

不同强韧性匹配的重载车钩材料高周疲劳行为研究

田长亮¹, 赵庚宁¹, 崔世海¹, 王 皓¹, 李鹤飞², 覃作祥²

(1. 中车齐齐哈尔车辆有限公司, 黑龙江齐齐哈尔 161002; 2. 大连交通大学材料科学与工程学院, 辽宁大连 116028)

摘要: 研究了不同强韧性匹配重载车钩材料的高周疲劳行为。通过不同热处理工艺获得的重载车钩材料25MnCrNiMoA钢三种不同强韧性匹配的试样, 即: 高强低韧、中强高韧和低强高韧三种组合的试样。采用旋转弯曲疲劳试验方法, 测定了车钩材料的疲劳极限。绘制了 p - S - N 曲线, 观察了疲劳断口, 分析了在不同回火温度下获得的不同强韧性匹配对车钩材料高周疲劳行为的影响。结果表明, 强韧性匹配对重载车钩材料的高周疲劳行为影响显著。经过处理的中强高韧强韧性匹配车钩材料具有较高的疲劳极限和寿命水平, 与低周疲劳试验研究结果一致, 本研究为车钩设计的选材和生产提供重要的理论依据。

关键词: 重载车钩; 强韧性匹配; 高周疲劳; 疲劳极限

车钩作为铁路货车关键的连接部件, 它在机车与车辆、车辆与车辆之间起连接作用, 并在列车运行中传递牵引力和缓解冲击力, 在车辆运输中起着非常重要的作用。由于车钩在运行中承受拉、压、冲击等多种载荷的综合作用, 致使各部分时常产生裂纹、变形、磨耗及三态作用不良等失效形式^[1]。随着列车重载程度的不断增加, 车钩在服役中受到的随机的、交变的载荷越来越大, 车钩的疲劳断裂问题日益突出, 并已成为车钩失效的主要形式^[2-8]。早期的疲劳断裂失效不仅缩短了车钩的使用寿命, 造成了重大的经济损失, 而且严重威胁到了列车的运行安全。考虑到车钩的互换性, 钩体和钩舌的结构无法进行大的改变, 因此改善钩体和钩舌材料的疲劳寿命水平是提升其疲劳寿命的有效办法。众所周知, 车钩材料的疲劳寿命与材料强度和韧性有很大关系, 材料的强度与韧性是呈现此消彼长的关系, 提高强度会降低韧性, 提高韧性就要降低强度水平才能达到。那么在车钩热处理后, 究竟是保证强度还是保证韧性或是保证强度和韧性合理的匹配关系才能提高车钩的疲劳性能和使用寿命, 一直是工程设计中急需解决的重要问题。南非国际重载大会发表的论文, 对不同强韧性匹配的车钩材料进行了低周疲劳性能研究, 得出中强高韧强韧性匹配车钩材料具有较好的低周疲劳寿命水平^[9]。为探明不同强韧性匹配对重载车钩材料高周疲劳行为的影响, 完成对其高、低周疲劳性能的完整研究。本研究从高周疲劳的角度入手, 采用重载车钩材料25MnCrNiMoA钢, 通过不同热处理工艺获得三种不同强韧性匹配的试样, 即: 高强低韧、中强高韧和低强高韧三组试样, 制成圆柱形光滑疲劳试样, 开展旋转弯曲疲劳试验, 研究不同强韧性匹配对重载车钩材料高周疲劳行为的影响规律。

1 试验材料

选用棒状尺寸为25 mm × 25 mm × 190 mm的25MnCrNiMoA钢作为试验材料。通过920 °C淬火+450 °C、550 °C、650 °C高温回火处理来改变材料内部组织结构, 获得了高强低韧、中强高韧和低强高韧三组不同强韧性匹配的试验材料。

作者简介:

田长亮(1987-), 男, 高级工程师, 硕士, 主要研究方向为金属材料。
电话: 13796894735,
E-mail: tcliang_qrrs@163.com

中图分类号: TG172

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2021)

02-0206-08

收稿日期:

2020-09-15。

1.1 显微组织

图1为25MnCrNiMoA钢热处理后金相组织^[10]。450℃回火时组织为回火索氏体，板条特征明显，较小的渗碳体颗粒分布在铁素体晶界上；550℃回火时，铁素体板条特征逐渐消失，呈现多边形特征，渗碳体既分布于铁素体晶界，也分布于铁素体晶内。650℃回火时，铁素体发生回复和再结晶，渗碳体主要分布于铁素体晶内。

1.2 力学性能

25MnCrNiMoA钢经热处理后得到抗拉强度、冲击功的变化结果见表1。试样经450℃回火后其强度很高，但冲击功较低，仅为45 J；进一步提高回火温度，当回火温度升高至550℃，则强度降低，冲击功升高至

103 J；当回火温度达到650℃时，冲击功高达181 J，韧性极好，但强度较低。这样就得到了三种不同强韧性匹配组合，即：高强低韧、中强高韧和低强高韧三种组合的试样。

1.3 冲击断口形貌

图2为-40℃下25MnCrNiMoA钢V形缺口冲击断口扩展区形貌。由图可见，试样经450℃回火后断口较平坦，具有明显解理特征，断口无韧窝出现，冲击功较低仅为45 J；随着回火温度升高到550℃，出现了大小不一的韧窝，大的韧窝周围密集分布着小的韧窝，此时冲击功较高，为103 J；当回火温度达到650℃时，韧窝变得更加细小密集，出现尺寸达几十微米以上的大而深的韧窝，冲击功高达181 J，韧性很好。

