

高冲击韧性 QT900-6 材料的开发与应用

丛建臣^{1, 2}, 倪培相², 邵诗波², 冯梅珍², 戴学忠², 苏新同³

(1. 山东理工大学, 山东淄博 255000; 2. 天润工业技术股份有限公司, 山东威海 264400;
3. 齐鲁工业大学, 山东济南 250353)

摘要: 通过优化球墨铸铁材料微量元素配比, 采用SiC基变质剂进行铁液预处理和分段保温热处理的方式, 研发出高冲击韧性的QT900-6新型球墨铸铁材料。该材料组织中石墨球数量明显增加, 铁素体呈分散的破碎状分布, Si在铁素体中的固溶量减少, 珠光体团和片间距明显变小, 综合作用提高了材料的韧性。材料抗拉强度达到956 MPa, 伸长率达到7.4%, 缺口冲击吸收功达到5.2 J, 而且仍保留着低塑性材料的可胀断优势。利用该QT900-6材料生产的球墨铸铁胀断连杆具有胀断性好、疲劳强度高、重量一致性好的优点, 成本比锻钢连杆低, 各项指标能够满足发动机连杆节能、降耗、降成本、高可靠性的要求。

关键词: 球墨铸铁; QT900-6; 缺口冲击吸收功; 胀断连杆

现代球墨铸铁自20世纪40年代研制成功以来, 在工业上获得了广泛应用, 应用范围已遍及汽车、船舶、冶金、化工等领域^[1-2], 如汽车轮毂、支架、发动机曲轴、壳体等零部件。随着产品轻量化和节能减排的发展需求, 对球墨铸铁零件的强度、韧性等综合性能要求越来越高。对于金属材料而言, 强度和韧性互为冲突、相互制约, 强度提高的同时, 韧性随之降低^[3]。目前, 国内外抗拉强度在900 MPa以上的高强度球墨铸铁材料, 缺口试样冲击值小于3 J/cm², 因此通常不检测缺口冲击韧性, 只检测无缺口试样冲击值^[4-5]。高强度球墨铸铁材料韧性太低, 应用受到了限制, 如受冲击力较大的发动机连杆等零部件。因此, 提高球墨铸铁材料的冲击韧性已成为近年来关注的焦点。

本文针对传统球墨铸铁材料强度与韧性互为冲突的矛盾, 优化合金元素配比, 突破高强度球墨铸铁韧性低的难题, 提高其缺口冲击韧性, 研发高强度高冲击韧性的QT900-6球墨铸铁材料, 并应用于发动机连杆的生产。

1 QT900-6材料研究

为提高球墨铸铁材料韧性, 传统的方法只能增加硅含量, 但硅含量过高则导致铁素体量增加, 从而降低强度, 并且球墨铸铁的韧-脆转变温度相应提高, 使材料的低温冲击韧性急剧下降^[6]。本文通过优化微量元素配比, 采用SiC基变质剂进行铁液预处理, 增加石墨球数量, 同时稳定珠光体、控制铁素体含量, 研究珠光体的微观结构特征、铁素体形态及分布对强度韧性的影响, 以及硅在铁素体中的含量及固溶强化的作用等, 研发出强度高、韧性好的QT900-6材料, 并获得规模化生产的先进铸造控制技术。

1.1 材料制备

铸造原材料为生铁、废钢, 感应电炉熔炼, 湿型砂铸造。材料化学成分控制范围如表1所示。采用盖包法球化处理工艺, 瞬时孕育, 低温快速浇注, 同时增大铁液的冷却速度, 增加石墨形核核心。球化剂为稀土镁硅铁合金, 孕育剂为75%的硅铁,

作者简介:

丛建臣(1963-), 男, 教授, 主要从事金属材料及金属零件的研究与应用工作。
E-mail: jhcong@tianrun.com

中图分类号: TG143.5
文献标识码: A
文章编号: 1001-4977(2022)03-0302-08

收稿日期:

2021-08-12 收到初稿,
2021-09-17 收到修订稿。

浇注温度1 380~1 400 ℃。浇注成杆部长度为200 mm、总长度为280 mm的连杆样件。

为提高铸件的综合力学性能，需要对铸件进行正火热处理。普通正火热处理一般是将铸件加热到 Ac_{cm} 以上使组织全部奥氏体化，然后风冷或雾冷，获得珠光体和牛眼状铁素体组织。据资料介绍，在珠光体球铁中，铁素体为破碎状时无论是高能量还是低能量多次冲击，冲击性能都优于铁素体为牛眼状时的性能^[4]。

为获得破碎状铁素体，提高铸件的冲击韧性，本研究采用加热后两段式保温的热处理工艺，热处理后立即出炉雾冷8~10 min，热处理工艺见图1。

试样经热处理后分别制成有效直径为5 mm的圆柱形拉伸试样和带有V形缺口的夏比冲击试样各6个，进行拉伸和冲击性能检测，试样尺寸见图2。同时，取相同规格和普通高强度球铁材料（QT900-2）的试样进行性能检测，与该研究制备的QT900-6材料进行对比。拉伸试验在MTS型万能拉伸试验机上进行，冲击试验在摆锤式冲击试验机上进行，试验条件均为室温，检测结果取所有检测试样的平均值，见表2。

