

高强度 GH2132 合金螺栓力学性能影响因素分析

冯光勇, 赵 峰

(天津中德应用技术大学 机械工程学院, 天津 300350)

摘要:为了制订稳定批量生产高强度 GH2132 合金螺栓的控制措施,全面归纳了影响高强度 GH2132 合金螺栓力学性能的主要因素,并阐释各影响因素对 GH2132 合金力学性能的影响机理。结果表明:原材料的原始晶粒度及冷拉变形量、热处理工艺、镦制过程及滚 R 过程等方面对高强度 GH2132 合金螺栓力学性能的影响较大,因此在螺栓的生产过程中需要对上述相关参数及加工过程进行确认和控制。

关键词: GH2132 合金;力学性能;螺栓;晶粒度;热处理;航空发动机

中图分类号: V262.3+3

文献标识码: A

doi: 10.13477/j.cnki.aeroengine.2020.03.017

Effect Factors Analysis of the Bolts Mechanical Properties of High Strength GH2132 Alloy

FENG Guang-yong, ZHAO Feng

(College of Mechanical Engineering, Tianjin Sino-German University of Applied Sciences, Tianjin 300350, China)

Abstract: In order to formulate the control measures of stable mass production of high strength GH2132 alloy bolts, the main factors affecting the mechanical properties of high strength GH2132 alloy bolts were comprehensive induced, and the influence mechanism of each factor on the mechanical properties of GH2132 alloys was explained. The results show that the original grain size and cold tensile deformation of raw materials, heat treatment process, upsetting process and rolling R process have great influence on the mechanical properties of high strength GH2132 alloy bolts. Therefore, it is necessary to confirm and control the above-mentioned relevant parameters and processing during the production of bolts.

Key words: GH2132 alloy; mechanical properties; bolt; grain size; heat treatment; aeroengine

0 引言

GH2132(美国牌号为 A286)合金是 1 种铁基高温合金,主要通过时效析出 γ' -Ni₃(Ti, Al)相进行强化^[1]。该合金由于含有铬元素,具有良好的抗腐蚀性能^[2];在 650 °C 以下具有高的屈服强度、持久强度和蠕变强度,并具有较好的加工塑性和满意的焊接性能。常被用于制造在 650 °C 以下长期工作的飞机承力部件,如涡轮盘、叶片和紧固件等^[3-8]。

随着航空工业的快速发展,对航空用零部件的力学性能要求也逐步提高。如 1100 MPa 级的高强度螺栓近年来在飞机连接件中得到广泛应用。该强度级别的螺栓之前主要采用 40CrNiMo 和 30CrMnSiA 等低合金结构钢,但由于其不耐腐蚀,逐渐被兼具良好综合力学性能和耐腐蚀性能的 GH2132 合金所替代^[9]。目前国内

对于 GH2132 合金螺栓的成熟制造工艺仅达到 900 MPa 级,而针对 1100 MPa 级在批量生产中质量稳定性较差,还存在力学性能不合格的现象。GH2132 合金螺栓力学性能的影响因素较多,在实际生产过程中该类螺栓由于抗拉强度不能满足技术要求而报废的情况十分严重。

本文对 GH2132 合金螺栓力学性能的主要影响因素进行梳理,分析了各影响因素的机理及应对措施,以期为 1100 MPa 级 GH2132 合金螺栓稳定批量生产提供理论依据及处理措施。

1 高强度 GH2132 合金螺栓制造工艺路线及制造难点

高强度 GH2132 合金螺栓的主要制造工艺路线

收稿日期:2019-01-22 基金项目:天津市企业科技特派员项目(18JCTPJC50800)资助

作者简介:冯光勇(1982),男,硕士,高级工程师,主要从事金属材料的热处理工艺及表面处理工艺研究工作;E-mail:rp1356@163.com。

引用格式:冯光勇,赵峰. 高强度 GH2132 合金螺栓力学性能影响因素分析[J]. 航空发动机, 2020, 46(3): 94-98. FENG Guangyong, ZHAO Feng. Effect factors analysis of the bolts mechanical properties of high strength GH2132 alloy [J]. Aeroengine, 2020, 46(3): 94-98.

