DOI: 10.3901/JME.2014.14.089

Q235B 环形铸坯显微组织和力学性能的研究*

闫红红^{1,2} 李永堂^{1,2} 胡勇^{1,2} 李秋书^{1,2} 赵达文^{1,2} 曹争争^{1,2}

(1. 太原科技大学材料科学与工程学院 太原 030024;

2. 太原科技大学金属材料成形理论与技术山西省重点实验室 太原 030024)

摘要: 针对短流程铸辗复合成形工艺,以法兰常用材料 Q235B 碳素钢作为研究对象,通过金相观察、力学性能测试和断口扫描等试验,研究砂型铸造方式和离心铸造方式对环形铸坯组织和力学性能的影响。结果表明, Q235B 碳素钢的室温组织主要由铁素体和珠光体组成;砂型铸坯中的铁素体以块状的形式存在,且晶粒较为粗大,离心铸坯中的铁素体以针状和块状的形式存在,且晶粒较为细小。离心铸坯的抗拉强度和塑性、冲击韧性均明显优于砂型铸坯。砂型铸坯的拉伸断口呈现韧窝和准解理并存的混合断裂特征,冲击断口几乎为完全的脆性解理断裂特征;离心铸坯的拉伸断口几乎为完全的韧性断裂特征,冲击断口由撕裂韧窝区域和解理区域组成。

关键词: 环形铸坯; 铸造工艺; 铸辗复合成形; 显微组织; 力学性能

中图分类号: TG242; TG249

Study on the Microstructure and Mechanical Properties of Q235B Ring Casting Blank

YAN Honghong^{1,2} LI Yongtang^{1,2} HU Yong^{1,2} LI Qiushu^{1,2}
ZHAO Dawen^{1,2} CAO Zhengzheng^{1,2}

(1. School of Materials Science and Engineering, Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan 030024;

2. Shanxi Key Laboratory of Metallic Materials Forming Theory and Technology,
Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan 030024)

Abstract: Aiming at cast-rolling forming technology, by means of metallographic observation, mechanical properties test and fracture observation, the effect of different casting methods (sand casting and centrifugal casting) on the microstructure and the mechanical properties of the Q235B carbon steel are investigated. The results show that the microstructure of Q235B carbon steel at room temperature is mainly composed of ferrite and pearlite. The ferrite in the sand casting blank exists in the form of massive, and the grains are coarse. The ferrite in the centrifugal casting blank exists in the form of needle and massive, and the grains are small. The tensile strength, plasticity and impact toughness of the centrifugal mold casting blank are significantly better than that of sand casting blank. The tensile fracture of sand casting blank is a mixed fracture characteristics of quasi-cleavage and dimple. The impact fracture is almost completely brittle cleavage fracture characteristics. Centrifugal casting tensile fracture is almost entirely ductile fracture characteristics, and the impact fracture is composed mainly of tearing dimple and cleavage region.

Key words: ring casting blank; casting technique; casting-rolling forming; microstructure; mechanical property

0 前言

环形零件,如轴承套圈和风电法兰等,是装备制造和工业领域应用非常广泛的关键基础零件^[1]。目前普遍采用热辗扩成形技术对环形零件进行生产。该工艺一般都是以锻坯为原料,通过锻造-

冲孔-辗扩来实现环件的成形。这种工艺流程冗长,加热次数多,各个环节都需要大型设备,冲孔工艺和多次加热造成了材料浪费;存在能源动力消耗大、材料浪费严重、效率低、成本高、增加排放和污染环境等问题。为此,太原科技大学与相关企业合作研究开发了金属环件短流程铸辗复合成形工艺^[2],流程如图1所示,对于实现环件生产的节能、节材、提高效率、减少排放,具有重要的理论意义和实用价值^[3]。在实现整个环件短流程铸辗复合成形工艺过程中,环形铸坯的冶炼、凝固是确保环件综合性

