

# 某燃气涡轮发动机螺栓断裂失效分析

佟文伟

(中航工业沈阳发动机设计研究所, 沈阳 110015)



佟文伟(1974),男,高级工程师,主要从事航空发动机材料应用、失效分析和三防技术研究工作。

收稿日期:2012-11-16

**摘要:**针对某燃气涡轮发动机发生的 GH4169 合金螺栓断裂故障,通过对故障螺栓进行断口宏观观察、化学成分分析、硬度检测和金相组织分析,以及对未发生断裂失效的螺栓和螺母进行检查与分析,确定了该燃气涡轮发动机螺栓断裂性质为镉脆断裂;与螺母表面的镀镉层紧密接触、受到拉应力的作用以及工作温度较高,是导致螺栓发生镉脆断裂的主要原因。为此,提出了在涡轮后机匣连接部位选用 GH4169 合金螺母,并在发动机热端零部件连接件中避免使用镀镉层进行表面防护等建议,可供排除类似故障时借鉴。

**关键词:**燃气涡轮发动机;螺栓;断裂;失效分析;镉脆

## Fracture Failure Analysis of Bolt in a Gas Turbine Engine

TONG Wen-wei

(AVIC Shenyang Engine Design and Research Institute, Shenyang 110015, China)

**Abstract:** Aiming at the fracture fault of GH4169 alloy bolt of a gas turbine engine, the failure mode of bolt is Cadmium embrittlement by macro and micro observation of fracture surface, chemical composition analysis, hardness testing, metallurgical structure analysis, examination and analysis of fault-free bolts and nuts. The main causes of the Cadmium embrittlement fracture were that it contacted with Cadmium plating layer of nut, suffered loaded tension stress effect and high work temperature. Some suggestions are proposed to provide references for eliminating similar fault, which the GH4169 alloy bolt are used in the connection of turbine rear casing and the Cadmium plating are avoided to use the surface protection in the connection of the hot section components and parts.

**Key words:** gas turbine engine; bolt; fracture; failure analysis; Cadmium embrittlement

## 0 引言

在燃气涡轮发动机结构中,存在着大量各种形式的螺栓连接。一旦螺栓发生断裂故障,轻则必须停机维修,重则造成机毁人亡的事故。而在燃气涡轮发动机螺栓连接件发生断裂故障后,仅仅简单地更换无法完全排除再次发生断裂的风险,必须对导致断裂的影响因素进行深入分析,并采取措施加以改进。

GH4169 合金是 Ni-Cr-Fe 基时效硬化型高温合金,在 650 ℃ 以下具有较高的强度和塑性、良好的抗疲劳和耐腐蚀性,用于制造在 650 ℃ 以下工作的航空机械零部件<sup>[1]</sup>。作为燃气涡轮发动机中重要的紧固件,GH4169 合金螺栓在热端结构部件中得到了大量应用。某燃气涡轮发动机涡轮后机匣连接使用了 GH4169 合金螺栓(表面镀铜)。在经历较短时间试车后,连接螺栓发生断裂故障。

本文针对故障螺栓,进行了螺栓断口宏观观察分析、故障螺栓成分分析、硬度检测和金相组织分析,并对同期使用的未发生断裂失效螺栓和与故障螺栓配套螺母等相关件进行了检查与分析,明确了螺栓断裂失效的主要原因,提出了相应改进建议。为制定改进措施、避免类似故障的重复发生提供了重要的技术依据。

## 1 检查与分析结果

### 1.1 断口宏观观察

故障螺栓断口宏观形貌如图 1 所示。断面在螺纹牙底的最小截面处。从图中可见,断口表面较粗糙,大部分呈黑褐色,中心局部呈灰白色,断口表面部分区域可见磨损痕迹;断口平齐,无明显的塑性变形,断裂面与螺栓的轴线垂直。