为:下料→镦制(头部成型)→热处理(固溶、时效)→车→磨→滚螺纹→滚 R→无损检测→表面处理→成品检验→入库。与 900 MPa 级 GH2132 合金螺栓相比,1100 MPa 级 GH2132 合金螺栓的制造难点主要体现在零件热处理后,其抗拉强度通常不能达到 1100 MPa 的技术指标要求而造成报废,质量稳定性较差。其主要原因是 1100 MPa 级 GH2132 合金螺栓的强度指标要求较高,原材料、热处理工艺参数等力学性能参数都需达到最优才能确保制造出合格的螺栓。另外,高强度 GH2132 合金螺栓的制造工艺路线较复杂,在制造过程中其力学性能的影响因素较多。

2 高强度 GH2132 合金螺栓力学性能的影响因素

2.1 原材料的影响

原材料对 GH2132 合金螺栓力学性能的影响是多方面的,在保证满足材料标准的前提下,材料的原始晶粒度及变形量对 GH2132 合金螺栓的力学性能影响较大。

2.1.1 材料原始晶粒度

晶粒度对 GH2132 合金螺栓的力学性能有较大影响。一般情况下,细小的晶粒可以提高其抗拉强度和屈服强度,较粗大的晶粒具有更好的高温持久性能和抗蠕变性能^[9]。影响零件晶粒度的因素较多,材料原始晶粒度是其影响因素之一。如果原材料为固溶态,且在后续加工过程中没有经过变形或变形量较小时,那么材料原始粗晶便会保留在零件中,不能通过热处理进行细化。吕晶晶等^[11]研究了不同原始晶粒度的 GH2132 合金经不同程度的变形并固溶处理后的晶粒度,表明在变形量较小(3%)时没有产生新的再结晶晶粒,且晶粒长大了,且原始晶粒度越大,晶粒长大的趋势越明显。

因此,加工高强度螺栓用的 GH2132 合金原材料的晶粒度不能过大,在原材料入库或零件投产前需对其晶粒度进行测试,确保投产的 GH2132 合金原材料的晶粒度等于或小于 5 级。

2.1.2 原材料状态

GH2132 合金原材料状态主要有固溶和冷拉 2 种^[12]。其中冷拉变形量对 GH2132 合金螺栓显微组织及力学性能也有较大影响。秦鹤勇等^[13]对 GH2132 合金经不同变形量加工及热处理后的金相组织及力学

性能的研究结果表明:在经过面缩率为 10%~40% 的变形后可得到内外性能均匀的合金,且随着冷拉变形量的增大,合金强度提高,但塑性显著降低;同时,在冷拉变形后采用 980 ℃固溶将会大大减弱冷作强化效果,需要采用直接时效处理才可得到较高的强度。这主要是因为冷拉变形使晶粒发生滑移和变形,出现位错的缠结,从而显著提高了合金的强度;但经过固溶处理后,合金发生再结晶,产生新的等轴晶粒,从而减弱了冷作硬化效果。

许永春等^[10]发现 A286 合金在经过 2%~10% 的变形后再进行高温固溶处理会出现晶粒异常长大现象,导致抗拉强度和屈服强度降低;郭慧敏等^[14]认为 A286 螺栓杆部粗晶的主要原因是螺栓的变形量在临界变形区内;吕晶晶等^[11]对 GH2132 合金经不同程度的变形并固溶处理后的晶粒度的研究表明:最终晶粒尺寸随着变形量的增大呈现出先增大后减小的趋势,在经过小变形(临界变形区内)时,晶粒会变得更加粗大。上述研究表明,冷拉的变形量对零件的最终晶粒尺寸也有较大影响,从而影响零件的力学性能。因此,生产高强度 GH2132 合金螺栓应根据不同的强度要求采用不同变形量的冷拉状态的原材料。如采用固溶态的原材料则需在后续加工过程中采用缩杆等工艺,使螺栓杆部发生一定量的变形,且变形量不能在临界变形区内。