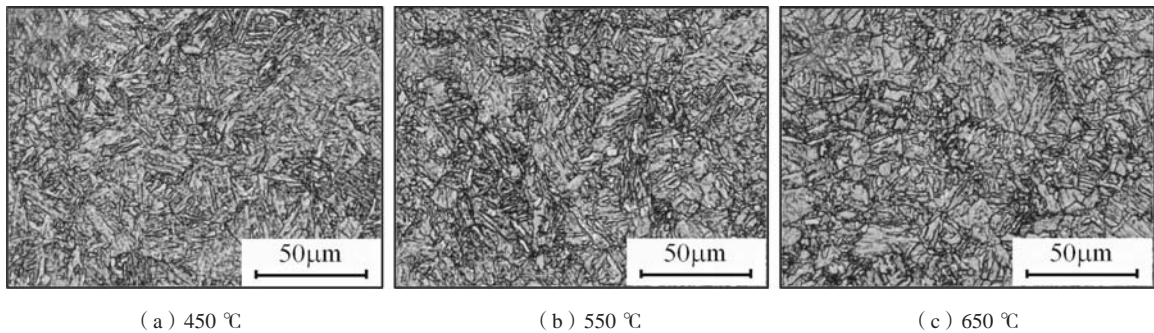


图1 25MnCrNiMoA钢调质热处理后的金相组织

Fig. 1 Metallurgical structure of 25MnCrNiMoA steel after 920 °C quenching and 450 °C, 550 °C, 650 °C tempering heat treatment

2 疲劳试验

高周疲劳试验采用旋转弯曲疲劳试验机，根据国家标准GB4337-2015《金属材料疲劳试验旋转弯曲方法》制备圆柱形光滑疲劳试样，形状及尺寸如图3。加工试样时，车削过程中逐次减小切削深度和走刀量，尽量使试样表面在加工时产生的残余应力和加工硬化减至最小，并对试样有效段及过渡段表面进行打磨抛光。

试验时利用砝码进行四点弯曲加载，应力循环对称系数 $R=-1$ ，频率为50 Hz，试验温度为室温，干燥空气，无潮湿及腐蚀性气氛。

2.1 条件疲劳极限

采用升降法测定条件疲劳极限。以 10^7 循环周次下所对应的应力作为“条件疲劳极限”，用 σ_{-1} 表示。试验保证有效的试样数量在13根以上，在3~5级应力水平下进行。对于试验初期数据的处理遵循以下原则：第一对相反结果以后的数据均为有效数据；第一对出现的相反结果以前的数据，若在之后数据的应力水平波动范围内的，则作为有效数据进行利用，可以在试验过程中将它们陆续的移动到第一对相反结果后面，作为在该应力水平下的第一个有效数据。对升降法获

表1 回火温度对抗拉强度、冲击功的影响

Table 1 Effect of tempering temperature on tensile strength and impact energy

项目	高强低韧	中强高韧	低强高韧
回火温度/℃	450	550	650
抗拉强度/MPa	1253	1051	850
-40℃ V型缺口冲击功/J	45	103	181

得的数据进行处理，计算出 $p=50\%$ 下的中值疲劳极限 $(\sigma_{-1})_{50}$ 和 $p=95\%$ 下的疲劳极限 $(\sigma_{-1})_{95}$ ，具体如表2所示。

资料表明^[11-12]，疲劳极限和静强度之间存在着一定关系，对于中、低强度钢，疲劳极限与抗拉强度之间大体呈线性关系^[11]。但是，当强度过高时，这一关系将不成立。25MnCrNiMoA钢经调质处理后其抗拉强度与疲劳极限的关系如图4所示。

由图可以看出，强度水平较低，抗拉强度 R_m 提高时，疲劳极限 σ_{-1} 随之升高。但强度过高韧性不足时，在本试验中，当钢强度高至1 253 MPa时，疲劳极限不但不升高，反而由524.1 MPa降至500.6 MPa。说明过高的强度反而容易导致过早的疲劳失效。

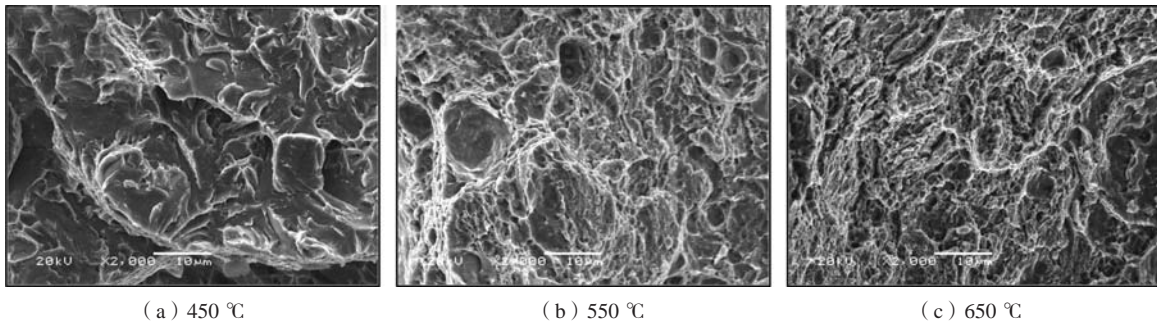


图2 25MnCrNiMoA钢-40 °C冲击断口扩展区形貌
Fig. 2 Morphology of impact fracture of 25MnCrNiMoA steel at -40 °C