经试验得出，QT900-6材料的抗拉强度达到956 MPa，屈服强度达到589 MPa，伸长率达7.4%，断面收缩率为6.8%，均高于QT900-2材料。尤其缺口试样的冲击吸收功达到5.2 J，远高于QT900-2材料。

1.2 分析与探讨

1.2.1 冲击断口

利用ZEISS sigma300型场发射扫描电子显微镜（SEM）对冲击断口的裂纹起始位置进行微观形貌观察。图3a、b冲击断口照片分别标注了电镜观察位置，图3c、d分别是QT900-6和QT900-2材料试样的冲击断口扫描电镜照片。从图3c中可以看出，QT900-6材料冲击断口呈准解理断裂，在不同解理面之间有明显撕裂棱和一定数量的韧窝，包含有韧性、脆性断裂的特点，说明材料具备一定的塑性。从图3d中看出，QT900-2材料冲击断口主要以解理断裂为主，出现大量河流状花

纹，解理面上有剪切唇，呈脆性断裂特征。

冲击值高的QT900-6试样比冲击值低的QT900-2试样断口解理面小，韧窝数量多，在准解理小平面上有明显的撕裂棱，石墨周围呈明显的韧窝状，这与其较高的冲击值相对应。

1.2.2 微观组织

从检测完成的拉伸试样端头取金相试样，经打磨、抛光后在Olympus金相显微镜下观察球化情况和石墨球形貌，并利用分析软件测量石墨球数量，然后用4%的硝酸酒精溶液腐蚀，观察组织形态和珠光体含量等。利用扫描电镜（SEM）进行微观组织观察。

表1 材料成分

Table 1 Chemical composition of the QT900-6 material

w _B /%					
C	Si	Mn	P	S	Cu
3.5~3.9	1.6~1.9	0.4~0.5	≤0.06	≤0.02	0.4~0.5

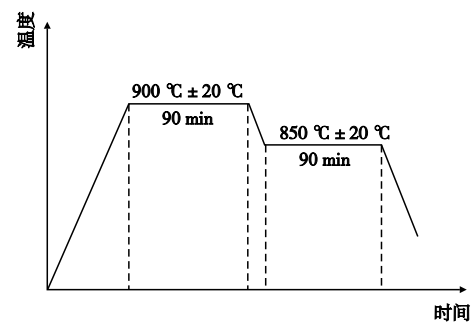


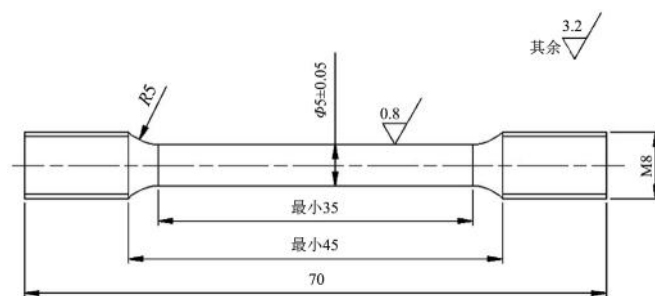
图1 铸件分段式热处理工艺

Fig. 1 Segmented heat treatment process for the casting

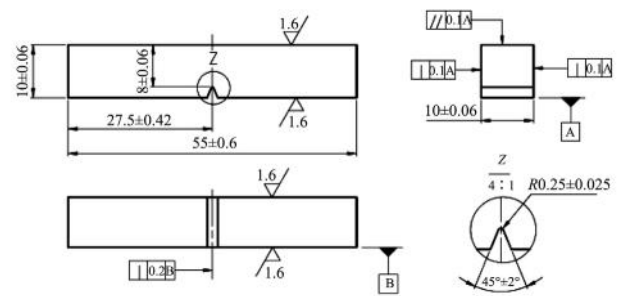
表2 材料力学性能检测结果

Table 2 The results of mechanical properties of the materials

材料	R_m /MPa	$R_{p0.2}$ /MPa	A /%	Z /%	A_{KV} /J
QT900-6	956	589	7.4	6.8	5.2
QT900-2	944	563	3.1	3.2	1.6



