

# 0Cr17Ni4Cu4Nb 钢制螺钉断裂原因分析

## Failure Analysis on 0Cr17Ni4Cu4Nb Screw

胡春燕<sup>1,2</sup>, 刘新灵<sup>2</sup>, 陶春虎<sup>2</sup>, 何玉怀<sup>2</sup>

(1 南昌航空大学 无损检测技术教育部重点实验室, 南昌 330063;

2 北京航空材料研究院, 北京 100095)

HU Chun-yan<sup>1,2</sup>, LIU Xin-ling<sup>2</sup>, TAO Chun-hu<sup>2</sup>, HE Yu-huai<sup>2</sup>

(1 Key Laboratory of Nondestructive Testing (Ministry of Education), Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China; 2 Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China)

**摘要:** 某故障螺钉所用材料为 0Cr17Ni4Cu4Nb 沉淀硬化型不锈钢。通过断口宏微观观察、金相检验、硬度检测和能谱分析等实验, 确定螺钉的断裂性质及断裂原因。结果表明: 螺钉的失效性质为疲劳断裂; 故障螺钉与疲劳实验螺钉疲劳源区附近均为准解理与沿晶特征, 故障螺钉的沿晶特征较明显, 应与该材料特性有关, 尤其是螺纹根部在预紧力、拉应力、弯曲应力等复杂的综合应力状态下, 螺钉产生沿晶特征。

**关键词:** 螺钉; 0Cr17Ni4Cu4Nb 钢; 疲劳断裂; 沿晶特征

**中图分类号:** V252.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4381(2012)12-0021-03

**Abstract:** A precipitation-hardening stainless steel 0Cr17Ni4Cu4Nb screw was fractured. The feature and cause of the screw were analyzed by micro and macro observation on fracture surfaces, metallographic examination, hardness testing and energy spectrum analysis. The results show that the fracture mode of the screw is fatigue failure. Failure and fatigue testing screw have the same feature of quasi-cleavage and intergranular in source zone, and the intergranular feature is more obvious in failure screw. The main cause of the intergranular feature should be relevant to the material properties and the complex stresses such as pretightening force, tensile stress, bending stress of screw thread roots.

**Key words:** screw; 0Cr17Ni4Cu4Nb steel; fatigue failure; intergranular feature

0Cr17Ni4Cu4Nb 是在 Cr17 型不锈钢基础上, 加入 Cu、Nb 等强化元素研制的一种马氏体沉淀硬化不锈钢, 它的强度是通过马氏体相变和在 400~650℃ 温度范围内时效时, 析出时效硬化相  $\epsilon$ -Cu、NbC、 $M_{23}C_6$  等碳化物而产生沉淀硬化达到的, 相近牌号为 17-4PH(美国)<sup>[1,2]</sup>。由于该钢具有高强度、高韧性、高耐腐蚀性和高抗氧化性等综合性能被广泛用于国防工业和民用工业, 可作为 370℃ 以下要求耐磨、耐蚀、高强度的结构件, 例如传动装置、轴、齿轮、螺栓、垫圈、阀及泵等零件, 还可用于 400℃ 以下工作的飞机、导弹的紧固件<sup>[3,4]</sup>。

本工作针对某故障螺钉的断口特征进行宏微观观察, 对螺钉的硬度和金相组织进行分析。此外, 对疲劳实验螺钉的断口进行宏微观观察, 并将故障螺钉与疲劳实验螺钉进行分析比较, 以确定故障螺钉的断裂性质及断裂原因。

## 1 实验

故障螺钉所用材料为 0Cr17Ni4Cu4Nb 沉淀硬化型不锈钢, 螺钉的加工过程: 下料→热处理(1050℃ 固溶, 550℃ 时效)→吹砂→机加工→滚螺纹→钝化→吹干。螺钉在应用前所经的实验: 基本性能测试, 约 3~4h; 42MPa 打压实验, 在 42MPa 下保持 3min; 静压密封实验 24h。实验之后, 该螺钉装在主机上工作 2h 之后发生断裂。螺钉在主机上所固定结构的液压为 28MPa。

