

拉深成形对于 Q&P980 高强度钢氢致延迟 断裂影响的实验研究

叶又¹, 陈佳捷¹, 濮振谦², 林建平²

(1. 泛亚汽车技术中心有限公司, 上海 202106; 2. 同济大学, 上海 200092)

摘要: **目的** 从整车厂应用的角度出发, 基于拉深工艺, 研究 Q&P980 高强度钢的氢致延迟断裂敏感性。**方法** 选取 1.6 mm 板厚的 Q&P980 高强度钢, 进行拉深系数为 0.56 和 0.63 的两种冲杯实验, 以电化学充氢结合摄像头定时拍摄的方法, 并结合 ABAQUS 软件计算杯口应力集中处的应力和应变。**结果** 对于 1.6 mm 板厚的 Q&P980 高强度钢, 在拉深试样杯口边缘应力集中处, 应力大致在 900~1000 MPa 范围, 而应变大于等于 0.32, 则必然发生延迟开裂; 若应变小于等于 0.23, 则延迟断裂敏感性较低。**结论** 应力和应变同时影响高强度钢的氢致延迟断裂敏感性, 即对 Q&P 980 (1.6 mm 厚度) 零件, 当拉深边缘应变小于 0.23, 则该位置氢致延迟断裂可能性低; 若应力集中处残余应力达到 900 MPa 以上, 应变达到 0.3 以上, 则该位置氢致延迟断裂敏感性高。此结论对工程应用判断拉深零件氢致延迟断裂有一定指导意义,

关键词: Q&P 钢; 拉深系数; 应力; 应变; 氢致延迟断裂

DOI: 10.3969/j.issn.1674-6457.2019.02.014

中图分类号: TG142.1 文献标识码: A 文章编号: 1674-6457(2019)02-0076-05

Effects of Drawing on Sensitivity of Hydrogen Induced Delayed Fracture of Q&P980

YE You¹, CHEN Jia-jie¹, PU Zhen-qian², LIN Jian-ping²

(1. Pan Asia Technical Automotive Center, Shanghai 202106, China;

2. Tongji University, Shanghai 200092, China)

ABSTRACT: The research aims to study the hydrogen induced delayed fracture performance of Q&P980 based on drawing process from the standpoint of OEMs. Q&P980 high strength steel with a thickness of 1.6mm was selected. By two specimens with the drawing coefficient of 0.56 and 0.63, the experiment method of electrochemical hydrogenation and the simulation of ABAQUS were combined to calculate the stress and strain at the stress concentrated area. For Q&P980 with a thickness of 1.6 mm, in the stress concentration area, the fracture appeared when stress was among 900~1000 MPa while the strain level was not less than 0.32. However, if the strain level was lower than 0.23, the hydrogen induced delayed fracture sensitivity was low. Stress and strain affect the hydrogen induced delayed fracture sensitivity of high strength steel simultaneously: for component of Q&P980 (1.6 mm thickness), when the strain of drawing edge is lower than 0.23, the hydrogen delayed fracture sensitivity is low; while stress is higher than 900 MPa and strain is higher than 0.3, the hydrogen delayed fracture sensitivity is high. This conclusion provides guidance for judging hydrogen induced delayed fracture of drawn parts in engineering application.

KEY WORDS: quenching-partitioning steel; drawing coefficient; stress; strain; hydrogen induced delayed fracture

收稿日期: 2019-02-12

作者简介: 叶又 (1968—), 男, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为汽车零部件金属材料选用、新材料/工艺的开发应用、各类紧固连接的设计/计算/试验等。

随着汽车整车轻量化与安全性能要求的不断提高, 超高强钢的应用已经成为重要的发展趋势。新一代先进超高强钢中的淬火配分 (Q&P) 钢^[1-2]由于其同时具有高强度与高塑性的特点, 在汽车工业中具有很好的应用前景。淬火配分钢在准静态下的抗拉强度达到 1000 MPa 以上, 断裂伸长率可以达到 20% 左右, 然而该强度级别下, 材料的氢致延迟断裂敏感性上升是制约超高强钢在整车应用上的主要问题之一^[3-4]。目前, 对于超高强钢的氢致延迟断裂敏感性的研究主要集中在材料级别基础研究中, 包括材料合金元素^[5-8]、微观组织^[9-10]、内部缺陷^[11-12]以及服役条件^[13-16]等等因素的影响。从汽车零件应用与成形的角度, 尤其是拉深成形角度, 对于高强钢氢致敏感性的研究较少, 淬火配分钢相关的研究更少。