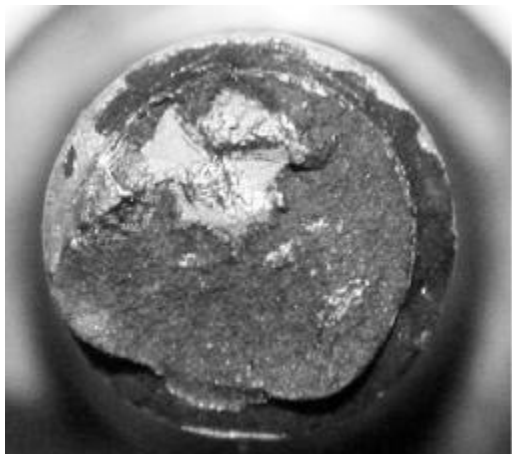
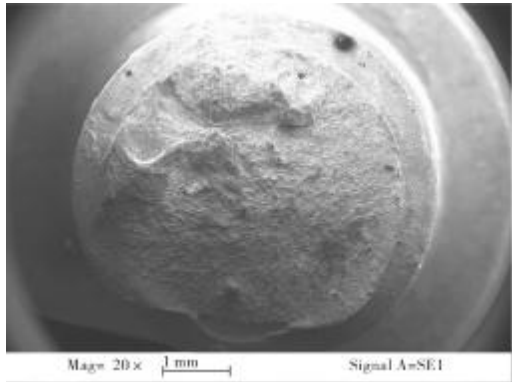


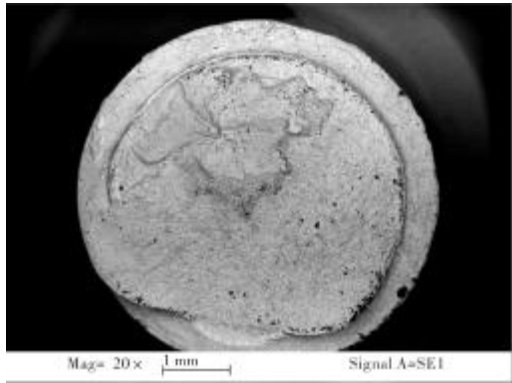
图 1 螺栓断口宏观形貌

1.2 断口微观观察

螺栓断口的扫描电镜低倍形貌如图 2 所示。从图 2(b)所示的背散射图像中可见,螺栓断口边缘存在 1 层环状白亮色区域。进一步放大观察,该区域呈现典型的沿晶断裂形貌特征(如图 3 所示)<sup>[2-3]</sup>;断口表面黑褐色区域主要呈熔融状物覆盖的沿晶断裂形貌(如图 4 所示);断口中部灰白色区域为典型的韧窝(如图 5 所示);整个断口表面未见疲劳断裂形貌特征。



(a)



(b)

图 2 螺栓断口低倍形貌

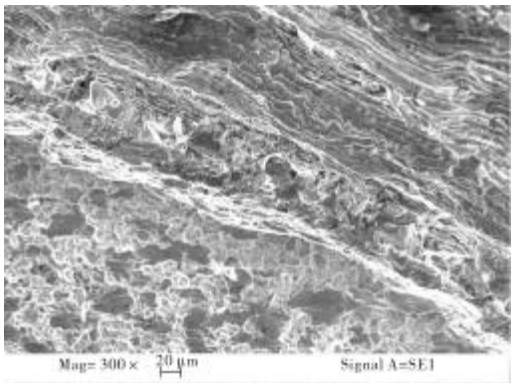


图 3 断口边缘的沿晶断裂形貌

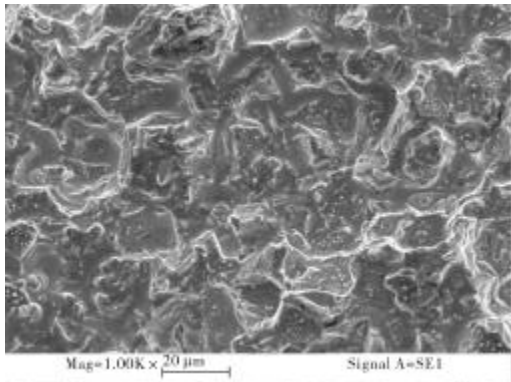


图 4 断口中部的沿晶断裂形貌

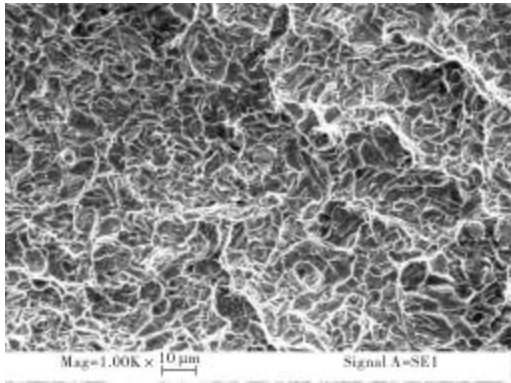


图 5 断口中部的韧窝形貌

对故障螺栓断口表面微区成分进行能谱分析,结果表明:断口边缘的白亮区存在大量的金属镉(能谱分析结果见表 1);断口中部表面熔融状覆盖物为金属镉(能谱分析结果见表 2);断口心部韧窝形貌区为 GH4169 合金螺栓基体成分。

