

等温淬火球墨铸铁 (ADI) 的低温性能与环境脆性

龚文邦¹, 杨振阳¹, 刘金城², 张民堂³, 孙利¹, 袁志刚¹, 凌远征¹

(1. 武汉纺织大学机械工程与自动化学院, 湖北武汉 430200; 2. 世界铸造组织铁基委员会, 辽宁沈阳 110022;
3. 河南欧迪艾铸造有限公司, 河南鹤壁 456750)

摘要: 论述了ADI的低温冲击韧度、断裂韧度及环境脆化问题。ADI的冲击韧度随温度下降而降低,但在-40℃条件下仍保持室温冲击韧度的约70%;ADI的断裂韧度随温度下降而降低,在-60℃时具有大约室温断裂韧度的60%~80%。在有水或氢存在的环境下,当受力超过屈服极限时,ADI材料有明显的脆化现象,通常ADI零件的工作应力远小于材料的屈服强度,由水脆化引起的ADI零件失效非常少见。

关键词: ADI; 低温性能; 环境脆性

在温度较低的情况下,零件、构件易发生脆性断裂,为此,人们针对温度对ADI性能,尤其是低温断裂韧性和冲击韧性的影响进行了大量研究^[1-8]。一般来讲,随着温度的降低,材料的抗拉强度提高,但冲击韧性和断裂韧性降低。ADI零件的最重要性能之一是在非常低的温度下工作,据Jokipii报道,实验证明ADI在-80℃温度下高碳奥氏体仍然是稳定的,ADI零件可以在-80℃下正常工作^[6]。这是因为,与大多数钢和普通球墨铸铁相比,ADI的屈服强度、冲击韧性与温度敏感度较低。此外,ADI的奥氏体组织比珠光体细密得多,这也是具有较好低温性能的原因之一。

1 ADI的低温冲击韧度

据美国Applied Process公司根据试验推测,ADI的低温韧-脆转变温度大约在-20~-2℃^[1]。这可能只是高碳奥氏体开始出现马氏体转变的温度,而非通常的韧性-脆性转变温度,这个转变是随着温度降低逐渐产生的,对性能的影响也是渐进的。图1所示为冲击韧性与温度关系的试验结果^[1-3]。

表1所列为美国Applied Process公司检测的不同材料在不同温度下的冲击功^[4],表2所列为R.Boelan等人按美国标准ASTM A897M—1990的两种ADI牌号试样在不同温度下检测的平均无缺口冲击功^[5]。

图2所示为ADI 1050-6试样平均冲击功随温度的变化关系。从实验数据可知,在-40℃时,冲击功均值由常温时的116.5 J降至39 J,降幅约66%;在-60℃时,冲击功降至24.6 J,降幅约79%;在-77.5℃时降至18.8 J。实验数据与前面国外进行的低温冲击韧度试验数据相比,明显偏低,其原因可能是试验方法与条件不同造成的结果。本试验是在冷却槽温度降至所需温度后将试样放入其中保温10 min,温度的急剧变化,可能使试样表面产生应力或微裂纹,对检测结果产生一定影响。在实际使用中,工件的温度变化一般都是缓慢的,工件与环境温度基本处于平衡,因此,这种情况一般不会出现。

2 ADI的低温断裂韧度

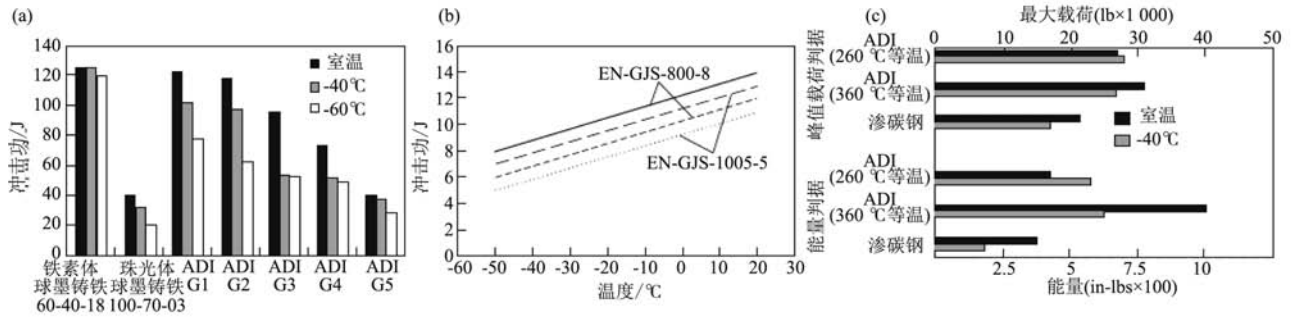
通常,机械零件的设计依据是防止发生塑性变形,设计上采用零件的许用应力乘以一个安全系数小于材料的屈服强度。即便如此,有些构件仍然有可能发生脆性