2.2 镦制过程的影响

GH2132 合金螺栓的镦制工序一般采用热镦工艺。在镦制之前采用高频加热,提高合金塑性,便以镦制成型。在高频加热过程中,如果加热温度过高、加热时间过长可能导致合金过热过烧,从而严重影响零件的力学性能。通常采用的控制手段是固定加热功率及保温时间,并对加工的前 3 件零件进行金相测试,合格后才能进行批量生产。也有企业采用红外测温的方式控制加热温度不超过固溶温度^[14],确保零件不发生过热过烧现象。

2.3 热处理工艺的影响

热处理工艺是 GH2132 合金螺栓力学性能的主要影响因素,其主要工艺参数有固溶温度、固溶时间、固溶冷却速度、时效温度、时效时间、时效冷却速度等。GB/T 14994-2008《高温合金冷拉棒材》推荐的 GH2132 合金的热处理工艺为:固溶 980~1000 ℃,1~2 h,油冷;时效 700~720 ℃,16 h,空冷^[12]。合金原

始组织中的各种组成相的形态、尺寸、分布并非处于最大强化作用状态,固溶处理的目的是使这些组成相溶入基体,获得1个成份均匀的过饱和固溶体,为时效处理在组织上做好准备。时效处理通常在略高于使用温度下进行,其目的是为了使强化相 γ' 、 γ'' 从过饱和固溶体中呈非常细小、圆整、弥散的形态析出,以获得高的强度。

2.3.1 固溶参数的影响

在固溶参数中,固溶温度和固溶时间对固溶效果影响较大。固溶温度太低,保温时间较短,原始组织中的组成相可能尚未充分溶解;固溶温度过高易于引起晶粒长大,虽然大晶粒组织能获得高的持久强度,然而,会造成其持久延伸率、瞬时强度、高温机械疲劳、低周疲劳性能都较低^[15]。张月红等^[16]对热轧和冷拉2种状态下的GH2132合金经过900、920、940、960、980、1000及1020℃固溶处理后的金相组织的研究表明:2种状态下的合金在经低温固溶处理后晶粒尺寸基本没有变化,但随着固溶温度的升高,晶粒尺寸逐渐增大;姚志浩等^[17]研究了 $\phi 7.5$ mm的冷轧A286合金盘条经过不同固溶温度(930、960、990和1020℃,固溶时间均为4 h)及不同固溶时间(0.2、0.5、1、2和4 h,固溶温度均为960℃)处理后的显微组织及维氏硬度,结果表明:随着固溶温度的升高,晶粒尺寸有一定程度的增大,由最初的原始晶粒直径24 μm 增大到1020℃处理后的36 μm ,其硬度由原来的182 HV减小到160 HV;随着固溶保温时间的延长,晶粒尺寸基本未变,但硬度有一定的减小,但减小不明显。这主要是随着合金固溶时间延长,虽然晶粒尺寸增大不明显,但是合金中强化相进一步回溶,从而导致合金硬度有一定的减小。

2.3.2 时效参数的影响

在时效参数中,时效温度、时效时间和时效冷却速度等参数都对时效效果产生较大影响。时效的目的是为了使强化相 γ' 、 γ'' 从过饱和固溶体中呈非常细小弥散的形态析出以获得高的强度,但时效的温度、保温时间及时效冷却速度等都会影响析出相的大小和种类,另长期时效(或长期使用)的过程中还可能析出 σ 、Laves等有害相。欧梅桂等^[18]对经过982℃ $\times$ 1 h固溶、982℃ $\times$ 1 h固溶+700℃ $\times$ 1 h时效、982℃ $\times$ 1 h固溶+718℃ $\times$ 1 h时效3种热处理后GH2132合金金相和力学性能的研究表明: γ' 相的数量对合金

