



非调质钢 36MnVS4 连杆胀断缺陷分析及控锻控冷工艺试验

鲜奋强¹, 王磊英¹, 蒋波², 李明林¹

(1 西宁特殊钢股份有限公司, 西宁 810005; 2 北京科技大学材料与工程学院, 北京 100083)

摘 要: 36MnVS4 钢是新一代中碳微合金胀断连杆用非调质钢, 此钢通过 V 微合金化设计及控 N 设计, 使连杆具有优良的综合机械性能, 从而广泛应用于乘用车发动机连杆的制造。但是非调质胀断连杆在其生产过程中, 往往存在连杆胀断不平齐或掉渣等典型连杆胀断缺陷, 严重影响连杆胀断后的组装质量及连杆使用性能, 尤其在 36MnVS4 钢连杆生产过程中, 此问题更为突出。为此, 对 36MnVS4 钢连杆胀断缺陷进行系统检验分析与研究, 并提出 36MnVS4 钢胀断连杆控锻控冷工艺优化与调控技术。确立了 36MnVS4 钢连杆最佳控锻控冷工艺, 工艺参数执行, 660 °C 以上快冷以抑制铁素体的析出, 660 °C 以下缓冷以得到粗片层珠光体, 保证连杆硬度指标合格的同时又兼具良好的胀断性能。

关键词: 非调质钢; 胀断缺陷; 控锻控冷; 微合金化

DOI:10. 20057/j. 1003-8620. N250565 **中图分类号:** TG306

Analysis of Fracture Split Defects of Non-Quenched-Tempered Steel 36MnVS4 Connecting Rods and Controlled Forging and Cooling Process Tests

Xian Fenqiang¹, Wang Leiyang¹, Jiang Bo², Li Minglin¹

(1 Xining Special Steel Co., Ltd., Xining 810005, China; 2 School of Materials and Engineering, Beijing University of Science and Technology, Beijing 100083, China)

Abstract: 36MnVS4 is a new generation of non-quenched-tempered (NQT) steel for medium-carbon micro-alloying connecting rods. Through V micro-alloying and nitrogen-controlled design, this steel achieve excellent comprehensive mechanical properties for the connecting rod. , So it is widely used in the manufacturing of passenger car engine connecting rods. However, in the production process of NQT connecting rods, there are often typical connecting rod defects such as uneven fracture or slag dropping, which seriously affects the assembly quality and performance of the connecting rod after fracture. Especially in the production process of 36MnVS4 connecting rods, this problem is more prominent. To this end, a systematic inspection, analysis and research on the fracture split defects of the 36MnVS4 connecting rod were carried out and the controlled forging and cooling process optimization was proposed. The optimal controlled forging and cooling process for the 36MnVS4 connecting rod has been established. The process parameters are implemented: rapid cooling above 660 °C to inhibit the precipitation of ferrite, and slow cooling below 660 °C to obtain coarse lamellar pearlite, ensuring that the connecting rod has qualified hardness indicators and has good expansion and breaking performance.

Key Words: Non-quenched-tempered Steel; Expansion and Breaking Defects; Controlled Forging and Cooling; Microalloying

20 世纪 70 年代以来, 由于在调质钢的强度、韧性等方面得到的突破微小, 而非调质钢在成本显著降低的情况下就可以达到, 甚至超过调质钢的强度和韧性水平, 发展较快。另外, 基于汽车零部件发展趋势, 零部件用钢的生产不断朝着低能耗、轻量化方向发展。非调质钢具有节能减排、制造成本低、生产周期短等优点^[1], 用于汽车零部件的生产符合碳达峰、碳中和的战略发展方向, 且随着对非调

质钢强韧性研究的深入, 其力学性能已接近甚至达到调质钢水平。因此, 非调质钢代替调质钢成为高品质汽车零部件用钢发展的重要趋向^[2]。36MnVS4 钢是德国近几年研制适用胀断的非调质中碳钢, 该材料降低了 C 含量, 增加了 V 含量, 具有强度高、疲劳性能好、机加性能比 C70S6 钢好、硫化物含量比 C70S6 钢低的特点, 为发动机主要零部件在高负荷条件下实现轻量化设计提供了条件^[3]。广泛应用于

