

微合金化 C70S6 胀断连杆断裂面掉屑缺陷分析与工艺改进

邓向阳, 谢 有, 李仕超

(中天钢铁集团有限公司技术中心, 常州 213011)

摘 要 采用金相显微镜、电子显微镜等分析得出, C70S6 钢表面严重脱碳以及内部质量缺陷均会造成连杆胀断掉屑, 通过优化 Al、V、P 含量, 钢中铁素体含量由原 5.5% ~ 8.6% 降至 2.7% ~ 4.8%; 连铸过热度由 ≤ 35 °C 降至 ≤ 30 °C, 拉速由 0.80 ~ 0.90 m/min 降至 0.65 ~ 0.75 m/min, 末端电磁搅拌电流由 200 A 提高至 300 A; 轧制前铸坯涂涂料, 加热炉加热时高温段空燃比由 0.7 ~ 0.8 降至 0.5 ~ 0.6, 加热温度提高至 1 200 ~ 1 250 °C; 并采用提高轧后冷速等措施后, C70S6 钢中心 C 偏析降为 0.99 ~ 1.04, 表面脱碳层深度 $\leq 0.50\%$ d, 晶粒度 5.5 ~ 6.0 级, 铁素体含量 $\leq 5.0\%$, 成功解决了连杆批量掉屑质量问题。

关键词 C70S6 钢 胀断 掉屑 脱碳 晶粒度

Analysis and Process Improvement on Defects of Broken Bits Dropping Out from Fracture Surface for Microalloying C70S6 Expansion-Broken Connecting Rods

DENG Xiangyang, XIE You, LI Shichao

(Research Development Department, Zenith Steel Group Co Ltd, Changzhou 213011)

Abstract By metallographic microscope, electron microscope etc. analyzing, it is obtained that surface serious decarburization of the C70S6 steel seriously causes the connecting rod expansion-broken bits dropping out, and internal quality defects. By optimizing the content of Al, V, and P, the ferrite constituent in steel decreases from original 5.5% ~ 8.6% to 2.7% ~ 4.8%, and by using measures including continuous casting superheat reduced from ≤ 35 °C to ≤ 30 °C, casting speed reduced from 0.80 ~ 0.90 m/min to 0.65 ~ 0.75 m/min, electromagnetic stirring current at the end increased from 200 A to 300 A; coating the cast billet before rolling, air-fuel ratio in the high temperature section of the heating furnace reduced from 0.7 ~ 0.8 to 0.5 ~ 0.6, heating temperature increased to 1 200 ~ 1 250 °C; and increasing cooling rate after rolling, the segregation of C in the center of the C70S6 steel is reduced to 0.99 ~ 1.04, the depth of the surface decarburization layer is $\leq 0.50\%$ d, the grain size rating is 5.5 ~ 6.0, and the ferrite content is $\leq 5.0\%$, successfully solved the problem of bits dropping in batches of connecting rods.

Material Index C70S6 Steel, Expansion and Broken, Broken Bits Dropping Out, Decarburization, Grain Size

非调质钢是指在中、高碳钢添加一定量的微合金元素(V、Nb 和 N 等)通过控轧(锻)控冷后不经淬火+回火工艺,即达到与调质钢相当力学性能的钢种。据 2018 年数据统计:我国汽车用特钢 1.5×10^7 吨/年,非调质钢产量为 1×10^6 吨/年,仅占 7%。日本汽车用特钢 7×10^6 吨/年,非调质钢产量为 2.3×10^6 吨/年,占 33%,90% 以上的曲轴、连杆均已采用了非调质钢制造。德国汽车行业中曲轴、连杆等锻件 70% 以上采用非调质钢制造^[1]。随着我国汽车产量和保有量的快速增加,节能减排的压力不断增大,非调质钢在汽车零部件中的使用越来越受到重视。

