

退火工艺下的低合金高强钢疲劳性能分析

苏 姣

(山西科技学院 材料科学与工程学院, 山西 晋城 048000)

摘 要:将 Mn-Cr-Nb 系复合高强钢、Cr-Mo 系复合高强钢、Cu-Ni 系复合高强钢作为试验材料, 制备 3 种低合金高强钢试样, 使用 DP 工艺、QP 工艺、TRIP 工艺等 3 种退火工艺对各种试样实施退火处理. 应用疲劳测试系统实施 3 种试样的疲劳性能测试. 结果表明: 在 DP 工艺下, Cu-Ni 系复合高强钢试样的疲劳寿命最长, 当退火速度为 130 m/min 时, 各种试样的疲劳寿命最长. 在 QP 工艺下, 各种试样的疲劳寿命均高于其他工艺. 在 TRIP 工艺下, Cu-Ni 系复合高强钢试样的疲劳寿命最长.

关 键 词:退火工艺; 低合金高强钢; QP 工艺; 疲劳测试系统; 疲劳性能

中图分类号: TG142

文献标识码: A

文章编号: 1673-1670(2023)05-0023-06

0 引言

近年来, 我国汽车市场扩张迅速, 汽车销售量不断增长, 已经成为全球最大的汽车市场. 越来越高的汽车使用量, 带来了能源消耗与环境污染问题, 出于节能与环保的需要, 汽车的轻量化成为汽车的主流发展方向^[1]. 在确保车辆综合性能指标后, 需要尽量减少车体自身质量, 以提升汽车动力性能, 降低排气污染, 减少燃料消耗. 实现汽车轻量化的主要途径是应用轻量化材料. 由于合金材料会大幅增加成本, 因此铝镁合金、有色合金等材料目前还无法作为轻量化材料来大量应用. 而高强钢的抗拉强度较高, 可以在不降低车身刚度与强度等各种性能指标的前提下实现车身质量的减少, 已经成为钢铁工业与汽车工业的研究热点^[2]. 低合金高强钢作为一种新出现的轻量化材料, 由于其优良的性能与减重的特性, 已经在汽车制造行业中引发广泛关注^[3].

对于低合金高强钢来说, 退火工艺对其最终力学性能有着重要影响, 其退火过程包括加热过程中的再结晶与冷变形组织恢复, 两相区临界奥氏体化等多个阶段. 基于该背景对退火工艺下的低合金高强钢疲劳性能进行分析. 目前已经有多名学者针对多种退火工艺对于低合金高强钢疲劳性能的影响进行了研究, 并取得了丰富的研究成果. 笔者总结并借鉴以往的研究方法与成果, 对退火工艺下的低合金高强钢疲劳性能实施深入而细致的分析.

1 试验材料与方法

1.1 试验材料

设计 3 种成分体系的低合金高强钢作为试验材料, 包括 Mn-Cr-Nb 系复合高强钢、Cr-Mo 系复合高强钢以及 Cu-Ni 系复合高强钢, 其中 Mn-Cr-Nb 系复合高强钢的化学成分构成如表 1 所示^[4].

Cr-Mo 系复合高强钢的化学成分构成如表 2 所示^[5].

表 1 Mn-Cr-Nb 系复合高强钢的化学成分

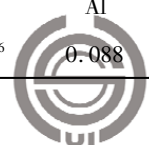
成分	C	Si	Mn	P	S	Als	Nb	Cr	Ceq	Pem
含量/%	0.16	0.5	1.64	0.505 3	0.504 2	0.065	0.032	0.07	0.041	0.087

表 2 Cr-Mo 系复合高强钢的化学成分

成分	C	Si	Mn	Nb	Cr	Mo	N	Al
含量/%	0.03	0.114	1.07	0.034	0.203	0.49	$\leq 50 \times 10^{-6}$	0.088

收稿日期: 2023-06-04

作者简介: 苏 姣(1997—), 女, 山西省晋城市人, 工学硕士, 山西科技学院材料科学与工程学院助教, 主要从事高强钢冷变形制备与热处理研究.



Cu-Ni 系复合高强钢的化学成分构成如表 3 所示.