所谓拉深工艺, 是指一块平板坯料在凸模的作用

下, 通过凹模形成一个开口空心零件的压制过程, 也是汽车用板料成形过程中最重要也是最常见的工艺之一。文中以拉深成形为典型对象, 结合 ABAQUS 软件仿真, 初步探索拉深成形对淬火配分钢延迟断裂敏感性的影响。

1 Q&P980 钢氢致延迟断裂实验

实验材料来自于宝钢通过冷轧及退火工艺生产的 Q&P980 钢, 其基本化学成分见表 1。其中, 微观组织中的铁素体、马氏体、残余奥氏体的体积分数分别为 32%, 57%, 11% 左右。其微观组织形貌见图 1, 3 种相特征分别为: 粗糙的表面结构是马氏体, 铁素体相对比较光滑并且有很少的表面特征, 残余奥氏体特别光滑并且没有表面特征。

表 1 Q&P980 钢化学成分 (质量分数)

Tab.1 Chemical components of Q&P980 (mass fraction)

%

C	Mn	Si	Ni	Mo	Al	N	S	P	Fe
0.20	1.80	1.51	0.01	0.01	0.036	0.005	0.005	0.012	余量

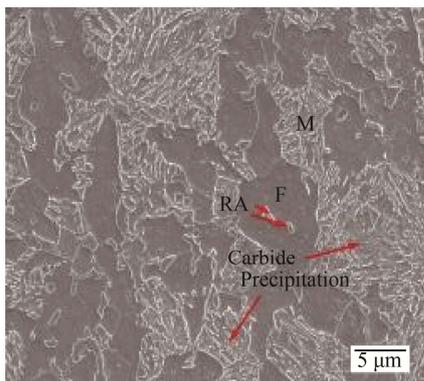


图 1 Q&P980 钢 SEM 金相组织
Fig.1 SEM image of Q&P980

氢致延迟断裂实验采用加速充氢法。选取板厚为 1.6 mm 的无镀层 Q&P980 高强钢作为研究对象。为了避免因边缘质量引起实验的不准确, 采用激光切割 (非电火花线切割) 获取直径为 90 mm 和 80 mm 的原型坯料各 3 个。对坯料厚向边缘使用 600# 砂纸打磨至光亮, 然后用无水乙醇擦拭后晾干。采用直径为 50 mm 的凸模和直径为 54 mm 的凹模, 拉深系数分别为 0.56 和 0.63, 用 32 kN 压边力对坯料进行完全拉深, 成为冲杯件。

使用无水乙醇擦拭冲杯件表面, 去除表面灰尘及油渍, 每批次 1 个试样。将试样完全浸没在 0.5 mol/L 的 NaOH 和 2 g/L 的 NaSCN 混合电解液中。在电流密度为 10 A/m² 情况下进行电化学充氢, 同时开启恒温磁力搅拌器对电解液进行搅拌, 使电解液温度维持在 20 °C。

采用双摄像头拍摄并记录试样的延迟断裂过程见图 2, 通过软件设置拍摄速度为 15 s/帧, 接通电源开始进行电化学充氢的同时, 开启摄像头记录整个化学充氢过程。当试样开裂或 24 h 后均未出现裂纹, 则停止实验。在实验全部结束后, 逆序查看所有照片, 判断出杯形件试样杯壁缘口上裂纹启裂时的所在帧, 并将该帧对应时刻作为试样开裂时刻, 将其作为材料开裂时间。

