

· XXXX ·



锻造和热处理工艺对 40CrNi2Mo 水下阀杆锻件性能的影响

尚贺军, 牛余兵, 张鑫, 臧超
(伊莱特能源装备股份有限公司, 章丘 250217)

摘要: 水下油气装备的力学性能和可靠性要求极为严苛。本研究以 40CrNi2Mo 水下阀杆锻件为对象, 系统分析了各主要合金元素的作用, 研究了化学成分、锻造比及热处理工艺对钢的力学性能的影响。通过鉴定试块 (QTC) 的制作和检测, 最终确定在拔长锻比为 4.5:1 的情况下, 水下阀杆锻件经 910 °C 完全退火 + (890 ~ 900) °C 双介质淬火 + (620 ~ 630) °C 高温回火后, 其性能优异。批量生产的阀杆锻件, 本体取样检测的屈服强度为 950 MPa, 抗拉强度为 1 080 MPa, 伸长率为 19.5%, 断面收缩率为 62.0%, -29 °C 冲击吸收功均值为 71.8 J, 产品表面硬度 331 HBW, 完全满足技术要求。

关键词: 40CrNi2Mo; 水下阀杆; 锻造; 热处理工艺; 力学性能

DOI:10. 20057/j. 1003-8620. N260065 **中图分类号:** TG156. 6

Effect of Forging and Heat Treatment Processes on Properties of 40CrNi2Mo Subsea Valve Stem Forgings

Shang Hejun, Niu Yubing, Zhang Xin, Zang Chao
(Iraeta Energy Equipment Co., Ltd., Zhangqiu 250217, China)

Abstract: The requirements for mechanical properties and reliability of subsea oil and gas equipment are extremely stringent. This research focuses on 40CrNi2Mo subsea valve stem forgings, systematically analyzes the roles of major alloying elements, and investigates the effects of chemical composition, forging ratio, and heat treatment processes on mechanical properties. Through the preparation and testing of qualification test coupons (QTCs), it was ultimately determined that under a drawing forging ratio of 4.5:1, the subsea valve stem forgings exhibit excellent performance after 910 °C full annealing + (890-900) °C dual-medium quenching + (620-630) °C high temperature tempering. For batch-produced valve stem forgings, the mechanical properties obtained from specimens taken from the body itself are as follows: yield strength of 950 MPa, tensile strength of 1 080 MPa, elongation of 19.5%, reduction of area of 62.0%, average impact absorbed energy of 71.8 J at -29 °C, and a product surface hardness of 331 HBW, fully meeting the technical requirements.

Key Words: 40CrNi2Mo; Subsea Valve Stem; Forging; Heat Treatment Process; Mechanical Properties

水下油气开发作为新时期能源开发的主要方向之一,对保证国民经济和社会发展有着重要的意义,特别是面对起步晚和技术封锁^[1]的现状,实现水下装备的自主发展显得尤为必要。水下阀门作为海底油气开发的关键控制部件,其阀杆需要在高压、低温、腐蚀性介质中长期服役,对材料的强度、塑性、低温韧性及抗疲劳性能提出了极高要求^[1-2]。40CrNi2Mo 钢作为一种中碳低合金超高强度钢,具有良好的淬透性和综合力学性能,在航空航天、深海装备等领域有广泛应用。近年来,国内外学者对 40CrNi2Mo 钢的热处理工艺与性能的关系开展了大量研究。王成林等^[3]研究了不同热处理参数下,