表 3 Cu-Ni 系复合高强钢的化学成分

成分	C	Si	Mn	Cu	Ni	Al	N
含量/%	0.022	0.177	1.147	0.364	0.484	0.78	$\leq 50 \times 10^{-6}$

其他辅助性试验材料包括钢板清洁剂、油.

3) 使用钢板清洁剂将各种钢坯清洗干净, 去除其表面的杂质.

1.2 试验设备

试验中使用的设备具体如表 4 所示^[6].

4) 在表面涂油, 避免钢坯出现二次氧化现象.

表 4 试验设备

设备名称	设备型号	生产厂家
二辊可逆式轧机	DFF63	冠诚金属科技有限公司
箱式电阻炉	E7-6W	美优试验设备有限公司
中频感应炉熔炼	D65	宝丰贵金属设备科技有限公司
淬火膨胀仪	EWG6977	恒久试验设备有限公司
盐浴退火炉	RTH32	恒力炉业有限公司
疲劳测试系统	TR65	辰鑫试验机制造有限公司
加热炉	F-68	美优试验设备有限公司

5) 应用二辊可逆式轧机实施多道次轧制, 获得制备的低合金高强钢试样^[9].

完成冷轧后, 使用退火工艺对试样实施退火处理.

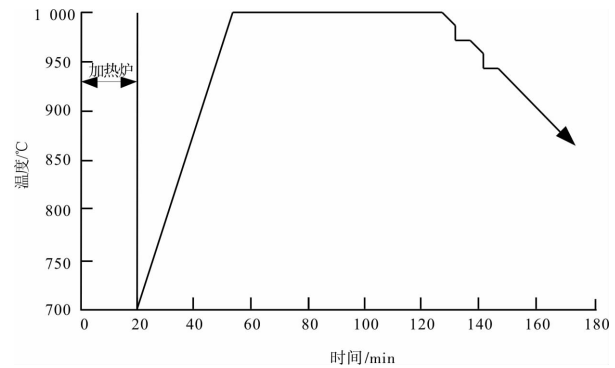


图 1 开坯锻造时的工艺曲线

1.3 低合金高强钢试样制备

低合金高强钢试样制备流程如下:

1.4 退火处理

1) 使用中频感应炉分别冶炼试验材料, 并进行浇铸与锻造^[7]. 其中冶炼时中频感应炉熔炼的参数设定如表 5 所示.

一共应用 3 种退火工艺, 分别为 DP 工艺、QP 工艺、TRIP 工艺, 三者的主要区别在于退火速度与缓冷段温度的控制, 其目标冷速分别为 40 °C/s、50 °C/s、60 °C/s.

表 5 冶炼时中频感应熔炼炉的参数设定

项目	直流 电流/A	中频 电压/V	中频 频率/Hz	熔炼 温度/°C
参数	85	550	4 650	1 650 ~ 1 685

开坯锻造时的工艺曲线如图 1 所示^[8].

DP 工艺、QP 工艺、TRIP 工艺的详细方案如表 6 所示.

2) 使用电火花线切割机将锻造结果切割为多个长方体钢坯, 尺寸为 240 mm × 200 mm × 60 mm.

表 6 3 种工艺的详细方案

工艺项目	目标 DP 工艺	实际 DP 工艺	目标 QP 工艺	实际 QP 工艺	目标 TRIP 工艺	实际 TRIP 工艺	
退火速度/(m/min)	120 ~ 130	120 ~ 130	150 ~ 160	150 ~ 160	110 ~ 120	110 ~ 120	
冷却速度/(°C/s)	50	45.5 ~ 52.5	60	57.5 ~ 62.5	35	33.5 ~ 35.5	
控制温度/°C	RTS 段	800	800 ~ 805	780	780 ~ 790	780	780 ~ 790
	SJC 段	700	700 ~ 705	700	690 ~ 700	690	690 ~ 695
	RJC2 段	300	295 ~ 315	310	300 ~ 310	310	304 ~ 310
OA 段	300	290 ~ 300	310	300 ~ 310	310	300 ~ 315	
总退火时间/h	5.5	5.5	5.2	5.2	6.2	6.2	

分别使用以上 3 种退火工艺对 3 种低合金高强钢试样实施退火处理. 其中 DP 工艺、QP 工艺在箱式电阻炉中完成, TRIP 工艺在盐浴退火炉中完成^[10].

