

四类高强钢的冲击韧性和平面应变断裂韧性研究

冯九胜

(中航工业陕西千山航空电子有限责任公司, 陕西 西安 710065)



冯九胜

摘要: A100、G50、G53、G54 是 4 种常用的具有高强度、高韧性、良好抗冲击性等优异力学性能的高强钢, 在工业制造领域得到了广泛的应用。对这 4 种高强钢分别进行了冲击韧性试验和平面应变断裂韧性试验, 对其冲击功、平面断裂韧度和断口形貌进行了研究分析和比较。研究结果发现, 4 种高强钢承受冲击功和平面断裂韧度大小的顺序均为: A100 > G50 > G54 > G53, 表明 A100 高强钢具有优异的抗冲击性能和平面断裂韧性, 而 G53 和 G54 虽然具有较高的静力学强度, 但其冲击韧性和平面断裂韧性相对较低。研究结果为新型高强钢的设计、抗冲击结构的选材和优化设计提供了数据参考。

关键词: 高强钢; 冲击韧性; 平面断裂韧性; 选材

中图分类号: TG142 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-3962(2018)04-0313-04

Study on Impact Toughness and Plane Strain Fracture Toughness of Four Kinds of High-Strength Steels

FENG Jiusheng

(AVIC Shaanxi Qianshan Avionics Co., Ltd., Xi'an 710065, China)

Abstract: A100, G50, G53, G54 are four kinds of high-strength steel with high strength, high toughness, good impact resistance and other excellent mechanical properties, which have been widely used in the field of industrial manufacturing. In this paper, the impact toughness and plane strain fracture toughness of four kinds of high-strength steels (A100, G50, G53, G54) were tested, impact energy, fracture toughness and fracture image were also obtained and compared. Results showed that the order of both impact energy and fracture toughness was A100 > G50 > G54 > G53, which indicated that A100 high-strength steel has excellent impact resistance and plane fracture toughness, while G53 and G54 have relatively low impact toughness and plane fracture toughness despite their high static strength. The result could provide a reference for designing and optimizing anti-impact structures.

Key words: high-strength steel; impact toughness; plane strain fracture toughness; materials selection

1 前言

超高强度钢是一种具有高强度、高韧性、高比强度以及优异的抗疲劳、抗冲击性能的合金钢, 在航空、航天、汽车和船舶领域均有非常广泛的应用^[1-6]。A100 (AerMet100)是由 Carpenter 公司在 20 世纪 80 年代根据美国海军 F/A18E/F 战斗机起落架材料需求而研发的一类新型超高强度钢, G50、G53、G54 则是我国自行研发的

超强合金钢, 它们由于优异的力学性能而成为近期的研究热点^[7-10]。

Singh^[11]和 Boyce^[12]对高强钢在应变率为 0.0002 ~ 200 s⁻¹ 的范围内的动态拉伸力学行为进行了细致的研究, 发现高强钢的应变硬化会随应变率的增加而增加, 且材料的断裂失效模式为韧性断裂。Hu^[13]则由实验结果建立了 A100 高强钢的应变率相关的 Johnson-Cook 和 Cowper-Symonds 本构模型。Sato^[14]的研究集中于提升高强钢的韧性, 秦玉荣^[15]利用 SHPB 实验对 3 种高强钢的动态压缩力学性能进行了研究。田杰^[16]对 G50 钢的动态力学性能研究则发现 G50 钢是应变率不敏感材料, 其动态压缩时会产生 45°剪切破坏。

冲击功和平面断裂韧度分别是评估高强钢冲击韧性和平面断裂韧性的两个重要指标, 因此我们对 A100、

收稿日期: 2016-08-19

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(11102017); 中航工业创新基金(2011D32715)

作者简介: 冯九胜, 男, 1969 年生, 主任设计师, Email: fjs3327@126.com

DOI: 10.7502/j.issn.1674-3962.2018.04.10

G50、G53、G54 这 4 种高强钢进行了冲击韧性试验和平面断裂韧性试验, 并对冲击功和平面断裂韧度进行了研究对比, 为新材料的设计、结构的选材和优化设计提供了设计参考。

2 实验材料和方法

2.1 实验材料

4 类高强钢分别为 A100、G50、G53 和 G54, 其材料力学性能如表 1 所示。图 1 给出了冲击韧性试验的试件尺寸, 对 4 种高强钢分别进行厚试件和薄试件的冲击韧性实验, 其中厚试件和薄试件厚度分别为 10 mm 和 5 mm, 除厚度外试件尺寸均一致, 试件长度为 55 mm, 宽度为 10 mm, 中间为深 2 mm、宽 2 mm 的 U 型槽。