使用非调质钢后,汽车零件制造省去了调质过程,如图 1 所示,可以减少调质过程中淬火引起的变形开裂^[2];可使生产能耗降低 30% ~ 40%,采用非调质钢制造胀断连杆加工成本减少高达 40%,并可以减重 10%,由于这类连杆良好的胀断面吻合性,

减小了装配过程中所产生的失圆而引起的发动机扭振,从而降低了发动机的噪声,已经成为发动机连杆的主要生产方式。胀断连杆用非调质钢种主要有高碳钢 C70S6;中碳合金钢 36MnVS4、46MnVS5。

虽然使用非调质钢制作胀断连杆有很多优点,但其在胀断过程易掉渣,影响产品质量。通过对用 C70S6 非调质钢材料制作的胀断连杆断裂面掉屑缺陷进行化学成分、电镜和金相分析研究并加以工艺改进。

1 非调质钢胀断连杆主要质量问题

目前国内非调质钢胀断连杆生产过程中主要反应质量问题为连杆掉屑和断面不平整^[3]。连杆掉屑缺陷往往伴随着断面不平整现象同时出现,连杆掉屑的直接原因是螺栓孔两侧断裂面偏移,断裂面偏移程度越大越容易掉屑,且缺口面积越大,而断面偏移是因为断口塑性变形大所导致,一方面是由内

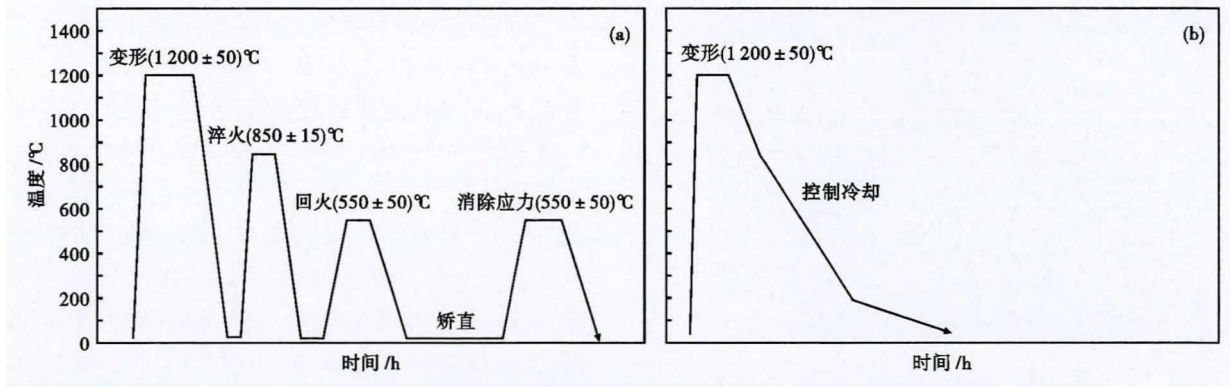


图 1 调质钢(a)与非调质钢(b)零件加工工艺对比

Fig. 1 Comparison between processing technology of quenched and tempered steel (a) and non-quenched and tempered steel (b) parts

部质量原因引起起裂位置塑性变形大,当材料晶粒度过细或者铁素体比例过高都会使得材料整体塑性变形大^[4],导致胀断困难,出现断口不平整、掉屑缺陷;另一方面是由表面质量引起,如材料表面脱碳,表层毛刺促进内部局部区域塑性大,造成胀断受力不均匀,在最终撕裂区形成撕裂岭,也会带来掉屑与断面不平整缺陷。