40CrNi2Mo 材料的显微组织演化对力学性能和干摩擦性能的影响。穆蕾雅等^[4]采用 Marc 软件模拟了经过调质处理和稳定化处理的 40CrNi2Mo 钢阶梯轴的残余应力值及其分布。曹国珍等^[5]采用试验的方法,研究热处理工艺对 40CrNi2Mo 钢性能的影响。廖庚峰等^[6]对比分析了 4340 钢和 40CrNiMo 钢这两种材料的化学成分、热处理参数及其力学性能的差异。G.Y.Lai 等^[7]研究了 AISI4340 钢的奥氏体化温度对平面应变断裂韧性 (K_{1c}) 和显微组织的影响。潘权文等^[8]采用光学显微镜、透射电镜和拉伸实验等研究了不同热处理状态的双真空冶炼 AISI 4340 钢的显微组织与拉伸性能,并与普通冶炼 AISI 4340

作者简介: 尚贺军(1980—),男,本科,高级工程师; **E-mail:** shjpeace@163.com; **收稿日期:** 2026-05-05

Editorial Office of Special Steel. OA under CC BY-NC-ND 4.0

钢的强度-塑性进行对比。赵洪壮等^[9]采用膨胀法对 AISI4340 钢马氏体相变进行研究,其结果表明奥氏体晶粒度和晶界析出相对马氏体相变动力学,特别是马氏体转变温度有很大影响。马涛等^[10]采用慢拉伸应力腐蚀试验与应力腐蚀裂纹扩展试验,对 AISI4340 钢在含饱和氧和/或 0.1 mol/L 的 100 °C 水中的应力腐蚀行为进行研究。

不过,针对水下阀杆这一构件,关于其热加工工艺与力学性能的研究方面,鲜有报道。本研究基于某重点水下项目需求,对 40CrNi2Mo 阀杆的全流程制造工艺进行优化设计,通过鉴定试块(qualification test coupon, QTC)的制作和检测,批量进行生产验证及力学性能测试,建立满足美国石油学会(American petroleum institute, API) API 6A, 21 st Edition, November 2018 标准产品规范等级(product specification level, PSL)为 PSL3 级、强度等级为 125 k 的制作要求,同时从相变机理角度对其进行阐释。

1 水下阀杆技术要求的评估和鉴定试块的制作

水下阀杆产品尺寸和形状如图 1 所示,其技术要求见表 1。根据 API 6A, 21 st Edition, November 2018 标准要求,对于产品规范等级为 PSL3 级的产品,需要制作等效圆(equivalent round, ER)(对于阀杆锻件,其等效圆即为热处理前的粗车直径)不小于阀杆有效厚度的鉴定试块(QTC),并对其热处理后的力学性能进行检测,以完成阀杆锻件用料、锻造工艺和热处理工艺的评定,确保阀杆产品的各项力学性能要求均可以完全满足,才可以进行批量生产。

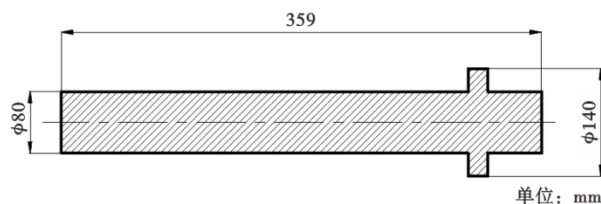


图 1 40CrNi2Mo 阀杆

Fig. 1 40CrNi2Mo valve stem

1.1 原材料

作为水下油气开采用轴类锻件用钢,采用电弧炉(EF)→钢包精炼(LF)→真空脱气(VD/RH)→细化晶粒处理的工艺。以最大程度控制钢中的夹杂物水平和气体含量,提高钢水的纯净度。浇铸时采用氩气保护浇铸的底注方式。

从给定的力学性能来看,对比张世英^[11]针对 40CrNi2Mo 所做研究,锻件整体强度要求较高(屈服 860 MPa 以上),同时,为了满足 API 6A 标准的服役温度等级要求(P 级对应为 -29 °C, U 级对应为 -18 °C),阀杆还需要满足 -29 °C 冲击性能要求。因此,对阀杆锻件用料,提出化学成分管控的目标值见表 2。

