45

某型火炮击针失效分析

秦会常¹,杨守杰¹,彭颋²,王传政¹,车路长²,卢连军¹,张均法¹

(1.山东特种工业集团有限公司,淄博 255201; 2.中国兵器工业第五九研究所,重庆 400039)

摘要:目的 为了解决火炮击针断裂的问题。方法 对断裂的火炮击针进行了宏观检查、化学成 分分析、机械性能测试、断口分析、宏微观组织检测,确定了击针断裂的性质和产生原因。结果 火炮击针断口属多源疲劳断口。结论 击针断裂的主要原因:一是螺纹槽根部半径 R 较小,截面 过渡不够平滑和自然,形成了较大的应力集中;二是螺纹槽根部的加工比较粗糙,进一步加剧了应 力集中;另外,发射药形成的高温气体对火炮击针螺纹槽根部有腐蚀作用,导致击针螺纹槽根部 R 处出现点蚀坑,点蚀坑破坏了该处的表面完整性,形成了较大的应力集中,导致在点蚀坑处萌生了 早期疲劳裂纹。建议改进工艺设计,增大螺纹槽根部 R,确保截面过渡平滑自然,以降低颈部的应 力集中系数;改进加工能力和水平,防止出现机加工缺陷。 关键词: 多源疲劳裂纹;应力集中;断裂;点蚀坑

DOI: 10.3969/j.issn.1674-6457.2014.02.009 中图分类号: TG115.5⁺7 文献标识码: A

文章编号: 1674-6457(2014)02-0045-06

Failure Analysis for the Artillery Pin

QIN Hui-chang¹, YANG Shou-jie¹, PENG Ting², WANG Chuan-zheng¹, CHE Lu-chang², LU Liang-jun¹, ZHANG Jun-fa¹
(1. CNGC Shandong Machinery Group Co., Ltd., Zibo 255201, China;
2. No. 59 Institute of China Ordnance Industry, Chongqing 400039, China)

ABSTRACT: **Objective** To solve the problem of artillery pin crack. **Methods** The properties and causes of the artillery pin crack were determined by macroscopic examination, chemical component analysis, mechanical property testing, fracture analysis, and macro- and microscopic tissue examination. **Results** The artillery pin crack belonged to multi-resource cut off. **Conclusion** The causes for the artillery pin crack were as following: first, the cross-section transition was not smooth enough due to the small R at the basis of the thread groove, leading to concentration of stress; second, the transition zone at the basis of the thread groove was not round and smooth enough, which further aggravate the concentration of stress, and finally, another cause was that the high-temperature propellant gas led to an erosion at the thread basis so that many erosion pits occurred. The pits damaged the surface completeness and caused stress concentration, hence the preliminary fatigue cracks formed on the erosive pits. It is suggested to improve the process design, increase the R at the basis of the thread groove, to ensure the smooth transition of the cross-section transition and reduce the stress concentration coefficient at the neck, and to improve the processing capacity and skills to avoid machine processing defects.

KEY WORDS: fatigue fracture; stress concentration; crack; corrosion pit

某火炮击针用原材料为 45CrNiMoVA,工艺流 程为:圆钢→锻造→退火→粗加工→调质热处理→ 精加工。退火温度为 880 ℃。淬火采用可控气氛炉 加热,用甲醇作为保护气氛,具体工艺为(860 ± 10)℃,2 h,油淬。回火采用电阻炉加热,具体工艺 为 400~500℃,2.5 h。火炮击针在打炮过程中出 现了断裂,文中对某火炮击针工件进行了断口宏微 观观察及能谱成分分析、金相组织观察、硬度检测、 荧光渗透检验和能谱成分分析,确定了断裂的性质, 并对其产生的原因进行了分析。