乘用车发动机胀断连杆的制造。

发动机是汽车的“心脏”，而连杆作为发动机的核心受力零部件，在工作过程中承受强烈的周期性冲击力、惯性力和弯曲力，故连杆的制造质量直接影响发动机的性能，这就要求连杆应具有高的强度、韧性、疲劳性能和质量稳定性^[4]。20世纪90年代，德国、美国等国家率先开发了胀断连杆，其连杆盖和连杆体经脆性胀断后组装而成^[5-6]。与传统的平切调质钢(42CrMo、40Cr)连杆相比，胀断连杆具有如下优点：1)胀断形成的断口将连杆盖和连杆体完美地啮合起来，且改善了连杆盖与连杆体分离的结合质量；2)节省了螺栓定位孔的加工；3)减少了连杆大头孔的变形，提高了连杆加工精度和装配质量；4)增强了剖分面承受能力；5)提高了连杆稳定性，对发动机的振动噪声也有一定的改善；6)改善了切削加工性能^[7-9]。胀断技术的应用，使生产工艺简化的同时大大提高了结合面的精度。但在非调质36MnVS4钢胀断连杆的加工过程中往往存在胀断面不平齐、掉渣等连杆胀断缺陷^[10]。为此，对36MnVS4钢胀断连杆胀断缺陷进行系统检验分析与研究，并提出36MnVS4钢胀断连杆控锻控冷工艺优化与调控技术，保证36MnVS4钢胀断性能，提高产品质量。

1 实验材料与检测

1.1 实验材料要求与缺陷形貌

实验材料为国内某连杆制造企业生产的

36MnVS4钢连杆两支，均为不合格品，其中一支连杆胀断断口存在起皮及不平齐问题；一支胀断断口存在掉渣及不平齐问题。材料成分要求见表1，两支不合格连杆的宏观形貌如图1所示。

利用线切割切取测试试样。在连杆大头位置切取光谱试样1，对连杆化学成分进行检测分析，计算碳当量。在连杆断口位置切取金相试样3，采用光学显微镜对连杆断口附近横截面显微组织进行观察，分析显微组织形貌及比例、晶粒尺寸、脱碳层深度；对断口试样纵截面，使用光学显微镜进行非金属夹杂物检测分析。在连杆杆部位置，切取拉力试样2，进行力学性能检测分析。连杆取样示意图如图2所示。

1.2 化学成分

在连杆大头位置切取光谱试样，对连杆化学成分进行检测分析，执行GB/T 223—1994《钢铁及合金化学分析方法》及GB/T 4336—2016《碳素钢和低合金钢 火花源原子发射光谱分析方法(常规法)》进行化学成分检验，主要检测设备：COREY-150-1红外碳硫仪、TC-500氧氮联测仪及ICP6300电感耦合等离子光谱仪，两支连杆化学成分满足标准要求，1#、2#连杆化学成分检测结果见表2。

1.3 力学性能

从连杆杆部取室温拉伸试样，按GB/T228.1—2010《金属材料 拉伸试验 第1部分：室温试验方法》、GB/T 231.1—2018《金属材料 布氏硬度试验 第1部分：试验方法》，进行力学性能检验，使用主要设

表1 36MnVS4连杆材料化学成分要求(质量分数)

Table 1 36MnVS4 connecting rod material chemical composition requirements

								%
C	Si	Mn	P	S	V	Cr	Mo	N
0.34~0.38	0.60~0.75	0.95~1.05	≤0.045	0.030~0.040	0.25~0.35	0.10~0.25	≤0.06	0.015~0.020



图1 36MnVS4连杆胀断缺陷宏观形貌：(a)1#试样，(b)2#试样

Fig. 1 Macroscopic morphology of fracture split defect of 36MnVS4 connecting rod : (a) 1# sample, (b) 2# sample



