

六角紧固件

失效原因分析



文/ Keith Bailey

紧固件的表现受到几个因素影响，包含设计负载、冶金特性决定之等级与外型。设计师或工程师会根据负载需求选择特定尺寸紧固件。选择时的考量往往包含：环境、寿命、成本、剪力与张力负载。高等级的紧固件常用于攸关生死，可能会造成财物重大损失的关键应用。在ASTM F 606里面的「Standard Test Methods for Determining the Mechanical Properties of Externally Threaded Fasteners, Washers and Rivets」中有规范。该测试法分析螺身到螺头曲面之直径。

本文探讨L9级六角头紧固件冶金失效的原因分析，其无法符合ASTM F 606之3.5.1的规范（图1）。测试并采用冶金分析来找出可能失效的原因，该破坏性冶金调查包含整体检测、截面检测、合金化学分析、微检测、硬度评估、机械测试。



图1 紧固件之破坏性冶金检验摄影

整体检测与截面检测分析

初步检测破裂螺栓，是采用肉眼以及7-30倍的显微镜。初步检验发现，紧固件螺身均产生楔型之变形，如ASTM F 606所述（图2）。

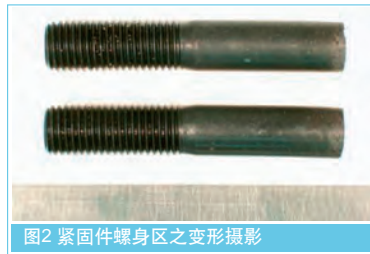


图2 紧固件螺身区之变形摄影

针对螺头表面分析发现，特定区域变形的情况，与楔型机械测试的结果一致（图3与4）。针对破裂与其他区域之评估，则与SAE J 123



图3 紧固件A螺头之表面负载测试摄影 | 图4 紧固件B螺头之表面负载测试摄影

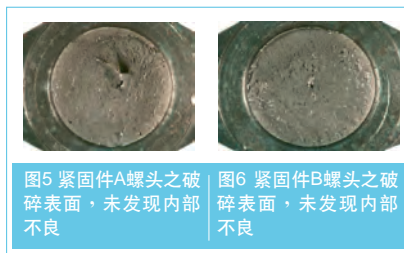


图5 紧固件A螺头之破碎表面，未发现内部不良

图6 紧固件B螺头之破碎表面，未发现内部不良

的Section 3（图5-8）所述之生产不良或表面不平无关。此外，表面不良例如：空洞、内部破裂、铸造流痕、明显氧化、淬火破裂等并没有发生。也没有发现到表面不平，例如：淬火破裂、缝隙、突出、剪力突出、空洞、重叠、折叠、工具痕迹、明显凹凸等。针对表面失效的分析则在破碎发生与最后失效区（图3-6）发现剪切唇（shear lip）。这些观察与楔型机械测试结果一致。

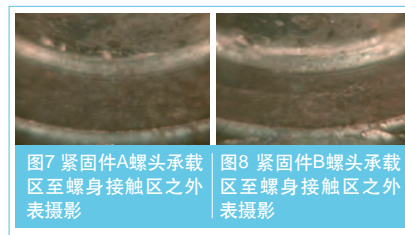


图7 紧固件A螺头承载区至螺身接触区之外表摄影

图8 紧固件B螺头承载区至螺身接触区之外表摄影

另也使用高倍率观察紧固件破碎表面，找出失效原因。此分析采用扫描式电子显微镜。

分析结果显示，破碎表面均呈现凹陷，外观之延展过负荷则与楔型测试一致（图9与10）。针对破碎发生区域的评估发现，剪力凹陷且缺乏氧化层，代表可能发生淬火破裂不良。

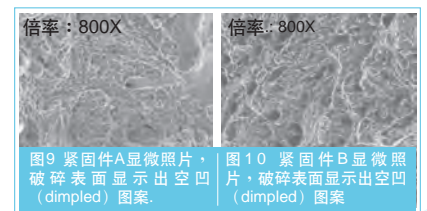


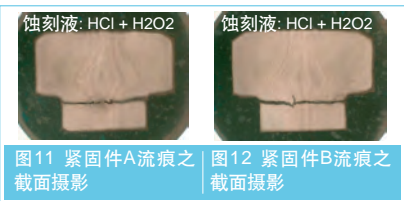
图9 紧固件A显微照片，破碎表面显示出空凹（dimpled）图案。

图10 紧固件B显微照片，破碎表面显示出空凹（dimpled）图案。

每一个螺头/螺身的截面，都是采用水力切断机取得破碎区附近的纵向截面进行流痕分析。这些截面均符合ASTM E 3的金相学规范。

分析结果显示，紧固件的流痕截面未发现重入或重叠（图11与12）。

本阶段分析可得到结论：紧固件经楔型测试，且没有制造过程形成之外部表面不良。破裂面分析显示此为延展过度负荷失效，与此类型等级之紧固件表现一致。



化学分析

针对紧固件螺身，另外进行基本合金组成，依照Fed Test Standard 151B, Method 112.2标准，进行光学放射光谱测试（Optical Emission Spectroscopy, OES）。此测试结果显示，两紧固件的合金均符合UNS G41400（4140, Cr-Mo Alloy Steel）标准，测试结果亦符合需求者之基本标准，结果可参见表1。