1) 碳(C)是钢中最主要的合金元素,同一钢种,含碳量越高,钢的强度越高,相应的塑韧性会降低,水下阀杆产品要求强度满足 125 k 的等级要求,属于较高的强度水平,因此,将材料中 $w[C]$ 的目标值设定为 0.42%,以有利于强度目标的实现。

2) 硅(Si)是非碳化物形成元素,通过固溶于钢中起到固溶强化作用。随着 $w[Si]$ 的增加,钢的韧性下降,因此,将 $w[Si]$ 目标值设定在 0.20% 左右。

3) 锰(Mn)在一定范围内,锰可以增大过冷奥氏体的稳定性,这有利于减少晶界碳化物数量,增大

表 1 40CrNi2Mo 阀杆的技术要求

Table 1 Performance requirements of 40CrNi2Mo valve stem

API 标准产品信息			力学性能					
PSL 等级	温度 等级	强度等级	R _{p0.2} /MPa	R _m /MPa	A/%	Z/%	Kv(-29 °C)/J	硬度(HBW)
PSL3	P.U	125 k	≥860	≥1 020	≥14	≥40	≥27	320~365

表 2 40CrNi2Mo 钢的化学成分目标值(质量分数)

Table 2 Target chemical composition values of steel 40CrNi2Mo

								%
C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	P	S	
0.42	0.20	0.78	0.85	1.86	0.260	0.013	0.001	
Al	Ca	Ti	V	Cu	O	H	N	
0.025	0.005	0.003	0.01	0.05	0.001 8	0.000 15	0.008 0	
Pb	Sn	Sb	Bi	As	Pb+Sn+Sb+Bi+As			
0.002 0	0.002 0	0.002 0	0.001 0	0.003 5	≤0.020			

碳化物的弥散性,使晶粒进一步细化,提高钢的韧性。因此,在允许范围内选择较高的 $w[\text{Mn}]$ (0.78%)。

4) 铬(Cr)是强碳化物形成元素,可以在钢中形成多种形式的碳化物,可以有效提高第二相强化作用,有利于实现钢的强度指标。

5) 镍(Ni)属于非碳化物形成元素,可以无限固溶于奥氏体中,具有增大过冷奥氏体稳定性,推迟钢的中温转变,增强钢的淬透性和低温韧性的作用,是保证 40CrNi2Mo 材料低温韧性的关键元素,应尽可能提高其在钢中的含量水平。

6) 钼(Mo)属于碳化物形成元素,可以在马氏体回火过程中离位析出细小弥散的碳化物(MoC),显著提高钢的强硬度水平,同时可以起到抑制钢的回火脆性的作用。

1.2 锻造工艺的策划

锻造过程是保证锻件力学性能和探伤要求得以实现的重要过程,需要对锻造余量、锻造成形方式、锻造比大小、锻造火次安排、每个火次加热温度和保温时间、锻后冷却方式等诸多方面进行策划,只有经过严密的策划,才能保证锻造成形后的锻件,经后续预备处理和性能处理之后,可以实现预定的力学性能指标和探伤要求。

水下阀杆作为支持阀门动作的关键部件,需要采取措施来保证其内部组织均匀性和材料的致密性,以提高其力学性能。锻拔锻造作为保证锻件力学性能的重要手段^[12],在阀杆锻造过程中,采用至少两次锻拔锻造,保证每次锻拔过程的锻粗/拔长比为 2.0~2.3。考虑到产品取样检测位置(R/2)和变截面的外形特点,锻件应留有足够的性能热处理前的粗车余量,保证经粗车出外形后再装炉进行性能处理。从产品尺寸和形状来看,该产品属于带台阶的细长轴类锻件,考虑到台阶尺寸较小,锻件可以采用不出形锻造的方式成形,以提高锻造生产效率,降低不必要的锻造难度,减少锻造火次。综合以上分析,结合产品重量,可以按照一至两个火次完成锻造来策划,根据李科元^[13]的研究,初始加热温度控制在 $(1\ 200 \pm 20)^\circ\text{C}$,保温时间根据坯料截面尺寸,结合装炉的坯料吨位,综合确定,保证坯料加热充分,兼顾晶粒细化要求,及时出炉锻造。根据 40CrNi2Mo 材料合金含量水平和锻件尺寸,锻后采用缓冷的方式,以降低开裂风险,在缓冷至 $(600\sim 700)^\circ\text{C}$ 时及时入预备热处理炉,进行退火处理。

