660~710℃ (HBS269~321) 540~590℃ (HBS311~388)	650~710℃ (HBS269~320), 空冷; 550~590℃ (HBS311~388), 空冷

回火均出现过冲击韧性偏低,且均呈现不同比例的沿晶断口的现象^[1]。可认定640℃回火温度处于材料的回火脆性区,在该温度下回火导致零件脆性倾向较大,最终造成在装配过程中零件脆断。

2.2 工艺验证试验

承制工厂按照640℃水冷的回火方式进行棒材入厂复验,各项力学性能均合格。为正确评估该制度处理的产品质量水平,有必要进行工艺验证试验。

热处理验证试验方案及检验得到的拉伸、冲击、硬度性能数据见表3。

表3 热处理工艺试验方案及结果

序号	热处理	拉伸				冲击A _v /J	硬度/HBS	断口类型
		R _m /MPa	R _{0.2} /MPa	A/%	Z/%			
1#	1010±10℃, 油冷; 640±10℃, 空冷	955	818	17.0	58	64	290	沿晶+准解理
2#	1010±10℃, 油冷; 640±10℃, 水冷	948	786	16.5	60	78	295	撕裂棱(韧窝)+准解理
3#	1010±10℃, 油冷; 680±10℃, 空冷	953	844	17.5	57	120	295	全韧窝
GJB 2294-95	1000~1020℃, 油/空冷; 660~710℃, 空冷	≥885	≥735	≥15	≥55	≥71	269~321	

从表中可见:

(1)3种回火方式试样的拉伸、硬度数值接近,均满足标准要求;

(2)不同回火方式对冲击数值以及冲击断口形貌影响较大,680℃回火试样冲击满足标准(全韧性断口),640℃空冷试样冲击未满足标准(脆性断口),640℃水冷介于二者之间。

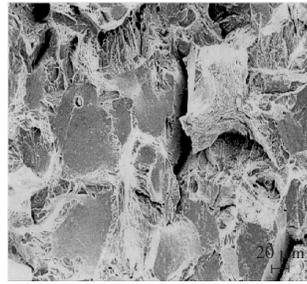
工艺试验冲击试样断口SEM形貌如图4所示。

2.3 分析与讨论

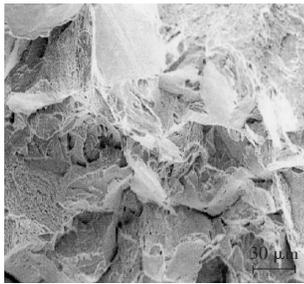
1Cr11Ni2W2MoV不锈钢的第2类回火脆性一直是编制工艺规程时尽量避免的问题。但是,因对该材料性能了解不够,导致回火脆性故障时有发生。工艺人员未严格依照标准编制工艺规程的原因大致为:(1)套用前苏联材料(牌号13X11H2B2M)标准或工艺规程

参数;(2)设计给定硬度范围处于脆性区间;(3)基于经验认为脆性区间回火后快冷可消除脆性^[15-16]。

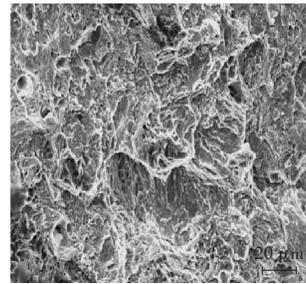
从马氏体不锈钢第2类回火脆性的形成原因来看,由于Ni、Cr、Sb、Sn、P等元素在高温下向靠近晶



(a) 1#



(b) 2#



(c) 3#

图4 工艺试验冲击试样断口SEM形貌

界的2~3个原子厚度的区域偏聚,从而导致晶界部位形成脆性相,最终形成回火脆性^[17]。对每种钢铁材料而言,其第2类回火脆性温度区间不同,因此要求材料在回火过程中在该区间停留的时间应尽量缩短。