| 表 1 断口表面边缘能谱分析结果 |      |      |      |      |       |      | w /%  |
|------------------|------|------|------|------|-------|------|-------|
| 元素               | O    | Cr   | Fe   | Ni   | Cu    | Zn   | Cd    |
| 质量分数             | 5.91 | 2.82 | 2.20 | 4.05 | 10.01 | 2.02 | 72.98 |

| 表 2 断口表面中部能谱分析结果 |      |      |      |       |      |      | w /%  |
|------------------|------|------|------|-------|------|------|-------|
| 元素               | O    | Cr   | Fe   | Ni    | Nb   | Mo   | Cd    |
| 质量分数             | 2.24 | 9.32 | 8.08 | 24.12 | 0.93 | 1.36 | 53.95 |

1.3 化学成分分析

在故障螺栓基体取样进行能谱分析,结果见表 3。故障螺栓基体的主要合金元素质量分数与技术标准规定的 GH4169 高温合金成分<sup>[4]</sup>相符。

| 表 3 故障螺栓能谱分析结果 |             |             |             |       |       |
|----------------|-------------|-------------|-------------|-------|-------|
| 元素             | Al          | Ti          | Cr          | Mn    | Fe    |
| 质量分数           | 0.47        | 1.13        | 20.54       | 0.29  | 16.52 |
| 技术标准           | 0.30 ~ 0.70 | 0.75 ~ 1.15 | 17.0 ~ 21.0 | ≤0.35 | 余     |

| 元素   | Co    | Ni            | Nb          | Mo          |
|------|-------|---------------|-------------|-------------|
| 质量分数 | 0.21  | 53.26         | 4.76        | 2.82        |
| 技术标准 | ≤1.00 | 50.00 ~ 55.00 | 4.75 ~ 5.50 | 2.80 ~ 3.30 |

1.4 硬度检测

在故障螺栓基体取样进行硬度测量,结果见表 4。从表 4 中测量结果可知,故障螺栓基体的硬度符合技术标准的要求。

| 表 4 故障螺栓硬度(HRC)测量结果 |             |      |      |      |
|---------------------|-------------|------|------|------|
| 编号                  | 1           | 2    | 3    | 4    |
| 测量结果                | 43.9        | 44.2 | 44.4 | 44.1 |
| 技术标准                | 36.0 ~ 46.5 |      |      |      |

1.5 金相组织分析

在故障螺栓基体取样进行金相组织检查,结果如图 6 所示,未见明显异常现象。

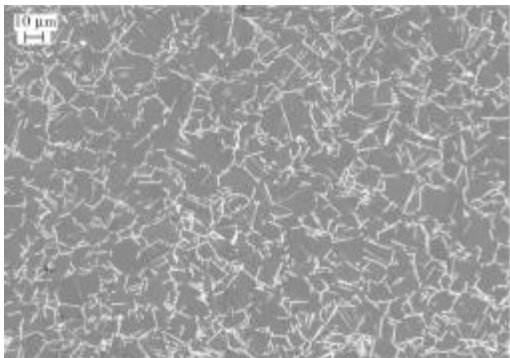
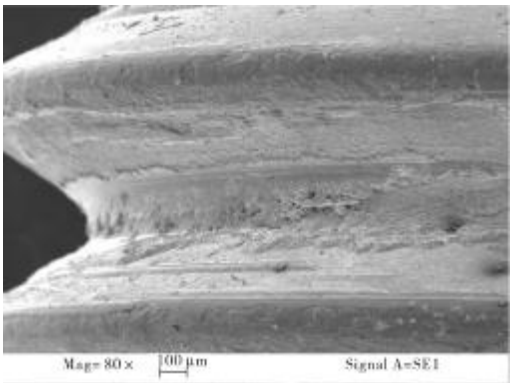