1.3 热处理工艺的策划

根据前述分析,水下阀杆锻件的热处理分两步进行,第一步是锻后的缓冷和退火处理,其目的在于消除锻造应力,将锻造状态的组织重新进行完全奥氏体化,然后随炉缓冷,以获得较为均匀的平衡组织,截断铸态和锻造态组织遗传的路线,为后续性能热处理做好充分的准备。之所以选择退火,没有采用正火处理,主要基于两个原因:1) 40CrNi2Mo 钢作为中碳合金钢材料,其碳含量在中碳范围,合金元素总含量处于较高水平(按照目标化学成分计质量分数为 2.97%),正火处理时,即使采用空冷也会使得阀杆锻件发生贝氏体甚至马氏体转变,表面硬度处于较高水平,不利于后续的淬火前粗加工进行;2) 采用锻后退火处理,让阀杆锻件在奥氏体化之后缓慢冷却,在扩散过程中完成奥氏体向珠光体+铁素体的转变,有利于降低阀杆锻件内部的偏析水平。在中碳钢锻件中,其锻后组织往往存在魏氏体组织,晶粒粗大且不均匀,同时伴生着沿锻造主变形方向形成的带状组织,通过完全退火处理,组织发生重结晶,可以有效细化晶粒,使锻件内部组织更加均匀,改善带状组织分布形态,消除内应力,降低锻件表面硬度,为后续粗加工和性能热处理做好准备。综上所述,最终确定阀杆锻件在锻后采用 910°C 奥氏体化+缓冷+ 650°C 等温的完全退火处理。第二步是为了实现产品的力学性能而进行的性能热处理,水下阀杆锻件要求具有较高的强度水平(125 k 级)和较好的低温冲击韧性,因此,应尽可能采用适宜的奥氏体化温度、冷却方式和合理的回火温度。

1.4 鉴定试块(QTC)的制作和检测

根据以上分析和策划,我们选用(0.41C-0.24Si-0.77Mn-0.89Cr-1.81Ni-0.25Mo)的精炼钢锭材料,经一次开坯为 $300\text{ mm} \times 300\text{ mm}$ 坯料后下料,控制拔长锻造比(两次拔长比之和)为 4.5:1,锻造出与阀杆产品相近截面的鉴定试块(QTC),按照表 3 所示方案完成预备和性能热处理,依据客户规定要求,从 R/2 处取样检测拉伸性能、冲击性能、硬度,其结果见表 4。

从表 3 和表 4 可以看出,在原材料和锻造过程相同的情况下,方案 1 采用常规奥氏体化温度,采用聚乙烯醇水溶液进行淬火,控制回火后硬度在中限水平时,QTC-1 屈服强度略高于技术要求的 860 MPa,冲击韧性较好;方案 2 采用较高的奥氏体

表3 鉴定试块(QTC)的热处理方案
Table 3 Heat treatment schemes for QTCs

热处理方案	试块编号	奥氏体化温度/℃	淬火介质	回火温度/℃
方案1	QTC-1	870~880	聚乙烯醇水溶液	620~630
方案2	QTC-2	890~900	聚乙烯醇水溶液	630~640
方案3	QTC-3	890~900	水+聚乙烯醇水溶液	620~630

表4 鉴定试块(QTC)的热处理参数和检测结果
Table 4 Heat treatment parameters and test results for QTCs

