

高强耐热铝合金钻杆材料优选

梁 健^{1,2}, 尹 浩¹, 孙建华¹, 李亚红³, 王成彪², 张金昌¹

(1.中国地质科学院勘探技术研究所,河北 廊坊 065000; 2.中国地质大学(北京)工程技术学院,北京 100083;
3.哈尔滨中飞新技术股份有限公司,黑龙江 哈尔滨 150060)

摘要:铝合金钻杆的使用性能是制约深部钻探技术发展的“瓶颈”。本文综合考虑孔内工况因素和钻杆性能因素,以钻柱组合设计为基础准则,从特深孔钻探工程技术需求出发,开展了高强耐温铝合金钻杆材质选择和评价的试验研究。试验结果表明:2219 铝合金固溶时效制度分别为 535 °C/1 h、165 °C/20 h,2618 铝合金固溶时效制度分别为 530 °C/1 h、200 °C/20 h;2219 铝合金在高温长时间暴露后的室温力学性能优于 2618 铝合金,在高温瞬时条件下的力学性能劣于 2618 铝合金;2219 铝合金中含有 Zr,该元素在热暴露过程中起到减缓溶质扩散速率的作用,这对提高热暴露后的剩余强度是有利的。

关键词:特深孔;深部钻探;铝合金钻杆;热暴露;力学性能

中图分类号:P634 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-7428(2020)04-0065-07

Optimization of high strength and heat resistant aluminum alloy drill rod material

LIANG Jian^{1,2}, YIN Hao¹, SUN Jianhua¹, LI Yahong³,
WANG Chengbiao², ZHANG Jinchang¹

(1.*Institute of Exploration Techniques, CAGS, Langfang Hebei 065000, China;*

2.*School of Engineering and Technology, China University of Geosciences, Beijing 100083, China;*

3.*Harbin Zhongfei New Technology Co., Ltd., Harbin Heilongjiang 150060, China*)

Abstract: The performance of aluminum alloy drill rods is the bottleneck of the development of deep drilling technology. With the design of the drill string structure as the basis and in view of engineering requirements of ultra-deep hole drilling, the selection and evaluation of high strength and heat resistant aluminum alloy drill rod material were studied. The results showed that: the solution aging of 2219 aluminum alloy was 535°C/1h, 165°C/20 h, 2618 was 530°C/1h, 200°C/20h, respectively. The mechanical properties of 2219 aluminum alloy were better than 2618 aluminum alloy after long time heat exposure at ambient temperature and worse than 2618 aluminum alloy at transient high temperature. The element Zr in 2219 aluminum alloy can slow down the solute diffusion rate in the process of heat exposure, and it is beneficial to improve the residual strength after heat exposure.

Key words: ultra-deep hole; deep drilling; aluminum alloy drill rod; thermal exposure; mechanical property

0 引言

铝合金钻杆以其独特的优越性,即具有质量轻、比强度高、钻进深度大、所需能耗小等特点,已成为深井超深井钻柱设计的优选方案^[1-6]。与钢钻杆相

比,铝合金钻杆应用具有一系列的技术特点:当钻进同一深度时,可降低钻机和绞车能力的要求,减小整套设备体积大小、功率要求以及起下钻时间等;当井筒轴线偏离垂直线时,由于整体钻柱质量轻,钻杆对

收稿日期:2020-02-17 DOI:10.12143/j.tkgc.2020.04.010

基金项目:国家重点研发计划项目“5000 米智能地质钻探技术装备研发及应用示范”课题三“高性能薄壁绳索取心钻杆研制”(编号:2018YFC0603403);国家自然科学基金项目“科学超深井铝合金钻杆的腐蚀防护机制研究”(编号:41772390);中国地质调查局地质调查项目“深海钻探技术与工程支撑”(编号:DD20190585)

作者简介:梁健,男,汉族,1980 年生,高级工程师,在读博士,从事深地与深水钻探钻具研发和科研管理工作,河北省廊坊市金光道 77 号,liangjian_cniet@qq.com。

引用格式:梁健,尹浩,孙建华,等.高强耐热铝合金钻杆材料优选[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2020,47(4):65-71.

LIANG Jian, YIN Hao, SUN Jianhua, et al. Optimization of high strength and heat resistant aluminum alloy drill rod material[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2020,47(4):65-71.