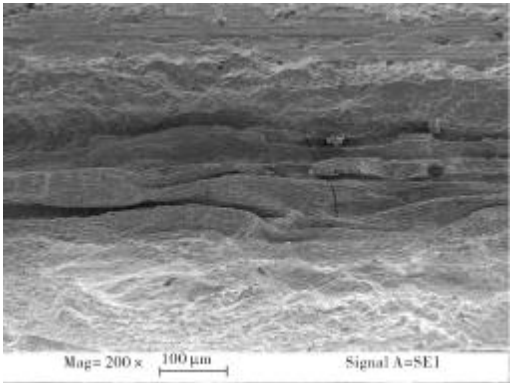
图 6 螺栓显微组织

1.6 相关件的检查与分析

选取同期使用且未发生断裂失效的螺栓在扫描电镜中放大观察,可见该螺栓与螺母配合部位的螺纹表面大部分区域较粗糙,存在明显的附着物,在个别部位的螺纹牙底可见明显的微裂纹形貌,如图 7 所示。对该螺栓表面进行能谱分析,结果如图 8 所示。表明其表面附着物为金属镉(Cd)。



(a)



(b)

图 7 未断裂失效螺栓表面形貌

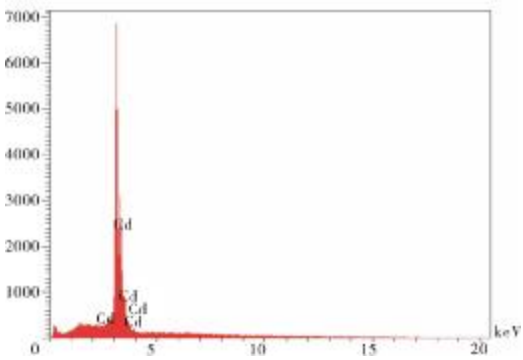
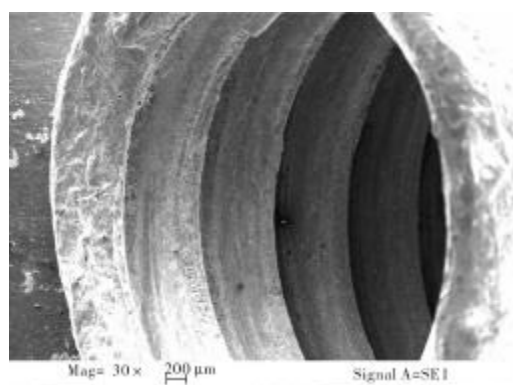


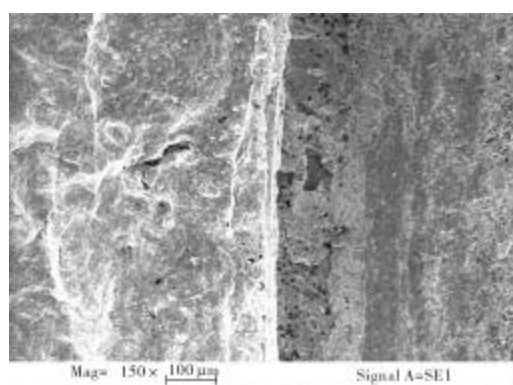
图 8 未断裂失效螺栓表面能谱分析曲线

在扫描电镜中放大观察与故障螺栓配套的螺母,其形貌如图 9 所示。从图中可见,螺母内表面较粗糙,有明显的附着物。对螺母表面进行能谱分析,结果如图 10 所示。表明螺母表面存在大量的金属镉(Cd)。

将与连接螺栓配套的螺母新件沿轴线解剖,制备金相试样后在扫描电镜中观察,其纵截面的背散射形貌如图 11 所示,螺母内、外表面均可见明显的白亮层。对白亮层进行能谱分析,结果如图 12 所示。表明该白亮层为金属镉(Cd),说明与故障螺栓配套的螺母表面有镀镉层。



(a)



(b)

