



某压力容器壳体水压试验渗水原因分析及预防措施

■ 张志正, 刘洋, 杨立合

摘要: 对某航天产品压力容器壳体水压强度试验渗水原因进行了分析和讨论, 通过对工艺过程排查和对渗水点缺陷的微观分析, 表明原材料疏松缺陷在锻造、热处理等热加工时被扩大化, 最终穿透薄壁壳体, 导致在水压试验时渗水, 从原材料、加工过程、试验检测等方面针对性地提出了质量隐患预防措施。

关键词: 压力容器; 水压试验; 渗水原因; 预防措施

航天产品压力容器壳体的液压强度试验是检验产品质量与可靠性的关键试验之一。某压力容器壳体在水压试验时, 发现壳体球形面基体上出现渗水现象。本文对压力容器壳体水压试验基体渗水原因进行分析, 并有针对性地提出了质量隐患预防措施, 为实际生产提供参考。

一、水压试验渗水情况

压力容器壳体材料为合金结构钢30CrMnSiA, 类似半球形壳体结构, 壳体壁厚变化不均匀, 球形面处最薄, 厚约3mm, 属于薄壁零件。本批次壳体制造完毕, 在进行水压强度试验时, 其中一件壳体出现渗水现象。水压在2.0MPa稳压15s后, 发现壳体表面上有一直径约3mm的水滴, 渗水点位于半球形壳体球面靠近中心位置, 见图1。仔细检查壳体外观质量, 未发现裂纹、划痕、撞迹、锈蚀点、掉块、变形等缺陷。

二、渗水原因分析

1. 原因的初步判定

对压力容器壳体生产工艺进行调查, 主要工艺流程如下:

锻造→退火→粗车→表面渗透无损检测→精车→焊接成压力容器部件→整体真空热处理→精车成形→压力容器总装→进行水压强度试验。

从壳体的加工工艺路线可以看出, 主要的工序有锻造、机加工、焊接、热处理4个工序。各主要工序后的壳体外形尺寸变

化, 如图2所示。壳体的加工是一个零件壁厚减薄的过程, 在最终加工成壁厚3mm的薄壁件上, 出现了缺陷。由于焊接缺陷一般出现在焊缝部位, 且焊接完焊缝处经过渗透无损检测, 质量合格。渗水点距焊缝约8mm, 在焊缝热影响区之外, 不可能是焊缝缺陷。水压试验后仔细检查了壳体表面, 表面光滑, 无刀痕、划伤等缺陷, 排除机加工缺陷。由此初步判断锻造、热处理两个工序产生的缺陷可能是引起壳体零件失效的原因。



图1 壳体表面渗水现象

从压力容器壳体基体渗水现象看,说明基体上存在穿透性缺陷,并且这种穿透性缺陷尺寸极小。开裂或穿孔均有可能造成壳体出现穿透性缺陷,开裂主要包括锻造裂纹、焊接裂纹和热处理裂纹,穿孔主要包括原材料疏松组织、焊接孔和机械加工造成的表面穿孔^[1]。

综合以上两点,判定壳体缺陷可能是锻造裂纹或热处理裂纹,也可能是材料疏松组织。

2. 零件解剖分析

对渗水的压力容器壳体解剖,取缺陷部位试样进行分析。分析过程如下:通过荧光检测技术确定缺陷具体位置,然后选择试样打磨、抛光,进行金相检测 and 能谱分析。

荧光检测结果显示试样两侧缺陷孔洞不完全吻合,如图3所示。打磨抛光试样,在金相显微镜下观察到缺陷形貌如图4所示,缺陷呈不连续、有分支的不规则线状,无裂纹走向趋势;经能谱分析,线状缺陷孔间无非金属夹杂物。试样经腐蚀后缺陷处金相显微形貌显示,沿缺陷边缘白色不连续线条状即为氧化物,如图5所示。

从金相图片看,缺陷整体形貌呈疏松的不致密组织,没有裂纹扩展趋势,缺陷边缘出现氧化现象,说明热加工之前已经存在,即为原材料组织缺陷。

3. 分析与讨论

原材料组织缺陷中的组织疏松在锻造、热处理时被扩大,但没有进一步扩展成宏观裂纹,

仍然保持着很小尺寸,这也与渗水现象高度吻合。因此,可以确定原材料组织疏松缺陷是造成零件失效的直接原因,锻造、热处理后零件继续加工,内部缺陷暴露。从原材料方面并结合锻造、热处理两个工序进行具体分析。

(1) 原材料组织缺陷分析 原材料疏松缺陷分为一般疏松和中心疏松。一般疏松分散在棒材整个横截面上,中心疏松集中分布于棒材横截面中心部位,而非分散在整个截面上^[2]。从渗水位置和渗水程度看,渗水点位

于相当于棒材横截面中心部位且只有一处渗水,符合中心疏松引起的缺陷特征。

(2) 锻造工艺分析 锻造形成的穿透性缺陷主要以裂纹形式出现,根据裂纹在锻件上的位置不同,分为外裂与内裂两种。外裂通过宏观或微观金相观察,内裂只能用解剖或无损检测加以判断。锻造裂纹产生的过程,首先是在裂纹源处萌生微观裂纹,然后扩展为宏观裂纹。微观裂纹的萌生是由于原材料中存在的冶金和组织缺陷,比如偏析、夹