2.2 应力-寿命曲线

在对称循环应力下测定材料的疲劳曲线 (p - S - N 曲线) 是评定金属材料疲劳性能的基本方法^[13]。利用统计学原理计算出试样在各应力水平下存活率 $p = 50\%$ 、置信度 $\gamma = 50\%$ 时的应力值和存活率 $p = 95\%$ 、置信度 $\gamma = 95\%$ 的应力值。结合升降法测得的 $p = 50\%$ 、置信度 $\gamma = 50\%$ 时中值疲劳极限 (σ_{-1})₅₀，以及存活率 $p = 95\%$ 、置信度 $\gamma = 95\%$ 的疲劳极限 (σ_{-1})₉₅，利用计算机软件，模拟绘制出三种试验材料的疲劳 p - S - N 曲线^[14]。

2.2.1 高强低韧450 °C回火钢的疲劳特性

图5为高强低韧450 °C回火后钢的 p - S - N 曲线。由图可见，450 °C回火时疲劳曲线趋势较陡，曲线斜率大，说明材料韧性较差，疲劳裂纹形成后扩展速率较快。成组法试验过程中试样最高应力值为700 MPa，在此应力水平下获得的最小循环周次为 413×10^2 周；最低应力值是555 MPa，在此应力水平下获得的最大循环周次为 $2\,738 \times 10^2$ 周次，可见数据波动性较小。所以得到 $p=95\%$ 条件下疲劳曲线上高应力区范围内数据点较集中，疲劳循环寿命较低，循环周次在 4×10^5 左右。

2.2.2 中强高韧550 °C回火钢的疲劳特性

图6为中强高韧550 °C回火后的 p - S - N 曲线。由图可以看出经550 °C回火后得到的疲劳曲线比较平缓，此时 $p=95\%$ 下疲劳极限较450 °C回火钢升高，为524.1 MPa。成组法试验中试样循环周次最小值是在736 MPa的应力水平下获得 151×10^2 周，所以曲线上高应力区第一个点非常靠近Y轴，疲劳寿命较低。其余三个应力值下的循环周次最低为 662×10^2 周，最高为 $3\,214 \times 10^2$ 周，且数据点集中在 $10^4 \sim 10^5$ 中间位置，波动性很小。

2.2.3 低强高韧650 °C回火钢的疲劳特性

图7为低强高韧650 °C回火后的 p - S - N 曲线。由图可知， p - S - N 曲线斜率很小，曲线也比较平缓，这说明疲劳裂纹形成后扩展速率较慢。 $p=95\%$ 下疲劳极限最低，仅为453.0 MPa。成组法试验过程中试样最高应力

值为592 MPa，在此应力水平下获得的最小循环周次为 370×10^2 周；最低应力值是531 MPa，在此应力水平下获得的最大循环周次为 $4\,178 \times 10^2$ 周，可见数据波动性较大。 p - S - N 曲线上高应力区范围内数据点较分散，疲劳循环寿命较高，最大循环周次接近 10^5 周次。

从疲劳失效的机制来看，材料的疲劳总寿命可分为裂纹形成寿命和裂纹扩展寿命两部分，分别表征了导致零件失效的疲劳裂纹的形成和扩展的难易程度。强度的提高有利于材料抵抗塑性变形的能力，从而可

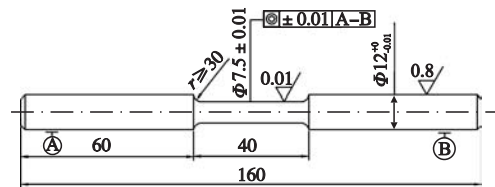


图3 圆柱形光滑疲劳试样
Fig. 3 Cylindrical smooth fatigue specimen

表2 三种试样的疲劳极限及对应的抗拉强度
Table 2 Fatigue limit and corresponding tensile strength of three samples

回火温度 / °C	中值疲劳极限 (σ_{-1}) ₅₀ / MPa	疲劳极限 (σ_{-1}) ₉₅ / MPa	抗拉强度 R_m / MPa
450	547.0	500.6	1 253
550	577.5	524.1	1 051
650	492.0	453.0	850