井壁和套管的侧向压力小,管材磨损少;铝合金钻柱表面的液体阻力系数较钢钻柱低,可以减少钻柱部分的流体压力损失;当处理铝合金钻杆事故时,用一般牙轮钻头即可将井内铝合金钻柱“消灭掉”;同时,铝合金材料在 CO_2 、 H_2S 等腐蚀环境中的稳定性较佳^[7-10]。但随着钻深的不断增加、地温的持续升高,5000 m特深孔地质钻探孔底温度预计将达到 $150\text{ }^\circ\text{C}$ 左右(正常的地温梯度一般为 $3\text{ }^\circ\text{C}/100\text{ m}$),因铝合金材料在高温环境下具有力学性能衰减的特性,随着高温热暴露时间的增加,其强度、硬度随之不断降低^[11-13];同时,由于钻柱存在极限应用长度,当钻孔超过某一深度时,钻柱自重就能将孔口处附近钻杆拉断,因此,铝合金钻杆的使用性能将是制约深部钻探技术发展的“瓶颈”,开展耐高温铝合金钻杆材料的优化和选型迫在眉睫,以解决孔内高温带来的难度更大、要求更高的钻井难题。石油天然气工业用铝合金钻杆制定了其国际标准(ISO 15546:2011)^[14],对铝合金钻杆材料要求应符合表1的力学性能要求。本文综合考虑孔内工况因素和钻杆性能因素,以钻柱组合设计为基础准则,从特深孔地质钻探工程技术需求出发,开展了高强耐温铝合金钻杆材质选择和评价的试验研究。

表1 铝合金钻杆的材料要求^[14]

Table 1 Requirements for aluminum alloy drill pipe material

材料组号	合金系列	最小屈服强度/MPa	最小抗拉强度/MPa	最小伸长率/%	最高操作温度/ $^\circ\text{C}$	在3.5%氯化钠溶液中的最大腐蚀速率/ $[\text{g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}]$
I	Al-Cu-Mg	325	460	12	160	
II	Al-Zn-Mg	480	530	7	120	
III	Al-Cu-Mg-Si-Fe	340	410	8	220	
IV	Al-Zn-Mg	350	400	9	160	0.08

注:表中给出的合金力学性能的试验温度为 $21\text{ }^\circ\text{C}\pm 3\text{ }^\circ\text{C}$ 。允许采用其他铝合金系,只要购买方同意且该合金满足以上四组材料中任意一組的要求。制造厂应编制一个程序文件以证实规定的最高操作温度条件下的屈服强度达到规定的最小值。力学性能试验应根据ISO 6892(最小屈服强度为0.2%残余变形法)。用户应了解室温下的屈服强度在最高操作温度下暴露时间超过500 h时可能会降低30%以上。

1 管材因素对钻深的影响

1.1 管材强度因素

每种物质都有其自重的存在,钻杆也不例外。钻柱中越靠近地表的钻杆由于它所悬挂的钻杆比较

多,下部重力相对较大,当钻井超过某一深度时,钻柱自重就能将井口处附近钻杆拉断。因此,当钻深达到一定深度时,在钻柱提升或钻进过程中,由于管柱的重力将超过其自身的极限强度时,该深度我们将其定义可下深度。钻杆的可下深度计算如式(1)所示^[15]:

$$H = \frac{\sigma_t}{n(\gamma_{tp} - \gamma_{cp})} \quad (1)$$

式中: H ——钻杆的可下深度,m; σ_t ——钻杆的屈服强度,MPa; n ——强度安全系数; γ_{tp} ——钻杆的容重, N/m^3 ; γ_{cp} ——泥浆的容重, N/m^3 。

图1为单一规格尺寸钻杆的可下深度图。从图1中可以看出,随着泥浆密度的增大,各材质钻杆可下深度均有所提高,但与钢钻杆相比,铝合金钻杆可下深度提高较为明显,也就是说,铝合金钻杆可下深度受泥浆密度影响较大,即其浮力系数随泥浆密度变化明显,见图2;图1中数据同时表明,V-150钢钻杆最大可下深度不足万米,7E04铝合金钻杆在空

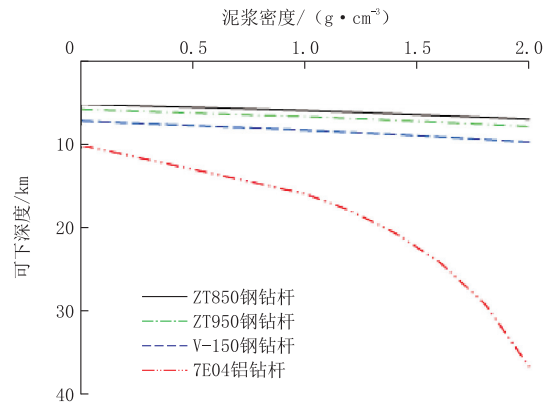
图1 单一规格钻杆的可下深度^[16]