作者简介:

龚文邦(1965-),男,博士,教授,主要从事金属材料及成形过程控制与工艺研究,等温淬火球铁(ADI)的研究及技术开发等。电话:13657273652, E-mail: gongwenbang@qq.com

中图分类号: TG132.3
文献标识码: A
文章编号: 1001-4977(2022)06-0741-05

收稿日期:
2021-12-08。



(a) 铁素体球墨铸铁、珠光体球墨铸铁和不同级别ADI (ASTM A897M-1990) 在室温、-40 °C、-60 °C 下的无缺口冲击韧性^[2]；
(b) 欧洲标准ADI的有缺口冲击功和温度的关系^[3]；(c) ADI和渗碳钢齿轮在室温和-40 °C 下的单齿冲击韧性^[1]

图1 冲击韧性与温度的关系

Fig. 1 The relationship between impact toughness and temperature

表1 美国Applied Process 公司检测的不同材料在不同温度下的冲击功
Table 1 The impact energies of different materials tested by Applied Process, Inc at different temperatures J

| 材料 | 21 °C | | -12 °C | | -79 °C | | |
|--------------------------|-----------|-------|--------|------|--------|------|------|
| | 有缺口 | 无缺口 | 有缺口 | 无缺口 | 有缺口 | 无缺口 | |
| 铸钢 | SAE 030 | 33.5 | - | 24.5 | - | 4.1 | - |
| | SAE 090 | 29.4 | - | 16.7 | - | 3.1 | - |
| | SAE 0170 | 29.9 | 254 | 15.8 | 160 | 13.6 | - |
| | SAE 1045 | 112.0 | - | 77.9 | - | 35.4 | - |
| | AISI 8620 | 11.3 | 355 | 8.6 | 324 | 4.9 | 296 |
| | CARB8620* | 4.1 | 17.1 | 2.7 | 24.9 | 2.7 | 16.7 |
| 普通球墨铸铁* (ASTM A36-84) | 100-70-03 | 4.1 | 52.5 | 3.1 | 31.7 | 2.7 | 11.3 |
| | 80-50-06 | 6.8 | 59.3 | 3.5 | 25.8 | 2.7 | 16.7 |
| | 65-45-12 | 19.0 | 131 | 9.9 | 137 | 3.1 | 28.0 |
| ADI (ASTMA897M-1990) | ADI G1 | 13.1 | 158 | 9.5 | 140 | 6.3 | 49.0 |
| | ADI G2 | 11.7 | 155 | 10.3 | 140 | 8.2 | 88.0 |
| | ADI G3 | 9.9 | 120 | 8.3 | 91.1 | 5.9 | 80.0 |
| | ADI G4 | 9.0 | 97.4 | 9.9 | 98.3 | 5.4 | 67.1 |
| | ADI G5 | 8.6 | 50.3 | 6.8 | 53.0 | 5.9 | 29.0 |

注：*美国球墨铸铁标准，单位为KSI。

表2 ASTM A897M-1990两种ADI牌号试样在不同温度下的平均无缺口冲击功

Table 2 Average non-notched impact energies of two ADI grade specimens of ASTM A897M-1990 at different temperatures J

| 试样 | 41 °C | 14 °C | -22 °C | -45 °C | -64 °C | -85 °C |
|-------------------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|
| ADI G1 | 147 | 163 | 128 | 129 | 63 | 54 |
| 介于ADI G1和ADI G2之间 | 117 | 168 | 107 | 117 | 103 | 55 |