## 2 实验过程与结果

### 2.1 断口宏微观观察及能谱分析

螺钉断口宏观形貌如图 1 所示。螺钉断面呈灰色, 分为平坦区和剪切唇区, 平坦区断面光滑细密, 可见较平直疲劳弧线。螺纹表面形貌如图 2 所示, 可见

明显的塑性变形痕迹,该痕迹与螺纹加工痕迹大致垂直,同时也可发现拧紧痕迹,螺纹表面的这种痕迹应是在预紧螺纹的过程中形成的。

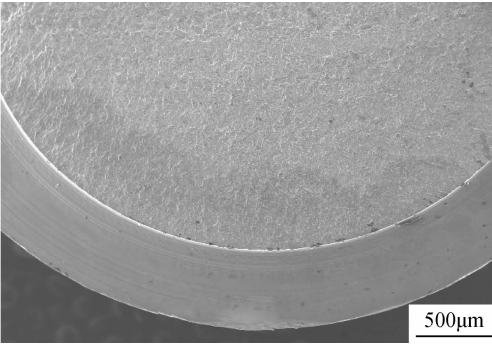


图 1 断口低倍形貌  
Fig. 1 Appearance of fracture surface

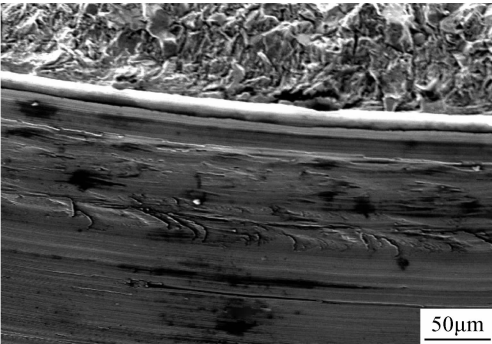


图 2 螺纹表面形貌  
Fig. 2 Appearance of screw thread surface

图 3 为螺钉源区的形貌,可见裂纹沿着螺纹表面根部起源,呈线源特征,源区面积大约为 1/2 圆周,在源区附近存在明显的沿晶特征。在大约 1/2 圆周起源附近均有沿晶特征,正对剪切唇起源位置的沿晶特征最明显,并且,沿晶特征区域集中在距离源区表面约 120µm 的弧形带内。沿晶区域之后开始出现疲劳条带特征,刚开始疲劳条带较少,同时伴随着准解理特征,随着裂纹的扩展疲劳条带逐渐增多。图 4 为扩展区的疲劳条带特征。出现疲劳条带的区域可称为裂纹稳定扩展区,在稳定扩展后期以疲劳条带和韧窝特征为主。裂纹疲劳扩展长度约 3.2mm。图 5 为瞬断区的形貌,可见韧窝特征。

对螺钉断口源区附近存在沿晶的区域进行能谱分析,并与稳定扩展区的能谱分析结果进行比较,未发现明显区别。

2.2 金相检查

在螺钉断口附近垂直于轴线方向取样磨制金相试样,经 4%(质量分数)的硝酸酒精腐蚀后在金相显微镜下观察,结果如图 6 所示,为正常的回火马氏体组

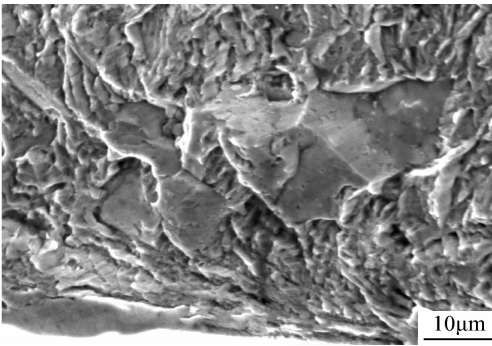


图 3 源区附近的准解理和沿晶特征  
Fig. 3 Quasi-cleavage and intergranular feature of source zone