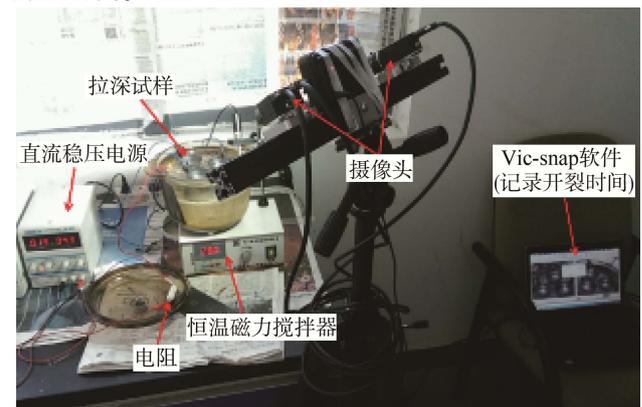


图 2 Q&P980 钢延迟断裂实验
Fig.2 Experiment of delayed fracture of Q&P980

2 结果分析

不同拉深系数延迟断裂情况见图 3, 拉深系数为 0.56 的所有试样在充氢过程中都发生了延迟断裂现象, 而所有拉深系数为 0.63 的试样在 24 h 的实验时间内均未发生延迟断裂。



a 拉深系数 0.56



b 拉深系数 0.63

图3 不同拉深系数延迟断裂情况

Fig.3 Delayed fracture with different drawing coefficients

逆序查看所有照片，延迟断裂时刻见图4，得出冲杯件试样杯壁缘口上裂纹启裂的时间，则为延迟断裂时间。Q&P980 高强钢不同拉深系数冲杯件延迟断裂时间见图5，由图5可见，在同样的充氢条件下，拉深系数分别为0.56(对应坯料直径90mm)和拉深系数0.63(对应坯料直径80mm)的两种冲杯件发生了截然不同的情况。前者在14min左右即发生了延迟断裂，而后者在24h时间内均未发生延迟断裂。由此可以得出，在拉深成形中，Q&P980 高强钢在拉深系数0.56和0.63之间，存在一个临界值，在这临界值以下时，其氢致延迟断裂敏感性大幅下降。反之则上升。研究与实验表明，延迟开裂发生在氢元素集中处，而氢元素的集聚很大程度上取决于应变与残余应力的大小，因此，需要分析冲杯的应力应变情况。

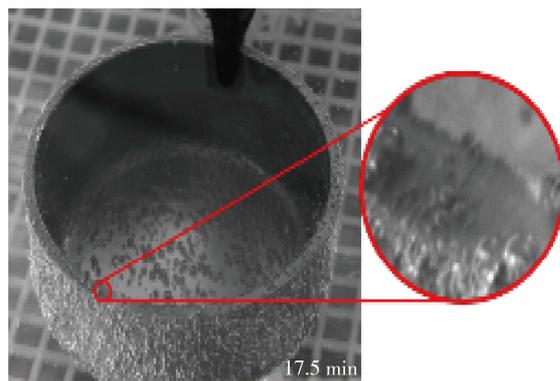


图4 拍摄照片的延迟断裂时刻
Fig.4 Moment when fracture happened

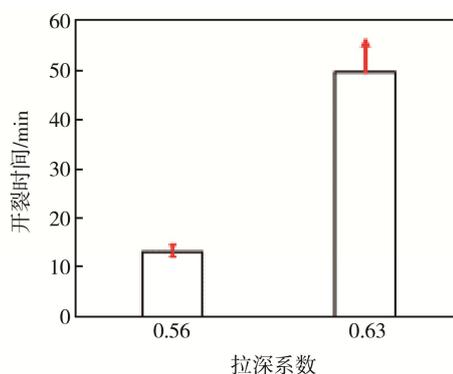
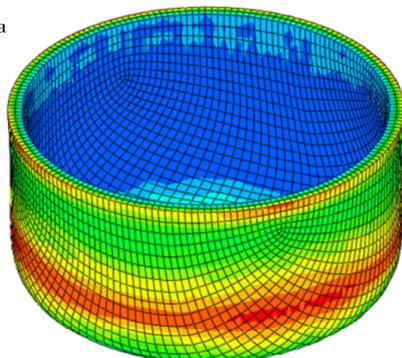
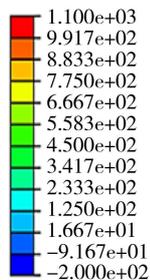


