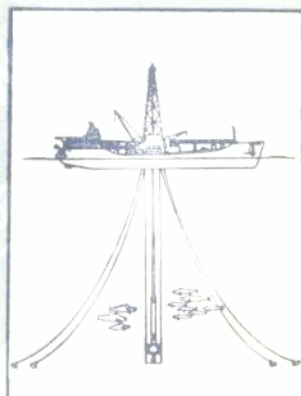
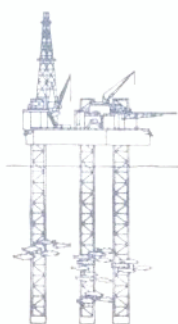
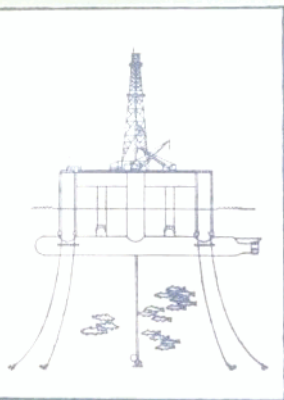


海上采油 平台用钢



冶金工业出版社

前 言

我国具有丰富的海洋石油天然气资源，目前业已探明的油、气储量已达可观数字。海上钻、采装置是在风、浪、冰、温度、载荷的复杂作用下工作的，对钢材的要求远比陆上采油装置严苛。所用钢材不仅要具有高强度、高韧性、良好的焊接性，还要能耐低温、耐腐蚀和抗疲劳等性能。为了尽快使海油平台用钢立足国内，并逐步打入国外市场，我们从近几年的国外期刊、国际会议文集中选编了这本文集，以供有关科研、设计、生产部门参考。在本书编译过程中，得到冶金部钢铁生产技术司康元秉、谢仕柜、李廷钊，冶金部钢铁研究总院刘嘉禾等同志的大力支持和指导，在此谨表谢意。

编译者

一九八七年十二月

本书中一些常用单位的换算

	公 制	英 制	国际单位制
长度	1 毫米 25.4毫米	3.94×10^{-2} 英寸 1 英寸	1 毫米 25.4毫米
应力	1 公斤/毫米 ² 0.102 公斤/毫米 ² 0.703 公斤/毫米 ²	1.42 千磅/英寸 ² 0.145 千磅/英寸 ² 1 千磅/英寸 ²	9.81 兆帕 1 兆帕 6.89 兆帕
能量	1 公斤·米 0.102 公斤·米 0.138 公斤·米	7.23 英尺·磅 0.738 英尺·磅 1 英尺·磅	9.81 焦耳 1 焦耳 1.356 焦耳

目 录

1. 海上采油平台结构用钢	1
2. 海洋结构用材料的选择	27
3. 关于海洋钢结构材料选择的考虑	55
4. 海洋结构用可焊接钢的发展趋势	98
5. 抗层状撕裂钢	110
6. 海洋结构用抗层状撕裂钢板	145
7. 影响钢的层状撕裂敏感性的材料因素	167
8. NK-Z 钢板	195
9. 60公斤/毫米 ² 级抗焊接破裂调质高强度钢 RIVERACE 60A、62A 的各项性能	218
10. 80公斤/毫米 ² 级低裂纹敏感性钢板K TEN80CF	242
11. 自升式钻井平台齿条用80公斤/毫米 ² 级特厚钢板	251
12. 80公斤/毫米 ² 级高强度厚壁铸钢的研制	278
13. 钒钢——海洋结构	295
14. 断裂韧性试验中“突进”意义的某些初步发现	300
15. 焊接接头疲劳性能的改善	323
16. 高强度钢铸造管接头和焊接管接头的评价与比较 ——预制大腿组块系统适用性的研究	363