1 工件的理化检测

1.1 宏观观察

击针断口产生于头部与细杆部结合面的螺纹槽 根部附近,如图1所示。螺纹槽根部R较小,存在 明显截面过渡,断口外缘存在比较粗糙的机加工刀 痕,外边缘有外力损伤的点状、线状缺口;整个断口 上未见夹杂、疏松等材质缺陷。断口宏观形貌见图 2,击针断口的断面光泽灰暗、高低不平,在宏观上具 有明显的贝纹线特征,这些贝纹线呈同心圆状,间距 较大,并向瞬断区弯曲,最终瞬断区位于断口中心偏 一侧,即同心圆状贝纹线的"圆心";击针断口宏观 上具有疲劳断裂的特性,在断面的边缘上,可观察到 沿断口周向有许多条的台阶条纹且高度差大,同时 向内扩展。瞬断区面积较大,剪切唇较小。图2中 能清晰地看到疲劳源区、疲劳扩展区和瞬断区这3 个疲劳断口的宏观组成部分。



图 1 断口产生的位置 Fig. 1 Location of the fracture

1.2 工件断口微观观察

将击针断口表面油污洗去后放入扫描电镜进行



图 2 断口的宏观形貌 Fig. 2 Macro appearance of the fracture

观察。断口低倍形貌如图 3 所示,可见裂纹源位于 击针螺纹槽的根部,源区高倍形貌,呈穿晶断裂特 征,断口其他区域也均表现为穿晶断裂特征。



图 3 工件表面一侧的断口低倍形貌

Fig. 3 Appearance of crack source zone in low magnification



图 4 试样低倍组织 Fig. 4 Macrostructure of the tissue

1.3 工件裂纹断口能谱成分分析

对裂纹源区、断口中部及晶粒表面进行能谱成 分分析,结果见表1。由表1可知,由于裂纹源区最 先开裂,因而氧化程度相对其他区域稍严重。

46

表 1	断口表面能谱分析结果(质量分数,%)
Fahle	1 Energy spectrum analysis results

一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一			
儿杀	裂纹源区	断口中部	晶粒表面
Fe	73.72	74.72	76.55
Cr	0.77	0.76	0.91
Mn	0.62	0.64	0.67
Si	0.24	0.24	0.23
Мо	0.20	0.20	0.23
Ni	1.49	1.51	1.63
0	22.96	21.93	19.78

1.4 工件金相检测

对此火炮击针进行金相检测。

1.4.1 工件的低倍检测

在工件上截取低倍试棒,将低倍试棒的横截面加 工到粗糙度小于或等于 1.6,然后将试样置于 75~ 80 ℃,1:1 的 HCl 溶液中酸蚀 18 min,火炮击针的 低倍组织如图 4 所示:一般疏松约为 0.5 级,未见有 其他低倍组织缺陷存在;符合 GJB 1951—94《航空 用优质结构钢棒规范》中关于 45CrNiMoVA 钢棒低 倍组织的验收要求。

1.4.2 非金属夹杂物的检测与分析

在工件中取样,并按要求淬火后进行非金属夹杂物检测,如图 5 所示。按 GB 10561—2005《钢中非金属夹杂物显微评定方法》进行评定,火炮击针的非金属夹杂物级别为:A0.5,B0.5,C0.5,D0.5; 火炮击针所用钢棒的洁净度很高^[1-4],符合 GJB 1951—94《航空用优质结构钢棒规范》中 45CrNiMoVA 非金属夹杂物的验收要求。



图 5 试样中非金属夹杂物的形貌 Fig. 5 Appearance of non-metallic inclusion in the sample

1.4.3 工件的金相显微组织检测

在断口附近和击针心部截取金相试样,进行金相显微组织分析,火炮击针横截面的微观组织如图6所示,断口附近、裂纹源附近和火炮击针心部的基体组织均为均匀、细小的回火托氏体,3个部位附近的组织无明显区别,均属于正常的热处理组织。





c 基体

图 6 试样横截面的微观组织



1.5 硬度检测

将断口附近和击针心部截取的金相试样进行抛 光处理,按 GB 231.1—2009《金属布氏硬度试验第 一部分:试验方法》的要求进行布氏硬度检测,断口 源区 HB 值为 397,断口中部 HB 值为 402,断口边缘 HB 值为 397。按 GB 1172—1999《黑色金属硬度及 强度换算值》进行换算,其抗拉强度在 1370~1400 MPa 之间,具有较高的强度。