热处理方案	试块编号	Rp _{0.2} /MPa	Rm/MPa	A/%	Z/%	硬度(HBW)	Kv(-29℃)/J
方案1	QTC-1	900	1040	19.0	64.0	343	84.2, 86.4, 79.0
方案2	QTC-2	859	976	19.0	57.0	305	92.8, 88.5, 84.2
方案3	QTC-3	911	1050	19.5	60.0	330	100.3, 99.3, 98.2

化温度,与方案1相同,只采用聚稀乙醇水溶液进行淬火,然后采用较高的回火温度,QTC-2抗拉强度和硬度均低于技术要求,冲击韧性略好于QTC-1;方案3采用与方案2相同的奥氏体化温度,淬火时,采用水冷+聚乙烯醇水溶液冷却的双介质淬火的方式,与方案2相比,适当降低回火温度,QTC-3的强度水平比QTC-1要高,硬度略低于QTC-1,冲击韧性好于QTC-1和QTC-2,各项指标均满足技术要求。这主要是在较高奥氏体化温度下,钢中的合金元素可以更加充分地融入奥氏体中,淬火时的过冷度更大,奥氏体的稳定性进一步提高。淬火时,采用水+聚乙烯醇水溶双介质淬火,在高温阶段,可以有效保证更高的冷却速度,促使等温转变曲线向右移动,有效避开中温转变区域^[13],如图2所示,这样可以有效提高其淬透性。在低温阶段则可以获得相对安全的冷却速度,降低淬火开裂风险。因此,最终确定批量生产的水下阀杆锻件采用方案3进行性能热处理。

2 水下阀杆锻件的批量制作和取样检测结果

实际上,对水下油气开采设备用锻件,DNV-RP-0034—2022标准给出了详细的技术和质量管控要求,包括原材料冶炼方式、化学成分特别是有害元素水平管控、锻造成形过程、热处理过程及取样检测等诸多方面,事关锻件力学性能和内部质量的许多因素,都需要在实际生产过程中进行管控,可供实际生产过程借鉴。

最终,水下阀杆锻件的工艺流程为:钢锭冶炼

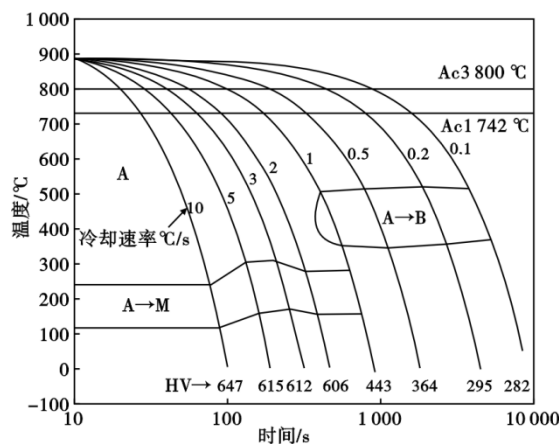


图2 (0.41C-0.25Si-0.64Mn-0.75Cr-1.38Ni-0.17Mo-0.10Cu-0.02Al)材料的连续冷却曲线

Fig. 2 CCT diagram of the steel with composition (0.41C-0.25Si-0.64Mn-0.75Cr-1.38Ni-0.17Mo-0.10Cu-0.02Al)

和浇铸→热送开坯→开坯缓冷→坯料检尺和探伤→坯料检测→锻件下料→锻造→锻后缓冷+完全退火→粗车→超声波检测(UT)→淬火回火(QT)→取样检测→精车→无损检测(UT+MT)→终检→包装发货。

2.1 锻件下料和锻造

采用经验证合格的钢锭材料,开坯为300 mm×300 mm的坯料。坯料缓冷出炉后,检测横截面低倍组织。然后按照预定重量进行水下阀杆锻件的下料。作为轴类锻件,我们控制阀杆锻件的拔长锻造比(两次拔长比之和)为4.5:1,根据李科元^[13]的研究,控制坯料加热温度为1 200℃±20℃,终锻温度≥900℃。