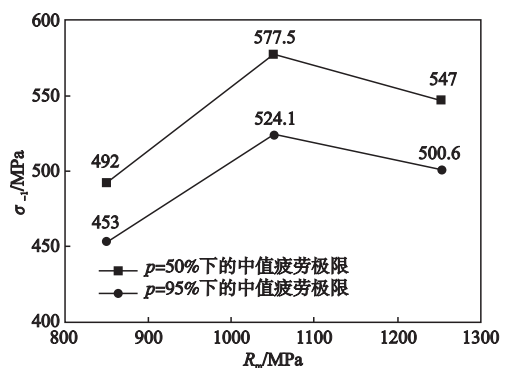


图4 抗拉强度与疲劳极限的关系图
Fig. 4 Relationship between tensile strength and fatigue limit

以降低疲劳裂纹萌生的几率,延缓材料裂纹萌生,提高裂纹形成寿命;塑韧性的提高有利于降低裂纹形成后进一步扩展的速率,减缓疲劳失效状况的发生,因此可以提高材料的裂纹扩展寿命。试样经650℃回火后获得韧性较高、强度较低的强韧性配合,疲劳寿命主要受裂纹形成寿命控制,试验过程中发现某些650℃回火的试样表面断口的附近还有一些细小的裂纹,产生这些裂纹的原因是:一方面材料的强度较低,裂纹易于萌生;另一方面,材料韧性较高,裂纹扩展需要一个过程,而在此过程中往往会有新的裂纹萌生,这些裂纹来不及进一步扩展,便保留在试样表面。试样经450℃回火后强度较高而韧性较低,疲劳寿命主要受裂纹扩展寿命控制,此温度回火时试样表面虽然难以萌生裂纹,但是由于材料韧性较小,微裂纹一旦形成(往往在冶金、加工缺陷处),极容易扩展直至断裂,因此450℃回火后试样的疲劳性能不高。而经550℃回火后的试样具有较好的强韧性配合,一方面保证了材料具有较高的裂纹形成寿命,使疲劳裂纹不容易萌生,另一方面也使材料保持较高的裂纹扩展寿命。试样表面萌生的裂纹进一步扩展的倾向较低,从而使材料达到最佳的疲劳性能。

材料的疲劳寿命并不是由强度或者韧性单独控制的,它与强韧性配合有着最为密切的关系。根据分析可知,25MnCrNiMoA钢在550℃回火时表现出了最佳的强韧性配合,同样,在疲劳试验中经550℃回火的试样的 p - S - N 曲线在所有试样中的抗疲劳失效的能力是最强的。

2.3 疲劳断口分析

图8是450℃回火钢在较高应力下发生疲劳断裂后的断口整体形貌及其各部分的细节形貌。从全貌上看,断口的瞬断区区域很大,约占整个断口面积的1/2,这是因裂纹扩展寿命低所致。这时整体受力较大,裂纹扩展速率较快,属于典型的低周次疲劳断裂。将瞬断区放大可以看出,断面呈现准解理微观形貌,宏观表现为脆性断裂。

图9是450℃回火钢在低应力下发生疲劳断裂后的断口整体形貌及其各部分的细节形貌。瞬断区面积也较大,疲劳源如图9b箭头所示,在疲劳源处的断面细密、平坦,断面上可以很清楚的看到放射状条纹由该处向四周发射。

图10是550℃回火钢在高应力下发生疲劳断裂后的断口整体形貌及其各部分的细节形貌。在全貌中可见,瞬断区所占比例较450℃回火时减小。将瞬断区放大,可见同样为高应力下的断面,与图8d相比发现,经550℃回火钢断口中除了解理形貌外,还存在着大小不一的韧窝,说明试样经历了塑性变形,这说明550℃回火后不仅具有良好的强度,韧性也较优。

图11是550℃回火钢在589 MPa的应力下发生疲劳断裂的试样断口形貌,选取了循环周次差距较大的两根试样。从全貌来看,两者的瞬断区都较小,较高周次($N=5\ 350 \times 10^2$)试样断口的瞬断区断面更粗糙一些,且上面有少量因断裂形成的韧窝,如图11a、11b。在扩展区低疲劳寿命时疲劳台阶现象更加严重。将瞬断区放大可见,两者整个断面都是由韧窝组成, $N=5\ 350 \times 10^2$ 的试样出现的韧窝比较细小密集,而 $N=1\ 086 \times 10^2$ 的试样出现的韧窝则大小不一。可见,在同

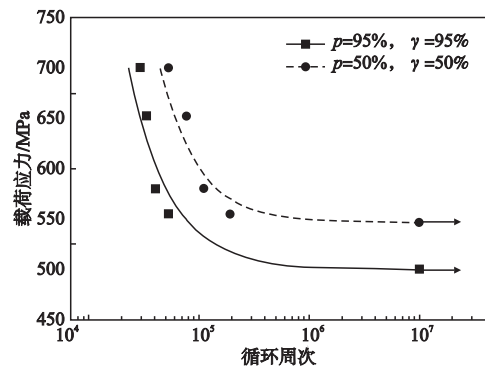


图5 高强低韧450℃回火后钢的 p - S - N 曲线

Fig. 5 p - S - N curves of high strength-low toughness steel tempered at 450 °C

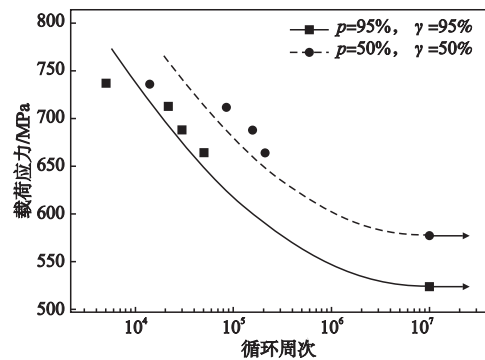


图6 中强高韧550℃回火后钢的 p - S - N 曲线

Fig. 6 p - S - N curves of medium strength-high toughness steel tempered at 550 °C