1.6 回火脆性侵蚀试验

在火炮击针断口附近制取金相试样,金相试样 经研磨抛光后于回火脆性侵蚀剂饱和苦味酸酒精溶 液中侵蚀,结果如图7所示。从图7可看出,火炮击 针断口的附近未出现黑灰色网状组织。

1.7 化学成分分析

从远离火炮击针断口的部位取样,对击针的化 学成分进行分析,分析结果如表2所示。从表2可 看出,火炮击针的化学成分符合工艺的要求。



图 7 脆性侵蚀剂侵蚀后试样的显微组织 Fig. 7 Microstructure of the sample after corrosion

表 2 化学成分分析结果(质量分数,%) Table 2 Chemical composition analysis results

化学元素	检测结果	标准要求
С	0.46	0.42 ~ 0.50
Si	0.25	0.17~0.37
Mn	0.68	0.50~0.80
Cr	0.93	0.80~1.10
Mo	0.25	0.20~0.30
Ni	1.65	1.30~1.80
Cu	0.021	≤0.25
S	0.0020	≤0.015
Р	0.011	≤0.025

2 分析与讨论

1) 45CrNiMoVA 钢属于中碳高强度低合金结构 钢,从其"C"曲线上可知:因为奥氏体的珠光体、贝 氏体转变具有较大的孕育区,钢的临界冷却速度降 低,使钢具有较好的淬透性,甚至在正火状态下也可 以获得马氏体组织,因此该钢径淬火、中温回火后可 获得高的强度和一定的韧性。该钢与其他中碳合金 结构钢相比存在较高的碳量,并含有碳化物形成元 素 Cr, Mo, V, 而且其中 Cr 与 Ni 之比近似1:2,因 此该钢具有良好的淬透性,钢中的镍元素还可以强 化铁素体,从而提高钢的强度和韧性,尤其对钢的低 温冲击韧性更为有利,含 Cr, Ni 的钢中加入 0.20~ 0.30%的 Mo 可以有效地抑制回火脆性。V 的加 入,可以形成 VC,在提高强度的同时,起到细化晶粒 的作用,因此该钢在淬火、中温回火后获得的回火托 氏体组织极为细密,具有良好综合力学性能,尤其是 具有较高的弹性性能和疲劳性能,所以该钢非常适 于制造火炮击针,在正常加工、热处理条件下,击针 应不会在打炮过程中出现断裂。

2) 火炮击针在使用中产生断裂,其原因有以下 几种可能:原材料材质缺陷:热处理工艺不完善:设 计和加工缺陷:使用环境存在腐蚀介质。从金相检 测可看出,心部及断口周围组织均为均匀、细小的回 火托氏体,没有产生类似的淬火软斑,属正常的热处 理组织,所以断口的产生应与淬火温度及淬火介质 无关。若断裂的原因是淬火过程中存在一定程度的 超温,导致晶界弱化,则断口附近组织应出现晶界熔 化、宽化和组织粗大等过热或过烧特征,但从断口上 的晶粒大小和断口附近的金相组织来看,晶粒和组 织均匀细小,未见明显粗大,所以可排除淬火过程中 存在一定程度的超温,导致晶界弱化的可能。通过 回火脆性浸蚀检测可以得出,热处理后的火炮击针 没有明显的回火脆性,因此火炮击针的断裂应与热 处理工艺无关。通过低倍检测、非金属夹杂物检测、 原材料的化学成分分析、硬度检测可以看出:原材料 的化学成分、硬度、非金属夹杂物、低倍组织均符合 要求,原材料的洁净度高、力学性能较佳,材质优良, 可以排除材质缺陷引起火炮击针断裂的可能性。通 过宏观观察和微观检测可知:火炮击针断口的断面 上也无明显材质缺陷,这进一步说明了原材料的材 质正常,击针断裂应与原材料材质无关。