图2 36MnVS4钢连杆取样示意图

Fig. 2 36MnVS4 steel connecting rod sampling diagram

表2 36MnVS4钢连杆化学成分检测结果(质量分数)

Table 2 36MnVS4 steel connecting rod chemical composition test results

序号	C	Si	Mn	P	S	V	Cr	Mo	N	Ceq	%
1 [#]	0.36	0.65	0.95	0.016	0.035	0.29	0.21	0.01	0.0151	1.11	
2 [#]	0.36	0.65	0.95	0.015	0.033	0.29	0.21	0.01	0.0151	1.11	

备为 WAW-Y500C 型电液伺服万能材料试验机,布氏硬度机。连杆平均抗拉强度 1 051.5 MPa,平均屈服强度 829.5 MPa,平均断后伸长率 17.0%,平均断面收缩率 36.5%,两支连杆力学性能满足标准要求。36MnVS4 连杆力学性能检测结果见表 3。

1.4 金相检验

在 36MnVS4 钢连杆大头断口位置切取金相试样,按 GB/T 13298—2015《金属显微组织检验方法》、GB/T 13299—2022《钢的游离渗碳体、珠光体和魏氏组织的评定方法》、GB/T 6394—2017《金属平均晶粒度测定方法》、GB/T 224—2019《钢的脱碳层深度测定方法》,采用光学显微镜对连杆断口附近显微组织进行观察,分析其显微组织形貌及比例,并检测晶粒尺寸、脱碳层深度。可以看出,连杆断口显微组织类型为:F+P 组织,铁素体含量 38%,铁素体沿晶界析出,呈明显聚集状态;连杆断口晶粒度评级 6.0 级,连杆断口边部未发现脱碳现象,晶粒度及脱碳层指标均正常,符合标准要求。连杆大头胀断处样品观察示意图如图 3 所示,连杆断口横截面位置 1、位置 2 处显微组织形貌如图 4、图 5 所示。

1.5 非金属夹杂物检验

钢中夹杂物能破坏钢基体的连续一致性,在用

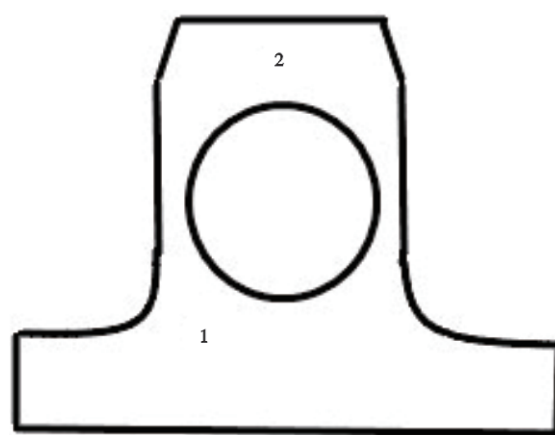


图3 36MnVS4连杆大头胀断处样品观察示意图

Fig. 3 Observation diagram of the sample at the expansion fracture point of the big end of 36MnVS4 connecting rod

户加工变形过程中因为应力的集中而成为裂纹源,对加工变形产生极大危害,为了保证用户正常加工使用及产品质量,对连杆胀断断口试样纵截面,使用光学显微镜进行非金属夹杂物检测分析,使用主要仪器为 BX53M 型金相显微镜,按 GB/T10561—2023《钢中非金属夹杂物含量的测定 标准评级图显微检验法》评级。1[#]、2[#]连杆非金属夹杂物评级结果为 A 类细系 1.0 级, B 类细系 1.0 级,未发现大颗粒夹杂物及夹杂物聚集分布现象,两支连杆夹杂物检验结果满足标准要求。夹杂物评级结果见表 4,硫化物分布如图 6 所示。