1.5 疲劳测试方法

应用疲劳测试系统实施低合金高强钢试样的疲劳性能测试, 该系统由控制系统、拉伸夹具、数字式高频疲劳试验机构成^[11]. 疲劳试验机的规格是

100 kN,通过控制系统显示、监测、控制试验过程中的波形加载、频率加载、位移量、实时载荷大小。

具体的疲劳测试步骤如下:

1) 试样装夹

将载荷清零,在疲劳试验机上装夹低合金高强钢试样。

2) 前期调整

将试样加力到最大应力载荷值,接着卸载至零,使后续的动态加载过程中不发生屈服累积变形问题,避免对测试精度造成影响^[12]。

3) 设定载荷

将载荷调整为此类疲劳试验各级载荷的中值,具体计算公式如下:

$$\left. \begin{aligned} p_m &= \frac{p_{\max} + p_{\min}}{2}, \\ p_{\min} &= p_{\max} \times T. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中, p_m 为此类疲劳试验各级的载荷中值, p_{\min} 为疲劳试验载荷最小值, p_{\max} 为疲劳试验载荷最大值, T 为应力比^[13]。

4) 开始测试

选定合适的表征方式与失效认定方式,在室温空气下开始测试^[14]。

测试中设置的各级载荷为 1 500 Pa、1 600 Pa、1 700 Pa、1 800 Pa、1 900 Pa、2 000 Pa、2 100 Pa、2 200 Pa、2 300 Pa^[15]。

当低合金高强钢试样上出现疲劳裂纹,表示试样为疲劳失效状态。当发生疲劳失效时,通过控制系统自动停止试验,此时的循环次数就是该级载荷下的试件疲劳寿命^[16]。

在可靠度为 50% 的条件下进行各组试验。设置 3 组 Mn-Cr-Nb 系复合高强钢、3 组 Cr-Mo 系复合高强钢、3 组 Cu-Ni 系复合高强钢,每组试样中包含 20 个样品,以此进行低合金高强钢疲劳性能分析。

2 疲劳性能分析

2.1 DP 工艺下的低合金高强钢疲劳性能

在 DP 工艺下,当退火速度为 120 m/min 时,测试 Mn-Cr-Nb 系复合高强钢、Cr-Mo 系复合高强

钢、Cu-Ni 系复合高强钢试样在各级载荷下的疲劳寿命,测试结果如表 7 所示。

表 7 疲劳寿命测试结果

各级 载荷	试件疲劳寿命		
	Mn-Cr-Nb 系 复合高强钢	Cr-Mo 系 复合高强钢	Cu-Ni 系 复合高强钢
1 500 Pa	$10^6 - 305\ 717$	$10^6 - 518\ 657$	$10^5 - 286\ 522$
1 600 Pa	$10^6 - 298\ 563$	$10^6 - 412\ 505$	$10^5 - 185\ 221$
1 700 Pa	$10^6 - 215\ 747$	$10^6 - 320\ 120$	$10^4 - 69\ 587$
1 800 Pa	$10^5 - 98\ 632$	$10^5 - 206\ 852$	$10^4 + 78\ 562$
1 900 Pa	$10^5 - 56\ 841$	$10^5 - 156\ 238$	$10^4 + 136\ 254$
2 000 Pa	$10^5 - 154\ 264$	$10^6 - 269\ 324$	$10^4 + 15\ 698$
2 100 Pa	$10^4 - 19\ 852$	$10^5 - 78\ 562$	$10^3 + 165\ 247$
2 200 Pa	$10^4 + 45\ 115$	$10^5 + 152$	$10^3 + 256\ 853$
2 300 Pa	$10^4 + 16\ 582$	$10^5 - 38\ 571$	$10^3 + 216\ 528$

根据表 7 测试结果,当退火速度为 120 m/min 时,Cr-Mo 系复合高强钢试样的疲劳寿命最长,Mn-Cr-Nb 系复合高强钢的疲劳寿命居中,Cu-Ni 系复合高强钢的疲劳寿命最短。随着载荷的上升,3 种低合金高强钢试样的疲劳寿命都在持续降低。