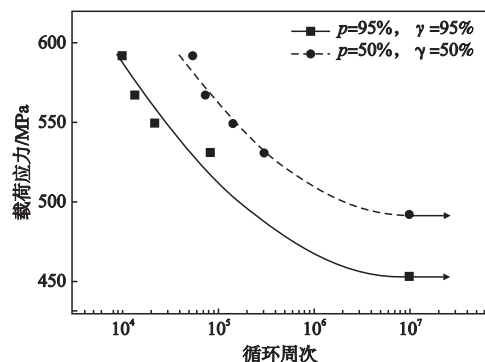


图7 低强高韧650℃回火后钢的 p - S - N 曲线

Fig. 7 p - S - N curves of low strength-high toughness steel tempered at 650 °C

样的环境及加载应力下，试样的疲劳寿命可能不同，这与试样加工有关。

图12为650 °C回火钢在较高应力下发生疲劳断裂后的断口整体形貌及其各部分的细节形貌。从图中可以看出瞬断区是不平坦的粗糙平面，其面积只占整个断

面的1/3左右。将瞬断区放大可以看到，断口由细密的韧窝组成，为韧性断裂特征，如图12d所示。在扩展区能观察到轻微贝纹线痕迹，并能看到许多与贝纹线相垂直的疲劳台阶，这是在较高应力下裂纹沿不同平面扩展所致。

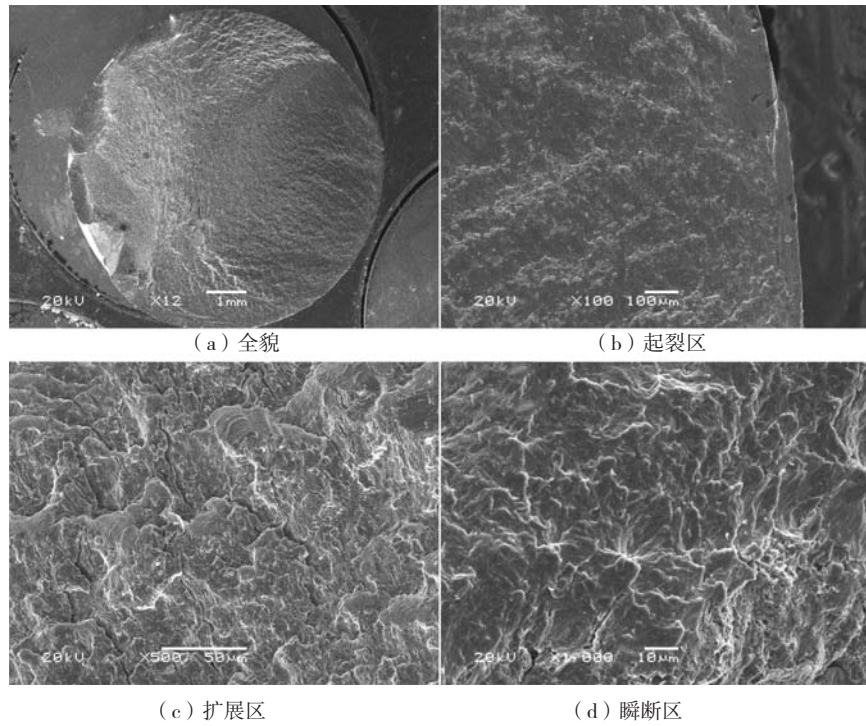


图8 450 °C回火钢在 $\sigma=700$ MPa、 $N=413 \times 10^2$ 下疲劳断口形貌

Fig. 8 Fatigue fracture morphology of 450 °C tempered steel under $\sigma=700$ MPa, $N=413 \times 10^2$

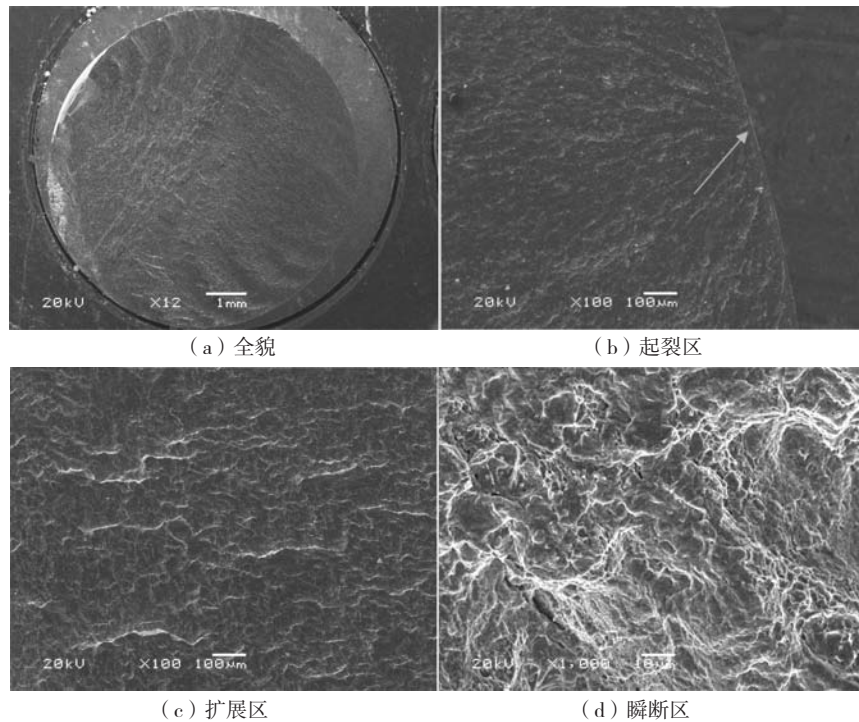


图9 450 °C回火钢在 $\sigma=580$ MPa、 $N=1\ 224 \times 10^2$ 下疲劳断口形貌

Fig. 9 Fatigue fracture morphology of 450 °C tempered steel under $\sigma=580$ MPa, $N=1\ 224 \times 10^2$