(a) 拉伸试样



(b) V形缺口冲击试样

图2 力学性能试样尺寸

Fig. 2 The sizes of the mechanical properties samples

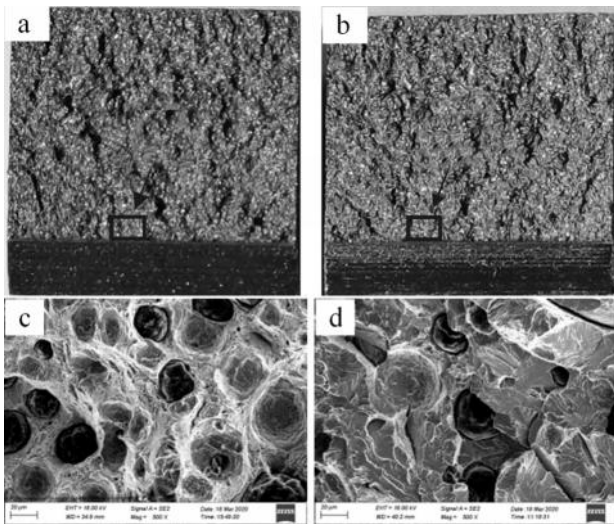
图4a是QT900-6材料的球化组织。从图中看出，QT900-6材料石墨球细小圆整均匀，石墨大小为7级，石墨球数量达200~250个/mm²，细小均匀的石墨球加强了阻止裂纹扩展的能力，为材料的高强韧性提供了组织基础。图4b是QT900-6材料的金相组织。组织中的铁素体为均匀分散的破碎状铁素体，破碎状铁素体提高了材料的韧性。

Si与Fe之间的结合力比C强，Si原子与Fe原子可以结合成具有强共价键的含Si铁素体。Si在Fe中的固溶度比C大得多，在Fe中形成置换固溶体，Si的溶入使相邻的Fe原子靠拢而产生晶格畸变，有较大的固溶强化作

用。Si的固溶强化可提高球墨铸铁的 R_m 、 $R_{p0.2}$ 和HBW，而降低塑性和韧性^[7]。

对同炉铁液生产的QT900-6材料的铸态和正火态组织进行Si含量能谱检测，结果见图5和表3。从中看出，正火态组织中的块状游离铁素体和珠光体中层片状铁素体固溶的Si含量均比铸态组织中铁素体的Si含量少，且趋势相同。Si的固溶量变少，减小了晶格畸变，降低了畸变能，晶格变得比较稳定，提高了材料的塑性和韧性。

梁宇、赖毅翔等人研究得出，随晶粒尺寸的增加，冲击试样缺口前沿塑性区中大角度晶界密度降



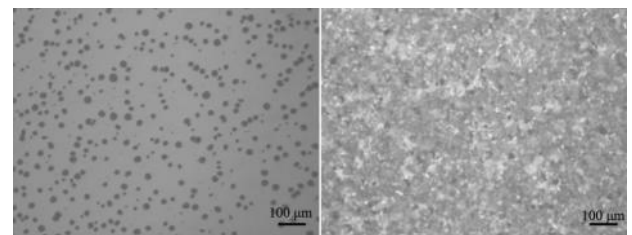
(a)、(c) QT900-6; (b)、(d) QT900-2

图3 试样冲击断面及电镜照片

Fig. 3 The impact fracture and SEM images of the samples

表3 铁素体组织中元素含量
Table 3 Element contents in the ferrite structure

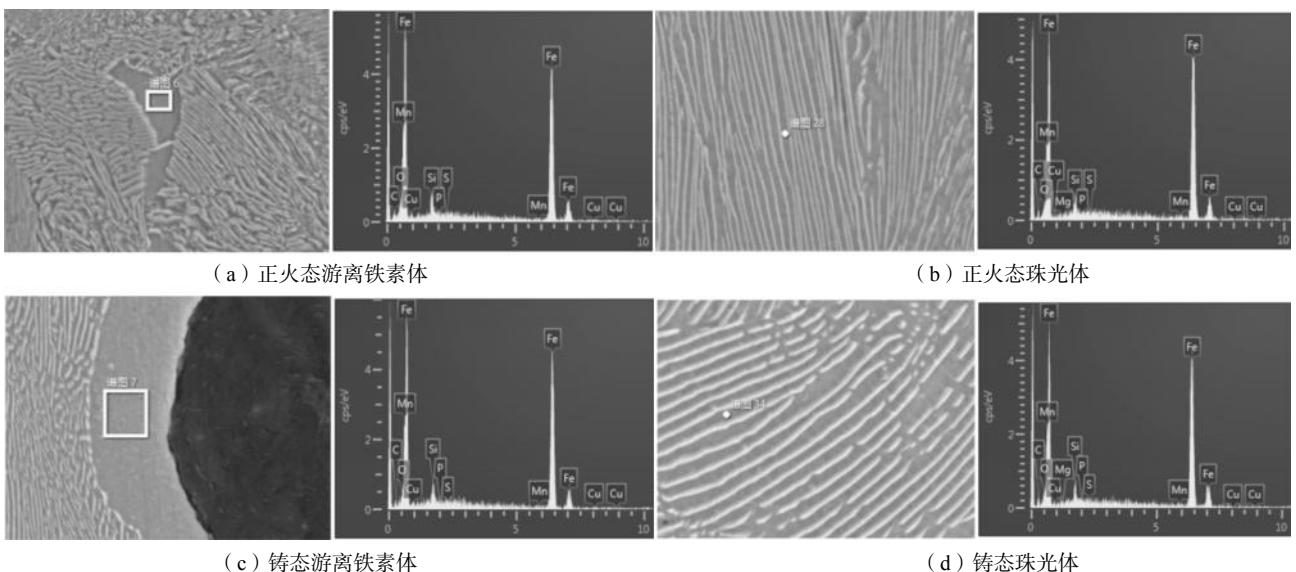
元素	C	Si	Mn	Cu	Fe
正火态F	3.88	1.51	0.25	1.25	92.62
正火态P	3.12	1.36	0.62	1.2	92.99
铸态F	3.27	2.19	0.28	2.39	91.20
铸态P	3.64	1.59	0.53	1.21	92.32