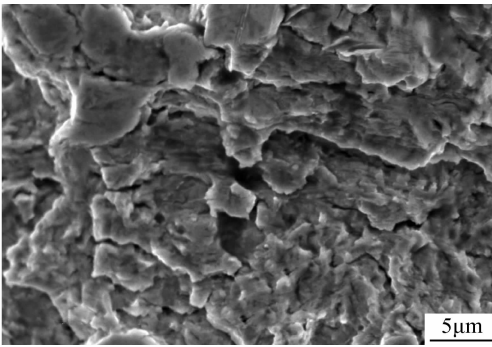


图 4 扩展区的疲劳条带  
Fig. 4 Microscopic fatigue feature of the propagation zone

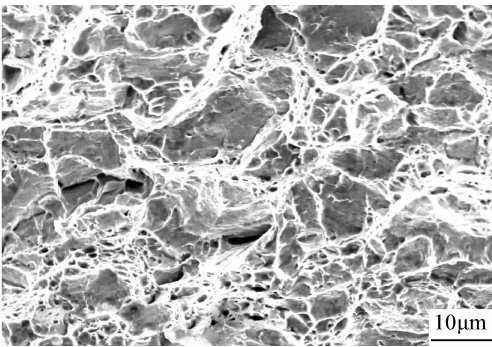


图 5 瞬断区的韧窝  
Fig. 5 Dimple feature of the final fracture zone

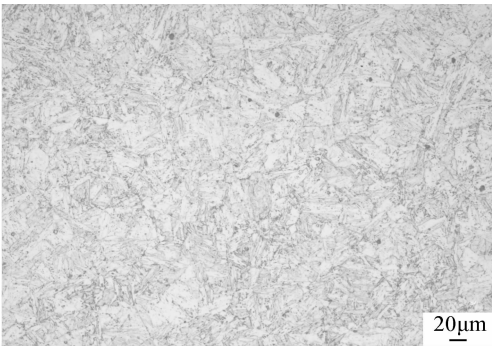


图 6 螺钉心部金相组织  
Fig. 6 Microstructure of screw

织,未见过烧、严重夹杂等组织缺陷。

2.3 硬度检测

在断口附近取样,对其进行显微硬度检测,并根据 GB/T 1172—1999 进行硬度换算。检测结果如表 1 所示,可见,螺钉的硬度符合技术要求 HRC 35~40。

表 1 螺钉的硬度检测结果

Table 1 Hardness testing results of screws

	Position				Average	HRC
	1	2	3	4		
Heart of sample	398.9	403.1	400.3	392.6	398.73	37
Fringe of sample	393.0	401.5	395.0	397.2	396.68	35

2.4 螺钉疲劳实验

对同批次的螺钉进行疲劳实验,对疲劳实验后断裂的螺钉断口及螺纹表面进行观察,螺纹表面形貌如图 7 所示,只观察到滚压螺纹的加工痕迹,未见垂直于螺纹加工痕迹的塑性变形痕迹,该螺钉在实验过程中不存在预紧力。

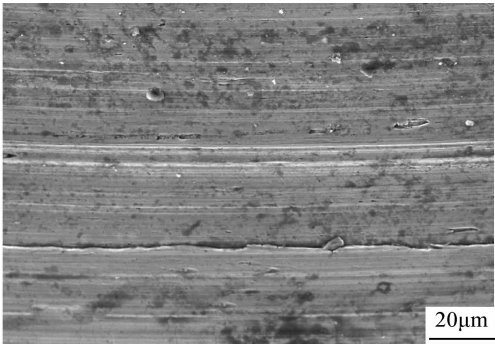


图 7 实验螺钉螺纹表面形貌

Fig. 7 Appearance of fatigue experiment screw thread surface

断口源区附近形貌如图 8 所示,源区附近为准解理与少量的沿晶特征,与故障螺钉源区附近的形貌相

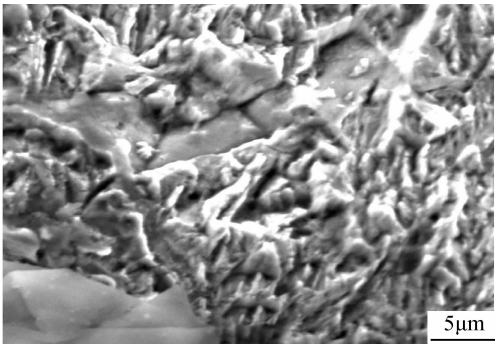


图 8 实验螺钉断口源区附近准解理与沿晶特征

Fig. 8 Quasi-cleavage and intergranular feature of fracture source zone

类似,但故障螺钉源区附近沿晶区域所占比例要高。该螺钉疲劳扩展裂纹长度约 2.6mm。

3 分析与讨论

从以上实验结果可知,该螺钉的金相组织为正常的回火马氏体组织,未见过烧、严重夹杂等组织缺陷;螺钉的硬度符合技术要求 HRC 35~40。螺钉断口扩展区宏观可见疲劳弧线,微观可见典型的疲劳条带,因此该螺钉的断裂性质为疲劳断裂。疲劳源沿螺钉 1/2 圆周起源,疲劳源区附近为准解理和沿晶特征,稳定扩展区为疲劳条带和准解理特征,随着裂纹的扩展,疲劳条带增多,到扩展区的后期为疲劳条带与韧窝并存,瞬断区为韧窝特征。稳定扩展区的面积占整个断口面积的 2/3,断面平坦细密,疲劳裂纹扩展较充分,可见该螺钉的工作载荷并不大,但起源特征表明裂纹萌生应力较大。