断裂。采用安全系数并不能防止这种因为脆性断裂而引起的失效。而断裂韧性，材料对裂纹扩展的固有抗力对设计者来说正成为越来越重要的材料性能。断裂韧性是衡量材料抵抗材料中保有的裂纹或缺陷（实际上所有材料中均存在有裂纹或缺陷）的能力，它已经

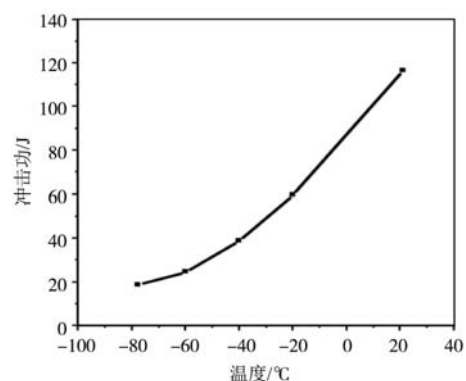
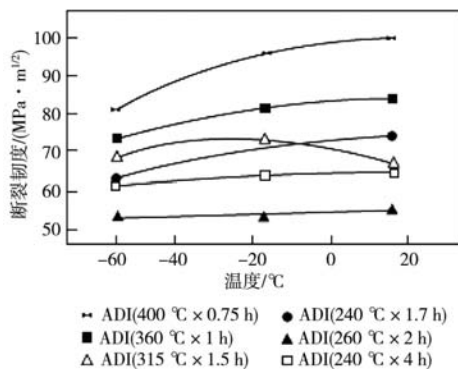


图2 ADI 1050-6试样冲击功与温度的关系

Fig. 2 The relation between impact energy and temperature of the ADI 1050-6 sample

广泛用于设计断裂安全的构件。KIC是最重要和最常用的测量材料断裂韧度的参数，它是材料常数，只与材料本身特性有关。

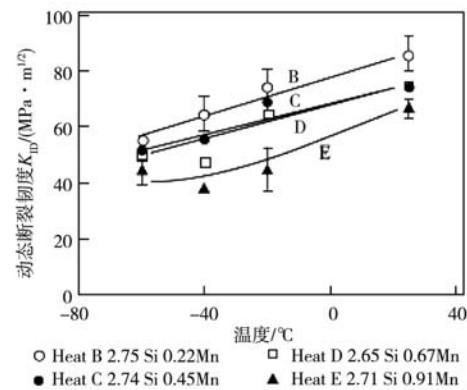
美国Applied Process公司对不同牌号ADI材料在不同温度下的断裂韧度进行了测试，图3所示为断裂韧度与温度关系的实验结果^[1]。室温时ADI的断裂韧度大约为55~105 MPa·m^{1/2}。与8620渗碳淬火钢（断裂韧度在22~33MPa·m^{1/2}）相比，ADI的断裂韧度指标要好得多。从图3a可知，对于等温温度较高，强度、硬度较



(a) 不同温度下，不同牌号ADI的断裂韧度

低，伸长率较高的ADI，断裂韧度较高；对于等温温度较低，强度、硬度较高，而伸长率较低的ADI，断裂韧度较低。从图3b可以看出，随含锰量增加，ADI的冲击韧度下降，主要是因锰易在晶界偏析引起的。同时，从图示结果可知，对于不同牌号的ADI，及不同锰含量的ADI，其断裂韧度都随温度降低而降低，但在-60℃条件下仍保持其室温大约60%~80%的断裂韧度。

可知，不同牌号ADI低温有缺口冲击功差别不大；强度等级较低的ADI无缺口冲击功稍高于强度等级较高



(b) 不同温度下，不同锰含量的ADI的动态断裂韧度KID

图3 断裂韧度与温度的关系

Fig. 3 The relationship between fracture toughness and temperature

的ADI。实验数据表明，ADI的冲击韧性随温度降低而降低，但是在-40℃下仍保持其室温大约70%的冲击韧性。

为研究汽车底盘零件的耐低温性能，对ADI 1050-6材料进行了低温冲击试验。试验方法为：先将冲击试验的试样在低温槽内通过液氮与酒精的比例调控降至所需的温度，然后保温10 min，快速取出试样，采用JBN-300摆锤式冲击试验机进行试验，试样取出后需在5 s内完成试验。试验温度分别为：-20℃、-40℃、-60℃、-77.5℃，及21℃（室温）的对比试验。试验数据如表3所示。