在 DP 工艺下,退火速度为 130 m/min,测试 3 种复合高强钢试样在各级载荷下的疲劳寿命,测试结果如表 8 所示。

表 8 疲劳寿命测试结果

各级 载荷	试件疲劳寿命		
	Mn-Cr-Nb 系 复合高强钢	Cr-Mo 系 复合高强钢	Cu-Ni 系 复合高强钢
1 500 Pa	$10^6 - 65\ 841$	$10^6 - 86\ 521$	$10^5 + 175\ 202$
1 600 Pa	$10^6 - 154\ 210$	$10^6 - 165\ 847$	$10^5 + 102\ 587$
1 700 Pa	$10^6 + 120$	$10^6 + 16\ 587$	$10^5 + 245\ 647$
1 800 Pa	$10^5 + 86\ 235$	$10^6 + 86\ 523$	$10^5 + 312\ 547$
1 900 Pa	$10^5 + 265\ 841$	$10^6 + 245\ 695$	$10^4 + 502\ 145$
2 000 Pa	$10^5 + 201\ 243$	$10^6 + 203\ 012$	$10^4 + 445\ 821$
2 100 Pa	$10^5 + 145\ 681$	$10^6 + 152\ 365$	$10^4 + 403\ 258$
2 200 Pa	$10^4 + 356\ 985$	$10^5 + 326\ 584$	$10^3 + 586\ 321$
2 300 Pa	$10^4 + 314\ 582$	$10^5 + 286\ 954$	$10^3 + 548\ 562$

根据表 8 测试结果,当退火速度为 130 m/min 时,随着载荷的上升,3 种低合金高强钢试样的疲劳寿命仍呈现出持续降低的趋势。此时仍然是 Cr-Mo 系复合高强钢试样的疲劳寿命最长,Mn-Cr-Nb 系复合高强钢的疲劳寿命居中,Cu-Ni 系复合高强

钢的疲劳寿命最短. 相比退火速度为 120 m/min 时的情况, 3 种低合金高强钢试样的疲劳寿命值均更高, 说明该工艺下更高的退火速度能够使低合金高强钢试样的抗疲劳性能更强. 此外, 在 DP 工艺中, 通过加热使材料处于奥氏体区域, 然后急速冷却到马氏体转变温度以下, 形成外层马氏体和内部残余奥氏体的双相结构. 这种结构具有高强度和较高的断裂韧性. 适当的高温退火能够改善材料的可塑性、减少残余应力、增强组织稳定性, 从而提高疲劳寿命.

2.2 QP 工艺下的低合金高强钢疲劳性能

在 QP 工艺下, 当退火速度为 150 m/min 时, 测试 3 种低合金高强钢试样在各级载荷下的疲劳寿命, 生成 $S-N$ 曲线测试结果, 如图 2 所示.