* 国家自然科学基金重点(51135007)、国家自然科学基金(51174140, 51204118)、高等学校博士点优先发展计划(20111415130001)、山西省青年科技研究基金(2012021018-3)和太原科技大学青年科技研究基金(20123003)资助项目。20140109收到初稿,20140603收到修改稿

能的基础和关键环节。因此,加强环形铸坯的冶炼、铸造工艺研究,对于铸辗复合成形技术的推广应用具有十分重要的意义。

图1 环件铸辗复合成形新工艺流程

目前,人们对钢铁材料的研究更多地集中在对铸件或铸坯进行热处理或变形处理后的组织和性能,其中李永堂等^[4]对低合金耐磨钢衬板制造工艺和热处理工艺进行了研究,吴中佳等^[5]得出了通过少量铈的添加可显著改善高硼高速钢的综合性能,李志杰等^[6-7]分别对中碳钢、DP980 变形行为进行了研究。但对钢铁材料铸态时的组织和性能的研究还相对甚少^[8-9]。针对短流程铸辗复合成形工艺,本论文以法兰常用材料 Q235B 碳素钢作为研究对象,设计了环件的冶炼、铸造工艺,进行了工业试验,得到了环形铸坯,并对其进行了组织分析和力学性能研究。

1 试验条件与方法

铸件材料为低碳钢 Q235B,化学成分如下:
 $w_C=0.2\%$, $w_{Si}=0.35\%$, $w_{Mn}=1.4\%$, $w_S \leq 0.045\%$,
 $w_P \leq 0.045\%$ 。采用中频感应炉冶炼,冶炼温度
 $1\,680\sim 1\,700\,^{\circ}\text{C}$,冶炼 $3.5\sim 4.0\,\text{h}$,保证钢液中脱氧
 产物、炉渣、耐火材料等上浮排除。浇注温度控制
 $1\,540\sim 1\,550\,^{\circ}\text{C}$ 。分别采用砂型倾斜浇注和离心铸
 造工艺,得到环形铸坯,环件的尺寸均为 $\phi 270\,\text{mm} \times \phi 105\,\text{mm} \times 45\,\text{mm}$ 。采用线切割机从铸态环坯的
 外层、中层、内层分别切取金相样品、拉伸试样和
 冲击试样,具体取样位置如图2所示。对金相样品
 分别依次进行研磨、抛光、腐蚀处理,腐蚀剂为4%
 硝酸酒精溶液,金相组织采用 VHX-600E 金相显微
 镜进行观察。根据国标 GB6396-1986,拉伸试样标
 距直径和长度分别为5 mm和50 mm,冲击试样尺

图2 金相样品、拉伸试样和冲击试样在铸坯中的取样位置示意图

寸为 $10\,\text{mm} \times 10\,\text{mm} \times 55\,\text{mm}$ 。拉伸试验在日本岛津 AG-X 100 kN 电子万能拉伸试验机上进行,拉伸速度为 $2\,\text{mm/min}$ 。冲击试验在 JB-300B 半自动冲击试验机上进行,显微断口采用日立 S-4800 扫描电镜进行观察。

2 试验结果与讨论

2.1 显微组织

图3为砂型铸坯各个部位的显微组织。由图3可见,铸坯的室温组织为大量的块状铁素体和少量的珠光体,并且随着距铸坯表明距离的增加,铁素体晶粒尺寸明显增加。另外,在图3中还观察到了明显的原奥氏体晶粒的轮廓,发现共析转变前的原奥氏体晶粒较为粗大。这说明在砂型铸造过程中,由于冷却速度比较缓慢,在发生先共析铁素体析出前,原奥氏体晶粒得到了充分的长大。另外,在图3a和图3c中可以看到明显的原奥氏体柱状晶的痕迹,而图3b中的原奥氏体则是粗大的等轴晶。由于钢液在凝固过程中冷却速度的变化,铸坯的宏观组织通常由三个晶粒区所构成,即外表层的细晶粒区,中间的柱状晶粒区和心部的等轴状晶粒区^[10]。由于金相试样的取样位置距铸坯的表层还有一定距离,所以在本试验中没有观察到表层细小的原奥氏体晶粒。在表层细晶粒区形成的同时,砂型温度升高,液态金属冷却速度减慢。这时,沿垂直于型壁方向散热最快,晶体沿散热相反方向择优生长形成柱状晶粒区。由于图3a和图3c试样的取样位置刚好处于柱状晶区,所以观察到了明显的原奥氏体柱状晶的晶界。图3b试样的取样位置基本处于铸坯的中心位置。由于钢液的凝固是按照自外而内的方向进行