(a) 球化组织 (b) 金相组织

图4 QT900-6材料微观组织

Fig. 4 Microstructure of the QT900-6 material



(a) 正火态游离铁素体

(b) 正火态珠光体

(c) 铸态游离铁素体

(d) 铸态珠光体

图5 QT900-6材料铁素体能谱分析图片

Fig. 5 SEM images of energy spectrum analysis of the QT900-6 material ferrite

低, 珠光体团的取向越单一, 阻碍裂纹扩展的能力变弱, 冲击韧性随晶粒尺寸的增加快速降低^[8-9]。扫描电镜观察到QT900-6材料的珠光体团明显小于QT900-2材料, 而且取向增加, 见图6a、b。被分割的细小珠光体团增加了裂纹沿珠光体团界面扩展的路径, 且珠光体团边界进一步阻碍裂纹扩展^[10], 使得裂纹扩展所消耗的能量显著增加, 因此其缺口冲击韧性明显高于QT900-2材料。

球墨铸铁材料的珠光体强度主要由片层间距决定, 片层间距越小, 其强度、硬度越高。QT900-6材料珠光体片间距在0.5 μm 左右, 明显小于QT900-2材料, 见图6c、d。因此, QT900-6材料在韧性提高的同时, 强度也有所提升。

2 QT900-6材料的应用

连杆是发动机的核心运动件, 在发动机中受往复惯性力、旋转离心力和点火产生的爆压力等交变载荷, 工作条件极为恶劣, 对材料的强度与冲击韧性要求极高, 其可靠性对整机的可靠性起着关键作用^[11-12]。目前, 发动机连杆大多采用42CrMo等调质钢锯断生产和C70S6、46MnVS6等非调质钢材料胀断生产^[13-14]。

传统锯断加工工艺需要先把连杆大头孔锯断后再分别加工两侧锯断面。锯断连杆普遍存在大头孔锯断结合面承载能力低、抗剪切能力差的特点, 而且存在生产工序长、效率低、生产设备投资大、加工切削液污染等问题, 因此该加工工艺逐步被淘汰。

连杆胀断技术是新兴的连杆加工技术, 是用带楔形的压头快速冲入大头孔产生的径向力使连杆盖从连杆体上断裂而分离开来。胀断技术具有连杆断面啮合

好、定位精度高、连杆承载能力和抗剪切能力强的优点, 加工工序少、生产成本低, 具有传统锯断加工方法无可比拟的优越性, 在欧美发达国家得到了广泛应用。但用于生产胀断连杆的国产化锻钢材料在一定程度上存在性能不稳定。而且锻钢材料生产流程长、能耗高、连杆重量大、生产成本低, 对发动机轻量化、低排放和低成本的发展要求形成巨大挑战。

球墨铸铁材料的密度比锻钢材料低8%, 同体积重量轻, 成本低, 其低塑性和易脆断性适宜连杆胀断加工。但普通高强度球墨铸铁材料综合性能差, 尤其是缺口冲击韧性极低, 无法满足发动机连杆对高爆压冲击力的要求, 限制了其在连杆上的应用, 国内外至今未见球铁连杆的规模化生产与应用。

本研究开发的QT900-6材料既有很高的强度, 又有较高的缺口冲击韧性, 而且仍保留着低塑性材料的可胀断优势, 使胀断后连杆断面具有良好的啮合性^[15], 能够满足连杆对高爆压冲击力的要求, 可以用于生产胀断连杆。球铁连杆与锻钢连杆的主要差别在于连杆强度和毛坯铸造缺陷问题, 是生产过程最关注的问题。

2.1 球铁连杆的设计

为解决连杆强度问题, 本研究利用有限元计算和多体动力学分析技术, 对连杆结构进行优化设计, 增加了杆部的承载面积, 加强了连杆结构强度, 连杆设计模型见图7。对五款结构优化后的连杆进行模拟计算得出, 各型号球铁连杆在最大载荷时可以承受的最大