裂纹萌生于第一螺纹底部,螺纹面上有变形痕迹,该痕迹应是预紧螺钉的过程中形成的,螺钉的断口形貌表明裂纹萌生应力较大,从这方面也说明螺钉可能承受了较大的预紧力。预紧力为拧紧力,也是剪切应力,工作载荷主要为拉伸载荷,在较大的预紧力基础上叠加服役应力会促进裂纹萌生,明显影响螺钉寿命。采用电子探针与扫描电镜对断口源区附近进行能谱分析,未发现异常腐蚀元素,也未发现元素偏析的现象。故障螺钉与疲劳实验螺钉疲劳源区附近均为准解理与沿晶特征,故障螺钉的沿晶特征较明显,应与该材料特性有关。尤其是螺纹根部在预紧力、拉应力、弯曲应力等复杂的综合应力状态下,导致螺钉产生沿晶特征。

由于 0Cr17Ni4Cu4Nb 马氏体沉淀硬化不锈钢的材料特点,在不同加载方式及加载速率下,其断裂特征不同,如刘海英等<sup>[5]</sup>研究了 0Cr17Ni4Cu4Nb 钢制前吊挂断裂分析,整个断口形貌表明疲劳扩展区所占的面积极小,大部分区域为准解理或沿晶特征,而吊挂的失效模式为疲劳断裂;由于 0Cr17Ni4Cu4Nb 钢可选择不同的时效温度,因此其具有不同的强度、韧性和硬度,有资料表明<sup>[6-9]</sup>,该钢对热处理温度的要求相当敏感,特别是最后时效处理温度必须控制在±5℃的范围内;吊挂的硬度偏高导致材料的疲劳强度降低,裂纹源区的沿晶现象,主要是由于碳化物在晶界偏析而造成的岩石状晶间断裂,在应力作用下,这些硬而脆的碳化物容易开裂、剥落,并与基体分离。沿晶脆性断裂的发生在很大程度上取决于晶界的状态和性质<sup>[3]</sup>。一般情况下,产生沿晶特征可能有几种情况:如热加工工艺不当,

## 参考文献

- [1] 张爱民, 权高峰. 镁合金疲劳性能的研究现状及展望[J]. 机械工程材料, 2010, 34(5): 1—4.
- [2] 毛萍莉, 李扬, 刘正, 等. 挤压态 AZ31 镁合金的疲劳行为研究[J]. 特种铸造及有色合金, 2010, 30(3): 213—215.
- [3] TOKAJI K, KAMAKURA M, ISHIIZUMI Y, et al. Fatigue behaviour and fracture mechanism of a rolled AZ31 magnesium alloy[J]. International Journal of Fatigue, 2004, 26(11): 1217—1224.
- [4] 王长义, 刘正. 压铸态 AZ91 镁合金疲劳断口组织与裂纹扩展机制[J]. 压力铸造, 2008, 28(1): 37—39.
- [5] SONG K, JUNG H C, SHIN K S. Fatigue crack propagation behavior of AZ31 Mg alloy in ultra-high vacuum[J]. Met Mater Int, 2011, 17(3): 397—402.
- [6] LV F, YANG F, DUAN Q Q, et al. Fatigue properties of rolled magnesium alloy (AZ31) sheet; influence of specimen orientation[J]. International Journal of Fatigue, 2011, 33(5): 672—682.
- [7] FOUAD Y. Fatigue behavior of a rolled AZ31 magnesium alloy after surface treatment by EP and BB conditions[J]. Alexandria Engineering Journal, 2011, 50(1): 23—27.
- [8] ZUBEROVA Z, KUNZ L, LAMARK T T, et al. Fatigue and tensile behavior of cast, hot-rolled, and severely plastically deformed AZ31 magnesium alloy[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2007, 38(9): 1934—1940.
- [9] 徐玉磊, 张奎, 李兴刚, 等. 含 1% 混合稀土压铸镁合金的高周疲劳性能[J]. 稀有金属材料与工程, 2010, 39(9): 1579—1582.
- [10] 杨晓明, 杨帆, 尹树明, 等. Mg-12Gd-3Y-0.5Zr 镁合金的不同疲劳行为[J]. 机械工程材料, 2011, 35(4): 41—45.
- [11] 杨友, 刘勇兵, 杨晓红, 等. 稀土元素对 AZ91D 压铸镁合金高周疲劳性能的影响[J]. 金属热处理, 2006, 31(7): 18—22.
- [12] 姜伟之, 赵时熙, 王春生, 等. 工程材料的力学性能[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2000. 241.