2 胀断连杆掉屑缺陷实例剖析

该汽车连杆零部件制造厂,在对 C70S6 材料连杆进行胀断加工时,胀断处外表面出现批量的掉屑缺陷。

2.1 连杆加工工艺流程

该胀断连杆生产制造流程为:下料→感应加热→锻打→抛丸→磨削→镗孔、攻丝→大头处激光开槽→连杆大头处胀断→上铜套→装配。

2.2 宏观检测

将从现场取回的掉屑连杆典型形貌进行宏观检查发现,连杆大头孔径内壁开槽的一侧胀断处外表面出现掉屑现象,见图 2;连杆打开后发现,断面很不平整,起伏较大,见图 3。

2.3 化学成分检测

从掉屑的胀断连杆上割取试样用直读光谱仪进行化学成分检测,检测结果见表 1。从表 1 可见,胀断掉屑连杆的化学成分满足标准要求,因此可以排除成分控制原因造成连杆胀断掉屑质量问题。

2.4 扫描电镜分析

将连杆大头断面在扫描电镜下观察,整个断面

很不平整,有平整区域也有很多不平整区域,起伏较大,存在较多塑性撕裂岭,断面未发现过烧、非金属夹渣等其他冶金缺陷存在,见图 4。

将掉屑附近局部断口平整区域进一步放大:断

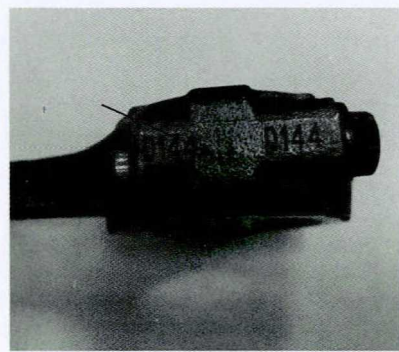


图 2 掉屑部位宏观形貌

Fig. 2 Macro morphology of position at dropped broken bits

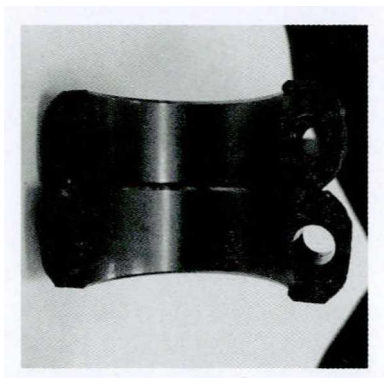


图 3 连杆胀断面宏观形貌

Fig. 3 Macro morphology of connecting rod expansion fracture

表 1 C70S6 钢化学成分/%
Table 1 Chemical composition of C70S6 steel /%

项目	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	V	Al
实测值	0.70	0.18	0.58	0.014	0.063	0.14	0.06	0.037	0.006
标准要求	0.67~0.73	0.15~0.25	0.53~0.60	≤0.045	0.060~0.070	0.10~0.15	0.04~0.08	0.030~0.040	≤0.010

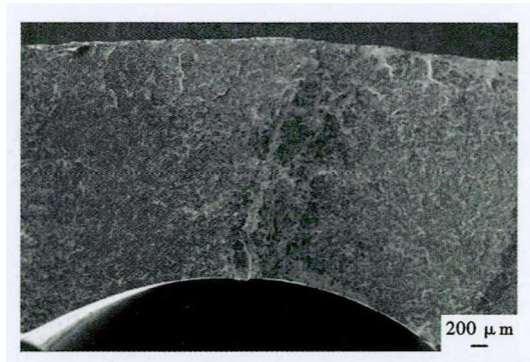


图 4 连杆大头整体断口形貌

Fig. 4 Overall fracture morphology of big end of connecting rod

口无剪切唇,呈清晰的河流状花样,为脆性解理断裂;而将局部断口不平整区域进一步放大,有明显的撕裂岭出现,存在部分微孔型断裂韧窝,表现出一定的塑性断裂形貌^[5]。脆性断口有利于连杆胀断时开裂,且断口才会平齐,断裂面才会有较好的啮合度,连杆的装配精度才能达到使用要求,而上述检测发现,断口平整区域材料呈现脆性,但断口不平整区域局部出现塑性的撕裂岭,说明整个断面材料组织不均匀,在胀断力作用下,脆性区域易胀断,塑性区域较难胀断,存在较大的胀断阻力,当胀断力达到一定值的时候,后断的塑性区域就出现了塑性撕裂,从而导致整个胀断面凹凸不平,断裂线不平齐,并在最难胀断且最后裂开的塑性区域出现掉屑缺陷。