的力学性能有显著影响,固溶+时效处理后合金基体析出大量的 γ' 相,相比固溶处理显著提高了合金的抗拉强度,但塑性指标有所降低;718℃时效处理相比700℃下析出更多的 γ' 相,合金抗拉强度也有一定的提高。邵清安等^[19]对经过6种热处理后GH2132合金的金相和力学性能的研究表明: γ' 相的尺寸和数量是影响GH2132合金强度的主要因素,推荐在690~720℃进行时效;代礼斌等^[20]对GH2132合金在720℃进行4、8、10、12、14、16及18 h保温、空冷时效处理后的抗拉强度和金相组织的研究表明:合金抗拉强度随着时效时间的延长呈现先提高后降低再趋于稳定的现象。这主要是随着时效时间的延长, γ' 相逐渐析出,数量不断增多,导致抗拉强度不断提高。但时效一定时间后, γ' 相的尺寸不断增大导致其数量逐渐减少,从而引起抗拉强度降低,最后趋于稳定。樊开伦等^[21]在720℃ $\times$ 16 h(气冷)、680℃ $\times$ 16 h(缓慢冷却)、680℃ $\times$ 24 h(缓慢冷却)、650℃ $\times$ 24 h(缓慢冷却)4种时效制度下对GH2132合金力学性能及金相的研究表明:采用680℃ $\times$ 24 h(缓慢冷却)的时效制度相比720℃ $\times$ 16 h(气冷)的标准时效制度可大幅提高合金的硬度和室温强度。这主要是 γ' 相的开始析出温度约为650℃,因此在680℃时效保温结束后缓慢冷却到650℃的温度区间,会持续析出不同尺寸的 γ' 相,既增加了 γ' 相的数量,还获得了多种尺寸的 γ' 相,从而显著提高了合金的硬度和强度。叶文君等^[22]在多段时效下对A286合金抗拉强度的研究表明:通过高温+低温时效的工艺可显著提高合金的抗拉强度。这主要是通过多段时效可在高温时效时获得较大尺寸的 γ' 相,而在低温时效时获得较小尺寸的 γ' 相,从而获得尺寸不一的 γ' 相,增加了 γ' 相的数量,导致合金抗拉强度的提高。

以上研究表明,热处理工艺对螺栓力学性能的影响较复杂,是主要的影响因素。在制定热处理工艺时,需根据原材料的状态、金相组织及后续的加工内容合理选择参数。一般情况下,如原材料为固溶态且晶粒小于5级,可选择980℃ $\times$ 1 h固溶(油冷)+720℃ $\times$ 16 h时效(空冷)的热处理工艺。如经上述热处理工艺处理后抗拉强度不满足要求,可增加1段650℃保温16 h的时效工艺,以析出更小尺寸的 γ' 相,从而增加 γ' 相的数量及弥散度,提高抗拉强度。如原材料为冷拉态,可直接采用720℃保温16 h的时效

工艺。

2.4 滚 R 的影响

滚 R 工序是影响螺栓疲劳寿命的关键工序。R 是指螺栓的支撑面与杆部之间的过渡区。在该区域由于车削加工存在金属流线不连续的现象,是螺栓的应力集中点之一,因此 R 处的疲劳强度比螺栓其余部位的要低。为了提高螺栓的整体强度,需要对有疲劳强度要求的螺栓实施滚 R 工序。即使用滚轮对螺栓的支撑面与杆部之间的过渡区进行滚压,赋予过渡区压应力,提高其疲劳强度。影响滚 R 质量的主要因素是滚压时间和滚压力,通常采用的控制手段是固定滚压时间及滚压力,并对加工的前 3 件零件进行疲劳寿命测试,合格后才能进行批量生产。

3 总结

高强度 GH2132 合金力学性能的影响因素较多,主要体现在以下几个方面:

(1)GH2132 合金的原始晶粒度及变形量对螺栓的显微组织有较大影响,从而影响螺栓的力学性能。当合金的变形量位于临界变形量时,螺栓在热处理过程中其晶粒度会变得异常粗大,使螺栓的抗拉强度降低。当合金的变形量较小时,合金在固溶过程中不会再结晶,原始粗大的晶粒会保持在螺栓中;当合金的变形量较大时,合金在固溶过程中会发生再结晶,合理控制固溶温度及固溶时间,能将原始粗大的晶粒转化为合适的晶粒度。因此在选材时,原材料的变形量必须避开临界变形区。优选晶粒度合格的原材料,当原材料晶粒粗大时,可对原材料实施较大变形量的冷拔或缩杆。

(2)GH2132 合金的变形量对螺栓的力学性能也有直接影响。一般情况下,随着变形量的增大,合金的抗拉强度会逐渐提高。因此对于高强度螺栓,最好选用冷拉状态的原材料且热处理采用直接时效工艺。