2.2 锻件的性能热处理

完成预备处理的水下阀杆锻件,经粗车后沿外圆和轴向两个方向进行超声波检测(UT),其底波均匀,可探性很好,未发现超标缺陷。锻件装炉后采用如图3所示工艺进行淬火回火处理。

2.3 水下阀杆锻件本体取样检测的力学性能

调质完成的阀杆锻件,从R/2处取样检测轴向力学性能,其结果见表5。从最终检测结果可以看出,按照策划的工艺进行制作的阀杆锻件,其本体拉伸性能合格,低温冲击性能优异(一组三个试样冲击功均值为71.8 J),完全满足产品的技术要求。其本体取样检测的晶粒度均匀细小,达到8.0级,显微组织呈现均匀的回火索氏体,如图4所示。

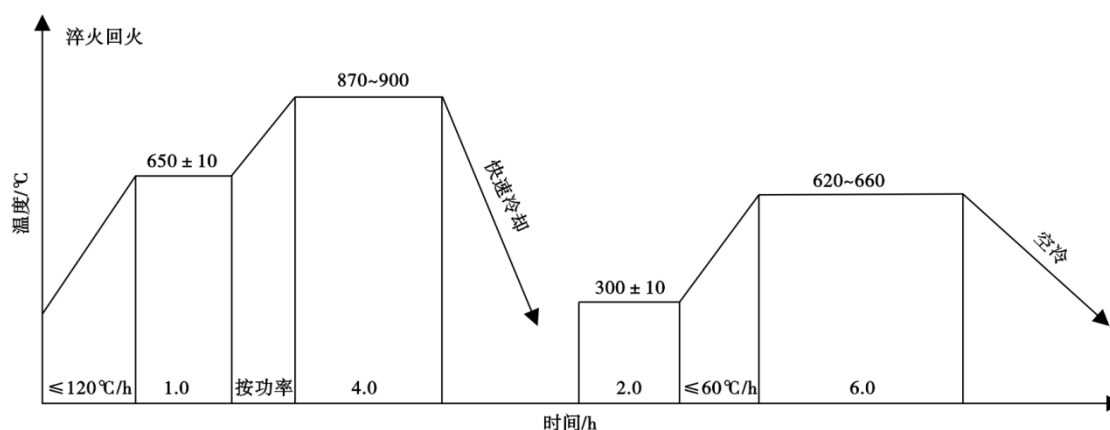


图3 水下阀杆40CrNi2Mo锻件淬火回火处理工艺

Fig. 3 Quenching and tempering processes of 40CrNi2Mo subsea valve stem

表5 40CrNi2Mo 阀杆本体力学性能检测结果

Table 5 Mechanical properties test results of 40CrNi2Mo valve stem body

屈服强度 $R_{p0.2}$ /MPa	抗拉强度 R_m /MPa	伸长率 A /%	断面收缩率 Z /%	冲击功 $K_v(-29^\circ\text{C})$ /J	硬度 (HBW)
950	1 080	19.5	62.0	70.8, 71.8, 72.8	331