图3 砂型铸坯不同部位的显微组织

的,以至于在凝固的最后阶段,钢液散热的方向性变得不明显,趋于均匀冷却的状态。此时,晶核在钢液中可以自由生长,在各个方向上的长大速度差不多相等,长成了比较粗大的等轴状的晶粒。

图 4 为离心铸坯各个部位的显微组织。与砂型铸造工艺相似,离心铸造工艺得到的铸坯的室温组织也是有大量的铁素体和少量的珠光体组成,同时也保留了明显的原奥氏体晶粒的轮廓,但原奥氏体晶粒尺寸明显较小。仔细观察图 4a,发现原始奥氏体晶粒呈现明显的柱状特征。这说明在凝固的早期阶段,沿垂直于铸型壁的方向散热最快,钢液中的先析出相沿着散热相反的方向择优生长形成柱状晶。由图 4b 和图 4c 可以看出,在凝固的中期和后期,钢液散热的方向性变得不是很明显,以至于在铸坯的中层和内层的晶粒以等轴晶的形式出现。另外,铸坯中铁素体的形貌以针状为主,同时存在一定量的块状。随着距铸型表面距离的增加,针状铁素体的数量减少,块状铁素体的数量增加,同时伴随着铁素体晶粒尺寸增加。之所以出现针状铁素体,是因为铸坯在冷却到 900 ℃ 左右时,采用冷却水对铸型表面进行了强制冷却,以至于大量的先共析铁素体以针状的形式出现。随着距铸型表面距离的增加,铸坯中层和内层的冷却速度降低,从而针状铁素体数量减少,块状铁素体数量增加^[9]。

图 4 离心铸坯不同部位的显微组织

2.2 力学性能及断口形貌

为了对比铸造方式及相应的铸态组织对力学性能的影响,在图 2 所示的 a、b、c 位置分别取样,然后进行拉伸测试和冲击韧性测试,结果如表 1 所示。由表 1 可知,离心铸造工艺得到的铸坯的各项力学性能都明显高于砂型铸造工艺,尤其是冲击韧性。由 GB/T700-2006 可知,Q235B 供货标准为屈服强度 215 MPa,抗拉强度 370~500 MPa,断后伸长率不低于 24%,冲击吸收能量不低于 27 J。由此可见,本试验采用砂型铸造和离心铸造得到的铸坯在未进行热处理或变形处理前已经满足供货要求。

表 1 环形铸坯的力学性能

铸造工艺		屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	断后伸长率(%)	断面收缩率(%)	冲击吸收能量/J
砂型	a	218.36	439.26	19.90	27.75	38
	b	215.07	436.88	24.05	41.86	23
	c	216.83	437.26	26.50	43.75	23
离心	a	262.83	511.75	27.50	41.86	84
	b	280.88	510.97	30.25	60.93	114
	c	284.34	507.71	30.00	54.43	134

材料的力学性能与晶粒大小密切相关,当受到外力作用时,具有较小晶粒组织的材料可以将塑性变形分散到更多的晶粒内进行,塑性变形较均匀,应力集中较小;此外,晶粒越细,晶界面积越大,晶界越曲折,越不利于裂纹的扩展。因此,在常温下的细晶粒金属比粗晶粒金属有更高的强度、更好的塑性和韧性。由上述显微组织分析可知,无论是原始奥氏体晶粒尺寸,还是室温铁素体晶粒尺寸,离心铸坯均明显小于砂型铸坯,从而具有较高的力学性能。