1. 海上采油平台结构用钢

田亥 张荣久 喻肇坤

一、海上采油的发展

海上采油开始于19世纪90年代, 美国和俄国于此时分别在加利福尼亚州采用填石法和在巴库采用木制栈桥人工岛法进行小规模海上采油。1940年以后开始大型化, 这时的人工岛设有宿舍、学校和医院, 岛上可以行车, 已成为一个能居住4000人的“小城堡”。但是, 这个时期的采油仅限于内海浅水水域。1947年美国在墨西哥湾水深6米的海域建造了钢制采油平台, 开始了使用钢制平台进行海上采油的时代^[1]。

1954年, 奥德科 (Odeco) 公司发现了谢尔 (Shell) 大油田, 开始了大规模的海上采油。进入60年代以后, 发达国家进行大规模海洋开发, 海上采油工程得到迅速发展, 海上采油平台的座数也逐年增加。1981年全世界海上勘探平台为513台 (表1—1), 生产平台约在500座以上, 主要分布在墨西哥湾、阿拉伯湾和英国北海等地^[2, 27]。

表1—1 海上采油平台的发展情况

年 代	1958	1965	1970	1975	1979	1981
台 数	约10多台	约70台	约150台	270台	398台	513台

随着石油需要量的增长, 海上采油量占总采油量的比例愈来愈高。例如, 1975年海上采油 (包括天然气) 量占15%, 1980年达22%, 1990年将增长到30%, 进入21世纪后, 将有50%石油和天然气来自海上。预计1984年以后, 全世界每年将增建勘探平台40~50台, 生产平台190座, 总用钢量达347万吨, 总投资达222亿美元^[2, 6, 27] (见图1—1)。

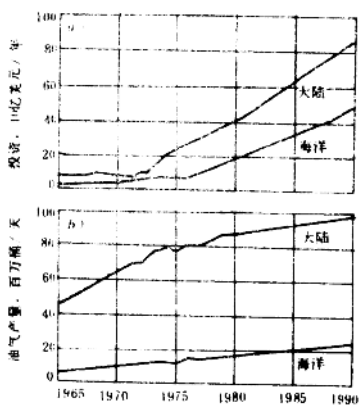


图 1-1

a — 海洋投资; b — 油气产量

二、海上采油平台的种类

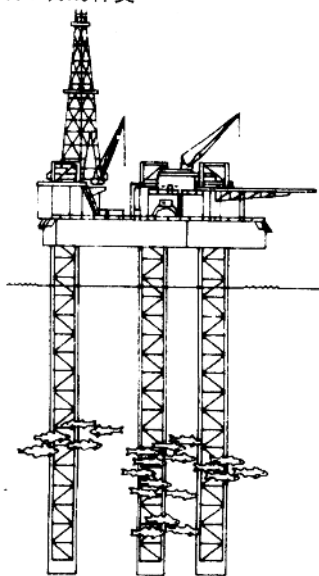


图 1-2 自升式采油平台

根据功能，海上采油平台可以分为勘探平台和生产平台；按照平台的形式又可以分为可动式和固定式两类。一般说来，可动式多为勘探平台，固定式为生产平台。

勘探平台（也称为钻井装置）有以下四种类型：

(1) 自升式（图 1—2）。约有一半以上的可动式勘探平台是自升式的。英国北海油田最大的一个自升式平台的工作水深达120米，大腿长170 米，甲板尺寸为 61×65 米。平台净重达4300吨^[3]。

(2) 半潜式。它用于深水勘探，工作甲板固定在圆柱桩上，柱桩下端带有不同形式的浮桶（图 1—3）。一般工作水深为200 米，在不太恶劣的环境下工作水深可达500 米，可经受160公里/小时的