Fig.1 Service depth of the single specification drill pipe

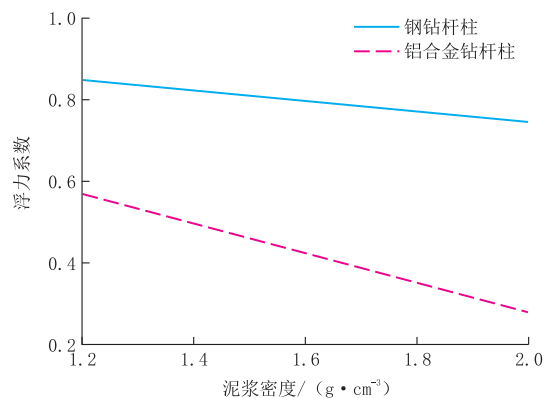
图2 不同材质钻杆柱浮力系数变化曲线^[16]

Fig.2 Buoyancy coefficient curve of the drill strings of different materials

气中的悬挂长度即可超过万米。因此,科学超深井钻柱全部使用同一规格尺寸钢钻杆不可实现,全部使用高强度 7 系铝合金钻杆理论上可以实现,但考虑到井内高温环境的影响,还需优选耐高温的铝合金钻杆,并开展钻柱组合设计研究。

1.2 管材耐热因素

目前,工业上应用的工程合金在 100 °C 以内时,时效铝合金具有最高的比强度。在 100 °C 以上的高温条件下,铝合金的力学性能迅速下降。从图 3 中曲线变化规律可以看出,铝合金钻杆在高温条件下具有机械性能衰减的特性,这是由于铝合金在高温长时间热暴露时,决定其强度的细小沉淀相的粗化引起的^[17],组织中的时效强化相将会不断地长大、粗化,时效相与基体之间的半共格关系也会逐渐丧失并产生过时效,从而使合金的强度和硬度明显降低。同时,王建华等^[11]对 2618 耐热铝合金的组织与力学性能进行了试验研究,研究结果表明:2618 合金在 150、200 及 250 °C 的热暴露环境下,随着高温热暴露时间的增加,铝合金试样的强度、硬度随之不断降低。

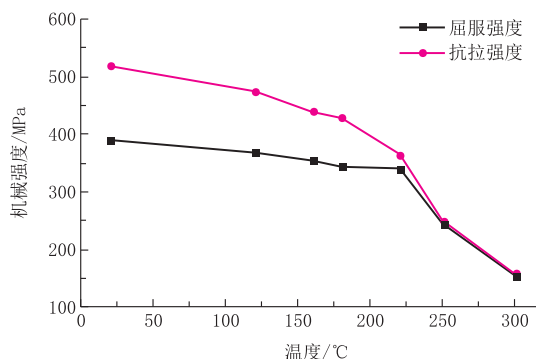


图 3 2024 铝合金管材热稳定特性曲线

Fig.3 Thermal stability curve of 2024 aluminum alloy pipe

我国“松科二井”超深井测井温度曲线见图 4,从图 4 中可看出,在该井井底 7000 m 的测井温度为 236 °C,远远超过了工程合金最高的比强度的使用最佳温度 100 °C。我们从表 1 可以推断,在钻井的上部使用高强度铝合金钻杆(其屈服强度为 480 MPa),在钻井的中下部使用耐温铝合金钻杆(其屈服强度为 340 MPa),也就是说,由于环境温度因素致使钻柱设计应考虑耐温铝合金材料的优选;与高强度铝合金钻杆相比,从表 1 中可知耐热铝钻杆的屈服强度整体下降 29.16 %,意味着温度因素致使铝钻杆钻深能力受到较大影响。