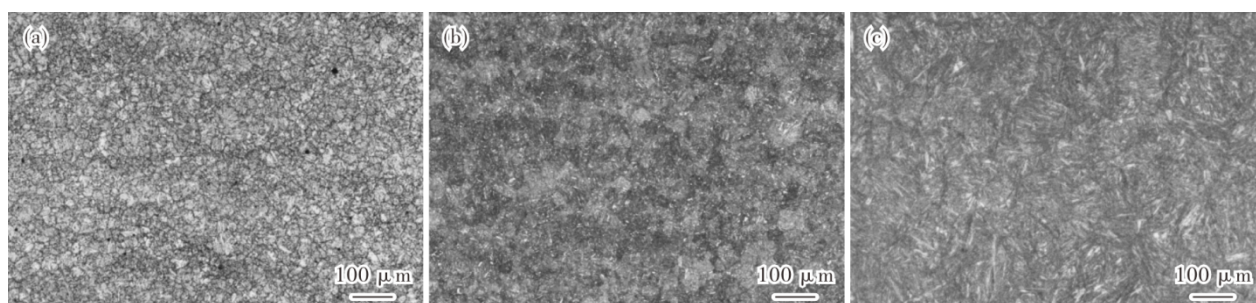


图4 40CrNi2Mo 阀杆本体的晶粒度和显微组织:(a)晶粒度,(b)(c)显微组织

Fig. 4 Grain size and microstructures of 40CrNi2Mo valve stem body : (a)grain size, (b)(c)microstructures

3 结论

1)结合各元素在钢中的作用和 underwater 阀杆锻件的力学性能特点,合理控制40CrNi2Mo钢中成分,主要化学成分(质量分数)目标值为0.42%C,0.20%Si,0.78%Mn,0.85%Cr,1.86%Ni,0.26%Mo,0.013%P,0.001%S,有利于保证水下阀杆锻件综合力学性能的实现;

2)控制拔长比为4.5:1,锻后经910℃完全退火+(890~900)℃双介质淬火+(620~630)℃高温回火处理,水下阀杆锻件本体的力学性能为:屈服强度为950 MPa,抗拉强度为1 080 MPa,伸长率为19.5%,断面收缩率为62.0%,-29℃冲击吸收功均值为71.8 J,产品表面硬度331HBW,完全满足技术要求。

参考文献

- [1] 王小龙. 海洋油气开采用深水球阀关键技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2018.
- [2] 石磊, 琚选择, 张飞, 等. 水下阀门研制及工程应用[J]. 阀门, 2019(1): 24-27.
- [3] 王成林, 王勇澎, 牛志强, 等. 回火温度对40CrNi2Mo钢力学性能和干摩擦性能的影响[J]. 材料热处理学报, 2020, 41(4): 75-82.
- [4] 穆蕾雅, 陈炜, 王思倩, 等. 40CrNi2Mo钢阶梯轴残余应力的数值模拟[J]. 热处理, 2019, 34(6): 21-24.
- [5] 曹国珍, 郑泽花, 周水波. 热处理工艺对40CrNi2Mo钢性能的影响[J]. 热加工工艺, 2013, 42(22): 170-172+175.
- [6] 廖庚峰, 李丰, 胡立嵩, 等. 4340钢与40CrNiMo钢的热处理特点[J]. 热处理技术与装备, 2023, 44(5): 5-9.
- [7] G. Y. Lai, W. E. Wood, 马柏生. 4340钢的奥氏体化温度对其淬火态显微组织与机械性能的影响[J]. 兵器材料与力学, 1981, 4(S1): 62-71.
- [8] 潘权文, 颜莹, 李小武, 等. 热处理对双真空冶炼 AISI 4340

- 钢显微组织和拉伸性能的影响[J]. 材料热处理学报, 2021, 42(4): 87-95.
- [9] 赵洪壮, Young-kook LEE, 刘相华, 等. AISI 4340 钢马氏体相变的研究[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2006, 27(6): 650-653.
- [10] 马 涛, 张肖飞, 华晓春, 等. AISI4340 高强钢在含氧和/或 Cl⁻ 高温水中的应力腐蚀行为[J]. 机械工程材料, 2021, 45(2): 15-19+60.
- [11] 张世英. 40CrNi2Mo 钢低温力学性能的研究[D]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2009.
- [12] 尚贺军, 臧 超, 张 鑫, 等. 高质量低合金高强度板类钢锻件及其制备方法: CN115595506B[P]. 2024-04-09.
- [13] 李科元. 合金结构钢(40CrNiMo)热变形行为及热处理工艺研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2018.