2 36MnVS4 连杆控锻控冷调控技术

36MnVS4 钢作为新一代中碳、微合金高强度胀断连杆用非调质钢,其最大的优势是其具有优良的综合机械性能,因而被广泛应用于乘用车连杆的制造,为汽车轻量化、高强度奠定了材料基础。但是在 36MnVS4 钢连杆实际锻造生产控制过程中,因控锻控冷方式不当,往往存在连杆胀断缺陷。因此,根据 36MnVS4 材料基础特性研究,并结合现场生产实际,针对此材料,提出了合理的控锻控冷手段,改善 36MnVS4 钢连杆的胀断性能,提高产品质量。

2.1 控锻控冷工艺流程

控锻控冷工艺采用锻后 660 ℃以上快冷以抑制

表3 36MnVS4钢连杆力学性能检验结果

Table 3 Mechanical property test results of 36MnVS4 steel connecting rod

项目	抗拉强度/MPa	屈服强度/MPa	断后伸长率/%	断面收缩率/%	试样硬度(HBW)
标准要求	1 000~1 150	≥750	≥8	≥30	290~325
1	1 045	823	18	38	314
2	1 058	836	16	35	316

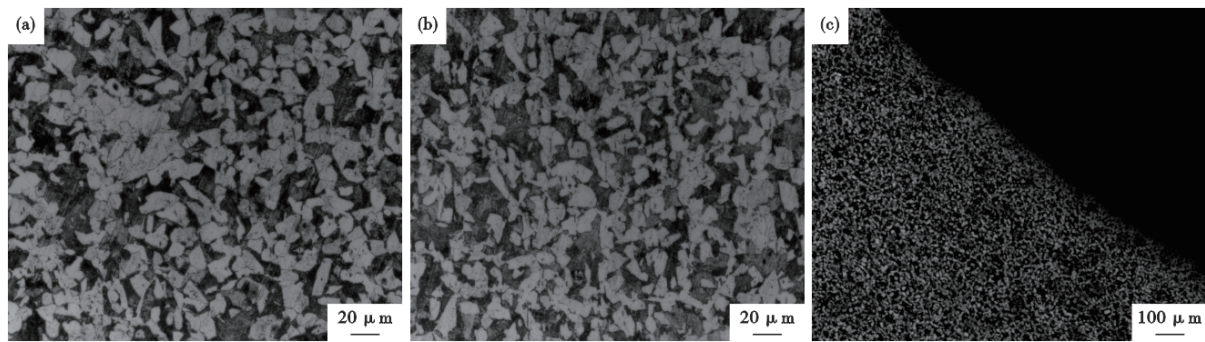


图4 1#36MnVS4钢连杆断口横截面:(a)断口位置1处显微组织,(b)断口位置2处显微组织,(c)脱碳层深度

Fig. 4 1#36MnVS4 steel connecting rod fracture cross-section : (a) microstructure at fracture position 1, (b) microstructure at fracture position 2, (C) depth of decarburization layer

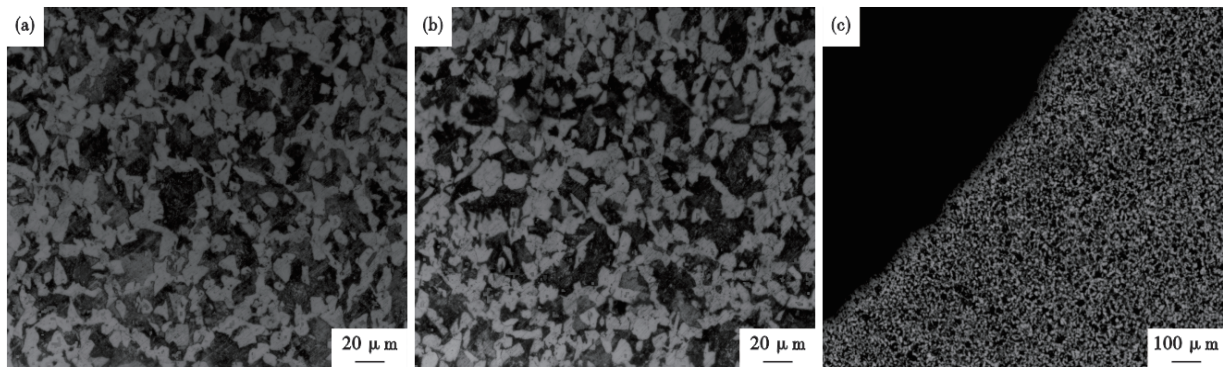


图5 2#36MnVS4钢连杆断口横截面:(a)断口位置1处显微组织,(b)断口位置2处显微组织,(c)脱碳层深度

Fig. 5 2#36MnVS4 steel connecting rod fracture cross-section : (a) microstructure at fracture position 1, (b) microstructure at fracture position 2, (c) depth of decarburization layer