杂质元素是形成第2类回火脆性的“元凶”,因此,减小杂质元素质量分数有利于避免脆性发生。真空电弧重熔相对于电渣重熔而言,Sn、Sb元素的质量分数更小,因此采用真空电弧重熔工艺冶炼的1Cr11Ni2W2MoV 不锈钢棒无第2类回火脆性现象^[2]。另外,Mo、W元素可抑制第2类回火脆性,因此对于冶炼过程、成分控制均有所差别的1Cr11Ni2W2MoV 不锈钢(前苏联、俄罗斯的该钢材小规格棒材有双真空冶炼工艺,中国尚无此工艺),不宜套用国外热处理工艺。

通过工艺验证试验可知,在脆性温度区间进行回火并快速冷却,在一定程度上可以缓解回火脆性,使得冲击性能满足标准;但是无法根除回火脆性,冲击试样断口仍然为脆性断口。考虑到材料化学成分与热处理工艺参数的波动性因素,编制热处理工艺规程时应避免该温度区间。

3 结论

(1)在装配过程中折断的1Cr11Ni2W2MoV 钢制螺栓断口形貌为撕裂棱线、准解理+少量韧窝,断面沿晶特征明显,失效模式为一次性大应力脆断;

(2)造成螺栓脆断的原因在于热处理的回火过程,选用的640℃回火温度处于1Cr11Ni2W2MoV 钢的第2类回火脆性区间;

(3)在脆性区回火后快速冷却可缓解材料脆性倾向,但无法根除断口的沿晶特征,且冲击测试值偏低;

(4)1Cr11Ni2W2MoV 不锈钢的第2类回火脆性受制于材料的化学成分与冶炼方法,与热处理回火过程密切相关。为避免此类现象,应避免在600~660℃回火和长时停留。

参考文献:

- [1] 李春胜,黄德彬.金属材料手册[M].北京:化学工业出版社,2005:110-112.
LI Chunsheng, HUANG Debin. Metal material handbook[M]Beijing: Chemical Industry Press, 2005:110-112. (in Chinese)
- [2] 中国航空材料手册编辑委员会.中国航空材料手册[M].北京:中国标准出版社,2001:256-259.
Editorial Committee of Chinese Aviation Material Manual. Chinese aviation material manual[M].Beijing: Chinese Standard Press, 2001: 256-259. (in Chinese)
- [3] 王琳,孙枫,佟小军.1Cr11Ni2W2MoV 钢的离子渗氮[J].金属热处理,2015(6):128-131.
WANG Lin, SUN Feng, TONG Xiaojun. Plasma nitriding of 1Cr11Ni2W2Mo steel[J]. Heat Treatment of Metals, 2015 (6) : 128-131. (in Chinese)
- [4] 汪诚,赖志林,何卫锋.激光冲击次数对1Cr11Ni2W2MoV 不锈钢高周疲劳性能的影响[J].中国激光,2014,41(1):46-51.
WANG Cheng, LAI Zhilin, HE Weifeng. Effect of multi-impact on high cycle fatigue properties of 1Cr11Ni2W2MoV stainless steel subject to laser shocking processing[J]. Chinese Journal of Lasers, 2014, 41 (1) : 46-51. (in Chinese)
- [5] Ma T W, Hao X C, Wang P. Effect of heat treatment on Charpy impact properties of 15Cr12MoVWN ferritic / martensitic steel[J]. Journal of Iron and Steel Research, 2022, 29(3):512-518.
- [6] 黄春峰.1Cr11Ni2W2MoV 钢航空发动机叶片热加工工艺与力学性能[J].热加工,1995(1):29-33.
HUANG Chunfeng. Properties of hot-work technology and mechanics for 1Cr11Ni2W2MoV steel blade[J]. Hot-work, 1995 (1) : 29-33. (in Chinese)
- [7] 钟培道.淬火冷速对1Cr11Ni2W2MoV 钢组织与性能的影响[J].航空材料,1984(4):25-29.
ZHONG Peidao. The influence of quench cooling rate on microstructure and mechanic properties for 1Cr11Ni2W2MoV steel[J]. Aeronautical Materials, 1984(4):25-29. (in Chinese)
- [8] 陈宗霖,王少刚,陈桂梅,等.1Cr11Ni2W2MoV 钢及其零件的第二回火脆性与韧性[J].航空制造工程,1999,4:128-139.
CHEN Zonglin, WANG Shaogang, CHEN Guimei, et al. Secondary tem-