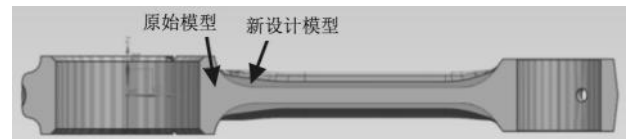


图7 连杆模型设计

Fig. 7 Design of the con-rod model

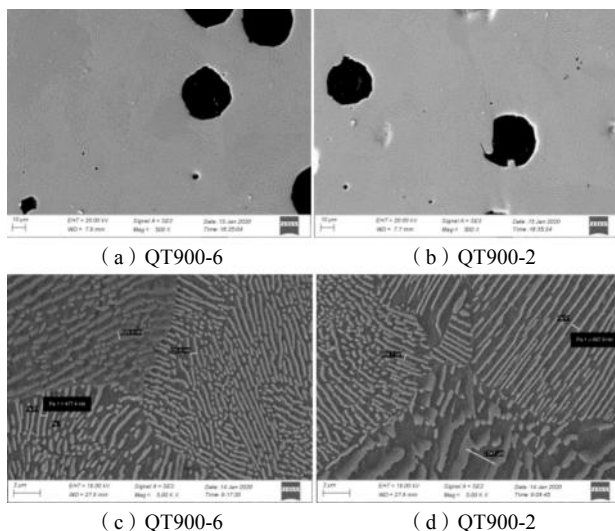
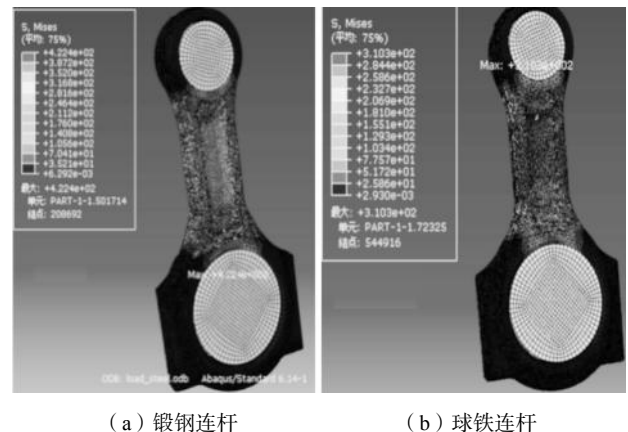


图6 球铁材料珠光体SEM图片

Fig. 6 SEM images of the pearlite of the ductile iron materials



(a) 锻钢连杆

(b) 球铁连杆

图8 连杆模拟计算结果

Fig. 8 Simulation results of the con-rod

应力均高于同型号锻钢连杆，见图8和表4。

2.2 球铁连杆毛坯的生产

生产工艺简述：造型线采用湿型砂高压造型线，型板尺寸为1 240 mm × 890 mm，感应电炉进行铁液熔炼，采用冲入法对铁液进行球化处理，球化并除渣后导入浇注机，由浇注机自动浇注，浇注过程中随流孕育，浇注温度控制在1 380~1 400 ℃。

连杆毛坯的铸造缺陷主要有表面砂眼和内部缩松两种。通过研究发现，模具上箱连杆杆部表面是最容易形成砂眼的部位，在杆部与大小头孔连接部位热节最大，最容易产生内部缩松。因此，采用热稳定性更好的铸造用粘合剂，同时优化横浇道与内浇道，使其高度比大于4，减少夹砂、夹渣缺陷。在工艺设计时，增加激冷片对热节处进行激冷，同时优化浇注系统，加大局部横向浇道，代替冒口，对铸件进行补缩，增加铸件冷却过程的补缩能力，工艺设计见图9。

采用上述工艺生产的球墨铸铁连杆毛坯表面光洁，无砂眼，外观与锻钢连杆几乎没有区别，见图10。依据ASTM E446检测标准，对球铁连杆进行X射线探伤检测，内部无缩松、缩孔、夹渣等铸造缺陷。

取30支连杆，按照图11的取样位置从杆部分别切取拉伸试样和冲击试样各30个，进行性能检测。经统计分析得出，QT900-6材料的抗拉强度、屈服强度、伸长率和缺口冲击值的 C_{pk} 值分别为1.03、1.0、1.03、0.93，各项力学性能非常稳定，见图12。



(a) 锻钢连杆



(b) 球铁连杆

图10 连杆照片

Fig. 10 The photos of the con-rod

表4 连杆强度计算结果

Table 4 Strength calculation result of the con-rod

连杆	质量/kg	最大应力/MPa	安全系数
WP6铁连杆	1.545	308	2.017
WP6钢连杆	1.525	267.5	2.112
WP10铁连杆	3.477	327.4	2.14
WP10钢连杆	3.469	252.5	2.2
E00铁连杆	0.985	422.4	1.795
E00钢连杆	1.006	310.3	1.857
4RAZ铁连杆	2.03	306.7	1.85
4RAZ钢连杆	2.18	374.8	1.691
D20铁连杆	0.756	293	1.92
D20钢连杆	0.762	361	1.867