2.5 金相检验

为进一步分析引起材料局部产生塑性变形,断面处组织不均匀的原因,取胀断连杆大头胀断断口处横向磨制后检验,发现连杆胀断线处断裂面掉屑部位边缘存在较为严重的脱碳现象,脱碳层深度 0.20 mm,正常断裂处边缘区域未发现明显脱碳,如图 5 所示。

金相检测结果显示:掉屑连杆基体组织为珠光体 + 铁素体,铁素体比例不超过 10%,符合产品技术要求,同时检测晶粒度评级为 6 ~ 7 级,符合标准 5 ~ 8 级的技术要求,可以排除因组织异常造成的连杆胀断掉屑^[6],进一步证实了是由于表面质量问题,表面严重脱碳造成脱碳部位塑韧性好的铁素体含量显著提高,而脆性好的珠光体含量变少,从而导致脱碳部位的塑韧性显著提高,脆断性能变差,胀断时,脱碳部位胀断困难,胀断后产生了塑性撕裂岭,并最终造成了胀断掉屑缺陷。对胀断连杆来说,局部脱碳超标可能来源于以下两道工序,一道为原材料

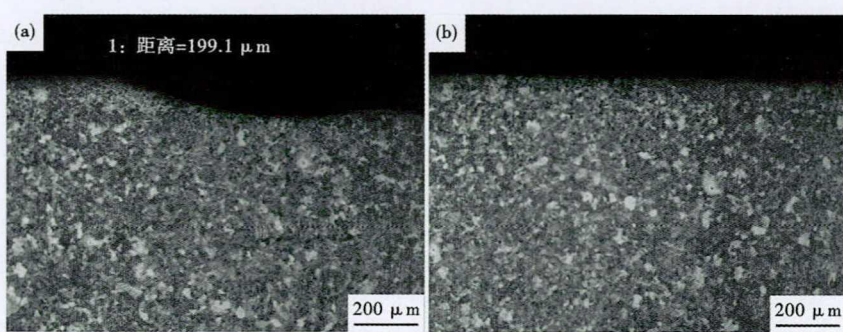


图 5 连杆胀断面掉屑处边缘脱碳(a)和未掉屑处边缘组织(b)形貌

Fig. 5 Decarburization microstructure at edge of connecting rod expansion break en bits dropping out position (a) and edge structure at no bits dropping out position (b)

轧制加热工序,另一道为锻造加热工序。而锻造加热采用感应加热,加热时间不超过 10 s,很难带来较重脱碳,因此,接下来对原材料生产工艺进行分析。

3 C70S6 钢的生产工艺

钢厂生产 C70S6 圆钢的生产工艺流程为:90 t EBT 电弧炉 → LF 精炼 → VD 真空 → 五机五流 220 mm × 260 mm 断面连铸机 → 加热炉 → 连轧机组 → KOCKS 精轧机组 → Φ42 mm 圆钢 → 探伤精整 → 检验 → 打包入库,该圆钢对应的连铸与轧制过程主要工艺参数见表 2、表 3 所示。

从出厂检验情况来看,该批圆钢表面脱碳高达

表 2 连铸主要参数及过程情况

Table 2 Main parameters and process conditions of continuous casting

弧形半径/ m	连铸断面/ (mm × mm)	拉速/ (m · min ⁻¹)	过热度/ ℃	结晶器搅拌电流/ A	末端搅拌电流/ A	连浇炉数/ 炉	液面控制/ mm
10	220 × 260	0.80 ~ 0.90	≤35	190 ~ 210	190 ~ 210	6 ~ 8	±5.0