2.2.1 室温拉伸断口形貌

图 5 为砂型铸坯的拉伸断口形貌。由图 5a 可知,砂型铸坯的拉伸断裂为韧窝与准解理并存的混合型断裂。对图 5a 中区域 A 进行放大后发现,该试样

的韧窝大小分布极不均匀,深度普遍较浅,并且韧窝内部没有发现明显的夹杂物或第二相,如图 5b 所示。对图 5a 中的区域 B 和 C 放大后发现,这两个区域内均有大量高密度的弯曲的撕裂棱线条和明显的放射状的河流花样,如图 5c 和图 5d 所示。这种形貌具有典型的准解理特征,即介于解理断裂和韧窝断裂之间的一种过渡断裂模式。之所以出现这种形貌,与铸坯的显微组织密切相关。由图 3 可知,砂型铸坯中的铁素体晶粒尺寸明显较大,同时珠光体与夹杂物主要聚集在原奥氏体的晶界处。这就使得裂纹很容易在原奥氏体晶界处萌生,并沿其最容易扩展的方向延伸;同时由于晶界数量较少,很难阻碍裂纹的快速扩展,从而在拉伸断口上就出现了较浅的韧窝和准解理的形貌。这些特征表现在力学

性能上,就是具有较低的强度和塑性。

图5 砂型铸坯拉伸断口形貌

图6为离心铸坯的拉伸断口形貌。与砂型铸坯不同,离心铸坯的拉伸断裂为完全的韧窝断裂,如图6a所示。对局部放大后发现,如图6b所示,断口中存在着大小不同的韧窝,几乎每一个大韧窝中都有一颗夹杂物,同时大韧窝周围还分布着大量的小韧窝。该断口形貌的形成过程如下所述。首先较大尺寸的夹杂物或第二相粒子作为韧窝的核形成显微空穴,当显微空穴长大到一定尺寸后,较小的夹杂物或第二相粒子将形成显微空穴并随后长大,与先前形成的显微空穴在长大过程中联结,产生了大小不一的韧窝形貌^[11]。另外,在某些较大韧窝的内壁上可以看到“蛇行滑移”、“涟波”等滑移线痕迹,这是因为当韧窝表面与主应力方向垂直时,较大的应力会导致韧窝的自由表面产生新的滑移,初生的滑移痕迹很尖锐,继续滑移使之平滑发展为蛇行花样,进而成为涟波^[11]。离心铸坯的拉伸断裂形貌也与其显微组织密切相关。由图4可知,离心铸坯的原奥氏体晶粒、铁素体晶粒、珠光体团及层片间距都较小,珠光体与夹杂物的分布也比较分散。夹杂物的尺寸减小和分散分布可以有效阻止裂纹的过早萌生和形成,同时晶粒细化使得晶界前塞积的位错数减少,有利于降低应力集中和增加裂纹扩展的阻力,从而使离心铸坯的拉伸塑性显著提高。

图6 离心铸坯拉伸断口形貌

2.2.2 室温冲击断口形貌

图7a为砂型铸坯冲击试样宏观断口,断口表面凹凸不平,呈现粗颗粒状。仔细观察发现,砂型铸坯的断口几乎为完全的脆性断裂特征,仅在V型缺口附近存在少量的韧窝。由此可做推断,砂型铸坯在冲击过程中,裂纹首先在V型缺口底部萌生,然后按照图中箭头的方向以解理的方式快速扩展并穿过整个试样,进而发生断裂。对局部放大后发现,砂型铸坯的断口形貌为典型的解理扇形河流花样(图7b)。这是因为在外力作用下,解理裂纹通过晶界后,在新的晶粒中某一点上形核,从该处开始裂纹扩展到整个晶粒^[11]。在这一个晶粒内,河流花样以裂纹源为中心,以扇形的方式向外扩展,从而形成扇形解理。