图 9 螺母内表面形貌

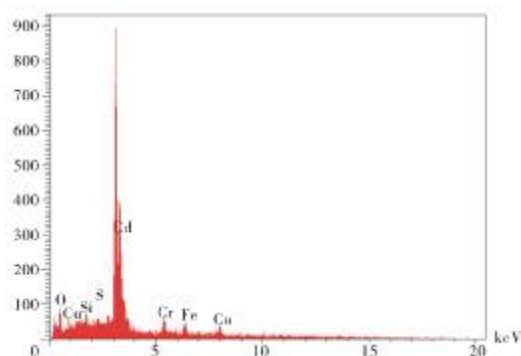


图 10 螺母内表面能谱分析曲线

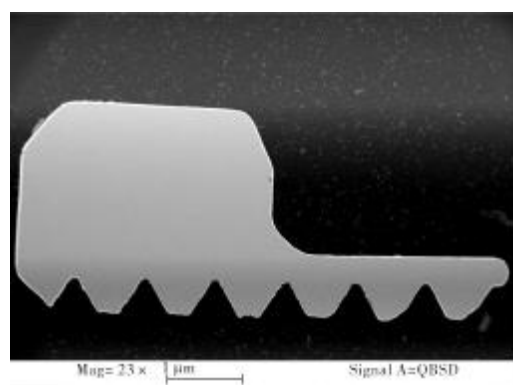


图 11 螺母纵截面形貌

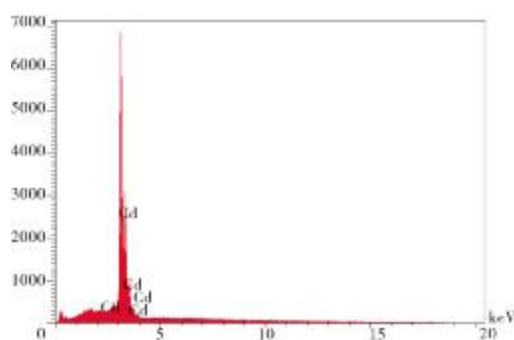


图 12 纵截面边缘区域能谱分析曲线

## 2 分析与讨论

根据断口宏微观分析结果可知:故障螺栓断口平齐,无明显的塑性变形,断裂面与螺栓的轴线垂直,为典型的脆性断口<sup>[5]</sup>;断口大部分区域呈黑褐色,中心局部呈灰白色,表明故障螺栓开裂过程中经受过高温的作用,即螺栓断裂故障应发生在燃气涡轮发动机试车过程中;断口边缘及中间大部分区域均为沿晶断裂形貌,仅在中部较小区域内呈现典型的韧窝形貌,整个断口表面未见疲劳断裂形貌特征,表明故障螺栓断口为脆性沿晶断裂断口<sup>[6]</sup>。断口表面微区成分分析结果表明,断口边缘沿晶断裂区存在大量的金属镉,断口中部表面熔融状覆盖物也为金属镉,而断口中部韧窝形貌区主要为故障螺栓基体(GH4169 合金)成分,进一步说明故障螺栓断口为金属镉引起的脆性沿晶断裂断口。

故障螺栓基体主要合金元素质量分数符合技术标准的要求,金相组织未见明显异常,硬度符合设计要求,表明本次断裂故障与螺栓的材质无直接关系。

金属镉镀层在一定温度和应力的同时作用下,能够从零件表面沿晶界扩散到零件内部,引起零件基体材料脆化而导致脆性断裂——镉脆<sup>[7-8]</sup>;这种脆化效应能在镀镉的零件上发生,也能在与镉镀层相接触的零件上发生;镉镀层通常允许的最高使用温度为 230 ℃,对于强度较高的承力件和长寿命件,其允许使用温度应降低至 200 ~ 210 ℃。某燃气涡轮发动机涡轮后机匣连接螺栓选用材料为 GH4169 合金,属于高强度紧固件,在工作过程中主要受紧固拉伸应力作用,同时还受热应力、剪切应力等作用<sup>[9]</sup>;螺栓工作温度最高可达 300 ℃ 以上,远高于镀镉层的允许使用温度;与螺栓配套的螺母表面存在镀镉层。上述因素使得该

连接螺栓具备了发生镉脆断裂的全部条件。在发动机工作过程中,在温度和应力的共同作用下,螺母表面的镉镀层与连接螺栓表面紧密接触,使得金属镉扩散到螺栓基体中,最终导致螺栓发生镉脆断裂<sup>[10-12]</sup>。