表 3 轧制过程主要工艺参数

Table 3 Main process parameters of rolling process

加热温度/℃			空燃比			加热总时间/ min	开轧温度/ ℃	上冷床温度/ ℃
加热一段	加热二段	均热段	加热一段	加热二段	均热段			
950 ~ 1 050	1 120 ~ 1 180	1 130 ~ 1 190	0.6 ~ 1.0	0.7 ~ 0.8	0.7 ~ 0.8	150 ~ 240	1 030 ~ 1 130	860 ~ 900

0.40~0.45 mm,存在异常,由此,可以认为此次连杆掉屑处局部存在的严重脱碳,来源于原材料表面脱碳,且为铸坯在轧制加热工序产生。

4 胀断连杆掉屑缺陷分析与工艺改进

4.1 连杆掉屑原因分析

4.1.1 表面脱碳

经过上述胀断连杆掉屑实例研究分析发现,其中一个原因是由材料表面质量问题引起:连杆胀断处外表面掉屑部位边缘存在较为严重的脱碳现象,正常边缘区域未发现明显脱碳,掉屑区域脱碳层中铁素体含量明显高于正常区域,造成了整个胀断处组织的不均匀,从而在胀断时产生了受力不均,在脱碳严重、铁素体含量较多的塑性区域最后断裂且在较大胀断力作用下产生塑性撕裂,从而出现了局部的塑性撕裂岭,并造成表面掉屑现象。

4.1.2 内部质量

除表面质量缺陷外,材料内部质量也是影响连杆胀断性能的重要因素^[7],具体体现在如下4个方面:

(1)材料组织组成。当材料组织中含有较多的珠光体时,材料硬而脆,有利于胀断,当材料中铁素体含量较高时,材料塑性较强,在胀断时难以断裂,并在胀断线处局部出现撕裂,从而掉屑,研究认为:当轧后、锻后冷却过程冷速过缓时,先共析铁素体大量析出,从而导致连杆材料出现较多的铁素体组织^[7]。

(2)材料组织不均匀性。连铸过程中,过热度、拉速、电磁搅拌等参数控制不合理时,会导致铸坯产生较重的成分偏析,而在随后的轧制加热过程又得不到充分的扩散,最终导致整个材料组织不均匀,在胀断面不同区域存在铁素体与珠光体含量的较大差异,从而导致胀断时受力不均,在铁素体含量较多区域出现塑性撕裂,出现掉屑。

(3)晶粒尺寸大小。材料过细的晶粒尺寸,会导致细晶强化,材料的塑性增强,不利于连杆胀断裂开,而晶粒尺寸受化学成分的影响,当细晶元素Al、V等含量较多时,晶粒会变细;晶粒尺寸还受变形温度的影响,变形温度降低,晶粒细化。

(4)非金属夹渣。当连铸过程控制不当时,发

生结晶器液面卷渣,从而材料出现皮下宏观夹渣,胀断时非金属夹渣剥落从而出现“缺屑”掉屑。

4.2 工艺改进措施

4.2.1 成分优化设计

降低Al含量至 $\leq 0.005\%$,在材料强度满足成分要求的情况下,适当降低V含量至 $0.032\% \sim 0.035\%$,从而防止细晶元素含量过多,造成材料晶粒过细,此外适当提高易脆元素P含量,也有利于胀断断裂,由原来的内控要求 $\leq 0.020\%$ 提高至 $\leq 0.030\%$ 。

4.2.2 连铸工艺参数改进

主要是通过降低拉速、控制过热度等来减少材料的偏析,为获得均匀一致材料组织奠定基础,此外加强液面控制,防止液面波动过大,造成浇注过程结晶器液面卷渣,从而带来材料皮下夹渣,具体优化工艺如表4所示。

表4 改进前后连铸主要工艺参数对比

Table 4 Comparison of main process parameters of continuous casting between before and after improvement

工艺	连铸拉速/ ($m \cdot min^{-1}$)	结晶器电磁 搅拌电流 /A	末端电磁 搅拌电流 /A	过热度/ ℃	液面控制/ mm
改进前	0.80~0.90	200±10	200±10	≤35	±5
改进后	0.65~0.75	250±10	300±10	≤30	±3