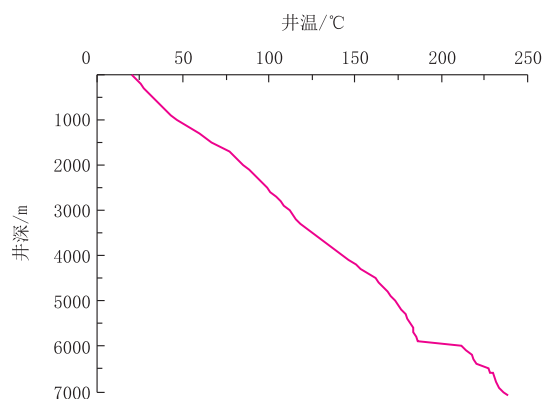


图 4 “松科二井”超深井测井温度曲线

Fig.4 Temperature logging curve of SK-2 ultra-deep well

1.3 钻柱组合设计方法

为使钻柱有更大的允许钻进深度和足够的安全系数,可采取改变钻柱组成的方法。深部钻探复合钻柱一般是由不同规格(上大下小)、同种规格不同壁厚(上厚下薄)、不同钢级(上高下低)以及不同材质(上钢下铝)的钻杆组成等。与单一规格尺寸的钻柱相比,复合钻柱结构具有较多的优点,其既能满足强度要求,又能减轻整个钻柱的重力,也可在现有钻机负荷能力下达到更大的钻深。作用于钻柱上的力较为复杂,如拉力、压力、弯曲力矩、扭矩等,但其中经常作用且数值较大的力为拉力。因此,在组合钻柱设计中,以拉伸计算为主,再通过一定的设计安全系数来考虑起下钻时的动载荷以及其它应力的复合作用。合理的钻柱设计,既要满足最基本的卡瓦挤毁设计系数和安全系数,又要给出足够的拉力余量的值^[18]。一般在钻柱设计中,最大允许静拉负荷取决于安全系数、最小的设计系数和拉力余量 3 个因素,然后从三者当中取最低的值作为最大允许静拉负荷。同时,对于铝合金钻杆来讲还应考虑井中的温度因素。

1.3.1 安全系数法

考虑起下钻时的动载及摩擦力,一般取一个安全系数 S_t ,以保证钻柱的工作安全,即:

$$F_a = F_p / S_t \quad (2)$$

式中: F_a ——钻杆柱安全静拉伸载荷, kN; F_p ——钻杆柱任意截面上的静拉伸载荷, kN; S_t ——安全系数,一般取 1.3。

1.3.2 设计系数法(考虑卡瓦挤压)

对于深井钻柱来说,由于钻柱重力大,当它坐于卡瓦中时,将受到很大的箍紧力。当合成应力接近

或达到材料的最小屈服强度时,就会导致卡瓦挤毁钻杆。为了防止钻杆被卡瓦挤毁,要求钻杆的屈服强度与拉伸应力的比值不能小于一定数值。此值可根据钻杆抗挤毁条件得出,即:

$$\sigma_s = \sigma_t \left[1 + \frac{d_p K_s}{2L_s} + \left(\frac{d_p K_s}{2L_s} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

式中: σ_s ——杆体材料的屈服强度,MPa; σ_t ——悬挂在吊卡下面钻柱的拉伸应力,MPa; d_p ——钻杆外径,cm; K_s ——卡瓦的横向负荷系数(以平均值计算 $K_s=4$), $K_s=1/\tan(\alpha+\varphi)$; α ——卡瓦锥角; φ ——摩擦角, $\varphi=\arctan\mu$; μ ——摩擦系数($\mu\approx 0.08$); L_s ——卡瓦与钻杆的接触长度,cm。

1.3.3 拉力余量法

考虑钻柱被卡时的上提解卡力,钻杆柱的最大允许静拉力应小于其最大安全拉伸力一个合适的数值,并以它作为余量,称为“拉力余量”(记为MOP),以确保钻柱不被拉断。

$$F_a = F_p - MOP \quad (4)$$

式中: F_a ——钻杆柱安全静拉伸载荷,kN; F_p ——钻杆柱任意截面上的静拉伸载荷,kN; MOP ——拉力余量,一般取200~500 kN。

铝合金钻柱是前苏联科学超深井施工三大技术特色之一。世界第一深钻,12262 m深的科拉超深井就是使用铝合金钻杆施工的。前苏联的钻探界十分重视铝合金材料和钻柱的研究、开发和应用,开发出了多种铝合金材料,其物理机械性能可满足从浅到超深井施工的各种使用条件的要求,见表2。科

拉超深井完钻的钻柱组合见表3。

表2 科拉超深井用铝合金材料^[1]

Table 2 Aluminum alloy for Kola ultra-deep well

合金牌号	合金类型	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	伸长率/%	耐温能力/℃
Д16Т	Al-Cu-Mg	330	450	11.0	160
AK4-1T1	Al-Cu-Mg-Fe-Ni	350	410	12.0	220
1953T1	Al-Zn-Mg-Cu	490	540	7.0	120

表3 科拉超深井铝合金钻柱组合^[19]