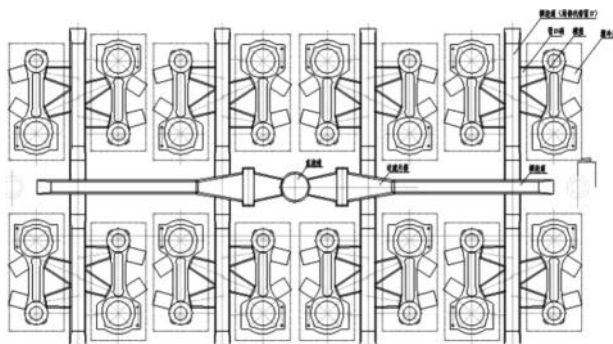


图9 铸造工艺设计图

Fig. 9 Casting process design drawing

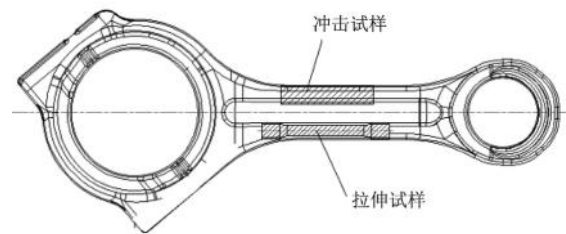


图11 性能试样取样位置图

Fig. 11 Sampling location diagram of the mechanical properties

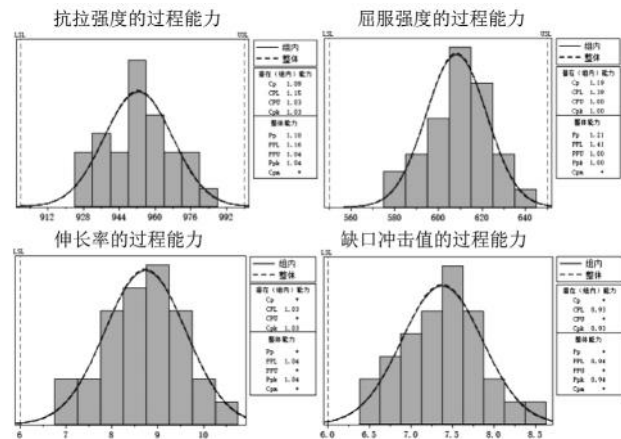


图12 QT900-6材料力学性能过程能力

Fig. 12 Process capacities of mechanical properties of the QT900-6 materials

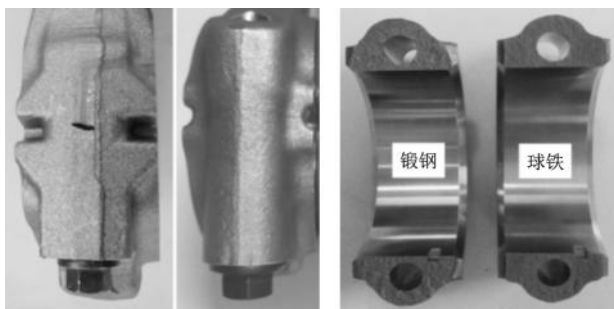
2.3 球铁连杆的加工

锻钢连杆的胀断掉渣问题是连杆胀断生产的重大难题。球铁连杆材料具有较低的塑性，在胀断性能上优于锻钢连杆。通过对胀断技术进行深入研究，增加了胀断前激光刻痕的深度，提高了胀断过程的冲头速度，球铁连杆胀断掉渣率控制在1%以内。胀断后的球铁连杆胀断面吻合度好，大头孔变形小、无失圆现象，胀断面的高度差（断面平整度）小于1.5 mm。胀断质量指标和胀断口外观形貌均优于锻钢连杆，见图13和表5。

传统切削工艺加工的螺纹，材料组织纤维被切断，降低了螺纹强度。挤压工艺加工的螺纹，仍保留了材料原来的组织纤维状态，而且螺纹表面材料更加致密，强度得到很大提高。图14是挤压螺纹和切削螺纹的对比示意图。

为保证连杆大头螺栓孔螺纹强度，球铁连杆大头螺栓孔螺纹采用挤压加工工艺。图15是利用挤压工艺加工的连杆螺栓孔螺纹截面金相组织。从图中看出，螺纹形貌具有典型挤压螺纹的特征，螺纹近表面的石墨球发生了明显的挤压变形，呈细长或椭圆形，基体组织呈明显的纤维状，珠光体组织发生挤压变形，组织更加致密，提高了螺纹强度。

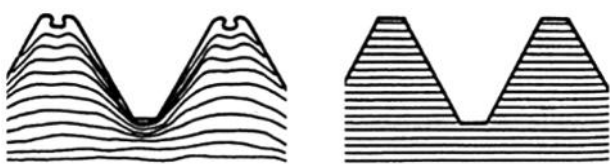
连杆在使用过程中做高速旋转运动，容易产生不平衡，因此对连杆重量的要求极高，每台发动机的连杆在装配前必须进行重量分组。表6是某型号球铁连杆重量检测结果，单件平均重量比锻钢连杆轻2%左右，