图5 Q&P980 高强钢不同拉深系数冲杯件延迟断裂时间
Fig.5 Time of fracture occurred for different drawing coefficients of Q&P980

3 冲杯件的应力应变分布仿真分析

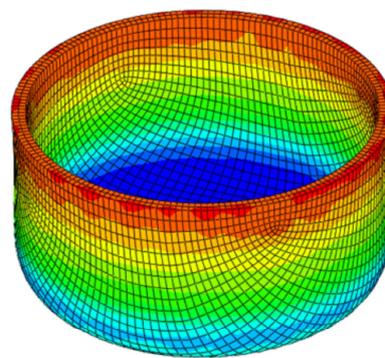
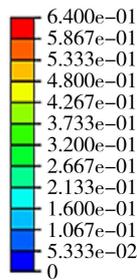
使用 ABAQUS 仿真软件，模拟 Q&P980 高强钢冲杯件的“拉深-回弹”过程。不同拉深系数下，试件的应力应变分布见图6和图7。仿真的中央集中变形处最小网格边长为1.5mm，厚向划分为2层。采用将冲杯件试样(回弹后)的高度、杯口直径的仿真值与实测值进行比较的方法，来验证仿真模型合理性。

S,Max. Principal/MPa
(Avg: 75%)



a 主应力云图

PEEQ
(Avg: 75%)



b 等效应变云图

图6 回弹后 Q&P980 高强钢冲杯件(拉深系数 0.56)

Fig.6 Drawing part of Q&P980 after spring-back (0.56 drawing coefficient)

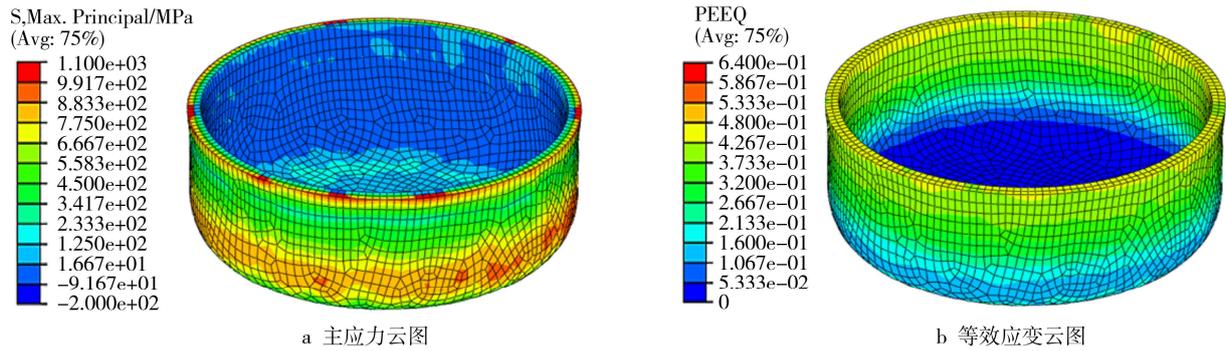


图 7 回弹后 Q&P980 高强钢冲杯件 (拉深系数 0.63)
Fig.7 Drawing part of Q&P980 after spring-back (0.63 drawing coefficient)

使用数显高度仪对每个冲杯试样分别进行 3 次高度测量,并求取平均值作为高度实测值。使用游标卡尺对每个冲杯试样分别进行 3 次杯口直径测量,并求取平均值作为杯口直径实测值。经测量后 Q&P980 冲杯试样(回弹后)的高度、杯口直径的仿真值与实测值见表 2(拉深系数 0.56)和表 3(拉深系数 0.63)。

表 2 Q&P980 高强钢冲杯试样(拉深系数 0.56)
参数仿真值与实测值对比

Tab.2 Simulation and tested data comparison of Q&P980 drawing part (0.56 drawing coefficient)