### 3 结论

某燃气涡轮发动机涡轮后机匣 GH4169 合金连接螺栓断裂性质为镉脆断裂。经分析,螺栓断裂故障的发生与其材质没有直接关系;主要原因是故障螺栓配套的螺母表面有镀镉层、螺栓在工作过程中受拉应力作用以及螺栓工作温度较高。

为了避免类似故障重复发生,提出以下改进建议:

(1)在涡轮后机匣连接部位选用抗氧化和耐腐蚀性能均较好的 GH4169 合金螺母;

(2)在燃气涡轮发动机热端零部件的各种连接件中,避免使用镀镉层对其紧固件进行表面防护<sup>[13]</sup>。

### 参考文献:

- [1] 万明攀,马瑞. GH4169 螺栓断裂失效分析及工艺改进[J]. 热加工工艺,2012(6):195-196.  
WAN Mingpan, MA Rui. Failure analysis of GH4169 bolts and process improvement [J]. Hot Working Technology, 2012 (6): 195-196.(in Chinese)
- [2] 张栋,钟培道,陶春虎,等. 失效分析[M]. 北京:国防工业出版社,2004:113-114.  
ZHANG Dong, ZHONG Peidao, TAO Chunhu, et al. Failure analysis [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2004: 113-114. (in Chinese)
- [3] 美国金属学会. 金属手册(第9卷): 断口金相与断口图谱[M]. 8版. 北京:机械工业出版社,1983:109-112.  
American Society for Metals. Metals handbook (Vol. 9th): Fractography and atlas of fractographs[M]. 8th Edition. Beijing: Machinery Industry Press, 1983: 109-112. (in Chinese)
- [4] 《工程材料实用手册》编辑委员会. 工程材料实用手册(第2卷):变形高温合金,铸造高温合金[M]. 2版.北京:中国标准出版社,2001:324-325.  
Practical Handbook of Engineering Materials Committee. Practical handbook of engineering materials (Vol. 2th): wrought high temperature alloys mold high temperature alloys [M]. 2th Edition. Beijing: Standards Press of China, 2001: 324-325. (in

- Chinese)
- [5] 胡世炎. 破断故障金相分析 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1979:178-181.  
HU Shiyen. Metallographic analysis of breaking fault [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1979: 178-181.
  - [6] 郑修麟. 材料的力学性能[M]. 西安:西北工业大学出版社, 1990:34-38.  
ZHENG Xiulin. Mechanical properties of materials [M]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University Press, 1990: 34-38. (in Chinese)
  - [7] 李金桂. 腐蚀控制设计手册 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2006:462-464.  
LI Jingui. Corrosion control design manual [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2006: 462-464.
  - [8] 张栋. 机械失效的痕迹分析 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1996:205-206.  
ZHANG Dong. Trace analysis of mechanical failure [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1996: 205-206. (in Chinese)
  - [9] 陶春虎,刘高远,恩云飞,等. 军工产品失效分析技术手册 [M]. 北京:国防工业出版社,2009:375-377.  
TAO Chunhu, LIU Gaoyuan, EN Yunfei, et al. Failure analysis technical manual of military products [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2009: 375-377. (in Chinese)
  - [10] 曾甲牙. 发动机镀镉螺栓连接件的失效分析[J].固体火箭技术,1999(3):71-73.  
ZENG Jiaya. Failure analysis of cadmium plated bolts in solid rocket motor [J]. Journal of Solid Rocket Technology, 1999 (3): 71-73. (in Chinese)
  - [11] 马春林. 航空机械失效案例选编 [M]. 北京: 科学出版社, 1988:41-43.  
MA Chunlin. Aviation mechanical failure case selected [M]. Beijing: Science Press, 1988: 41-43. (in Chinese)
  - [12] 刘庆瑞. WP7 发动机压气机工作叶片镉污染分析[J]. 航空发动机,2003,29(1):34-38.  
LIU Qingrui. Analysis of Cadmium-contaminated blade of WP7 engine compressor[J]. Aeroengine, 2003,29 (1): 34-38. (in Chinese)
  - [13] 刘道新.材料的腐蚀与防护[M]. 西安:西北工业大学出版社,2006:207-213.  
LIU Daoxin. Material corrosion and protection [M]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University Press, 2006: 207-213. (in Chinese)