- pering brittleness and toughness of 1Cr11Ni2W2MoV steel and parts[J]. Aviation Manufacturing Engineering, 1999(4): 128-139. (in Chinese)
- [9] 中国航空制造工程手册编辑委员会. 中国航空制造工程手册 [M]. 北京: 中国标准出版社, 2009: 356-357.
Chinese Editorial Committee of Aviation Manufacturing Engineering Manual. Chinese aviation manufacturing engineering manual[M]. Beijing: Chinese Standard Press, 2009: 356-357. (in Chinese)
- [10] Hassend F, Weber S. Effect of heat treatment on the microstructure of casting martensitic stainless steel[J]. Practical Metallography, 2021, 58(4): 180-192.
- [11] 张栋, 钟培道, 陶春虎, 等. 失效分析[M]. 北京: 国防工业出版社, 2004: 34-44.
ZHANG Dong, ZHONG Peidao, TAO Chunhu, et al. Failure analysis [M]: Beijing: National Defense Industry Press, 2004: 34-44. (in Chinese)
- [12] 郝锡秀. 化学成分及热处理条件对 30CrMnSiNi2A 钢机械性能的影响[D]. 沈阳: 东北大学, 2006.
HAO Xixiu. Effects of chemical component and heat treatment condition on microstructure and mechanical properties of 30CrMnSiNi2A steel[D]. Shenyang: Northeastern University, 2006. (in Chinese)
- [13] 魏爱玲, 王鑫, 李若冰. 船舶蒸汽管道用钢 12Cr1MoV 的回火脆性研究[J]. 热处理技术, 2017, 46(2): 212-218.
WEI Ailing, WANG Xin, Li Ruobing. Study on temper brittleness of 12Cr1MoV[J]. Hot Working Technology, 2017, 46(2): 212-218. (in Chinese)
- [14] 徐锐, 单金光, 戴玮高. 不同热处理制度下 1Cr11Ni2W2MoV 钢螺栓断裂特性[J]. 金属热处理, 2013, 38(9): 89-91.
XU Rui, SHAN Jinguang, DAI Weigao. Fracture characteristic of 1Cr11Ni2W2MoV steel bolt under different heat treatment processes [J]. Heat Treatment of Metals, 2013, 38(9): 89-91. (in Chinese)
- [15] 罗天放, 陈荣刚, 吴斌. 材料等离子淬火后的组织与性能[J]. 金属热处理, 2019, 44(2): 77-82.
LUO Tianfang, CHEN Ronggang, WU Bing. Microstructure and properties of gun steel after plasma quenching[J]. Heat Treatment of Metals, 2019, 44(2): 77-82. (in Chinese)
- [16] 卜铁伟. 热处理对马氏体不锈钢显微组织和性能的影响[J]. 热加工工艺, 2017, 46(16): 216-219.
BU Tiewei. Effects of Heat treatment on microstructure and mechanical properties of martensitic stainless steel[J]. Hot Working Technology, 2017, 46(16): 216-219. (in Chinese)
- [17] 陈宗霖, 姜照群, 王少刚. 晶界富集元素和沉淀相对 1Cr11Ni2W2MoV 钢性能的影响[J]. 材料工程, 1994(增刊1): 1-3.
CHEN Zonglin, JIANG Zhaoqun, WANG Shaogang. The influence of enrichment elements on grain boundary and pre[J]. Journal of Materials Engineering, 1994(S1): 1-3. (in Chinese)

(编辑: 刘 亮)