表3 ADI 1050-6试样在不同温度下的无缺口冲击功
Table 3 Non-notched impact energies of the ADI 1050-6 specimens at different temperatures J

| 序号 | 温度/℃ | 试样1 | 试样2 | 试样3 | 试样4 | 平均值 |
|----|-------|-----|------|------|------|-------|
| 1 | 21 | 113 | 103 | 130 | 120 | 116.5 |
| 2 | -20 | 52 | 59 | 65 | 63 | 59.8 |
| 3 | -40 | 37 | 37 | 42.2 | 39.8 | 39.0 |
| 4 | -60 | 27 | 24.8 | 20.5 | 26.2 | 24.6 |
| 5 | -77.5 | 18 | 17.5 | 20 | 19.8 | 18.8 |

3 ADI的环境脆性

20世纪90年代在北美，接触水的ADI锚件的失效受到人们关注，使得人们对ADI水脆化问题展开研究^[9-18]。

研究发现，当ADI表面接触水等液体或者某些气体（如氢气）时会发生脆化，抗拉强度和伸长率明显下降，即产生环境导致/诱发的脆化现象。环境脆化不是ADI独有的现象，高强度球墨铸铁包括珠光体球墨铸铁、马氏体球墨铸铁，甚至钢都会发生环境脆化现象。ADI的环境脆化有以下特点。

(1) ADI表面接触水后立即发生脆化现象。在拉伸中只要用沾水棉签涂抹试样表面，试样会立即发生脆化现象；但当表面干燥后，脆化现象立即消失。所以ADI的环境脆化现象是可逆的，而且和接触液体时间无关。

(2) ADI的环境脆化现象对伸长率影响最大，约降低70%~80%；其次是抗拉强度，约降低30%；对屈服强度影响较小，对断裂韧性也有影响，但是对冲击韧性基本没有影响。这说明环境脆化现象和应力速度有关，应力速度快，影响小；应力速度慢，影响大。

(3) ADI的环境脆化现象与石墨或晶粒边界无关。铁素体球墨铸铁有大量晶粒边界和相对于珠光体球墨铸铁更高的石墨体积分数，但是没有环境脆化现象。

(4) ADI的环境脆化现象与基体组织有关。铁素体球墨铸铁及含10%左右珠光体的铁素体球墨铸铁不会发生环境脆化现象；但珠光体球墨铸铁、马氏体球墨铸铁及ADI会发生环境脆化现象。通常ADI强度越高，脆化越严重。

(5) ADI的环境脆化现象和基体的化学成分无关。合金元素对环境脆化基本没有影响。

(6) ADI拉伸试验在氢气环境下进行时也呈现脆化现象。

(7) ADI表面接触其他液体如异丙醇或矿物油也会产生脆化现象,但是脆化程度没有水脆化那么严重。

(8) 当表面形成铁素体层,如含部分共析前铁素体的ADI(如美国标准750-500-11牌号ADI),在形成连续网状后,水脆效应受到抑制。

环境脆化机理:对于ADI的环境脆化机理有不同解释,但是任何一种都不能阐明所有的问题,比较普遍认同的是氢致脆化机理。氢致脆化机理认为ADI试样表面附着的水分解出氢原子,在试样塑性变形时氢原子通过化学吸附作用弱化了试样表面金属基体的原子键,从而造成脆化。ADI在氢气环境同样有脆化现象支持了这一观点。但是,氢致脆化不能解释某些现象,如钢的氢脆是滞后的,ADI则是立即产生;钢的氢脆与铁素体有关,而铁素体球墨铸铁没有脆化现象。也有人认为是球墨铸铁最后凝固区裂纹和马氏体导致脆化。

R.E.Boeri, R.A.Mart'nez等人对ADI试样水致脆化现象进行了研究^[9],图4所示为2个ADI拉伸试样表面涂水所造成的水脆断口的扫描电镜图像。箭头所指为接近表面光亮的脆性区,断裂形式为脆性穿晶解理断裂,认为断裂源于该区域。断口的其余部分有许多韧窝,主要为韧性断裂。