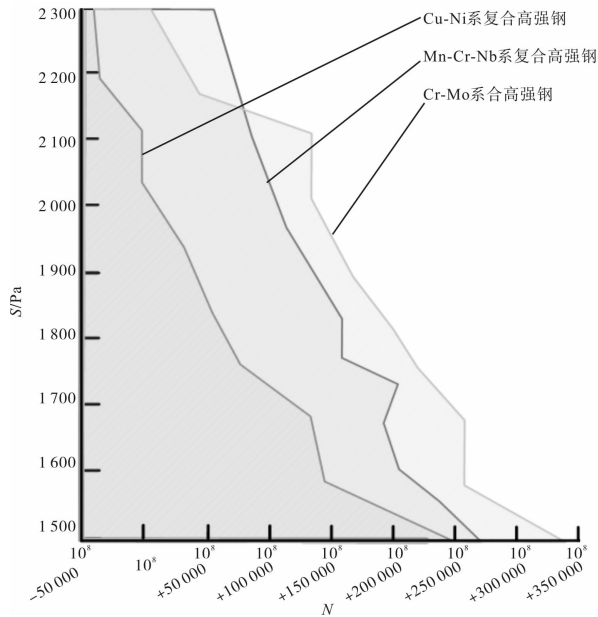


图 2 疲劳寿命测试结果

根据图 2 的测试结果可知, 退火速度为 150 m/min 时, 当载荷由 1 500 Pa 上升至 2 100 Pa 时, Cr-Mo 系复合高强钢的疲劳寿命最长; 当载荷继续上升时, Mn-Cr-Nb 系复合高强钢的疲劳寿命逐渐高于 Cr-Mo 系复合高强钢. Cu-Ni 系复合高强钢的疲劳寿命最低. 整体来说, QP 工艺下 3 种低合金高强钢的疲劳寿命远高于 DP 工艺的低合金高强钢疲劳寿命. 同时相比 DP 工艺, 3 种低合金高强钢之间的疲劳寿命差值较小.

当退火速度为 160 m/min 时, 3 种低合金高强钢试样在各级载荷下的疲劳寿命 $S-N$ 曲线结果如图 3 所示.

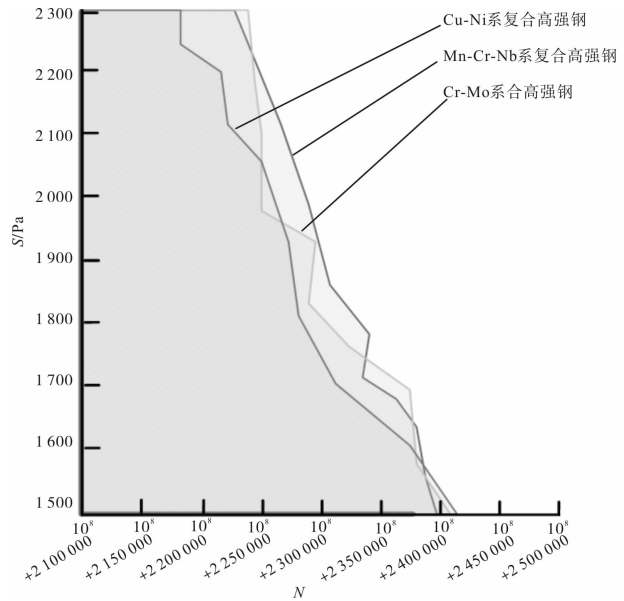


图 3 疲劳寿命测试结果

图 3 测试结果表明, 当退火速度为 160 m/min 时, 3 种低合金高强钢试样在各级载荷下的疲劳寿命差异较小, 同时, 当退火速度为 160 m/min 时, 3 种低合金高强钢试样的疲劳寿命相对于退火速度为 150 m/min 时也有很大上升. 对于 QP 工艺来说, 更高的退火速度能够获得更好的低合金高强钢抗疲劳性能. 同时, 在 QP 工艺中, 通过高温快速冷却和后续再回火处理来获得孪生组织. 孪晶结构由奥氏体基体与具有定向排列的极间相孪生片区构成, 能够提供较高的强度和延展性. 孪晶组织在应力作用下形成裂纹时可以压制裂纹扩展, 增加材料的疲劳寿命. 适当的回火处理能够消除应力集中和塑性不均匀, 增强材料的韧性, 并提高疲劳寿命.

2.3 TRIP 工艺下的低合金高强钢疲劳性能

在 TRIP 工艺下, 当退火速度为 110 m/min 时, 3 种低合金高强钢试样在各级载荷下的疲劳寿命 $S-N$ 曲线如图 4 所示.

该工艺下, 当退火速度为 110 m/min 时, Cu-Ni 系复合高强钢试样的疲劳寿命最长, 其余 2 种低合金高强钢试样的疲劳寿命较短并且大致相似. 整体来说, 该工艺下试样的疲劳寿命远低于 QP 工艺下的疲劳寿命, 也低于 DP 工艺下的疲劳寿命. 同时, 相比其他 2 种工艺, 随着载荷的提高, 3 种低合金高强钢试样的疲劳寿命降幅更大.

当退火速度为 120 m/min 时, 3 种试样在各级载荷下的疲劳寿命 $S-N$ 曲线如图 5 所示.