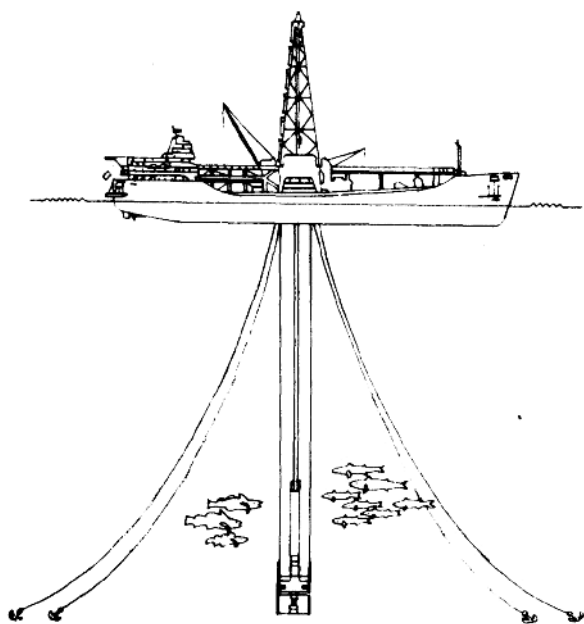


图 1—3 半潜式采油平台

巨风和周期17~18秒、浪高30米的巨浪的冲击。例如英国北海油田艾克斯 (Aker's) H3 半潜式钻井装置, 其甲板尺寸为 97×81 米, 甲板高37米, 工作水深330 米, 排水量为19000吨。

(3) 潜入式。它完全潜入海水, 此种钻井装置只适用于浅水水域。

(4) 钻探船和钻探驳船。

生产平台又可以分为导管架式 (或桩基式) 和重力式两类。前者为钢结构(图1—4), 按照结构特征又可分为桩式、桩基式、导管架式、混合式和塔式等 5 种类型。在工程中, 一般根据工作水深的差异采用不同的结构型式 [4、7、8、9、10]。

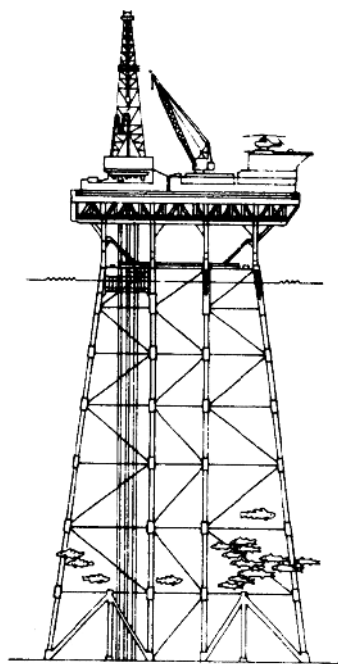


图 1—4 固定式采油平台

重力式生产平台多为钢筋混凝土结构。重力式生产平台的用钢量与导管架式大致相同。例如,水深140~150米底座式钢筋混凝土采油平台需用混凝土72600立方米,钢筋1.08万吨,钢材2万吨^[5.8]。

三、海上采油平台结构用钢

建造和安装海上采油平台耗资巨大,其技术的复杂程度可与登月相比,它要在苛刻恶劣的环境里长期服役,并经受低温、飓风和巨浪的作用。例如英国北海海域,最大浪高达30米,周期17~18秒,风速达200~250公里/小时。在3~4月最冷季节里,最低气温达-15℃。随着海上石油开发的进展,采油工程向深水发展,耗用的钢材数量也愈来愈多(图1—5)^[8.25]。

因此,为了保证这种巨型焊接钢结构在制造和使用时万无一失,避免恶性灾难事故的发生,对采油平台用钢性能要求特别严格,对钢材的选择要特别慎重。

(一) 采油平台用钢的选材原则

为了保证建造的采油平台符合经济、安全原则,在选用钢材时要综合考虑下列几个因素^[26]:

- (1) 结构类型及受力情况;
- (2) 环境条件,包括水深、最大浪高、飓风、暴风、潮汐、海水及空气的温度、海水含盐量、海洋生物、土壤条件、浮冰和地震等;
- (3) 使用性能(疲劳、可焊性、破断抗力及强度);
- (4) 生产工艺(保证高的纯净度及满意的综合性能);
- (5) 制造工艺;
- (6) 经济成本。

(二) 对采油平台用钢的性能要求

(1) 强度:为了减少壁厚和整个钢结构的重量,以及为了降低焊接制造、安装、运输的成本,应尽量采用高强度钢。一般采用微合金化的细晶粒钢,通过控制轧制、正火或调质处理得到所需的强度。控制轧制钢板的厚度限于25毫米以下,不能进行热成形,以及