位置	平均仿真值/mm	平均实测值/mm	误差/%
试样高度	28.53	29.87	4.5
杯口直径	53.48	54.92	2.6

表 3 Q&P980 高强钢冲杯试样(拉深系数 0.63)
参数仿真值与实测值对比

Tab.3 Simulation and tested data comparison of Q&P980 drawing part (0.63 drawing coefficient)

位置	平均仿真值/mm	平均实测值/mm	误差/%
试样高度	18.97	20.58	7.8
杯口直径	53.65	54.88	2.2

比较表 2 和表 3 中冲杯试样高度和杯口直径的仿真值和实测值可发现,在拉深系数分别为 0.56 和 0.63 的两种试样中,高度平均仿真值与实测值误差分别为 3.6% 和 5.3%,杯口直径平均仿真值与实测值分别为 2.6% 和 2.2%。各项指标的误差值均较小,因此该仿真结果具有很好的合理性。

观察图 6a 和图 7a 可发现,冲杯试样在杯口处边缘都有残余应力(拉应力)集中的现象,说明延迟断裂裂纹首先是从杯口边缘启裂,这与实验结果相吻合。在两种拉深系数冲杯试样中,每个试样选择 3 处(分别标记为 1, 2, 3)杯口边缘应力集中处,通过 ABAQUS 软件,测量该位置的主应力大小和主应变大小,统计结果见表 4。

由表 4 可见,拉深系数为 0.56 的冲杯试样杯口应力集中处,其主应力大小在 930 MPa 到 960 MPa

表 4 冲杯试样杯口边缘应力集中处主应力和主应变
Tab.4 Principle strain and stress of stress concentrated area at drawing part rim

拉深系数	位置	主应力/MPa	主应变
0.56	1	934	0.328
	2	957	0.321
	3	941	0.314
0.63	1	975	0.234
	2	972	0.238
	3	1018	0.228

之间,主应变为约 0.32;而拉深系数为 0.63 的冲杯试样杯口应力集中处,其主应力大小在 970 MPa 到 1020 MPa 之间,主应变为约 0.23。从数值比较上看,拉深系数为 0.63 的冲杯试样比拉深系数为 0.56 的冲杯试样残余应力增大 3%~4%,而应变则减小 40% 以上,因此,在应变影响远大于残余应力的情况下,拉深系数为 0.56 的冲杯试样开裂。所以,应变与残余拉应力的成为影响 Q&P980 高强钢在拉深工艺中氢致延迟断裂敏感性强弱的主要因素。

4 结论

以 Q&P980 高强钢为研究对象,采用拉深系数为 0.56 和 0.63 的两种冲杯试样,通过电化学充氢结合摄像头定时拍摄的方式进行了实验,发现拉深系数为 0.56 的冲杯试样在约 14 min 内发生延迟断裂,而拉深系数为 0.63 的冲杯试样在大于 2 个数量级的时间(24 h)内都没有发生延迟断裂。该方法也可以用于其他高强钢成形延迟开裂敏感性的判断。经 ABAQUS 软件对“拉深-回弹”过程进行仿真,计算杯口应力集中处应力和应变,得出以下结论。

1) 应力和应变同时影响高强钢的氢致延迟断裂敏感性。Q&P980 高强钢拉深试样杯口边缘应力集中处为延迟开裂的危险区域,对于 1.6 mm 板厚的 Q&P980 高强钢,应力大致在 900~1000 MPa 范围,而应变大于等于 0.32,则必然发生延迟开裂;若应变

小于等于 0.23, 则延迟断裂敏感性较低。

2) 对于工程应用, 则汽车企业生产的 Q&P980 高强钢 (1.6 mm 厚度) 拉深零件, 也可以参照此方法, 判断延迟开裂的可能性, 即高强钢零件拉深边缘应变小于 0.23, 则该位置氢致延迟断裂可能性低; 若应力集中处残余应力达到 900 MPa 以上, 应变达到 0.3 以上, 则该位置氢致延迟断裂敏感性高, 有延迟开裂的危险。

参考文献:

- [1] SEUNG C H, JAE C A, SANGY N, et al. Mechanical Properties of High-Si Plate Steel Produced by the Quenching and Partitioning Process[J]. *Metals and Materials International*, 2007, 13(6): 439—445.
- [2] LI H Y, JIN X J. Microstructure and Mechanical Properties of 50SiMnNiNb Steel by a Novel Quenching-Partitioning-Austempering Heat Treatment[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2009, 22(5): 645—650.
- [3] 刘军友. 高强度钢板延迟断裂性能和纳米镍磁学性能的研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2007.
LIU Jun-you. Study on Delayed Fracture Behavior of High Strength Steel and Magnetic Properties of Nano-nickel[D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2007.
- [4] 张永健. 超高强度薄板钢的氢致延迟断裂行为研究[D]. 北京: 钢铁研究总院, 2013.
ZHANG Yong-jian. Study on Hydrogen Delayed Fracture Behavior of Ultra-high Strength Steel Sheets[D]. Beijing: Central Iron & Steel Research Institute, 2013.
- [5] ZHAO J W, JIANG Z Y, LEE C S, et al. Effects of Tungsten on the Hydrogen Embrittlement Behaviour of Microalloyed Steels[J]. *Corrosion Science*, 2014, 5(82): 380—391.
- [6] PARK I J, JEONG K H. The Mechanism of Enhanced Resistance to the Hydrogen Delayed Fracture in Al-added Fe-18Mn-0.6C Twinning-induced Plasticity Steels[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2012, 37(12): 9925—9932.
- [7] NIE Y H. Effect of Boron on Delayed Fracture Resistance of Medium-Carbon High Strength Spring Steel[J]. *Journal of Iron and Steel Research, International*, 2007, 14(6): 53—57.
- [8] ZHANG C L, LIU Y Z, JIANG C, et al. Effects of Niobium and Vanadium on Hydrogen-Induced Delayed Fracture in High Strength Spring Steel[J]. *Journal of Iron and Steel Research, International*, 2011, 18(6): 49—53.
- [9] JIN X J, LI W, ZHU Y, et al. Hydrogen Embrittlement in AHSS Containing Metastable Austenite[D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2014.
- [10] 万荣春, 单爱党. 超高强钢组织结构对延迟断裂性能的影响[J]. *热加工工艺*, 2014, 43(8): 217—219.
WAN Rong-chun, SHAN Ai-dang. Effects of Microstructure on Delayed Fracture of Ultra High-strength Steel[J]. *Hot Working Technology*, 2014, 43(8): 217—219.
- [11] TALAGI S, YOSHINO M T. Hydrogen Embrittlement Resistance of 1180 MPa Grade Automotive Steel Sheet Evaluated by Various Methods[C]// Belgium, 2014.
- [12] 吕学奇, 陈业新. 氢陷阱对纯净钢 SM490B 中氢扩散行为的作用[J]. *上海金属*, 2013(5): 14—18.
LYU Xue-qi, CHEN Ye-xin. Effect of Hydrogen Traps on Diffusion of Hydrogen in SM490B Clean Steel[J]. *Shanghai Metals*, 2013(5): 14—18.
- [13] AKIYAMA E, MATSUDADO K. Constant-load Delayed Fracture Test of Atmospherically Corroded High Strength Steels[J]. *Applied Surface Science*, 2011, 257(19): 8275—8281.
- [14] REHRL J, MRACZEK K, PICHLER A, et al. Constant-load Delayed Fracture Test of Atmospherically Corroded High Strength Steels[C]// Belgium, 2014.
- [15] 米振莉, 薛瑶, 吴彦欣, 等. 基于 Dynaform 软件的 TWIP 钢延迟断裂研究[J]. *金属热处理*, 2014, 39(6): 126—129.
MI Zhen-li, XUE Yao, WU Yan-xin, et al. Study on the Delayed Fracture of TWIP Steel Based on Dynaform Software[J]. *Heat Treatment of Metal*, 2014, 39(6): 126—129.
- [16] NAGUMO M, SEKIGUCHI S, HAYASHI H, et al. Enhanced Susceptibility to Delayed Fracture in Pre-fatigued Martensitic Steel[J]. *Materials Science and Engineering*, 2003, 344(1/2): 86—91.