4.2.3 轧制工艺的改进

(1)轧制前,对铸坯表面进行涂高温涂料处理,在加热过程形成保护气氛,从而防止圆钢脱碳超标。

(2)加热炉加热时,当加热温度达到 $700\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上时,采用快速加热升温,防止在 $700\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上温度缓慢加热造成材料局部严重脱碳^[8];控制加热炉内空燃比,并保持炉内微正压。

(3)要获得良好的胀断性能,需要优化连杆组织:即适当粗化晶粒,控制组织晶粒度 $5.0 \sim 6.0$ 级,而组织具有遗传性,为获得良好的连杆组织,首先需优化轧材组织,研究表明,提高轧制加热温度并适当延长铸坯加热时间,尤其是提高加热二段与均热段的加热温度不仅可以提高开轧温度有效增大轧材晶粒,还能使C、Mn、S等易偏析元素在高温加热状态下进行均匀扩散,从而减轻材料偏析,均匀材料

表5 改进前后轧制主要工艺参数对比

Table 5 Comparison of main rolling process parameters between before and after improvement

工艺	加热温度/℃			空燃比			加热总时间/ min	开轧温度/ ℃	上冷床温度/ ℃
	加热一段	加热二段	均热段	加热一段	加热二段	均热段			
改进前	950~1050	1120~1180	1130~1190	0.6~1.0	0.7~0.8	0.7~0.8	150~240	1030~1130	860~900
改进后	1000~1100	1200~1250	1200~1250	0.6~0.8	0.5~0.6	0.5~0.6	180~270	1100~1150	800~850

表 6 改进前后成分、性能对比
Table 6 Composition and performance comparison before and after improvement

工艺	炉号	元素含量/%			圆钢中心碳 偏析指数	晶粒度/ 级	组织中铁素体 含量/%
		Al	V	P			
改进前		0.005 ~ 0.010	0.036 ~ 0.039	0.010 ~ 0.015	1.08 ~ 1.15	6.0 ~ 7.0	5.5 ~ 8.6
改进后	021-375	0.004	0.033	0.023	0.99	6.0	3.5
	021-376	0.003	0.032	0.025	1.03	5.5	2.7
	021-377	0.005	0.034	0.027	1.04	5.5	4.8
	021-378	0.004	0.033	0.024	1.01	6.0	4.2

组织,确保连杆胀断时能够均匀一致的变形,防止出现掉屑。

(4)通过轧后穿水,降低上冷床温度,来提高轧后冷速,从而抑制网状铁素体析出,获得更多的珠光体,控制铁素体含量 $\leq 6\%$,从而改善胀断性能^[9]。

改进前后工艺参数如表 5 所示。

4.3 改进效果

通过工艺方案的改进调整,材料的成分、偏析、组织等均得到了较大程度的改善,工艺改进后生产 4 炉 $\Phi 42\text{mm}$ 规格的圆钢,做相关性性能检测,并与改进前对比,具体对比情况见表 6。

Al、V 细晶元素的少量降低,在不影响材料力学性能的前提下,可以适当粗化材料的晶粒度,而脆性的 P 元素的增加可以提高材料的脆断性能,此外通过连铸、轧钢等工序工艺参数优化,材料的偏析减轻,晶粒适当粗化,铁素体含量得到控制,也有利于材料胀断性能的改善。

工艺改进后取棒材整个圆周观察,原材料脱碳情况得到明显好转。改进后 $\Phi 42\text{mm}$ 圆钢表面局部脱碳由改进前的 $443\ \mu\text{m}$ 降至 $172\ \mu\text{m}$,且 $172\ \mu\text{m}$ 的表面脱碳在随后的锻造时,可以随锻造加热表面氧化及锻造产生的废毛边去除,但是 $443\ \mu\text{m}$ 的较重表面局部脱碳在随后的锻造过程很难去除,因此将造成连杆表面残留脱碳^[10]。