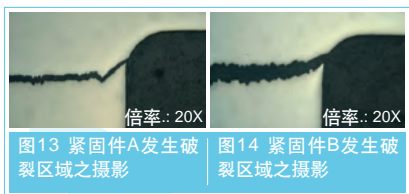
元素	紧固件A 基本合金 (wt%)	紧固件B 基本合金 (wt%)	UNS G41400合金规范1 (wt%)
C	0.41	0.42	0.38-0.43
Cr	0.92	0.93	0.80-1.10
Mn	0.79	0.80	0.75-1.00
Mo	0.20	0.20	0.15-0.25
P	0.008	0.008	0.035 max
S	0.022	0.020	0.040 max
Si	0.26	0.26	0.15-0.35
Fe	Base	Base	Base

表1 按重量之UNS G41400 (4140)紧固件基础合金元素成分

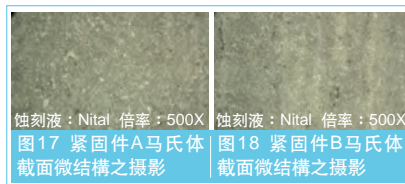
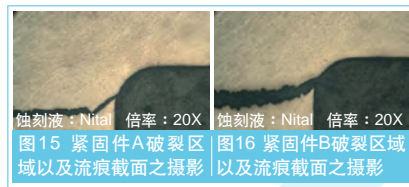
微结构检验

首先，针对受测L9级紧固件以及本报告前述之「整体检测与截面检测分析」章节，进行无蚀刻与轻度蚀刻状态测试。

检视两种截面後发现，失效发生区并未出现氧化层（图13与14），截面之螺头/螺身也未发现显著之浸入/氧化。在蚀刻截面则发现，破碎发生区与流痕微结构一致

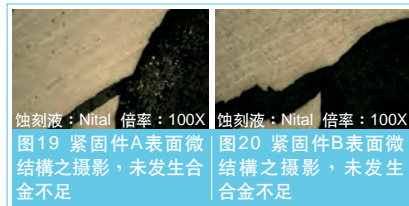


（图15与16）。紧固件之截面同时也显示出马氏体矩阵，以及小部分的铁氧体



（图17与18）。检视表面时则未发现蚀刻效应，代表脱碳与合金不足的状况是可

接受的（图19与20）。此微结构检查并未发现会导致紧固件失效之微结构不良。截面显示常见的马氏体矩阵表面并未发现合金不足，且无过量的渗入/氧化发生，破碎发生区与流痕一致。



硬度分析

微硬度测试脱碳，采用500公克装载之努氏压头（Knoop indenter），并符合ASTM E 384 per Section 3.5.1 of AMS 2759/1D标准。挑选此规格的原因，乃因图片并未说明脱碳分析规格，因而挑选最严格之标准，本分析采用表1的ASTM E140转换为HRC。对直径中央的核心硬度分析，则采用United True Blue Hardness Tester，并符合SAE J 429的ASTM E 18 per Section 3.13。

分析结果显示，紧固件A/B的表面合金硬度在20 Knoop点分别为0.003"与0.004"（表2）。分析结果高於AMS 2759/1D规范需求，也就是核心与表面20 Knoop点最大深度差距为0.005"。

直径中央分析结果显示，紧固件A/B平均硬度为43 HRC与41 HRC，直径中央区之38-44 HRC硬度，符合客户之规范。

机械测试

两紧固件螺身区分别进行延展测试，符合ASTM E 8规范。

紧固件	深度(in.)	硬度(HK)	平均硬度(HK)
A	Core	466	456
"	"	452	
"	"	450	
A	0.002	421	---
"	0.003	448	---
B	Core	463	463
"	"	463	
"	"	463	
B	0.002	385	---
"	0.003	421	---
"	0.004	448	---

表2 紧固件A与B核心与表面之微硬度测试结果

分析结果显示，紧固件A/B的最大张力强度为193 ksi与194 ksi (表3)。紧固件基本合金超过客户图示要求之180 ksi。失效强度、伸长比例、面积缩小比例可参见表3。

紧固件	最大张力强度 (ksi)	失效强度 (ksi)	延长度 (%)	面积缩小比例 (%)
A	193	180	16	43
B	194	179	15	53

表3 对测试条进行紧固件A与B之机械测试资料

结论

针对两送件之紧固件进行的冶金分析显示，最可能造成失效的原因，应该是螺头至螺身接合处之直径较小所致。针对表面与截面之整体检验与微检验，未发现会导致头身接合处失效的不良成因。针对破碎区之分析则显示出过度延展失效，其失效模式符合此等级与类型之紧固件。化学分析也显示，其基本合金符合客户要求之成分。截面分析也发现此等级与类型之紧固件常见之马氏体矩阵。硬度分析则未发现明显的表面脱碳。核心硬度测试显示，两紧固件均符合客户规范。机械测试显示，紧固件A/B的最大延展强度符合最小180 ksi的规范。

与供应商讨论之後，将螺头至螺身接合处之直径进行修正後，已将本区域造成之失效率降为零。根据以上资讯与冶金学分析，可推断本失效的原因为紧固件外型设计，因接合处直径较小所导致。