表4 非金属夹杂物检测结果

Table 4 Non-metallic inclusion detection results									级
序号	A粗	A细	B粗	B细	C粗	C细	D粗	D细	DS
标准要求	≤3.5	≤3.5	≤1.5	≤2.0	≤1.0	≤1.0	≤1.0	≤1.0	≤1.0
1	0	1.0	0	1.0	0	0	0	0	0
2	0	1.0	0	1.0	0	0	0	0	0

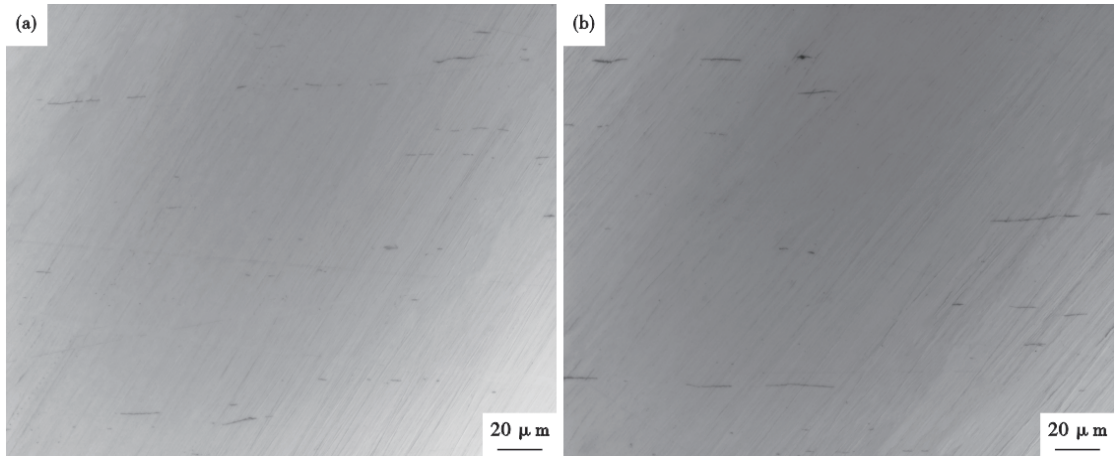


图6 连杆断口纵截面非金属夹杂物:(a)1#,(b)2#

Fig. 6 Non-metallic inclusions in longitudinal section of 1# connecting rod fracture : (a)1#,(b)2#

铁素体的析出、后续缓冷以得到粗片层珠光体的原则,保证连杆在硬度指标合格的前提下同时兼具优良的胀断性能。

工艺流程:中频感应炉加热→预锻→精锻→入网带炉→控制冷却→出网带炉→收集→抛丸→探伤→机加工→胀断。

2.2 控锻控冷方法

依据36MnVS4材料连续冷却曲线及相变规律,可以知道非调质胀断连杆用钢36MnVS4的 A_{c1} 、 A_{c3} 和 M_s 相变点温度分别为712、797、346℃,如图7所示。当冷速 $\leq 3^\circ\text{C/s}$ 时组织均为铁素体+珠光体;当冷速达到 5°C/s 时,组织为铁素体+珠光体+47.8%贝氏体,贝氏体转变的临界冷速为 3.5°C/s ;冷速为 10°C/s 时,组织为铁素体+珠光体+贝氏体+1.1%马氏体,马氏体转变的临界冷速为 10°C/s 。