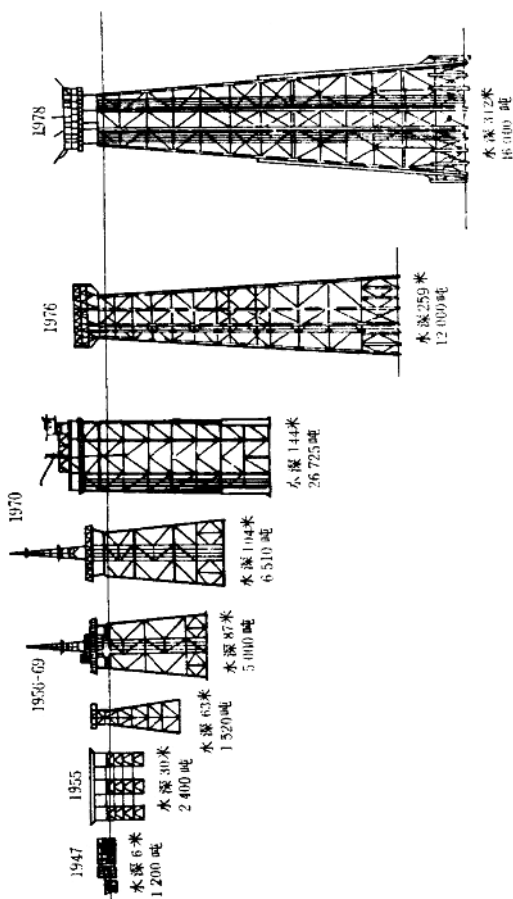


图 1--5 采油平台用钢量随工作水深变化的变化

终轧温度低,使MnS拉长变形,对层状撕裂的敏感性提高,这些都使控制轧制钢板在采油平台中的应用受到限制。目前大量采用的是经正火处理的 $\sigma_s \geq 367$ 牛顿/毫米² (36公斤/毫米²)级的高强度低合金钢。高强度钢及其焊缝的疲劳强度不高于普通强度钢,因此,限制了它在固定式平台中承受疲劳载荷的构件上的应用。但是,即使在那些部位,目前它的应用也在逐渐扩大。而对自升式和半潜式以及固定式平台的上部结构,则更多地采用正火或调质的 $\sigma_s \geq 390 \sim 690$ 牛顿/毫米²的高强度钢^[26-27]。

(2) 可焊性:采油平台用钢为大型焊接结构用钢,属于高强度低合金钢范畴,良好的可焊性是它的重要标志。要求这类钢的焊接工艺简便易行,焊接裂纹敏感性低,焊接结构使用安全可靠。为了保证焊缝和焊接热影响区具有尽可能低的氢含量,要求对焊接材料的烘烤和焊接工艺(预热温度等)严加控制。熔合线和热影响区的韧性取决于焊缝和母材的化学成分及焊接热循环。为了得到最佳韧性,热影响区800~500℃的冷却时间要限于10~15秒。考虑到应力腐蚀裂纹的危险,还规定热影响区最大硬度 $HV_{10} \leq 325$ 。对壁厚大于40毫米的节点要进行焊后热处理,以减少残余应力,改善韧性和提高疲劳强度。为了解决在恶劣环境下焊接施工及大线能量焊接带来的氢裂纹和热影响区韧性下降等问题,近年来在欧洲和日本还发展了焊接无裂纹钢(CF-50、CF-60和CF-80)、大线能量焊接钢(最大线能量可达70~80千焦/毫米)、加0.03Ti的43D(E)钢及含Ti+B的焊丝材料^[15-16]。其中CF-钢在北海采油平台建造中已获得较多的应用^[13-14,26-27]。

(3) 韧性:不可避免的焊接制造缺陷和可能出现的疲劳裂纹是造成脆性破坏的根源。为了阻止裂纹的扩展,避免出现恶性灾难事故,要求采油平台用钢具有优越的低温韧性和抗脆断能力。目前多采用降低碳、硫含量、提高Mn/C、微合金化和热处理等手段来提高韧性。例如,Mn/C=19的TRC36钢的纵向 $vE-40^\circ C = 270$ 焦耳,而Mn/C=9的EH36钢仅为100焦耳(图1—6)。