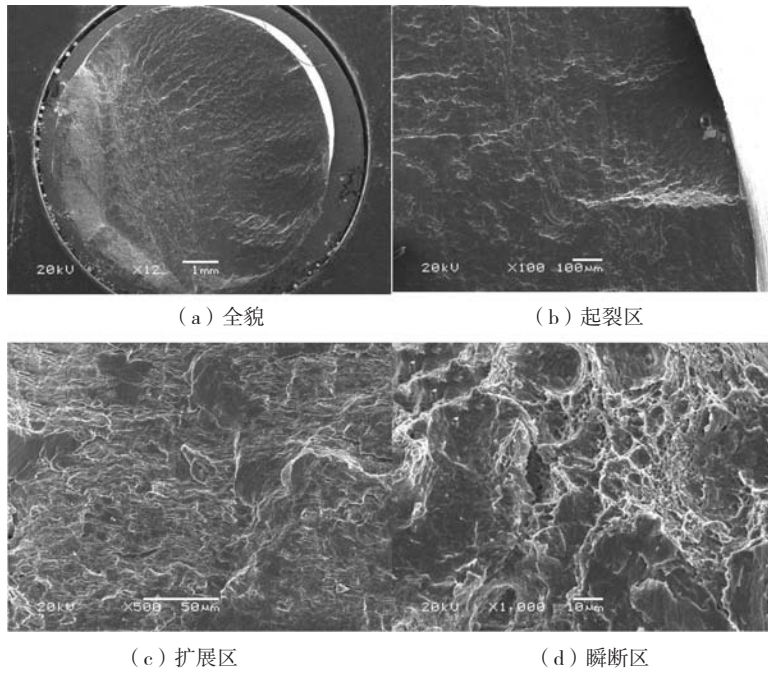


图10 550 °C回火钢在 $\sigma=712$ MPa、 $N=617 \times 10^2$ 下疲劳断口形貌

Fig. 10 Fatigue fracture morphology of 550 °C tempered steel under $\sigma=712$ MPa, $N=617 \times 10^2$

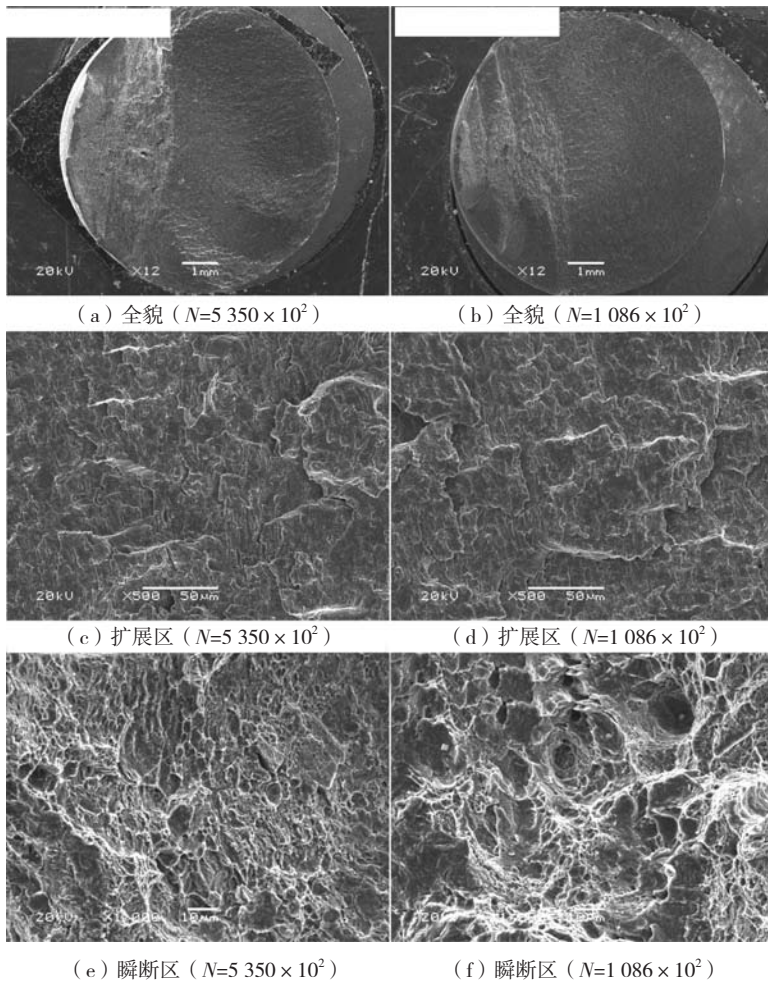


图11 550 °C回火钢在 $\sigma=589$ MPa下疲劳断口形貌

Fig. 11 Fatigue fracture morphology of 550 °C tempered steel under $\sigma=589$ MPa