结合企业现场生产工装及产品性能要求,制定出相应控锻控冷试验工艺,采用锻后 660°C 以上快冷以抑制铁素体的析出、后续缓冷以得到粗片层珠光体的原则,保证连杆在硬度指标合格的前提下同时兼具优良的胀断性能。试验工艺共6组,试验工艺具体参数见表5。

2.3 控锻控冷试验结果

2.3.1 连杆硬度

完成6组控锻控冷试验,并对连杆布氏硬度进

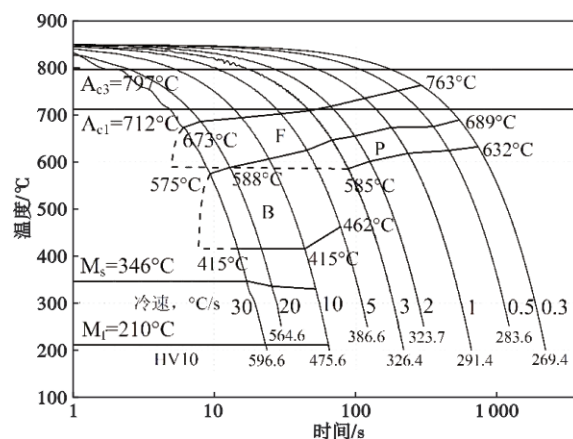


图7 36MnVS4钢动态CCT曲线

Fig. 7 36MnVS4 steel dynamic CCT curve

行检验分析。试验工艺1与试验工艺2冷却速度最快,生产的连杆杆部布氏硬度较高,检验结果为:328~331HBW,均超标准要求;试验工艺6与试验工艺4冷却速度适中,但试验工艺6保温温度较试验工艺4较低,试验6生产的连杆杆部布氏硬度接近标准上限要求,连杆杆部布氏硬度检验结果为:320~325HBW;试验工艺3、试验工艺5冷却速度最弱,生产的连杆大头及杆部硬度均符合标准要求,但试验工艺3生产连杆的杆部布氏硬度略低,试验工艺5与试验工艺4生产连杆的布氏硬度检验结果相近。连杆布氏硬度检验结果见表6。

表5 36MnVS4钢连杆试验工艺参数

Table 5 Test process parameters for 36MnVS4 steel connecting rods

工艺号	感应炉加热温度/℃	入网带炉温度/℃	网带炉控制		
			速冷区冷却风机频率/HZ	速冷区引风机,频率/HZ	稳定区加热温度/℃
1	1 250~1 260	大头:880~890 杆部:820	10	15	450
2			10	15	480
3			5	10	500
4			8	12	500
5			5	10	450
6			8	12	450

表6 36MnVS4钢连杆布氏硬度

Table 6 36MnVS4 steel connecting rod brinell hardness

HBW

工艺号	布氏硬度要求(290~325)	
	大头芯部	杆部芯部
1	307,305,301,302	331,329
2	298,301,312,302	330,328
3	294,293,291,292	311,314
4	290,294,292,295	320,321
5	290,298,297,294	320,321
6	298,302,296,301	320,325