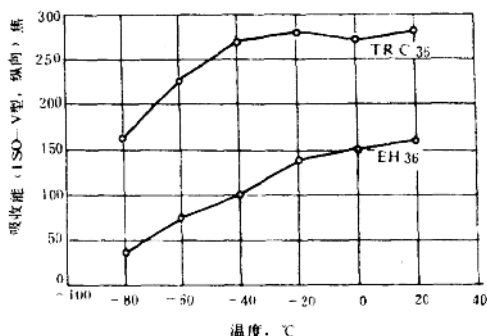


图 1—6 Mn/C 对高强度钢吸收能的影响

钢号	板厚, 毫米	屈服强度 牛顿/毫米 ²	化学成分, %				Mn/C
			C	Mn	Nb	S	
EH 36	25	396	0.16	1.43	0.03	0.009	9
TRC 36	30	386	0.09	1.70	0.04	0.007	19

近十年来, 英国在建造采油平台的过程中开始应用COD试验, 但是, COD 试验并不用于常规质量检验和交货检验, 而是用于评断具有制造缺陷的构件是否报废。例如, BS 4360 50D50~70毫米钢板, 采用 SD 3 焊丝或 Ti + B 焊丝进行埋弧焊, 要求焊态的焊缝金属 $COD_{-10^{\circ}C} > 0.5$ 毫米, 经焊后热处理的焊缝 $COD_{-10^{\circ}C} \geq 1.5$ 毫米 [2, 26, 27]。

(4) 抗层状撕裂性能: 过去一直把焊接结构中出现的层状撕裂现象归因于焊接冷裂纹。对这种撕裂破坏, 虽经采用各种措施予以补救, 例如改善接头设计和严格控制焊接工艺, 但终不能完全避免。七十年代初国际焊接学会 (IIW) 组织了许多国家对层状撕裂破坏事故进行了调查和研究, 历经 5~6 年, 已基本将这一破坏事故查明。研究结果表明, 除接头拘束应力、焊接次序、钢中氢含量等因素外, 钢中较高的硫含量及在热轧过程中拉长变形的 MnS 是造成层

状撕裂破坏的主要原因。各种再现试验和破坏构件的解剖结果表明,采用钢板厚度方向断面收缩率(ψ_z)值能正确地评定钢材抗层状撕裂性能的优劣。这种方法既简单又有效。根据接头拘束程度的大小,要求相应的 ψ_z 值,即 $\psi_z \geq 15$ 、25、35%三级。生产抗层状撕裂钢的关键在于:降低钢中硫含量、硫化物形态处理、提高钢的纯净度和降低钢中的氢含量。国外生产抗层状撕裂钢一般采用铁(钢)水炉外脱硫——加Ca、Ti、Zr或REM进行硫化物形态处理——钢水真空处理(例如RH和DH等)。这种工艺流程简便经济。也有采用SKF等炉外精炼法进行冶炼的,但钢的成本大为提高。图1—7示出S含量及Ca处理对StE355钢厚度方向断面收缩率的影响。海上采油平台结构中的K、X、Y、T型管接头(节点),结构复杂,厚度方向的焊接残余应力高达正常应力的8~12倍^[17],为避免该部位产生层状撕裂破坏,必须采用抗层状撕裂钢板^[3,7]。例如英国北海福蒂斯(Forties)油田,对水深135米的海上采油平台的节点,采用了 $\sigma_s \geq 345$ 牛顿/毫米²级的高强度抗层状撕裂钢,钢的化学成分为:0.13~0.15% C, 0.43~0.51% Si, 1.40~1.50% Mn, 0.005~0.007% P, 0.001~0.004% S, 0.13~0.16% Ca, 0.002