Table 3 Aluminum alloy drill string structures in Kola ultra-deep well

序号	管柱段/m			钻柱代号	合金牌号
	自(井底)	至(井口)	长度		
1	0	40	40	КНБК	
2	40	2179	2139	ЛВТПН 147×11	AK4-1T1
3	2179	3184	1005	ЛВТПН 147×13	AK4-1T1
4	3184	4746	1562	ЛВТПН 147×11	Д16Т
5	4746	5266	520	ЛВТПН 147×15	Д16Т
6	5266	7448	2182	ЛВТПН 147×11	1953T1
7	7448	9397	1949	ЛВТПН 147×13	1953T1
8	9397	11386	1989	ЛВТПН 147×15	1953T1
9	11386	12262	876	ТБВК 140×11	《P》

2 耐热铝合金材料力学性能测试

2.1 试验材料和规格

2219和2618耐热铝合金具有较高的强度和良好的耐热性能,被广泛应用于航空航天领域^[20-21]。本次试验选用这2种耐热铝合金材料,评价其力学性能在特深孔地质钻探应用的适用性。2种合金化学成分见表4。

表4 两种铝合金的实测化学成分

Table 4 Measured chemical composition of two kinds of aluminum alloy

合金牌号	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Ni	V	Zn	Ti	Zr	其他杂质	
											单个	合计
											wt%	wt%
2219	0.069	0.146	6.105	0.364	0.003		0.087	0.071	0.053	0.149	≤0.05	≤0.15
2618	0.143	1.030	2.421	0.011	1.193	1.125		0.092	0.020		≤0.05	≤0.15

2.2 试验方法

2.2.1 常温力学性能试验

试验对铝合金材料按相关标准规定的几何尺寸进行切割剖样,将剖样置于WDW-100E型电子万能材料试验机上进行抗拉试验,试验后读取其屈服强度、抗拉强度以及测量断后伸长率,每个状态测试3个样品。试验严格遵循国家相关标准^[22]进行。

2.2.2 高温力学性能试验

高温力学性能试样与常温力学性能试样不同的

是试样两端头的夹持部分是螺纹。严格遵循国家相关标准^[23]进行高温拉伸测试,将剖样置于自带高温保温装置的UH5105GL型电子万能材料试验机上,预拉伸速度和拉断试验速度均为2 mm/min。每个状态测试3个样品,测试温度保温10 min后开始拉伸。测试温度分别为100、150、200、250、300℃。

2.2.3 不同温度暴露90 h的室温拉伸性能

在电热风干燥箱中,分别将经过固溶失效处理的试样进行120、160、200、250、300℃暴露90 h

后处理,冷却到室温进行拉伸试验。试验方法及试样加工方法与常温性能试样方法相同,每个状态测试 3 个样品。

2.2.4 布氏硬度试验

严格遵循国家相关标准^[24],在 HB3000B 型布氏硬度机上测定试样合金的硬度,调节载荷 2500 N、加载时间为 30 s,压头直径为 5 mm。每个状态点选取 2 个硬度样片,经打磨后测试至少 5 个点,最后取平均值。

2.2.5 显微组织观察

严格遵循国家相关标准^[25],金相试样经 180 号水砂纸粗磨、800 号水砂纸细磨,再经机械抛光,Keller's 金相腐蚀液浸蚀,通过江南 XJL-03 型金相显微镜对合金在不同状态下的显微组织进行观察与分析。

2.3 结果与讨论

2.3.1 固溶时效处理制度

2 种合金分别在 525、530、535 °C 进行固溶处理,到温后保温 1 h,并在 30 °C 的冷水中进行淬火,进行显微组织观察,见图 5 和图 6。固溶处理后,黑色粒子明显减少,未溶第二相多数溶解,表面合金溶质较充分的溶进基体,这对后期热处理充分发挥了合金元素的作用是有利的;同时,2219 合金在 535 °C 固溶处理后电导率较小为 17.2%IACS,2168 合金在 530 °C 固溶处理后电导率较小为 16.0%IACS。

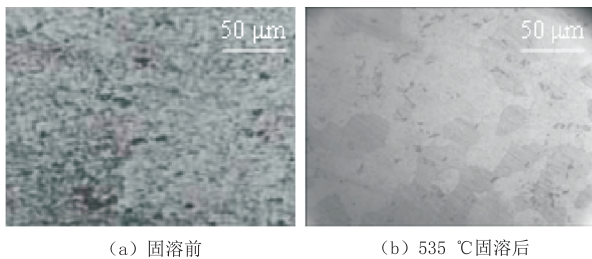
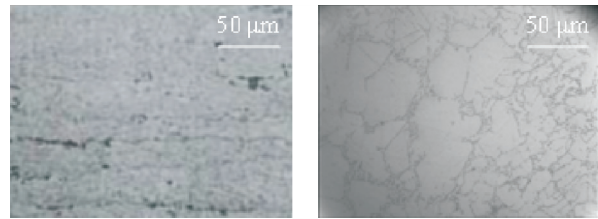