**基金项目:**国家自然科学基金资助项目(50801048);航空科学基金资助项目(2007ZF54016)

**收稿日期:**2011-11-07;**修订日期:**2012-07-27

**作者简介:**沙桂英(1963—),女,博士,教授,主要从事航空轻质结构材料的制备及其变形与断裂方面的研究,联系地址:沈阳航空航天大学材料科学与工程学院(110136),E-mail:guiysha@sina.com

\*\*\*\*\*

(上接第 23 页)

造成杂质元素在晶界富集与沿晶界析出脆性第二相;或因温度过高(加工温度与使用温度)使晶界弱化;或因环境介质沿晶界浸入金属基体等因素出现时,晶界的键合力被严重削弱,往往在低于正常断裂应力的情况下,被弱化的晶界成为断裂扩展的优先通道而发生沿晶断裂<sup>[10]</sup>。因此,有必要对 0Cr17Ni4Cu4Nb 钢在不同热处理工艺制度、加载方式和加载速率下的断裂特性做进一步的研究。

综上所述,故障螺钉的断裂性质为疲劳断裂,沿晶特征较明显,应与该材料特性有关。尤其是螺纹根部在预紧力、拉应力、弯曲应力等复杂的综合应力状态下,导致螺钉产生沿晶特征。

## 4 结论

(1)螺钉的断裂性质为疲劳断裂。

(2)螺钉的金相组织及硬度符合技术要求。

(3)故障螺钉的沿晶特征较明显,应与该材料特性有关。尤其是螺纹根部在预紧力、拉应力、弯曲应力等复杂的综合应力状态下,导致螺钉产生沿晶特征。

## 参考文献

- [1] 夏德贵. 0Cr17Ni4Cu4Nb 马氏体沉淀硬化型不锈钢的耐海水腐

蚀性能研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学,2007.

- [2] 李颇, 郭李波, 王小奎. 沉淀硬化型不锈钢 0Cr17Ni4Cu4Nb 的实验研究[J]. 黑龙江冶金, 2006, (3): 7—9.
- [3] 何著, 赵寿根, 杨嘉陵, 等. 0Cr17Ni4Cu4Nb 不锈钢动态力学性能研究[J]. 材料科学与工程学报, 2007, 25(3): 418—421.
- [4] 刘光辉, 郑灿舜, 刘亚林. 沉淀硬化型不锈钢 0Cr17Ni4Cu4Nb 实验研究[J]. 黑龙江冶金, 2003, (4): 13—15.
- [5] 刘海英. 0Cr17Ni4Cu4Nb 钢制前吊挂断裂失效分析[J]. 理化检验-物理分册, 2003, 39(6): 315—317.
- [6] 董翠, 刘丽玉. 17-4PH 不锈钢拉杆失效分析[J]. 失效分析与预防, 2010, 5(3): 182—186.
- [7] 刘德林, 袁洪, 陶春虎. 30CrMnSiNi2A 钢螺钉断裂分析[J]. 失效分析与预防, 2009, 4(3): 174—176.
- [8] 杨晓. 17-4PH 不锈钢性能和组织研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学,2007.
- [9] 杨雪春. 热处理对耐热马氏体不锈钢 0Cr17Ni4Cu4Nb 性能的影响[J]. 长沙大学学报, 2006, 20(5): 32—34.
- [10] 张栋, 钟培道, 陶春虎, 等. 失效分析[M]. 北京:国防工业出版社,2008.

**基金项目:**无损检测技术教育部重点实验室开放基金资助(ZD201129014)

**收稿日期:**2012-01-21;**修订日期:**2012-08-14

**作者简介:**胡春燕(1983—),女,硕士,工程师,现从事金属材料失效分析及安全评估等方面的研究,联系地址:北京市 81 信箱 4 分箱(100095),E-mail:fachcy@163.com