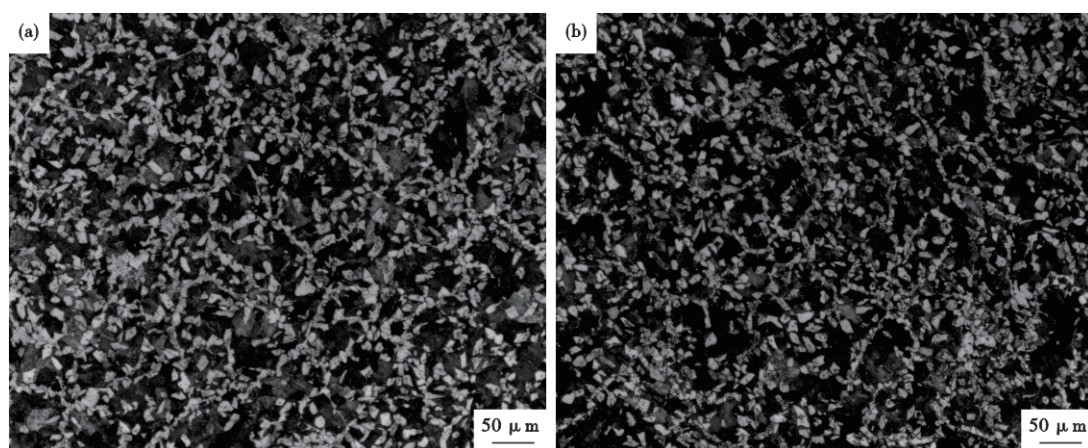


图8 试验工艺4连杆断口横截面显微组织:(a)位置1,(b)位置2

Fig. 8 Microstructure of the fracture cross section of connecting rod 4 in the test process : (a) position 1; (b) position 2

2.3.2 连杆组织

从试验工艺3、工艺4、工艺5各组试验参数来看,工艺4最接近分段控冷设计原则,并对工艺4显微组织进行检验分析,连杆断口横截面位置1、位置2铁素体含量分别为28%、30%,铁素体含量较不合格品相比,铁素体占比较小,铁素体分布相对比较弥散,无块状聚集现象。显微组织如图8所示。

3 结论

1)通过对非调质36MnVS4钢连杆胀断不合格品检验分析,检验结果表明:不合格连杆化学成分、机械性能、非金属夹杂物、晶粒度、脱碳层等技术指标均符合标准要求;连杆显微组织为P+F组织,铁素

体含量为38%,铁素体沿晶界析出,呈明显聚集状态。铁素体属于塑韧性组织,铁素体含量的增加,会导致连杆强度指标下降,塑韧性指标增加,进而影响连杆胀断性能。

2)为提高36MnVS4钢连杆胀断性能,依据36MnVS4钢连续冷却曲线及相变规律,对36MnVS4钢连杆进行控锻控冷工艺试验,通过试验,确定连杆最佳控冷工艺。在连杆锻后660℃以上采用快冷方式,以达到抑制铁素体析出的目的,严格控制铁素体含量占比;660℃以下采取缓冷方式,调整珠光体片层形态,保证连杆硬度符合标准要求。这样使连杆既具有优良的机械性能,又兼具良好的胀断性能,产品质量得到大幅提升。

参考文献

- [1] 卢明霞,张磊,王新社. 正火温度对胀断连杆用36MnVS4和46MnVS5钢组织及性能的影响[J]. 金属热处理, 2024, 49(7): 249-253.
- [2] 蒋波,冯奕洁,王芝林,等. 汽车用铁素体-珠光体型非调质钢研究现状[J]. 钢铁, 2023, 58(3): 11-24.
- [3] 杨建辉,邓伟,张勇,等. 关于国产36MnVS4胀断新材料的实验研究[C] 会议论文集, 2013, 545-547.
- [4] 刘攀,李卫钊,魏元生,等. 中碳微合金非调质钢胀断连杆的开发[J]. 钢铁研究学报, 2015, 27(1): 46-49.
- [5] 张渊普,韦泽洪,张欢,等. 汽车发动机连杆用钢C70S6BY的研制[J]. 特殊钢, 2021, 42(6): 40-42.
- [6] 韩常海,王志利,施进卿. 胀断连杆用非调质钢C70S6BY产品研发[J]. 特殊钢, 2021, 42(6): 55-57.
- [7] 方和杰,王传斌,胡劲松. NSE连杆胀断加工关键技术研究[J]. 汽车工艺与材料, 2010(10): 21-25.
- [8] 宋炯毅,汪雷刚. 胀断连杆加工工艺研究[J]. 现代零部件, 2011(3): 72-73.
- [9] 邓伟辉. 连杆胀断加工技术现状与展望[J]. 机电工程技术, 2008(4): 13-17.
- [10] 邓向阳,谢有,李仕超. 微合金化C70S6胀断连杆断裂面掉屑缺陷分析与工艺改进[J]. 特殊钢, 2022, 43(4): 50-54.