图 5 2219 合金固溶前后的显微组织比较
Fig.5 Microstructure comparison of 2219 alloy before and after solution

固溶淬火后的 2 种合金分别在不同温度下进行 20 h 的人工时效后,进行常温力学性能检测,结果见表 5。从表中可以看出,2219 合金在时效温度 165 °C 处理的室温力学性能最佳,2618 合金在 200 °C 时效处理的室温力学性能最佳。

2.3.2 高温力学性能

图 7 是 2 种合金在高温条件下抗拉强度曲线图。与前述常温力学性能比较,在 100 °C 以上的高



(a) 固溶前 (b) 530 °C 固溶后

图 6 2618 合金固溶前后的显微组织比较

Fig.6 Microstructure comparison of 2618 alloy before and after solution

表 5 不同时效温度下的常温力学性能

Table 5 Mechanical properties at ambient temperature under different aging temperatures

合金牌号	时效温度/°C	抗拉强度/MPa	伸长率/%	硬度 HB
2219	150	422.6	16.4	120
	165	436.9	12.9	130
	170	437.3	9.2	126
2618	180	405.1	7.2	122
	200	425.8	6.7	125
	210	413.6	6.3	123

温条件下,2618 合金的强度和伸长率普遍高于 2219 合金;两者随着温度的不断增加,抗拉强度均随之不断降低。这是由于组织中的时效强化相随温度的变化不断地长大、粗化,时效相与基体之间的半共格关系也会逐渐丧失并产生过时效,从而使合金的强度和硬度明显降低。

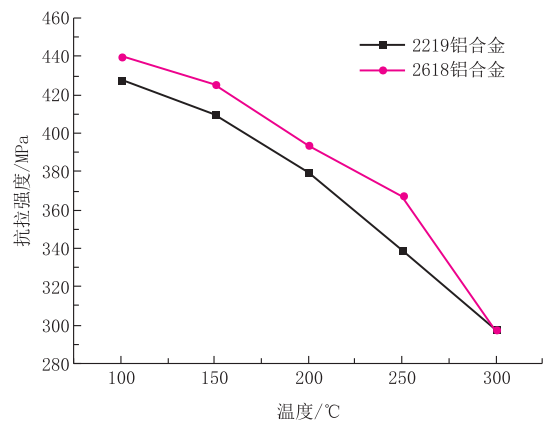


图 7 2 种合金高温瞬时条件下抗拉强度曲线

Fig.7 Tensile strength curves of two kinds of alloys at high temperature

2.3.3 不同温度暴露 90 h 的室温拉伸性能

图 8 和图 9 分别是 2 种合金在高温长时间暴露后的常温抗拉强度和伸长率的变化曲线。从图中可以发现,2219 合金的强度和伸长率普遍高于 2618 合金,这与高温条件下的 2 种合金的强度性能对比

正好相反;与暴露在室温条件下合金性能相比,暴露温度在 100 °C 和 150 °C 条件下的 2 种合金试样的常温抗拉强度和伸长率均有所提高,可能是在这 2 个暴露温度条件,对这两种合金起到了补充时效的作用,再随着暴露温度升高时,2 种合金的强度均呈下降趋势。

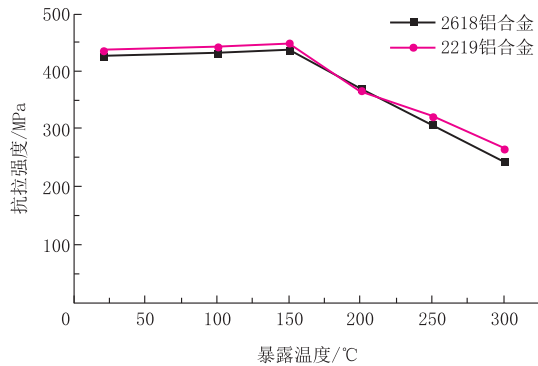


图 8 2 种铝合金高温长时间暴露后的常温抗拉强度

Fig.8 Tensile strength of two kinds aluminum alloys at ambient temperature after high temperature exposure