图7 砂型铸坯冲击断口形貌

图8a离心铸坯冲击试样宏观断口,图8中箭头为裂纹的扩展方向。由图8可见,在V型缺口底部与解理断裂区域之间出现了韧性断裂的形貌,同时,解理区域的表面凹凸不平程度和颗粒状程度都有所降低。已有的研究表明^[12],低碳钢的解理断裂分为三个过程:①位错反应导致裂纹形核;②应力尖端的应力集中引起小的塑性变形和加工硬化;③微裂纹尖端的正应力达到临界解理正应力(微裂纹达到临界裂纹尺寸),裂纹失稳,发生解理断裂。由此可见,在冲击过程中,离心铸坯的微裂纹在经历了较长时间后才进入失稳状态;而砂型铸坯的微裂纹在萌生后不久即进入了失稳状态。因此,在离心铸坯的断口中出现了明显的韧性断裂区域。对图8a中的D标示的区域进行放大后,发现韧性断裂区域的韧窝呈抛物线状,凸向都指向裂纹源(图8b),表明该韧窝为典型的撕裂韧窝。由于冲击过程时间非常短暂,试样来不及发生较大的塑性变形,所以此处韧窝的深度都比较浅。对图8a中的E标示的区域进行放大后,发现解理断裂区域除了扇形解理外,在某些解理面之间还存在明显的韧窝(图8c)。这些结果表明,与砂型铸坯相比,离心铸坯具有较好的冲击韧度。

图 8 离心铸坯冲击断口形貌

夹杂物或第二相偏聚在晶界时,能极大地降低晶界结合能,从而导致韧性降低;随着晶粒的细化,材料的韧性提高,同时在细晶粒材料中的缺陷尺寸减小,使断裂需要的应力提高^[13]。砂型铸坯的夹杂物尺寸较大,并且主要分布在原奥氏体的晶界处,在冲击力作用下,很容易产生应力集中,使其成为裂纹源;同时铁素体的晶粒较大,很难阻挡裂纹的快速扩展,以至于过早发生断裂。离心铸坯的夹杂物尺寸明显减小,并且分布较为均匀,这就阻止了裂纹的过早萌生和形成,同时铁素体的晶粒尺寸较小,大量晶界的存在增大了裂纹的扩展阻力,使冲击韧度得到显著提高。

3 结论

(1) 砂型铸坯和离心铸坯的室温组织均由铁素体和珠光体组成,均可观察到明显的原奥氏体晶界。砂型铸坯中铁素体以块状形式存在,并且晶粒较为粗大;离心铸坯铁素体晶粒以块状和针状的形式存在,晶粒尺寸均较小。

(2) 与砂型铸坯相比,离心铸坯的屈服强度、抗拉强度分别提高了 21.5%、14.18%,断后伸长率和断面收缩率分别提高了 37.9%、44.19%,冲击吸收能量增加了 74.7%。