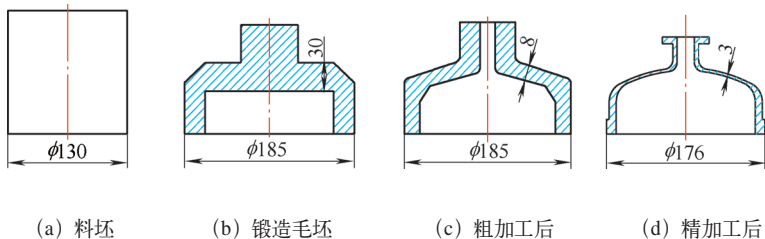


图2 壳体生产过程外形尺寸变化示意



(a) 渗水点内侧

(b) 渗水点外侧

图3 荧光检测缺陷处

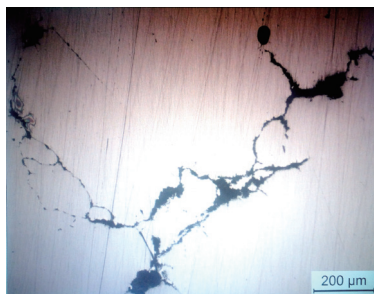


图4 缺陷处金相显微形貌 (50×)

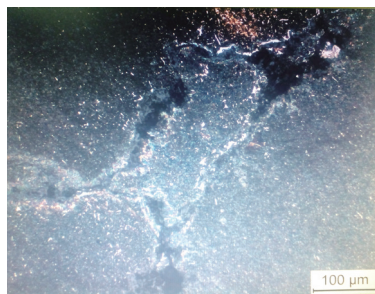


图5 缺陷处腐蚀后金相显微形貌 (100×)

杂、粗晶、疏松、气孔、第二相析出等。能否产生裂纹，除了内在原因外，还受热力学变形条件的影响。例如弯曲工件、外侧受拉裂开等。在加热或冷却时，由于温度不均，造成坯料热胀或冷缩不均匀引起热应力过大，受拉部位可能产生裂纹。其次，在组织转变时产生组织应力，锻坯中，比体积增加部位受压应力，而比体积减少部分受拉应力作用，尤其在高合金钢加热或冷却中上述内应力较大，一旦和残余应力叠加往往导致裂纹破坏。

压力容器壳体由棒料料坯采用模锻方式锻造成形，锻造工艺参数为700℃预热，始锻温度1140℃，终锻温度850℃，符合相关标准规定，锻造过程未发现异常现象。锻造时，料坯在锻模内受三向压应力，无撕裂倾向。所以认为，此缺陷是锻造加热时的高温 and 锻造变形时的应力变化使材料内部疏松处萌生微观裂纹。

(3) 热处理工艺分析 热处理是容易造成裂纹的主要环节，压力容器壳体热处理工艺成熟稳定，热处理前进行了消除焊接应力退火，且缺陷位置平滑过渡，不存在应力集中点。但是，经过锻造、机加工的壳体缺陷位置厚度3mm左右，锻造时萌生微观裂纹或材料内部细小的疏松缺陷已经暴露在表面甚至穿透壳体，热处理时高温加热使得这些缺陷部位被氧化、脱碳，缺陷被扩大化，形成穿透性缺陷。

综上分析，零件料坯经模锻成形、粗车加工后进行表面渗透检测，未发现有缺陷存在，这

是因为锻件粗车加工后壁厚仍有8mm左右，如图2c所示，渗透检测主要针对零件表面缺陷，零件内部尺寸很小的缺陷难以探测到。经过锻造没有锻合或消除的疏松组织，在后序加工生产过程中，特别是精加工后，压力容器壳体壁厚仅为3mm，如图2d所示，热处理工序中高温加热使得疏松部位氧化、脱碳，疏松缺陷被扩大化，内部细小缺陷暴露在表面甚至穿透壳体，在水压试验中发生渗水现象。

三、预防措施

压力容器壳体水压试验渗水有原材料的直接原因，也有热加工、检验方面的间接原因。因此，把好选材关和制造关，从根本上解决本身存在缺陷、加工质量差等问题，加强检验、测试控制，从而将质量、安全隐患消除在萌芽阶段，以免造成产品使用阶段更大的事故和损失^[3]。

1. 原材料质量控制

原材料是零部件加工质量的基础，其质量决定了零部件的质量，因此应提高原材料的复验要求，严格控制原材料质量。采购时除供货方提供产品质量证明书外，全面复查各项性能指标，细化明确检测方法，从材料源头上防止质量问题发生。

2. 热加工过程质量控制

对锻造、热处理等热加工特殊过程，对相关检验人员进行技术交底，强调检验重点控制点，特别是用于关键零部件的锻件，按相关标准和具体要求进行锻件

各项目复验，保证关键过程质量。

3. 试验有效性控制

对加工成形的产品进行相关试验、测试时，应细化试验步骤，明确试验重点控制点；对相关试验设备进行改进，提高设备数据的可靠性，防止问题产品进一步流转，将隐患控制在生产试验阶段。

四、结语

压力容器壳体作为一种特种设备，一旦出现失效，将造成严重经济损失，酿成巨大事故。针对各个生产环节容易导致失效的原因，应不断进行细致的研究和总结，加强从原材料到生产过程、成品检验等全生产周期质量控制，确保各个环节的受控，是确保压力容器壳体等航天产品质量的关键所在。

参考文献

- [1] 廖景娱, 刘正义. 金属构件失效分析[M]. 北京: 化学工业出版社, 2003.
- [2] 郑辉, 付宪强, 谢奎龙. S355J2G3钢疏松缺陷控制[J]. 特钢技术, 2013, 19: 20~22.
- [3] 陈瑞祥. 压力容器失效事故原因分析与预防[J]. 内蒙古石油化工, 2010, 19: 63~64.

作者简介: 张志正、刘洋, 杨立合, 西安长峰机电研究所。

MW 20161008