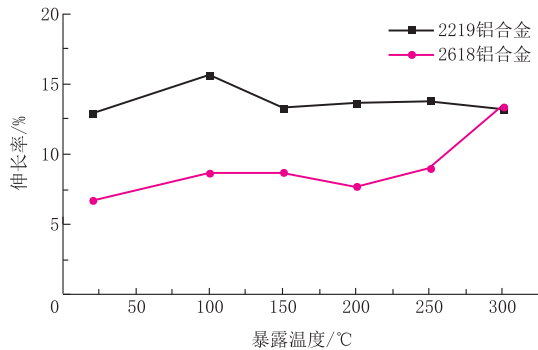


图 9 2 种铝合金高温长时间暴露后的常温伸长率变化

Fig.9 Elongation of two kinds aluminum alloys at ambient temperature after high temperature exposure

从图 9 中不难发现,随着暴露温度的升高,2618 合金伸长率随之有持续增大的趋势,这是由于高温下热暴时 Ω 相大幅度减少和粗化,合金断裂伸长率显著上升;而 2219 合金伸长率变化较小,相对稳定,这是因为 Zr 在热暴露过程中起到减缓溶质扩散速率的作用,热暴露的实质就是再时效处理,溶质原子的扩散速率减缓意味着 S 相粗化速率的降低,这对提高热暴露后的剩余强度是有利的^[11]。同时,Zr 元素通过阻碍溶质原子扩散降低合金时效峰值强度,但是会提高热暴露之后的剩余强度,2219 合金中含有 0.149% 的 Zr 元素,这也恰恰说明了热暴露条件下的 2219 合金的强度和伸长率普遍高于 2618 合金。

3 结论

综上所述,可以得到以下几点结论:

(1) 万米科学超深井钻柱全部使用同一规格尺寸钢钻杆不可实现,全部使用高强度 7 系铝合金钻杆理论上可以实现,但考虑到井内高温环境的影响,还需采用铝合金复合钻柱组合设计。

(2) 2219 合金固溶时效制度分别为 535 °C/1 h、165 °C/20 h;2618 固溶时效制度分别为 530 °C/1 h、200 °C/20 h。

(3) 2219 合金在高温长时间暴露后的室温力学性能优于 2618 合金,在高温瞬时条件下的力学性能劣于 2618 合金。2219 合金中含有 Zr,该元素在热暴露过程中起到减缓溶质扩散速率的作用,这对提高热暴露后的剩余强度是有利的。

(4) 铝合金钻杆的使用性能将是制约深部钻探技术发展的“瓶颈”,单从屈服强度性能考虑,2219 合金更适于在高温下长时间的井下工作。

参考文献 (References):

- [1] Aquatic Company and Maurer Engineering Inc. Development of aluminum drill pipe in Russia (Final Report TR99-23) [R]. Implement Russian Aluminum Drill Pipe and Retractable Drilling Bits into the USA, Contract NO. DE-FG26-98FT40128, 1999.
- [2] M.Y. Gelfgat, V.S Basovich. Aluminum vs. steel: preventing drill string buckling when drilling horizontally[J]. Oil & Gas Eurasia, 2007(6):32-38.
- [3] 吕拴录,骆发前,周杰,等.铝合金钻杆在塔里木油田推广应用前景分析[J].石油钻探技术,2009,37(3),74-77. LÜ Shuanlu, LUO Faqian, ZHOU Jie, et al. Prospects of aluminum alloy drill pipe in Tarim Oilfield[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2009,37(3):74-77.
- [4] 鄢泰宁,薛维,卢春华.铝合金钻杆的优越性及在地探深孔中的应用前景[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2010,37(2),27-29. YAN Taining, XUE Wei, LU Chunhua. Superiorities of aluminum alloy drilling pipe and its application prospects in deep holes for geological exploration[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2010,37(2): 27-29.
- [5] 梁健,刘秀美,王汉宝.地质钻探铝合金钻杆应用浅析[J].勘察科学技术,2010(3),62-64. LIANG Jian, LIU Xiumei, WANG Hanbao. Application of aluminum alloy drill pipe in geological drilling[J]. Survey Science and Technology, 2010(3),62-64.
- [6] 梁健,彭莉,孙建华,等.地质钻探铝合金钻杆材料研制及室内试验研究[J].地质与勘探,2011,47(2):304-308. LIANG Jian, PENG Li, SUN Jianhua, et al. Development of the aluminum alloy drill rod and laboratory tests[J]. Geology and Exploration, 2011,47(2):304-308.
- [7] M.Y. Gelfgat, V.S Basovich, V.S. Tikhonov. Drill string with