(3)热处理工艺对螺栓力学性能的影响较复杂,是主要的影响因素。在制定热处理工艺时,需根据原材料的状态、金相组织及后续的加工内容合理选择参数。当零件采用常规热处理工艺处理后抗拉强度不合格时,可采用增加 650 °C 保温 16 h 的时效工艺,以提高零件抗拉强度。

(4)螺栓的镦制、滚 R 等机加工工序对螺栓的力学性能也有较大影响,需严格控制参数。在批量生产

之前可加工 3 件试样测试其金相、疲劳等数据,验证工艺参数的合理性,并在批量生产过程中严格按验证的参数生产。

参考文献:

- [1] 严波. 电弧炉冶炼 GH2132 合金的研究[J]. 特钢技术, 2013, 19(3): 23-26, 63.
YAN Bo. Study on GH2132 alloy melted by EAF [J]. Special Steel Technology, 2013, 19(3): 23-26, 63. (in Chinese)
- [2] Esfandiari M, Dong H. Improving the surface properties of A286 precipitation-hardening stainless steel by low-temperature plasma nitriding [J]. Surface & Coatings Technology, 2007, 201 (14): 6189-6196.
- [3] Cicco H D, Luppo M I, Gribaudo L M, et al. Microstructural development and creep behavior in A286 superalloy [J]. Materials Characterization, 2004, 52(2): 85-92.
- [4] Rho B S, Nam S W. The effect of applied strain range on the fatigue cracking in Nb-A286 iron-base superalloy [J]. Materials Letters, 2001, 48(1): 49-55.
- [5] Wu H, Oshida Y, Hamada S, et al. Fatigue strength properties of precipitation strengthening stainless steel A286 focused attention on small fatigue [J]. Procedia Engineering, 2011, 10: 1973-1978.
- [6] Cicco H D, Luppo M I, Raffaelli H, et al. Creep behavior of an A286 type stainless steel [J]. Materials Characterization, 2005, 55(2): 97-105.
- [7] 程炜, 沈维. GH2132 铁基高温合金晶粒度显示的探讨 [J]. 特钢技术, 2017, 23(2): 50-53.
CHEN Wei, SHEN Wei. Discussion on display of grain size of GH2132 Fe base superalloy [J]. Special Steel Technology, 2017, 23(2): 50-53. (in Chinese)
- [8] 胡隆伟, 叶文君. 紧固件材料手册 [M]. 北京: 中国宇航出版社, 2014: 195-207.
HU Longwei, YE Wenjun. Fastener material manual [M]. Beijing: China Astronautic Publishing House, 2014: 195-207. (in Chinese)
- [9] 陈琪, 陈雅文, 孔凡亚. 热处理对超大变形量 GH2132 合金力学性能的影响 [J]. 热加工工艺, 2012, 41(20): 184-188.
CHEN Qi, CHEN Yawen, KONG Fanya. Effects of heat treatment on mechanical properties of GH2132 alloy with large deformation [J]. Hot Working Technology, 2012, 41(20): 184-188. (in Chinese)
- [10] 许永春, 董新燕, 朱玲玲, 等. A286 螺栓晶粒异常长大原因分析 [J]. 金属加工(热加工), 2015(23): 74-76.
XU Yongchun, DONG Xinyan, ZHU Lingling, et al. Analysis of abnormal grain growth of A286 bolt [J]. Metal Working (Metal Forming), 2015(23): 74-76. (in Chinese)
- [11] 吕晶晶, 于广娜, 宋金贵. 原始晶粒尺寸和锻后变形量对 GH2132 合金晶粒度的影响 [J]. 金属热处理, 2017, 42(12): 48-51.
LYU Jingjing, YU Guangna, SONG Jingui. Effects of original grain size and deformation amount after forging on the grain size of GH2132 alloy [J]. Heat Treatment of Metals, 2017, 42(12): 48-51. (in Chinese)
- [12] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理