(3) 砂型铸坯的拉伸断口由较浅的韧窝和准解理组成,离心铸坯的拉伸断口由大小不同的较深韧窝组成。

(4) 砂型铸坯的冲击断口几乎为完全的解理断裂特征,离心铸坯的冲击断口呈现出由韧窝断裂向解理断裂逐渐过渡的特征。

参 考 文 献

- [1] 利俊峰. 中国风电发展报告 2011[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2011.
LI Junfeng. The development report of China's wind power 2011[M]. Beijing: China Environmental Science Press, 2011.
- [2] 李永堂, 齐会萍, 刘志奇, 等. 一种利用铸坯辗扩成形大型环件的方法: 中国, ZL201010132491.7[P]. 2010-09-08.
LI Yongtang, QI Huiping, LIU Zhiqi, et al. A method of rolling forming large-scale rings use casting blank: China, ZL201010132491.7[P]. 2010-09-08.
- [3] 李永堂, 齐会萍, 李秋书, 等. 基于铸辗复合成形的 42CrMo 钢环坯铸造工艺与试验研究[J]. 机械工程学报, 2013, 49(7): 148-153.
LI Yongtang, QI Huiping, LI Qishu, et al. Casting process and experimental research of 42CrMo ring blanks based on cast-rolling forming technology[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013, 49(7): 148-153.
- [4] 李永堂, 付建华, 雷步芳, 等. 多元低合金耐磨钢破碎机衬板制造工艺研究[J]. 机械工程学报, 2013, 49(12): 72-77.
LI Yongtang, FU Jianhua, LEI Bufang, et al. Research on manufacturing process for complex low-alloyed wear-resisting crusher liner[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013, 49(12): 72-77.
- [5] 吴中佳, 陈志国, 向勇, 等. 少量铈对高硼高速钢微观组织与力学性能的影响[J]. 中国有色金属学报, 2013, 23(5): 1289-1294.
WU Zhongjia, CHEN Zhiguo, XIANG Yong, et al. Effect of small amount of Ce addition on microstructure and mechanical properties of high-boron high speed steel[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2013, 23(5): 1289-1294.
- [6] 李志杰, 彭艳, 刘宏民, 等. 中碳钢温变形的力学特性[J]. 北京理工大学学报, 2013, 33(4): 425-428.
LI Zhijie, PENG Yan, LIU Hongmin, et al. Mechanical characteristics of warm deformation of medium carbon steel[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2013, 33(4): 425-428.
- [7] 代启锋, 宋仁伯, 关小霞, 等. 铁素体晶粒尺寸对铁素体—马氏体双相钢 DP980 动态变形行为影响[J]. 机械工程学报, 2012, 48(6): 44-50.
DAI Qifeng, SONG Renbo, GUAN Xiaoxia, et al. Effects of ferrite grain size on dynamic deformation behavior of

- ferrite-martensite dual phase steel DP980[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2012, 48(6): 44-50.
- [8] NAJAFI H, RASSIZADEHGHANI J, NOROUZI S. Mechanical properties of as-cast microalloyed steels produced via investment casting[J]. Materials and Design, 2011, 32: 656-663.
- [9] TSUI Y C, HOWARD S J, CLYNE T W. The effect of residual stresses on the debonding of coatings-II[J]. Acta Metallurgica et Materialia, 1994, 42(8): 2837-2844.
- [10] 崔忠圻, 覃耀春. 金属学与热处理[M]. 北京: 机械工业出版社, 2010.
- CUI Zhongqi, QIN Yaochun. Metallography & heat treatment[M]. Beijing: China Machine Press, 2010.
- [11] 姜锡山. 钢铁显微断口速查手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 2010.
- JIANG Xishan. Quick query handbook of steel & iron microscopic fracture[M]. Beijing: China Machine Press, 2010.
- [12] 孙莹, 于庆波. 低碳钢的解理断裂机理及微观形貌分析[J]. 昆明理工大学学报, 2011, 36(4): 18-22.
- SUN Ying, YU Qingbo. Cleavage fracture mechanism and microstructure analysis of low-carbon steel[J]. Journal of Kunming University of Science and Technology, 2011, 36(4): 18-22.
- [13] 钟群鹏, 赵子华. 断口学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- ZHONG Qunpeng, ZHAO Zihua. Fracture morphology[M]. Beijing: Higher Education Press, 2010.
-
- 作者简介: 闫红红, 女, 1978 年出生, 讲师。主要研究方向为材料加工先进制造技术。
E-mail: yhhtyust@163.com
- 李永堂(通信作者), 男, 1957 年出生, 教授, 博士研究生导师, 太原科技大学副校长, 材料科学与工程学科首席学科带头人。主要研究方向为材料加工先进制造技术及锻压设备理论与控制, 发表论文 150 余篇。
E-mail: liyongtang@tyust.edu.cn