- aluminum alloy pipes design and practices[C]// IADC/SPE Drilling Conference (Amsterdam), 2003:79873.
- [8] M.Y Gelfgat, V.S Basovich, A. Adelman. Aluminum alloy tubules for the oil and gas industry[J]. World Oil, 2006, 227(7), 45—51.
- [9] Alcoa Inc. Aluminum alloy drill pipe (technical guide version 2.0)[J/OL]. http://www.alcoa.com/oil_gas/en/pdf/alcoa_oil_and_gas_aadp_drill_pipe_technical_guide_brochure.pdf, 2013—11—25.
- [10] Aluminum Alloy Drill Pipe, Inc. Drill faster, farther, deeper [J/OL]. <http://aluminumdrillpipe.com/ADP.Broucher.pdf>, 2013—11—25.
- [11] 王建华. 2618 耐热铝合金的组织与力学性能的研究[D]. 长沙: 中南大学, 2003.
- WANG Jianhua. Study on microstructures and mechanical properties of heat resistance aluminum alloy 2618[D]. Changsha: Central South University, 2003.
- [12] 王恒. 石油钻杆用耐热铝合金的组织 and 性能研究[D]. 长沙: 中南大学, 2012.
- WANG Heng. Study on the microstructures and properties of heat resistance aluminum alloy for petroleum drilling pipe [D]. Changsha: Central South University, 2003.
- [13] 梁健, 岳文, 孙建华, 等. 超声表面滚压处理铝合金钻杆的高温摩擦学性能[J]. 中国表面工程, 2016, 29(5): 129—137.
- LIANG Jian, YUE Wen, SUN Jianhua, et al. High temperature tribological properties of aluminum alloy drill pipe processed by ultrasonic surface rolling[J]. China Surface Engineering, 2016, 29(5): 129—137.
- [14] ISO 15546, Petroleum and natural gas industries—Aluminum alloy drill pipe[S]. Switzerland: International Organization for Standardization, 2011.
- [15] 李建湘. 铝合金特种管、型材生产技术[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2008.
- LI Jianxiang. Production technology of aluminum alloy special pipe and profile[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2008.
- [16] 梁健, 孙建华. 科学超深井钻杆柱受力分析与计算[C]// 中国地质学会探矿工程专业委员会. 第十六届全国探矿工程(岩土钻掘工程)学术交流年会论文集, 2011: 432—437.
- LIANG Jian, SUN Jianhua. Analysis and calculation of forces on drill string for scientific super-deep drilling[J]. Mineral Engineering Committee, Geological Society of China. Special for the Sixteenth National Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling) Academic Conferences, 2011: 432—437.
- [17] Hancheng Shin, Newjin Ho, et al. Precipitation behaviors in Al—Cu—Mg and 2014 aluminum alloys[J]. Metall. Mater. Trans. A, 1996, 27A: 2479—2483.
- [18] SYT 6427—1999, 钻柱设计和操作限度的推荐做法[S]. SYT 6427—1999, Recommended practice for drill stem design and operating limits[S].
- [19] К. Т. Н. В. С. Басович. Техника и технология бурения Кольской сверхглубокой скважины СГ—3 (обзорная информация)[Z]. Changchun, 2011.
- [20] Dursun T, Soutis C. Recent developments in advanced aircraft aluminum alloys[J]. Materials & Design, 2014, 56: 862—871.
- [21] 向剑波, 王博, 周蓉蓉, 等. 热处理对 8% 预变形 2219 铝合金组织与性能的影响[J]. 材料热处理学报, 2018, 39(2): 75—81.
- XIANG Jianbo, WANG Bo, ZHOU Rongrong, et al. Effect of heat treatment on microstructure and properties of 8% pre-deformed 2219 aluminum alloy[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2018, 39(2): 75—81.
- [22] GB/T 228—2002, 金属材料室温拉伸试验方法[S]. GB/T 228—2002, Metallic materials—Tensile testing at ambient temperature[S].
- [23] GB/T 4338—2006, 金属材料高温拉伸试验方法[S]. GB/T 4338—2006, Metallic materials—Tensile testing at elevated temperature [S].
- [24] GB/T 231.1—2018, 金属材料布氏硬度试验—第 1 部分: 试验方法[S]. GB/T 231.1—2018, Metallic materials—Brinell hardness test—Part 1: Test method[S].
- [25] GB/T 3246.1—2012, 变形铝及铝合金制品显微组织检验方法—第 1 部分: 显微组织检验方法[S]. GB/T 3246.1—2012, Inspection method for structure of wrought aluminum and aluminum alloy products—Part 1: Inspection method for microstructure[S].

(编辑 韩丽丽)