表 1 4 种高强钢的力学性能

Mechanical properties	A100	G50	G53	G54
Tensile strength, R_m /MPa	1768.01	1611.3	1770.0	1871.2
Yield strength, $R_{p0.2}$ /MPa	572.0	1296.3	1373.0	1665.2
Elastic modulus/GPa	170.2	174.5	173.0	172.5
Poisson ratio	0.32	0.29	0.30	0.30
Elongation/%	15.1	12.7	12.9	9.5
Shortening rate/%	63.6	51.9	53.0	61.5

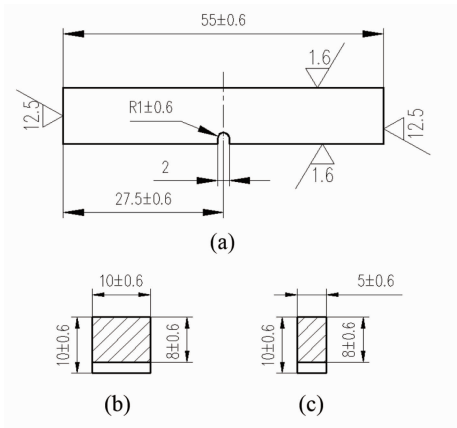


图 1 冲击韧性试验的试件尺寸: (a) 主视图; (b) 厚试件剖面图; (c) 薄试件剖面图

Fig. 1 Sizes of specimens for impact toughness test: (a) main view; (b) cutaway view of thick specimen; (c) cutaway view of thin specimen

图 2 给出了平面断裂韧性实验的试件尺寸, 4 种材料的试件尺寸均一致。试件长度为 140 mm, 宽度为 30 mm, 厚度为 15 mm, 试件中间处预制 10 mm 长的裂缝, 与试件表面垂直。

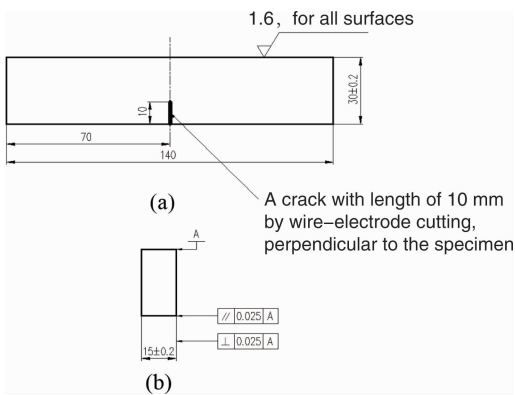


图 2 平面应变断裂韧性实验的试件尺寸: (a) 主视图; (b) 侧视图

Fig. 2 Size of specimens for plane strain fracture toughness test: (a) main view and (b) side view

2.2 实验方法

缺口是影响材料脆化的重要因素, 可使材料由韧性断裂状态变为脆性断裂状态, 冲击弯曲实验标准试样分为 U 型缺口和 V 型缺口, 本文选用 U 型缺口。

冲击韧性实验采用的金属冲击试验机为美特斯工业系统(中国)有限公司设计生产, 量程分为 150 J 和 300 J 两档, 本试验采用 150 J 档, 试验机精度等级为 1 级, 数据分辨率为 0.01 J, 如图 3 所示。

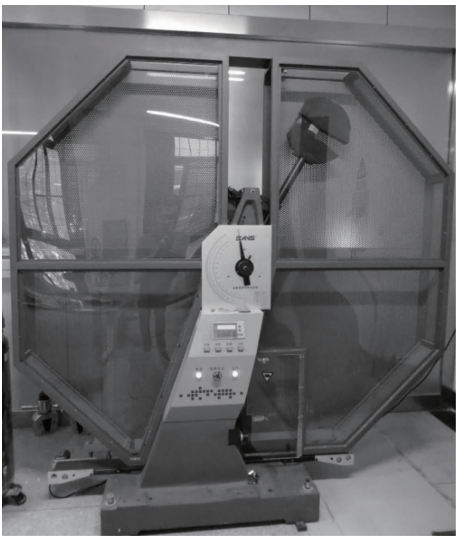


图 3 金属冲击试验机

Fig. 3 Metal impact testing machine

对于含有缺陷的构件, 只要缺陷达到临界尺寸, 就可能在远低于材料屈服强度的工况下断裂。在疲劳载荷下, 起初的缺陷尺寸将会增大, 使裂纹发生亚临界的稳定扩展, 直至达到断裂, 此时应力强度因子达到临界值 K_{IC} :

$$K_{IC} = Y\sigma_e\sqrt{a_e}$$

其中 K_{IC} 为平面应变断裂韧度, Y 为裂纹形状系数, a 为裂纹尺寸。

本文的平面应变断裂韧性实验首先通过线切割制备出裂纹的主体部分, 然后采用疲劳试验机在裂纹基础上制备出尖端很尖锐的疲劳裂纹, 最后通过材料测试系统 (MTS880) 进行三点弯实验, 实验得到的载荷-位移曲线和其他测量数据均由一台计算机记录下来。