3) 击针断口在宏观上具有明显的贝纹线特征, 这说明击针断口宏观上具有疲劳断裂的特性:断口 周向存在许多条台阶条纹,贝纹线呈同心圆状、向瞬 断区弯曲,最终瞬断区位于断口中心偏一侧,即同心 圆状贝纹线的"圆心",说明断口属典型的多源疲劳 断口。疲劳断口上的台阶是由不同位置生核的微裂 缝互相汇合而成的,击针台阶数目多,这说明在击针 很多位置都同时达到了生成微裂缝的条件,所以击 针断裂过程中所受的应力较大[5-11]。贝纹线的密 度较稀、疲劳源及疲劳破断区色泽灰暗和粗糙度较 大,则进一步说明击针螺纹处受到的应力和过载很 大。裂纹源产生于螺纹槽根部 R 处,由于圆角较 小,螺纹槽根部加工无圆弧过渡,相当于存在线性缺 口,形成了较大应力集中,故多个疲劳源在转角处多 重萌生,同时由表面向里扩展,最终使瞬断区形成在 中部。击针的颈部存在较深的加工刀痕,进一步加 剧了应力集中,由于机加时颈部留下较深的刀痕,且 R角较小,故击针使用过程中,在刀痕处会产生明显

的应力集中,导致在外圆产生多疲劳源裂纹,引起早 期疲劳断裂^[8-16]。

4)火炮击针螺纹槽根部转角处长期接触发射 药发射后产生的高温气体生成物,发射药形成的气 体对火炮击针具有腐蚀作用。由于螺纹槽根部 R 转角处存在表面缺陷,其周围组织耐发射药气体的 腐蚀性必然较差,腐蚀会导致击针螺纹槽根部转角 处出现点蚀坑。同时由于火炮击针螺纹齿和螺纹根 部转角处应力较大,而该处表面出现的点蚀坑破坏 了该处的表面完整性,形成了较大的应力集中,导致 在点蚀坑处萌生了早期疲劳裂纹。

3 结论

 击针断裂为早期疲劳断裂,是在打炮时受到 反复冲击载荷作用产生的。

2)引起击针疲劳断裂失效的原因主要有两方面:一是螺纹槽根部 R 较小,产生了明显的应力集中;且该处机加工比较粗糙,刀痕较深,进一步加剧了应力集中。另一个原因是发射药形成的高温气体对火炮击针螺纹槽根部有腐蚀作用。

避免击针断裂,需要改善设计和机加工操作技能,一是要保证 R 不能太小,截面过渡应平滑自然; 二是改进机加工水平和能力,确保击针颈部不出现 明显的机加工刀痕,以降低击针颈部的应力集中。

参考文献:

 [1] 姜锡山.钢中非金属夹杂物[M].北京:冶金工业出版 社,2011:359—361.
 JIANG Xi-shan. Non-metallic Inclusions in Steel [M].

Beijing: Metallurgical Industry Press, 2011:359-361.

[2] 杨伶俐,包燕平,刘建华.钢中夹杂物[J].炼钢,2009, 25(4):35-37.

> YANG Ling-li, BAO Yan-ping, LIU Jian-hua. Non-metallic Inclusions in Steel[J]. Steelmaking, 2009, 25(4): 35—37.

[3] 幸伟.钢中夹杂物去除技术进展[J].特殊钢,2009,30 (2):35-38.

> XING Wei. Progress of Removal Technology of Steel Inclusions[J]. Special Steel, 2009, 30(2):35-38.

[4] 张莉萍. 浅谈钢中夹杂物的控制对钢质量的影响[J].
 包钢科技,2002,28(4):84—88.