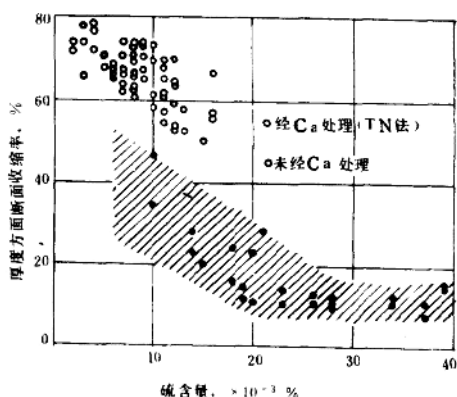


图1—7 StE355钢S含量和断面收缩率的关系

$\sim 0.004\% \text{Nb}$, $0.018 \sim 0.047\% \text{Al}$, $C_{eq} = 0.42 \sim 0.45\%$ 。钢板厚度 $30 \sim 125$ 毫米, 力学性能为: $\sigma_s = 358 \sim 447$ 牛顿/毫米², $\sigma_b = 517 \sim 572$ 牛顿/毫米², $vE_{20^\circ\text{C}} = 160 \sim 254$ 焦耳。厚度方向性能为: $c_s = 338 \sim 429$ 牛顿/毫米², $\sigma_b = 452 \sim 583$ 牛顿/毫米², $\psi_z = 36 \sim 73\%$, $\delta_z = 19 \sim 38\%$ ^[13, 27, 28]。

(5) 疲劳性能: 海上采油平台常年受到飓风和海浪带来的疲劳负荷的作用, 而海水腐蚀更加速了疲劳破坏。因此, 为了保证长期的安全使用, 许多国家对 K、Y、X、T 型管接头构件的海水腐蚀疲劳性能进行了大量的研究和试验。高强度钢的焊缝疲劳性能过低, 是目前影响高强度钢大量用于采油平台的一个重要原因。目前国外正在致力于这方面的研究, 以期改善焊接熔合线的疲劳强度。试验结果表明, 汽焊后再经热处理, 焊缝疲劳强度可恢复到母材的 80%。采用喷丸处理也是一个有效的方法。焊缝缝边处的微小缺陷(如未焊透、咬边等)及在此区域出现的应力集中大大地降低焊缝的疲劳强度。此外, 七十年代初以来, 国外发展了铸钢管节点, 目前英国钢铁公司和西德埃斯特林-赫施公司都能生产重量大于 30 吨的铸钢节点。这种铸钢节点除了提高疲劳强度和韧性、减少应力腐蚀破坏倾向外, 还可降低制造成本, 目前已用于海上采油平台 ^[13, 26, 27]。

(6) 经济性: 建造海上采油平台这样的巨型钢结构, 耗用钢材的数量为数万吨 ^[13, 26]。平台用钢的成本约占平台总投资的 6%, 但建造采油平台耗资巨大, 一个采油平台的建造成本, 小者 2 千万美元, 大者几亿、十几亿美元。因此, 应正确选用钢材, 采用合理生产和制造工艺, 以降低钢材成本, 做到“价廉物美”。

(三) 采油平台用钢

在采油平台钢结构中, 大量使用的钢材是 C-Mn 钢和 C-Mn 细晶粒钢以及低合金高强度钢。在大腿弦翼与支撑联结处的应力高度集中的节点上, 要使用具有特殊性能的抗层状撕裂钢(即 Z 向钢)。此外, 在重力式钢筋混凝土平台中还要使用高强度钢筋和预应力钢筋。

(1) 符合各国船舶标准的优质碳素钢和高强度低合金钢。

按照挪威DnV标准分类, C-Mn钢分为 A、B、C、D、E 四个级别。其抗拉强度为400~500 牛顿/毫米², 夏比吸收能最小为27焦耳, 试验温度: A级不要求冲击试验, B、W级为0℃, D级为-20℃, E级为-40℃。其详细规定如表1—2所示。

此外, DnV标准还规定了不同强度级别的高强度低合金钢。其最低屈服强度分别为265、315、355和390 牛顿/毫米² (表1—3)。

与挪威DnV标准相应的还有下列各国船用标准, 其中有关规定, 大同小异, 差别不大:

LR (Lloyd's Register of Shipping) 英国劳埃德标准;

ABS (American Bureau of Shipping) 美国造船局标准;

BV (Bureau Veritas) 法国船级社标准;

GL (Germanischer Lloyd) 西德劳埃德标准;

DnV (Det norske Veritas) 挪威船级社标准;

RI (Registro Italiano) 意大利船级社标准;

API (American Petroleum Institute) 美国石油协会标准;

NK日本海事协会标准。

(2) 高强度钢

尽管焊接结构中高强度低合金钢的疲劳强度很少超过普通强度钢, 但是, 近年来它在整个采油平台用钢中的比例还是愈来愈大。采油平台常用的一些高强度钢的化学成分和力学性能列于表1—4 [11~14, 29]。

(3) 抗层状撕裂钢 (即Z向钢)

所谓抗层状撕裂钢, 就是沿钢板厚度方向作拉伸试验时, 其断面收缩率必须达到一定的数值。根据法国BV、英国LR、西德蒂森 (Thyssen) 钢公司标准和日本NK标准, Z向钢板分为三个级别, 各级别钢板的含硫量及沿厚度方向的断面收缩率应符合表1—5的规定 [18~20, 24]。

(4) 钢筋

英国北海油田的钢筋混凝土采油平台采用了高强度钢筋, 钢筋

表 1—2 普通强度船体钢

级 别	NVA	NVB (W)	NVD		NVE
板厚, 毫米	≤12.5, 12.5/50	≤50	≤25	25/35 35/50	≤50
脱氧	任何方式脱氧	任何方式脱氧	任何方式脱氧	镇静A1处理 晶粒细化	镇静A1处理 晶粒细化
热处理	—	—	—	—	正 火
化学成分 (钢包), %					
C	≤0.23	≤0.21	≤0.21	≤0.21	≤0.18
Mn	>2.5 × C	>0.80	0.60/1.40	0.70/1.50	0.70/1.50
Si	≤0.35	≤0.35	≤0.35	0.10/0.35	0.10/0.35
P	≤0.04	≤0.04	≤0.04	≤0.04	≤0.04
S	≤0.04	≤0.04	≤0.04	≤0.04	≤0.04
Al 固	—	—	—	>0.02	>0.02
强度, 牛顿/毫米; 屈服强度, 牛顿/毫米; 伸长率, %			400 ~ 490 >235 >22		
冲击温度, °C 吸收功, 焦耳		0 >27		- 20 > 28	- 40 >27

表 1—3 高强度低合金钢 (DnV)

化学成分 %

C _{max}	Si	Mn	P _{max}	S _{max}	C _{Umax}	Cr _{max}	Ni _{max}	Mo _{max}	Al _{max}	Nb _{max}	V _{max}
0.18	0.10/0.50	0.9/1.6	0.04	0.04	0.35	0.20	0.40	0.08	0.08	0.05	0.10
力学性能											
类别	A 27	D 27	E 27	A 32	D 32	E 32	A 36	D 36	E 36	A 40	D 40 E 40
脱氧	半镇静 或镇静	半镇静 或镇静	镇静	镇静	镇静	镇静	镇静	镇静	镇静	镇静	镇静
晶粒细化	—	—	V	V	V	V	V	V	V	V	V
强度, 牛/厘米 ²	400 ~ 510			440 ~ 590			490 ~ 620			530 ~ 650	
屈服强度, 牛/厘米 ²	>265			>315			>355			>390	
伸长率, % L ₀ = 5.65 $\sqrt{A}$	>22			>22			>21			>20	
温度℃	—	-20 ~ -40	0 ~ -40	-20 ~ -40	0 ~ -40	-20 ~ -40	0 ~ -20	-40	0 ~ -20	-40	-40
冲击吸收功, 焦耳	—	>27	>20	>31	>22	>34	>24	>39	>26		
冲击方向	—	纵向	纵向	纵向	纵向	纵向	纵向	纵向	纵向	纵向	纵向