虽然ADI有环境脆化尤其是水脆化现象,但是这并不妨碍ADI的工业应用。事实上,因水脆化引起的ADI零件失效是非常罕见的。这或许是因为ADI的水脆化必须同时满足以下3个条件:①ADI零件表面接触水;②

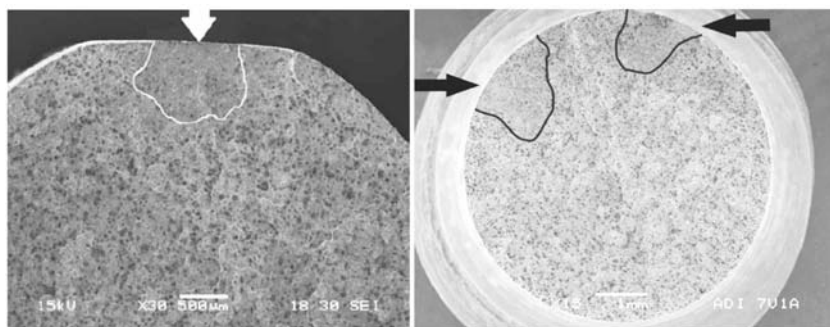
所受的应力达到或超过材料的屈服强度;③应变速率很慢。在实际应用中这3个条件同时出现的情况是少见的。

设计ADI零件时,通常要求零件允许的工作应力乘以一个安全系数小于材料的屈服强度,即一般情况下,工作应力远小于材料的屈服强度。但是当零件在能引起环境脆化的条件下工作时,应当格外小心,应避免上述3个条件同时出现。

如果ADI零件在能引起环境脆化的条件下工作,应该考虑采用涂层保护。要使保护涂层能够防止ADI脆化,就需要涂层在ADI基体产生变形时仍能保持其完整性,防止液体接触ADI表面。

有研究人员对ADI表面镀锡,以及采用聚酯、自固化环氧树脂、热固化聚酯环氧树脂、聚乙烯等涂覆保护膜进行了ADI水脆化实验。结果发现,试样表面镀锡不能有效防止ADI的水脆化;聚酯、自固化环氧树脂、热固化聚酯环氧树脂等涂层也不能有效防止ADI的水脆化;聚乙烯涂层能降低ADI的水脆化程度^[11]。

R. E. Boeri和R. A. Mart'nez等人研究发现^[9],防锈润滑剂WD40能够有效阻止ADI与水的接触,从而防止水脆化现象的发生。WD40是美国化学家诺姆(拉森(Norm Larsen)于1953年研发的,当时,他试图调制一种可以去除水分和湿气,防止工件腐蚀的配方,在完成第40次实验后,终于获得成功,因此取名WD40。WD40的渗透性极强(比水更强),而且与金属表面有极佳的亲和力,能够渗透到金属毛细孔内部,有效去除金属表面及毛细孔内部的水分和湿气,形成一层仅2.8~7.6 μm厚的致密保护膜,防止水进入到塑性变形初期形成的裂纹中,从而有效防止水脆化引起的断裂。



(a) 低倍

(b) 高倍

图4 ADI拉伸试样水脆断口的扫描电镜图像

Fig. 4 SEM images of water brittle fracture of the ADI tensile specimen

4 结论

(1) ADI的冲击韧性随温度降低而降低,但是在-40℃下仍保持其室温大约70%的冲击韧性。

(2) ADI断裂韧性随温度降低而降低,在-60℃条件下能保持其室温大约60%~80%的断裂韧性。

(3) ADI具有环境脆化尤其是水脆化现象,但通常ADI零件的工作应力远小于材料的屈服强度,因此,由水脆化引起的ADI零件失效非常少见。采用涂层保护可以有效防止ADI的水脆化。

参考文献:

- [1] 龚文邦, 刘金城, 向纲玉. 等温淬火球墨铸铁 (ADI) 理论、生产技术与应用 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2020.
- [2] RIABOV M V, LERNER Y S, FAHMY M F. Effect of low temperature on charpy impact toughness of austempered ductile irons [J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2002, 11 (5): 496-503.
- [3] ADI-strength meets toughness, ADI-austempered ductile iron-the benchmark engineering material, Euro ADI Promotion [R]. 1999.
- [4] KEOUGH J R. Austempered materials and their applications to drive line and suspension components [C]//International Off-Highway & Power Plant Congress & Exposition, Milwaukee, Wisconsin, 2000.
- [5] BOELAN R. Impact properties and plane strain fracture toughness of two grades of austempered ductile iron [R]. BHP Institute of Railway Technology, Monash University, Australia, 2001.
- [6] KALEVI Jokipii, KYMENITE. Austempered ductile iron as material for gears and other applications [C]//1st International Conference on Austempered Ductile Iron: Your Means to Improved Performance, Productivity and Cost, Hyatt Regency, O' Hare, Rosemont (Chicago) Illinois, 1984: 135-148.
- [7] 郑言彪, 李志华, 张军. ADI900材料的低温性能研究 [J]. 铸造, 2015 (12): 1222-1225.
- [8] 刘金城, 孙国雄. ADI的冲击韧度和断裂韧度 [J]. 现代铸铁, 2003, 23 (4): 1-6.
- [9] BOERI R E, MARTÍNEZ R A. Embrittlement of ADI by contact with liquids: influence of alloy content and preventive methods [J]. Journal of Materials Science and Technology, 2013, 29 (6): 665-671.
- [10] RAJNOVICD, BALOSS, SIDJANINL, et al. Tensile properties of ADI material in water and gaseous environments [J]. Materials Characterization, 2015 (101): 26-33.
- [11] 蔡启舟, 魏伯康, 田中雄一. 表面涂层对奥贝球铁水脆化行为的影响 [J]. 铸造, 2005, 54 (4): 333-335.
- [12] MARTÍNEZ R A, SIMISON S N, BOERI R E. Environmentally assisted embrittlement of ADI-current understanding [C]// Proceedings of the World Conference on ADI, Louisville, Kentucky, AFS Publication, 2002: 91-96.
- [13] KOMATSU S. Influence of water embrittlement effect on mechanical properties of ADI [J]. Int. J. of Cast Metal, 2003, 16: 209-214.
- [14] MASUD L, MARTNEZ R A, SIMISON S, et al. Embrittlement of austempered ductile iron on contact with water testing under applied potential [J]. J. Mater. Sci., 2003, 38: 2971-2977.
- [15] MARTINEZ R A. Environmentally assisted embrittlement of ADI by contact with liquids [J]. Int. J. of Cast Metal. Res., 2003, 16: 251-256.
- [16] CABALLERO L, ELICES M, PARKINS R N. Environment sensitive fracture of austempered ductile iron [J]. Corrosion, 2005, 61 (1), 51-57.
- [17] YASUHIRO Osafune. Effect of ferritic grains mixing in matrix on water embrittlement resistance of ADI [C]//Proceedings of the 8th International Symposium on Science & Processing Of Cast Iron (SPC18), Beijing, 2006: 163.
- [18] KATHY L H, KEOUGH J R, RIMMER A. New engineering and standards developments in austempered ductile iron (ADI) [C]//the 67th World Foundry Congress, Harrogate UK, 2006: 5-7.

Low Temperature Properties and Environmental Brittleness of Austempered Ductile Iron

GONG Wen-bang¹, YANG Zhen-yang¹, LIU Jin-cheng², ZHANG Min-tang³, SUN Li¹, YUAN Zhi-gang¹, LING Yuan-zheng¹

(1. College of Mechanical Engineering&Automation of Wuhan Textile University, Wuhan 430200, Hubei, China; 2. Ferrous Alloys Commission of the World Foundry Organization, Shenyang 110022, Liaoning, China; 3. Henan Aoudi Casting Co., Ltd., Hebi 456750, Henan, China)

Abstract:

This paper discussed the low temperature impact toughness, fracture toughness and environmental brittleness of austempered ductile iron (ADI). The impact toughness of the ADI decreases with the decreasing of temperature, but it remains about 70% of room temperature impact toughness at -40 °C. The fracture toughness of the ADI decreases with temperature and is 60%-80% of room temperature fracture toughness at -60 °C. In the presence of water or hydrogen, when the force exceeds the yield strength, the ADI has obvious brittleness. However, usually the working stress of the ADI parts is much less than the yield strength of the material, and the failure of the ADI parts caused by the water brittleness is very rare.

Key words:

austempered ductile iron; low temperature properties; environmental brittleness