ZHANG Li-ping. Influence of Control of Inclusions on the Quality of the Steel [J]. Baotou Steel Technology, 2002,28(4):84—88.

[5] 胡世炎,机械失效分析[M].成都:四川科学技术出版 社,1998:507—508.

HU Shi-yan. Mechanical Failure Analysis[M]. Chengdu: Sichuan Science and Technology Press, 1998:507-508.

- [6] 张栋,钟培道,陶春虎,等. 失效分析[M]. 北京:国防 工业出版社,2004:131—135.
 ZHANG Dong, ZHONG Pei-dao, TAO Chun-hu, et al. Failure Analysis [M]. Beijing: National Defense Industry Press,2004:131—135.
- [7] 任颂赞,张静江,陈质如,等.钢铁金相图谱[M].上海:上海科学技术文献出版社,2003:804—805.
 REN Song-zan,ZHANG Jing-jiang,CHEN Zhi-ru, et al. Steel Metallographic Map[M]. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press,2003:804—805.
- [8] 廖凌,叶顶鹏,袁中华. S135 钻杆刺失效分析[J]. 理化 检测-物理分册,2009,45(9):583—585.
 LIAO Ling, YE Ding-peng, YUAN Zhong-hua. Piercing Failure Analysis of S135 Drill Pipe[J]. Physical Testing and Chemical Analysis Part-Physical Testing, 2009,45 (9):583—585.
- [9] 石强,王威强,汤杰,等.活塞式压缩机联轴器连接螺 栓断裂原因分析[J].理化检验-物理分册,2012,48
 (3):203—205.

SHI Qiang, WANG Wei-qiang, TANG Jie, et al. Analysis on Fracture Reason of Bolt on Piston Compressor Coupling [J]. Physical Testing and Chemical Analysis Parta-Physical Testing, 2012, 48(3):203-205.

- [10] 余其中. 吊车转盘连接螺栓断裂分析[J]. 理化检验-物理分册,2012,48(3):194—196.
 YU Qi-zhong. Fracture Analysis on Binding Bolt of Crane Turnplate[J]. Physical Testing and Chemical Analysis Parta-Physical Testing,2012,48(3):194—196.
- [11] 路彩虹,刘永刚,王新虎,等. Φ165.1 mm 钻铤内螺纹 接头失效分析[J].理化检验-物理分册,2010,46(6): 396—399.

LU Cai-hong, LIU Yong-gang, WANG Xin-hu, et al. Fracture Analysis on Φ165. 1 mm Drill Collar Box [J]. Physical Testing and Chemical Analysis Part – Physical Testing, 2010, 46(6): 396–399.

[12] 徐永明,高芸,杨庆富. 发动机零件腐蚀后表面麻坑缺陷的分析[J]. 失效分析与预防,2008,3(2):28—30.
 XU Yong-ming, GAO Yun, YANG Qing-fu. Pit Defect Analysis on Surface of Part in an Engine after Corrosion

[J]. Failure Analysis and Prevention, 2008, 3(2):28-30.

- [13] 白明远,刘高远,王大为.发动机传动齿轮断裂失效分析[J].失效分析与预防,2007,2(3):37—41.
 BAI Ming-yuan,LIU Gao-yuan, WANG Da-wei. Fracture Failure Analysis of Transmission Shaft Gear of an Engine
 [J]. Failure Analysis and Prevention,2007,2(3):37—41.
- [14] 朱凯,何军,陈志川. 转臂开裂原因分析[J]. 失效分析 与预防,2007,2(3):42-45.
 ZHU Kai, HE Jun, CHEN Zhi-chuan. Analysis of Fracture of an Abutment [J]. Failure analysis and Prevention,

(上接第40页)

- [10] GUPTA P K, GUPTA N K. A Study on Axial Compression of Tubular Metallic Shells having Combined Tube-cone Geometry[J]. Thin-walled Structures, 2013, 62:85–95.
- [11] 吴进,贾芬,王蒙蒙,等. 石膏型渗流制备泡沫铝填充圆管压缩行为研究[J]. 精密成形工程,2011,3(4): 22-25.