- 理委员会. 高温合金冷拉棒材:GB/T 14994-2008[S]. 北京:中国标准出版社,2008:1-13.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the P.R.C. Superalloy cold drawn bars:GB/T 14994-2008[S]. Beijing:Standards Press of China,2008:1-13.(in Chinese)
- [13] 秦鹤勇,崔灿,王雪,等. 优质高强 GH2132 合金的形变强化和热处理制度研究[J]. 钢铁研究学报,2011,23(S2):44-47.
- QIN Heyong,CUI Can,WANG Xue,et al. Investigation of working hardening and heat treatment of high quality and high strength GH2132 superalloy [J]. Journal of Iron and Steel Research,2011,23 (S2):44-47.(in Chinese)
- [14] 郭慧敏,徐敬宇,张哲爽,等. A286 螺栓杆部粗晶问题的分析与处理[J]. 科技创新与应用,2016(24):154.
- GUO Huimin,XU Jingyu,ZHANG Zheshuang, et al. Analysis and treatment of coarse grain in A286 bolt rod [J]. Technology Innovation and Application,2016(24):154.(in Chinese)
- [15] 上海交通大学《金相分析》编写组. 金相分析[M]. 北京:国防工业出版社,1982:475-477.
- Compilation group of metallographic analysis of Shanghai Jiaotong University. Metallographic analysis [M]. Beijing:National Defense Industry Press,1982:475-477.(in Chinese)
- [16] 张月红,陆勇,王勇,等. GH2132 合金冷拉棒材热处理工艺研究[C] // 第十届中国钢铁年会暨第六届宝钢学术年会论文集 III. 北京:中国金属学会,2015:714-718.
- ZHANG Yuehong,LU Yong,WANG Yong,et al. Research on heat treatment technology of GH2132 alloy cold-drawing bar [C] // Proceedings of the 10th China Iron and Steel Annual Conference and the 6th Baosteel Academic Annual Conference III. Beijing:The Chinese Society for Metals,2015:714-718.(in Chinese)
- [17] 姚志浩,阮雅婷,董建新,等. 固溶时效热处理对 A286 合金组织演变规律的影响[J].材料热处理学报,2016,37(7):40-47.
- YAO Zhihao,RUAN Yating,DONG Jianxin,et al. Effect of solution and aging treatment on microstructure evolution of alloy A286 [J]. Transactions of Materials and Heat Treatment,2016, 37(7):40-47. (in Chinese)
- [18] 欧梅桂,杨春林,杨祖建. 热处理工艺对高温合金 GH2132 力学性能的影响[J]. 金属热处理,2014,36(6):91-93.
- OU Meigui,YANG Chunlin,YANG Zujian. Effect of heat treatment on mechanical properties of high temperature alloy GH2132 [J]. Heat Treatment of Metals,2014,36(6):91-93.(in Chinese)
- [19] 邵清安,关红,国振兴,等. 热处理制度对 GH2132 合金组织性能的影响[J]. 材料热处理学报,2015,36(2):55-59.
- TAI Qingan,GUAN Hong,GUO Zhenxin,et al. Effects of heat treatments on microstructure and mechanical properties of GH2132 superalloy[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment,2015,36 (2):55-59.(in Chinese)
- [20] 代礼斌,王东哲,莫燕,等. 时效工艺对 GH2132 高温合金组织和性能的影响[J]. 金属热处理,2017,42(8):142-146.
- DAI Libin,WANG Dongzhe,MO Yan,et al. Effects of aging on microstructure and mechanical properties of GH2132 super alloy[J]. Heat Treatment of Metals,2017,42(8):142-146.(in Chinese)
- [21] 樊开伦,邹刚,裴烈勇,等. 时效制度对 GH2132 高温合金性能的影响[J]. 金属热处理,2016,41(1):66-70.
- FAN Kailun,ZOU Gang,PEI Lieyong,et al. Effect of aging on properties of GH2132 superalloy [J]. Heat Treatment of Metals, 2016,41(1):66-70.(in Chinese)
- [22] 叶文君,胡隆伟,欧阳建文,等. 时效制度对 A286 性能的影响[J]. 金属加工(热加工),2014(23):86-88.
- YE Wunjun,HU Longwei,OUYANG Jianwen,et al. Effect of aging on properties of GH2132 superalloy[J]. Metal Working(Metal Forming), 2014 (23):86-88.(in Chinese)

(编辑:刘 亮)