(a) 胀断侧面 (b) 胀断断面

图13 连杆胀断部位外观照片

Fig. 13 The photos of splitting sections of the con-rod



(a) 挤压螺纹 (b) 切削螺纹

图14 螺纹纤维状态对比示意图

Fig. 14 Schematic diagram of thread fiber condition comparison

而且重量一致性远高于锻钢连杆，满足同台发动机连杆总成重量的技术要求，避免了重量分组，实现连杆的无差别化装配。

2.4 球铁连杆的可靠性验证

2.4.1 疲劳试验

连杆的抗疲劳强度是评价连杆可靠性的最有效指标，连杆的疲劳强度主要通过拉压疲劳试验来完成，被国内外广泛采用^[16]。依据JB/T 12661—2016内燃机连杆疲劳试验方法，利用德国进口SincoTec1000kN型高频连杆疲劳试验机进行连杆疲劳试验。

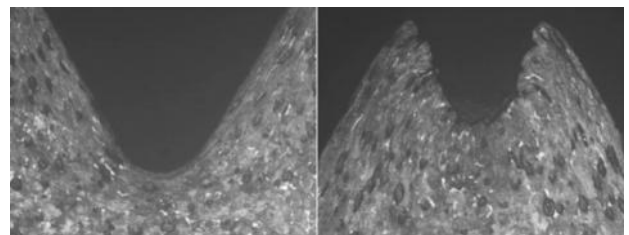
连杆通过大、小头轴销与试验机相连，连杆大小孔与轴销之间均为过盈配合。用升降法进行试验，试验载荷升降步幅为0.1倍的安全系数，试验过程保持固定载荷比不变。试验循环基数为 1×10^7 次，当循环次数

表5 连杆胀断质量对比
Table 5 Comparison of breaking quality of the con-rod

连杆材质	胀断掉渣率/%	断面高度差/mm
锻钢	4~10	≤2
球铁	< 1	≤1.5

表6 成品球铁连杆重量检测结果
Table 6 The results of weight of the finished ductile iron con-rod weight

编号	质量/g	编号	质量/g
1#	1 675	11#	1 673
2#	1 668	12#	1 663
3#	1 667	13#	1 669
4#	1 669	14#	1 674
5#	1 668	15#	1 661
6#	1 666	16#	1 672
7#	1 670	17#	1 669
8#	1 671	18#	1 670
9#	1 663	19#	1 665
10#	1 664	20#	1 668



(a) 螺纹根部 (b) 螺纹顶部

图15 连杆螺栓孔挤压螺纹金相组织

Fig. 15 Metallographic microstructures of extrusion thread of the con-rod bolt hole

小于 10^7 次, 试验频率明显下降, 并且试样有明显裂纹时, 判定试样失效。当试验循环次数达到 10^7 次, 试验频率没有下降, 且试样没有裂纹, 判定试样通过该载荷水平的试验。分别对同型号的球墨铸铁连杆和锻钢连杆进行疲劳试验, 对比其疲劳强度。试验结果如表7所示。

通过试验得出, 五款球铁连杆在50%存活率下的疲劳强度均高于同规格的锻钢连杆, 球铁连杆疲劳强度比锻钢连杆提高了3%~9%。

2.4.2 台架试验

利用新型球墨铸铁材料生产的E00球铁连杆已顺利通过一汽无锡柴油机厂的发动机台架试验, 试验后检测得出: 连杆无扭曲变形、螺栓松动等现象; 连杆杆身无裂纹, 连杆大头侧面无擦痕; 连杆小头衬套受力面磨损正常, 均无拉伤粘着现象。台架试验后的连杆照片见图16。试验结果达到发动机要求, 目前已经开始批量装机。

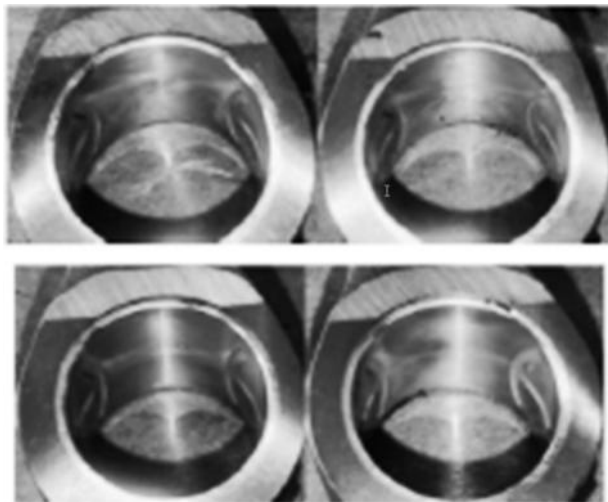


图16 台架试验后的连杆照片

Fig. 16 The photos of the con-rod after bench test

表7 连杆疲劳强度对比
Table 7 Comparison of fatigue strength of the con-rod

连杆类型	疲劳强度/kN	安全系数	强度比
WP6铁连杆	152.5	2.62	1.078
WP6钢连杆	141.5	2.43	1.000
WP10铁连杆	243.8	2.37	1.044
WP10钢连杆	233.5	2.27	1.000
E00铁连杆	126.7	1.99	1.036
E00钢连杆	122.2	1.92	1.000
4RAZ铁连杆	198.1	2.27	1.09
4RAZ钢连杆	181.5	2.08	1.000
D20铁连杆	99.0	2.02	1.030
D20钢连杆	96.1	1.96	1.000