图13同样是经650℃回火后的疲劳断口，但它是在较低应力水平下疲劳断裂的。疲劳寿命比图12试样的长一个数量级，其瞬断区所占比例仍较小。将瞬断区放大，断面中的韧窝更加细小密集，宏观表现为韧性断裂。

通过对比经450℃、550℃和650℃回火后试样的疲劳断口形貌发现：450℃回火后裂纹扩展寿命较低，材料韧性最差，断口呈现脆性断裂特征，瞬断区占比较大，

约占断口面积的1/2，整个断面呈现准解理形貌；650℃回火后材料的韧性最好，疲劳寿命受裂纹形成寿命影响，宏观表现为韧性断裂。瞬断区区域最小，只占整个断面的1/3左右，断面分布着细密的韧窝；550℃回火后疲劳寿命受裂纹形成寿命和裂纹扩展寿命共同影响，断面除解理形貌外，还存在着大小不一的韧窝，说明试样经历了一定的塑性变形，材料的强度和韧性配合最佳。

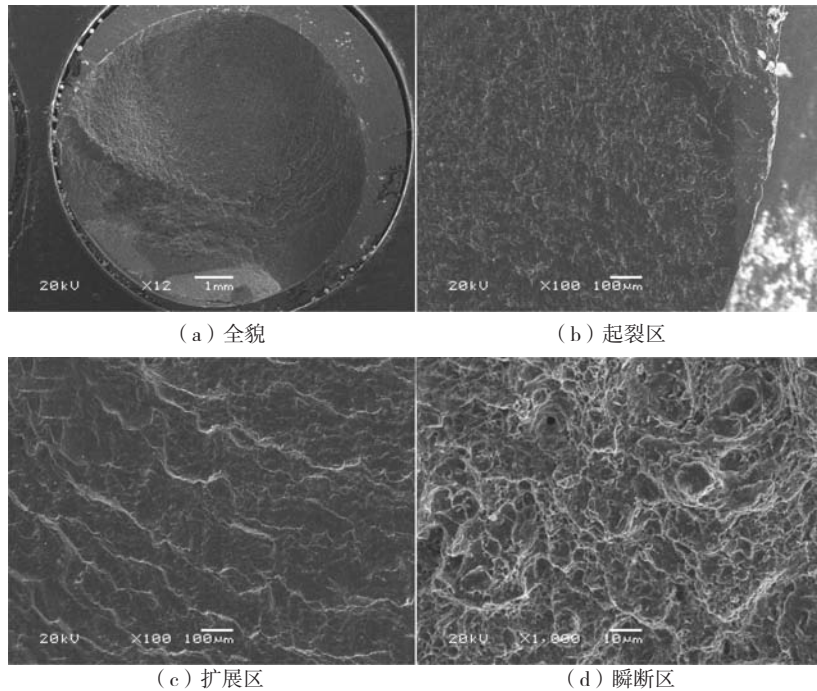


图12 650℃回火钢在 $\sigma=513$ MPa、 $N=5\ 728 \times 10^2$ 下疲劳断口形貌

Fig. 12 Fatigue fracture morphology of 650℃ tempered steel under $\sigma=513$ MPa, $N=5\ 728 \times 10^2$

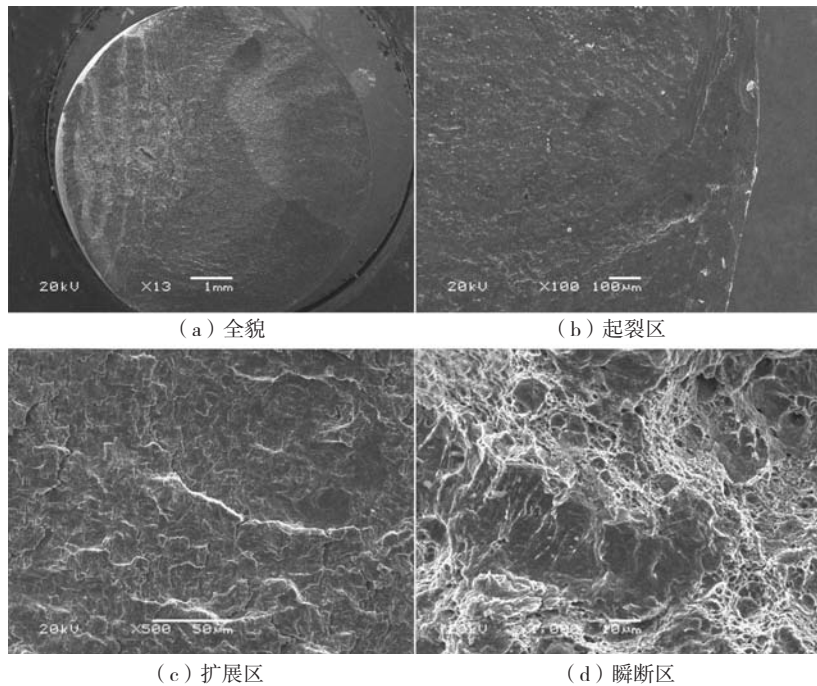


图13 650℃回火钢在 $\sigma=495$ MPa、 $N=14\ 152 \times 10^2$ 下疲劳断口形貌

Fig. 13 Fatigue fracture morphology of 650℃ tempered steel under $\sigma=495$ MPa, $N=14\ 152 \times 10^2$