3 实验结果分析和比较

3.1 冲击韧性实验

对4种高强钢的薄试件和厚试件分别进行了7组重复性试验, 以减小试验误差。以A100为例, 图4分别给出了其薄厚试件冲击韧性试验断裂后的照片。从图4a可以看出, 厚度为5 mm的薄试件在受到摆锤冲击后, 分成两半。典型的断口形式是: 其中一半, 断口大概成槽型, 中间接近是平台, 从试件缺口中间开始, 该部分占不到三分之一的厚度, 裂纹往里扩展到试件大概中间左右, 该部分宽度是略微收缩的, 之后平台宽度逐渐加宽, 斜向扩展到试件后部边缘; 槽型的两个边缘是呈大概45°的斜面; 另一半与前面的一半是相吻合, 是一个凸台, 中间为平台, 两边边缘呈大概45°的斜面。图4b中厚试件断口显示了类似的变形行为。缺口处的中间平台一般认为是正应力拉断的, 边缘是复杂应力状态, 45°切应力起主要作用, 原因可能与塑性变形有关, 边缘没有多少空间约束, 允许有较大塑性变形, 中间空间约束大。

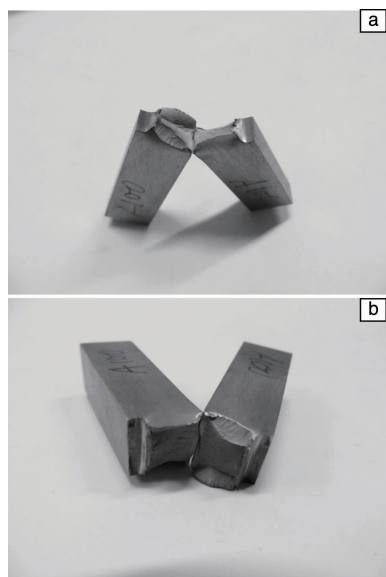


图4 A100 试件冲击韧性实验后断口: (a) 薄试件; (b) 厚试件

Fig. 4 Fracture surfaces of A100 specimens after impact testing:

(a) thin specimen and (b) thick specimen

表2给出了4种高强钢的冲击功, 可以看出同一种材料的薄试件所受的冲击功均低于厚试件, 承受冲击功大小的顺序为: A100 > G50 > G54 > G53。

表2 4种高强钢的冲击功

Table 2 Impact energy of four kinds of high-strength steels

	Impact energy of thin specimens/J	Impact energy of thick specimens/J
A100	75.86	97.65
G50	57.89	90.64
G53	43.67	49.50
G54	55.53	58.52

从试验后试件的外观看, 在发生塑性变形的部位, A100的塑性变形大一些, G53和G54的要小一些。从4种材料的冲击功比较来看, 对于薄试件, A100材料的冲击韧性要显著高于另外3种材料, G53的冲击韧性是最差的; 对于厚试件, A100和G50冲击韧性相近, 且显著高于G53和G54。其中, G53薄试件和厚试件的冲击韧性都是最差的, 而对于G54, 薄试件和厚试件的冲击韧性差别不是很明显, 也表明了G54相对而言要偏于脆性一些(与其他材料相比而言)。

3.2 平面应变断裂韧性实验

图5给出了平面应变断裂韧性试验后试件的断裂缺口情况, 对4种高强钢分别进行了3组重复性三点弯实验, 以减小实验误差。图5a是A100试件经过三点弯试验后的缺口情况, 图5b是G54试件经过三点弯试验后的缺口情况。可以看出, 试件预置裂纹后, 三点弯试验中, 试件沿裂纹方向呈直线断开, 断口比较平滑。在断口边缘, 试件向内收缩呈凹槽状, 如图5b所示。

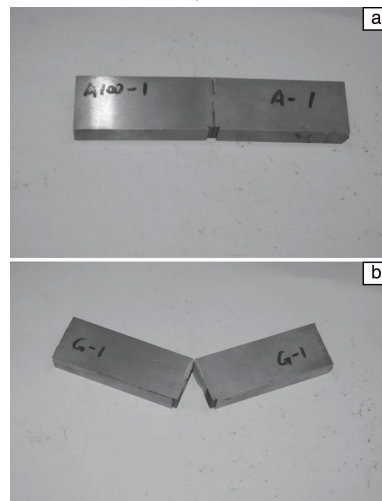


图5 平面应变断裂韧性试验后的试件: (a) A100; (b) G54

Fig. 5 Specimens after plane strain toughness test: (a) A100 and (b) G54

试件断裂缺口处较平,认为是正应力拉断的,受到的空间约束更大,边缘处比较平滑,表明切应力起到的作用较小,没有产生大的塑性变形,试件断裂形式为脆断。

表 3 给出了 4 种高强钢的平面断裂韧度,可以看出,平面断裂韧度大小的顺序为: A100 > G50 > G54 > G53。其中 A100 的 K_{IC} 值最大,这表明使该材料断裂所需要的能量要更大, A100 抵抗断裂的能力要高于其他 3 种材料。