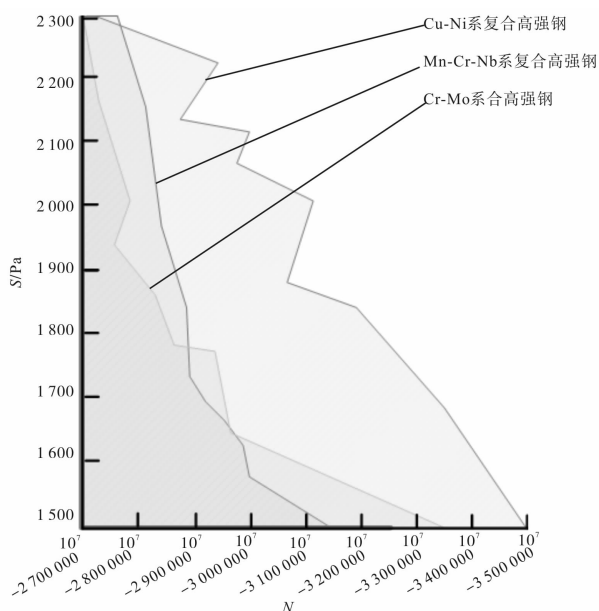


图4 疲劳寿命测试结果

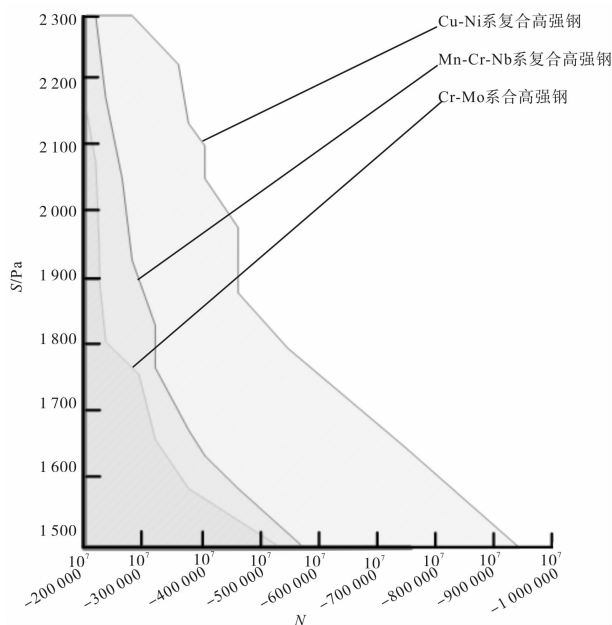


图5 疲劳寿命测试结果

在 TRIP 工艺下,材料中的部分奥氏体通过加载时的应力诱发转变为马氏体,从而增加了塑性变形.当应力卸载时,马氏体将重新转变回奥氏体. TRIP 工艺中的马氏体转变可以消耗裂纹扩展过程中的应力集中,并吸收能量,从而有效延缓裂纹的扩展速度.因此,适当的退火处理可以控制材料的奥氏体含量和形变诱发相变的有效性,从而影响疲劳寿命.

分析图 5 可知,相比 110 m/min 的退火速度,该工艺下 120 m/min 的退火速度能够使 3 种低合金高强钢获得更长的疲劳寿命.在该退火速度下,

仍然是 Cu-Ni 系复合高强钢试样的疲劳寿命最长.

3 结论

在低合金高强钢的研究中,对退火工艺影响低合金高强钢的疲劳性能进行了深入而详细的测试与分析,取得了创新性的成果,具体结论如下:

1) 相比 TRIP 工艺、DP 工艺,QP 工艺能够使 3 种低合金高强钢获得更长的疲劳寿命.

2) 在各种退火工艺下,更高的退火速度能够带来更长的疲劳寿命.

3) 在 TRIP 工艺、DP 工艺下,Cu-Ni 系复合高强钢试样的疲劳寿命最长;在 QP 工艺下,Cr-Mo 系复合高强钢的疲劳寿命最长.