4.4 用户使用效果

工艺改进后生产的 4 炉钢,用户全部加工成连杆,取样抽检未发现局部脱碳严重现象存在,其它检测指标也有明显好转,连杆胀断后也未发现批量的掉屑缺陷。

5 结论

(1)为防止材料表面局部脱碳超标,轧制前对铸坯涂高温涂料;对轧钢加热工艺进行改进,将高温的加热二段与均热段空燃比控制在 $0.5 \sim 0.6$,并保持炉内微正压。

(2)为优化材料内部质量,对成分进行优化设计,对连铸工艺参数进行改进:连铸过热度控制

$30\ ^\circ\text{C}$ 以内,连铸拉速控制 $0.65 \sim 0.75\ \text{m}/\text{min}$,末端电磁搅拌电流提高至 $(300 \pm 10)\ \text{A}$,液面波动控制在 $\pm 3\ \text{mm}$,从而减轻材料偏析,防止结晶器液面卷渣;轧制过程采用高温扩散加热工艺:提高高温段加热温度至 $1200 \sim 1250\ ^\circ\text{C}$,提高开轧温度至 $1100 \sim 1150\ ^\circ\text{C}$,进一步减轻材料偏析的同时,有利于晶粒的适度粗化;提高轧后冷却速率,抑制网状铁素体析出,从而降低铁素体比例。

(3)掉屑缺陷控制措施实施后,圆钢的中心 C 偏析降为 $0.99 \sim 1.04$,表面脱碳层深度降至 $0.50\% d$ 以内,晶粒度优化至 $5.5 \sim 6.0$ 级,材料铁素体含量降低至 5.0% 以内,经用户使用无批量掉屑质量问题发生,完全满足了用户的使用要求。

参考文献

- [1] 张朝磊,刘雅政. 汽车胀断连杆用非调质钢的应用现状与发展[J]. 材料导报,2017,31(5):58-64.
- [2] 刘瑞宁,王福明. 汽车用微合金化非调质钢的进展[J]. 特殊钢,2006,27(3):39-43.
- [3] 王芝林,钱才让,胡发贵,等. C70S6 非调质钢连杆胀断缺陷分析[J]. 热加工工艺,2018,47(13):250-252.
- [4] Kou Shuqing, Gao Yan and Zhao Yong, et al. Stress Analysis and Optimization of Nd:YAG Pulsed Laser Processing of Notches for Fracture Splitting of a C70S6 Connecting Rod[J]. Journal of Mechanical Science and Technology,2017,31(5):2467-2476.
- [5] 寇沙沙,李智丽,靳 燕. 扫描电镜在金属材料检测中的应用[J]. 包钢科技,2016,42(1):42-46.
- [6] 王占花,李 慎,葛 宇,等. C70S6 非调质钢锻造连杆的组织力学性能和胀断性能研究[J]. 热加工工艺,2015,44(19):39-43.
- [7] 刘智雄,惠卫军,刘荣佩. 连杆用 C70S6 钢的胀断性能[J]. 特殊钢,2011,32(5):66-68.
- [8] 肖金福,刘雅政,张朝磊,等. 弹簧钢 55SiCrA 脱碳规律的研究[J]. 金属热处理,2010,35(12):94-98.
- [9] 陈蕴博,马 焱. 汽车连杆用非调质钢及其控锻控冷技术[J]. 国外金属热处理,1997(1):32-35.
- [10] 姜喜峰,杨 航,顾 军,等. 连杆脱碳原因分析及预防[J]. 锻造与冲压,2021(21):64-68.

邓向阳(1982-),男,硕士(2018年北京科技大学),高级工程师,2006年江苏大学(本科)毕业,汽车用钢研发和技术管理。E-mail:857822931@qq.com

收稿日期:2021-12-18