表 3 4 种高强钢的平面断裂韧度

Table 3 Plane strain fracture toughness K_{IC} of four kinds of high strength steels

Plane strain fracture toughness $K_{IC}/\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$	
A100	164.63
G50	136.06
G53	79.75
G54	116.13

4 结 论

冲击韧性实验结果表明, 4 种高强钢的薄试件断裂时所受的冲击功均低于厚试件, 承受冲击功大小的顺序为: A100 > G50 > G54 > G53; 从试验后试件的外观看, A100 的塑性变形较大, G53 和 G54 变形较小。对 4 种材料的冲击韧性比较来看, 对于薄试件, A100 材料的冲击韧性要显著高于另外 3 种材料, G53 的冲击韧性是最差的; 对于厚试件, A100 和 G50 冲击韧性相近, 且显著高于 G53 和 G54。

平面应变断裂韧性实验结果表明, 4 种高强钢的平面应变断裂韧度大小为: A100 > G50 > G54 > G53, 断裂形式均为脆性断裂。在预置裂纹的情况下, A100 的 K_{IC} 值最大, 断裂所需要的能量要更大, 抵抗断裂能力更强。

参考文献 References

[1] Song Jun(宋 军), Zhang Wenping(张文平), Hua Xianfeng(华先

锋). *Journal of Ordnance Equipment Engineering* (兵器装备工程学报)[J], 2016, 3: 129–131.

[2] Tang Di(唐 荻), Mi Zhenli(米振莉), Wu Huajie(吴华杰), et al. *Materials China*(中国材料进展)[J], 2011, 30(12): 18–22.

[3] Qiu Jian(邱 健), Wang Yaogang(王耀刚). *Journal of Ordnance Equipment Engineering*(兵器装备工程学报)[J], 2016, 3: 15–19.

[4] Zhu Hongchuan(祝洪川), Sun Yiqiang(孙宜强), Wu Qingsong(吴青松). *Forging & Stamping Technology*(锻压技术)[J], 2015, 12: 115–119.

[5] Wang Yuan(王 远), Guan Ben(管 奔). *Advanced Materials Industry*(新材料产业)[J], 2015, 2: 31–35.

[6] Luo Yongfeng(罗永峰), Wang Xiyu(王熹宇), Qiang Xuhong(强旭红), et al. *Journal of Tianjin University*(天津大学学报)[J], 2015, S1: 134–141.

[7] Li Jiguang(李激光), Zhang Jindong(张金栋), Huang Hailiang(黄海亮), et al. *Materials Review*(材料导报: 纳米与新材料专辑)[J], 2012, S1: 397–401.

[8] Jiao Z B, Luan J H, Miller M K, et al. *Acta Materialia*[J], 2015, 97(4): 58–67.

[9] Fan Changgang(范长刚), Dong Han(董 瀚), Yong Qilong(雍岐龙), et al. *Materials for Mechanical Engineering*(机械工程材料)[J], 2006, 30(8): 1–4.

[10] Li Jie(李 杰), Li Zhi(李 志), Yan Minggao(颜鸣皋). *Journal of Materials Engineering*(材料工程)[J], 2007, 4: 61–65.

[11] Singh N K, Cadoni E, Singha M K, et al. *Materials & Design*[J], 2011, 32(10): 5091–5098.

[12] Boyce B L, Dilmore M F. *International Journal of Impact Engineering*[J], 2009, 36(2): 263–271.

[13] Hu D Y, Meng K P, Jiang H L, et al. *Materials & Design*[J], 2015, 87: 759–772.

[14] Sato K. *Office of Scientific & Technical Information Technical Reports*[J], 2002.

[15] Qin Yurong(秦玉荣), Su Jie(苏 杰), Yang Zhuoyue(杨卓越), et al. *Heat Treatment of Metals*(金属热处理)[J], 2014, 39(12): 83–86.

[16] Tian Jie(田 杰), Hu Shisheng(胡时胜). *Engineering Mechanics*(工程力学)[J], 2006, 23(6): 107–109.

(编辑 惠 琼)