参考文献:

- [1] 苏春霞, 陈本文, 杨晰, 等. 开发的 1 900 MPa Ti 微合金化低合金超高强钢组织和性能[J]. 特殊钢, 2021(2): 60-63.
- [2] 杨鹏, 张朋彦, 纪久张. 两相区淬火+回火对 600 MPa 级低合金高强钢组织与性能的影响[J]. 金属热处理, 2021(6): 59-64.
- [3] 杨源华, 唐小勇, 彭冲, 等. 退火工艺对低合金高强钢 X410LA 性能和组织的影响[J]. 江西冶金, 2021(1): 19-25.
- [4] 杨旭静, 王韬, 李茂君, 等. 预弯曲变形和退火工艺对双相高强钢 FB590 疲劳性能的影响[J]. 塑性工程学报, 2023(2): 88-96.
- [5] 郭晗, 程旭东, 张慧霞, 等. 低合金高强钢焊接接头在 3.5% NaCl 溶液中的腐蚀行为[J]. 热加工工艺, 2021(13): 49-53, 58.
- [6] HAN K, GODDARD R E, NIU R M, et al. Characterization of nitronic-40 stainless steel shells[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2021, 31: 1-5.
- [7] 胡波. 冷却速度对低合金高强钢显微组织的影响[J]. 热加工工艺, 2021(20): 159-161.
- [8] 陈小虎, 李守华, 曹晓恩, 等. 汽车用低合金高强钢 HC500LA 连续退火工艺[J]. 材料热处理学报, 2021(4): 132-137.
- [9] 徐志斌, 宋贤萍, 刘阳, 等. 回火对建筑用低合金高强钢 Q690 组织与力学性能的影响[J]. 热加工工艺,

2022(24):156-160.

- [10] SHARMA L, CHHIBBER R. Experimental investigation of structural integrity behavior of high strength low alloy steel—study of mechanical, microstructural and corrosion behavior of submerged arc welding weldments[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering, 2021, 235:266-273.
- [11] 王科强, 刘仁东, 郭金宇, 等. 汽车用 800 MPa 级冷轧低合金高强钢的研制[J]. 金属热处理, 2021(1):120-124.
- [12] 崔桂彬, 鞠新华, 严春莲, 等. 热浸镀低合金高强钢 Zn-Al-Mg 镀层的组织结构表征[J]. 钢铁, 2023(1):153-160.
- [13] 马颖涵, 张振, 郭孟雨, 等. F690 超高强钢的腐蚀疲劳裂纹扩展行为及其有限元模拟[J]. 机械工程材料,

2021(4):65-71,80.

- [14] 周峰, 曹羽鑫, 万响亮. 稀土钨的添加对低合金高强钢粗晶热影响区韧性的影响[J]. 材料热处理学报, 2021(12):84-92.
- [15] AKBAR F, ARSALAN M. Thermal modelling of cutting tool temperatures and heat partition in orthogonal machining of high-strength alloy steel[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 2021, 235:1309-1326.
- [16] KAWATA H, YASUTOMI T, SHIRAKAMI S, et al. Deformation-induced martensite transformation behavior during tensile and compressive deformation in low-alloy TRIP steel sheets[J]. ISIJ International, 2021, 61:527-536.

(责任编辑:王彦江)

Analysis on Fatigue Performance of Low Alloy High Strength Steel in Annealing Process

SU Jiao

(School of Materials Science and Technology, Shanxi University of Science and Technology, Jincheng, Shanxi 048000, China)

Abstract: Mn-Cr-Nb composite high-strength steel, Cr-Mo composite high-strength steel, and Cu-Ni composite high-strength steel were used as experimental materials. Three types of low alloy high-strength steel specimens were prepared, and DP process, QP process, and TRIP process were used to perform annealing treatment on various specimens. According to a fatigue testing system, fatigue tests on three types of specimens were conducted. The results show that under the DP process, the fatigue life of Cu-Ni composite high-strength steel specimens is the longest. Moreover, when the annealing speed reaches 130m/min, the fatigue life of various specimens is the longest. The fatigue life of various specimens under the QP process is higher than that of other processes. Under TRIP conditions, Cu-Ni composite high-strength steel specimens is the longest fatigue life.

Key words: annealing process; low alloy high-strength steel; QP process; fatigue testing system; fatigue performance