WU Jin, JIA Fen, WANG Meng-meng, et al. Study on Compressive Behavior of Foam-filled Tubes Prepared by Gypsum Mould Infiltrating Casting [J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2011, 3(4):22-25.

[12] 陈吉生,鄂大辛,张敬文.1Cr18Ni9Ti 管材拉伸断裂过 程中裂纹扩展的研究[J]. 兵工学报,2013,34(7): 865-868.

> CHEN Ji-sheng, E Da-xin, ZHANG Jing-wen. Research on Crack Propagation in the Crack Process of 1Cr18Ni9Ti Tube Under Uniaxial Tension [J]. Acta Armamentarii. 2013,34(7):865—868.

[13] 陈吉生,鄂大辛,张敬文. 材料模型对 1Cr18Ni9Ti 管材 拉伸有限元仿真的影响[J]. 精密成形工程,2012,4 (4):10-12.

CHEN Ji-sheng, E Da-xin, ZHANG Jing-wen. Effects of Material Models on Finite Element Simulation for Uniaxial 2007,2(3):42-45.

 [15] 崔约贤,王长利.金属断口分析[M].哈尔滨:哈尔滨工 业大学出版社,1998:77—91.
 CUI Yue-xian, WANG Chang-li. Metal Fracture Analysis
 [M]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 1998:

77—91.
[16] 秦会常,贾波,王传政,等. 某药模底座失效分析[J].
精密成形工程,2013,5(1):54—57.
QIN Hui-chang, JIA Bo, WANG Chuan-zheng, et al.
Failure Analysis of Punch for Pressing Powder Block[J].
Journal of Netshape Forming Engineering, 2013, 5(1):

54—57.

Tension of 1Cr18Ni9Ti Tube [J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2012, 4(4):10-12.

- [14] 刘娟,鄂大辛,张敬文.小直径薄壁管直接拉伸方法研究[J].实验技术与管理,2012,29(3):56—58.
 LIU Juan, E Da-xin, ZHANG Jing-wen. Study on Tensile Method of Thin-walled Tube with Small Diameter[J].
 Experimental Technology and Management,2012,29(3): 56—58.
- [15] E Da-xin, HE H H, LIU X Y, et al. Spring-back Deformation in Tube Bending[J]. International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials, 2009, 16(2):177-183.
- [16] E Da-xin,LIU Y F. Springback and Time-dependent Springback of 1Cr18Ni9Ti Stainless Steel Tubes under Bending
 [J]. Materials and Design,2010,31(3):1256—1261.
- [17] 钱匡武,李效琦,肖林钢,等. 金属和合金中的动态应 变时效现象[J]. 福州大学学报(自然科学版),2001, 29(6):8—23.
 QIAN Kuang-wu,LI Xiao-qi,XIAO Lin-gang, et al. Dynamic Strain Aaging Phenomenon in Metals and Alloys

namic Strain Aaging Phenomenon in Metals and Alloys
[J]. Journal of Fuzhou University (Natural Science),
2001,29(6):8-23.

(上接第44页)

CHEN Zhe, LU Wei, YAN Biao. Research Progress of Preparation of High Entropy Alloy by Mechanical Alloying [J]. Metallic Functional Materials,2012,19(3):52-54.

[15] 李国德,王艳,曹中秋. 晶粒细化对金属 Cr 在含 Cl⁻介 质中腐蚀电化学行为的影响[J]. 化工学报,2012,63

(2):561-567.

LI Guo-de, WANG Yan, CAO Zhong-qiu. Effect of Refined Grain Size on Corrosion Behavior of Metal Cr in Media Containing Chloride Ions[J]. CIESC Journa, 2012, 63(2):561—567.

50