3 结论

(1) 通过优化元素配比、利用SiC基变质剂进行铁液预处理和分段式热处理技术, 开发的新型QT900-6材料的抗拉强度达到956 MPa, 伸长率达到7.4%, 缺口冲击吸收功达到5.2 J, 缺口冲击功是高强度QT900-2材料的3倍以上。

(2) QT900-6材料组织中的石墨球数量达到200~250个/ mm^2 , 增强了阻止裂纹扩展的能力。组织中的铁素体呈均匀分散的破碎状, 铁素体和珠光体中的Si含量比普通高强度球铁材料明显减少, 降低了晶格畸变能, 同时珠光体团和片间距明显变小, 综合作用提高了材料的塑性和韧性。

(3) 利用新型QT900-6材料生产的多种型号发动机机断连杆, 疲劳强度比锻钢连杆高3%~9%。球铁连杆具有强度高、成本低、可胀断、重量一致性好的优点, 可以进行批量生产和规模化应用。

参考文献:

- [1] 房贵如. 现代球墨铸铁的诞生应用及发展趋势 [J]. 机械工艺师, 2000 (6): 13-15.
- [2] 中国机械工程学会铸造分会. 铸造手册 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2002.
- [3] 程新, 赵树山. 断裂力学 [M]. 北京: 科学出版社, 2006.
- [4] 杨启宇, 陈军, 毛卫民, 等. 热处理对球墨铸铁冲击韧性的影响 [J]. 铸造, 2008, 57 (4): 375-377.
- [5] 骆晓纲. 球墨铸铁低温冲击韧性的改善 [J]. 铸造, 1994 (10): 28-32.
- [6] NISHIKAWA L P, MELADO A C, GOLDENSTEIN H, et al. Enhancing mechanical properties of ductile cast iron conrods through different heat treatments [C]/SAE International, 2016.
- [7] 钱立. 谈谈铸铁中的Si [J]. 铸造, 2014, 63 (9): 956-960.
- [8] 梁宇, 向嵩, 梁益龙, 等. 原奥氏体晶粒尺寸对珠光体钢组织及韧性的影响 [J]. 材料导报, 2017, 31 (2): 77-81.
- [9] 赖毅翔. 高强韧破碎铁素体球墨铸铁曲轴的研究与制备 [D]. 大连理工大学, 2014.
- [10] 俞德刚, 谈育煦. 钢的组织强度学 [M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1983.

- [11] 曹正. 汽车发动机连杆材料的现状及发展趋势 [J]. 汽车工艺与材料, 2007 (1): 7-10.
- [12] 王乾. 发动机连杆新材料的发展与研究 [J]. 机械, 2010, 37 (3): 69-71.
- [13] 许燕茹, 苏铁熊, 龚玉霞, 等. 发动机连杆材料的研究现状 [J]. 内燃机与配件, 2011 (8): 31-32.
- [14] 范明强. 现代轿车发动机连杆材料及其发展现状 [J]. 国外内燃机, 2013, 45 (4): 34-39.
- [15] SULAMETARIOBIMO R, YUDHA G, SUKARNOTO T, et al. Thin wall austempered ductile iron connecting rod for lighter automotive component production of thin wall ductile iron connecting rod [C]//SAE International, 2019.
- [16] PRASHANT S T, FRANK CRASTA P. Exploring fatigue behavior of connecting rod made of austempered ductile iron [J]. International Research Journal of Engineering and Technology, 2017 (4): 2735-2745.

Development and Application of QT900-6 with High Impact Toughness

CONG Jian-chen^{1,2}, NI Pei-xiang², SHAO Shi-bo², FENG Mei-zhen², DAI Xue-zhong², SU Xin-tong³
(1. Shandong University of Technology, Zibo 255000, Shandong, China; 2. Tianrun Industry Technology Co., Ltd., Weihai 264400, Shandong, China; 3. Qilu University of Technology, Jinan 250353, Shandong, China)

Abstract:

A new type of ductile iron (QT900-6) with high impact toughness was developed by optimizing the proportion of trace elements in ductile iron material, using silicon carbide based modifier for pretreatment, and segmented thermal insulation heat treatment. The number of graphite spheres in the microstructure of the material increased obviously, ferrite was distributed in a dispersed and broken shape, the solid solution of Si in ferrite decreased, and the spacing between pearlite clusters and sheets decreased obviously. The comprehensive effect improved the toughness of the material. The tensile strength of the material reached 956 MPa, the elongation reached 7.4%, the notch impact energy reached 5.2 J. Moreover, it still retained the advantage of low plastic material which can be fractured. The ductile iron fracture split con-rod produced by QT900-6 material has the advantages of good fracture property, high fatigue strength and good weight consistency. The cost is lower than that of forged steel con-rod. The indexes can meet the requirements of energy saving, consumption reduction, cost reduction and high reliability of the engine con-rod.

Key words:

ductile iron; QT900-6; notch impact energy; fracture split con-rod