3 结论

(1) 强韧性配合对25MnCrNiMoA钢疲劳极限影响显著。450℃回火的高强低韧钢中值疲劳极限 $(\sigma_{-1})_{50}$ 为547.0 MPa、疲劳极限 $(\sigma_{-1})_{95}$ 为500.6 MPa。550℃回火的中强高韧钢疲劳极限最高,中值疲劳极限 $(\sigma_{-1})_{50}$ 为577.5 MPa、疲劳极限 $(\sigma_{-1})_{95}$ 为524.1 MPa。650℃回火的低强高韧钢中值疲劳极限 $(\sigma_{-1})_{50}$ 为492.0 MPa、疲劳极限 $(\sigma_{-1})_{95}$ 为453.0 MPa。经550℃回火的具有较好强韧性配合的中强高韧材料的疲劳极限最高。

(2) 从 p - S - N 曲线来看,材料的疲劳寿命并不是由

强度或者韧性单独控制的,它与强韧性配合有着最为密切的关系。25MnCrNiMoA钢在550℃回火时表现出了最佳的强韧性配合。同样,在高周疲劳试验中,经550℃回火的试样的 p - S - N 曲线在所有试样中的抗疲劳失效的能力是最强的。

(3) 对比三种不同强韧性配合试样的疲劳断口形貌发现:550℃回火后材料的疲劳寿命受裂纹形成寿命和裂纹扩展寿命共同影响,断面除解理形貌外,还存在着大小不一的韧窝,说明试样经历了一定的塑性变形,材料的强度和韧性配合最佳。

参考文献:

- [1] 宋忠明. 车钩的材质与强度[J]. 铁道学报, 1985, 7(4): 11-12.
- [2] 邢弘毅. 13号车钩钩舌失效原因及改进建议[J]. 铁道车辆, 1990, 28(10): 57-59.
- [3] 冯国卿. 16号、17号车钩生产故障的原因及[J]. 铁道车辆, 2000, 38(7): 42-43.
- [4] 白淑萍. 大秦线C80型货车16、17号车钩裂纹原因分析及应对措施[J]. 铁道技术监督, 2008, 36(9): 17-19.
- [5] 刘鑫贵, 项彬, 秦晓峰, 等. 大秦线C63A货车16号车钩尾销孔裂纹原因分析[J]. 金属热处理, 2008, 33(4): 109-113.
- [6] 陆阳. 消除国产E级钢车钩疲劳裂纹的探讨[J]. 铸造, 2008, (6), 592-595.
- [7] 孟庆民, 卢碧红, 姜岩. 铁路重载货车车钩裂纹故障探讨[J]. 铁道车辆, 2008, (10), 36-39.
- [8] 唐忠云. 车钩失效分析及其工艺研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2005.
- [9] QIN X F, TIAN C L, Study on effects combination of strength and toughness on fatigue property of heavy haul coupler materials [C]// 11th International Heavy Haul Conference, Cape Town of South Africa, 2017: 1161-1168.
- [10] 崔忠圻, 谭耀春. 金属学与热处理[M]. 第二版. 北京: 机械工业出版社, 2007: 281.
- [11] 束德林. 金属力学性能[M]. 北京: 机械工业出版社, 1987: 156.
- [12] 许祖耀, 黄本立, 焉国强. 中国材料工程大典第26卷材料表征与检测技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2006: 541-543.
- [13] 赵少汴. 抗疲劳设计手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 2015: 42-46.
- [14] SURESH S. 材料的疲劳[M]. 北京: 国防工业出版社, 1999.

High Cycle Fatigue Behavior of Heavy Haul Coupler Materials with Different Strength and Toughness Matching Properties

TIAN Chang-liang¹, ZHAO Geng-ning¹, CUI Shi-hai¹, WANG Hao¹, LI He-fei², QIN Zuo-xiang²

(1. CRRC Qiqihar Rolling Stock Co., Ltd., Qiqihar 161002, Heilongjiang, China; 2. School of Materials Science and Engineering, Dalian Jiaotong University, Dalian 116028, Liaoning, China)

Abstract:

The high cycle fatigue behavior of heavy haul coupler materials with different strength and toughness matching properties was investigated. Three kinds of specimens made from 25MnCrNiMoA steel with different strength-toughness matching properties, namely, high strength-low toughness, medium strength-high toughness and low strength-high toughness, were obtained by different heat treatment processes. The fatigue limit of the coupler materials were measured by the method of rotary bending fatigue test. The p - S - N curve was drawn, the fatigue fracture surface was observed, and the influence of different strength-toughness matching properties obtained at different tempering temperatures on the high cycle fatigue behavior of the coupler material was analyzed. The results show that the high cycle fatigue behavior of heavy haul coupler material is significantly affected by the strength-toughness matching. The medium strength-high toughness coupler material has higher fatigue limit and life level, which is consistent with the low cycle fatigue test results. This study provides an important theoretical basis for the material selection and production of coupler design.

Key words:

heavy haul coupler; strength toughness matching; high cycle fatigue; fatigue limit