

轧制温度对7075铝合金组织演变及力学性能影响

马少明

(中煤科工西安研究院(集团)有限公司,陕西 西安 710077)

摘要: 铝合金作为非钢质结构材料,在地质勘探、石油开采和科学钻探等领域的深井钻探中得到广泛应用。随着大陆及海洋深部油气钻探需求日益增加,对钻探装备和工具的综合性能提出了更高的要求。高强度铝合金以高比强度、低刚度和高耐腐蚀性能等显著优点,已在大位移井、定向井和超深井钻探中得到广泛应用。然而,目前对钻杆用7075超硬铝合金的热加工性能缺乏系统研究。为解决该问题,对7075铝合金在不同轧制温度下的组织演变和力学性能进行了系统地分析和研究。通过光学显微镜和X射线对合金晶粒尺寸和第二相的分布情况进行了观察分析,利用万能试验机对合金的抗拉强度和断裂延伸率等力学性能进行了研究。结果表明,随着轧制温度的升高,7075铝合金的组织 and 力学性能均会发生显著变化。在轧制温度250—350℃范围内,7075铝合金晶粒尺寸先增大后减小,晶粒当量直径平均值从215 μm增加至257 μm,后又减小至220 μm;当轧制温度为400℃时,合金的晶界组织不明显,原始粗大晶界逐步消失,出现了细小球状晶粒且当量直径平均值减小至47 μm。抗拉强度结果表明,随着轧制加工温度从250℃升高到400℃时,7075铝合金的抗拉强度变化的趋势为先减小后增大。当轧制温度为350℃时抗拉强度达到最低值521 MPa,当轧制温度为400℃时抗拉强度达到最大值570 MPa。此外,高的轧制温度(400℃)能显著增强7075铝合金的强度和塑性。拉伸断口的SEM图像显示,轧制温度400℃时,7075铝合金样品的断裂方式从偏脆性断裂变为偏韧性断裂。因此,轧制温度400℃被认为是7075铝合金适宜的热轧加工温度。本研究为不同轧制温度对轻质高强7075铝合金的力学性能影响规律提供了理论支撑。

关键词: 7075铝合金;轧制温度;微观组织;晶粒尺寸;析出相;抗拉强度;断裂延伸率;动态再结晶

中图分类号: TG146.1

文献标志码: A

文章编号: 1673-9981(2024)04-0656-06

引文格式: 马少明. 轧制温度对7075铝合金组织演变及力学性能影响[J]. 材料研究与应用,2024,18(4):656-661.

MA Shaoming. Effect of Rolling Temperatures on Microstructure Evolution and Mechanical Properties of 7075 Aluminum Alloy[J]. Materials Research and Application,2024,18(4):656-661.

0 引言

近年来,尽管我国大力控制煤、石油和天然气等化石能源消费,但是各类化石能源消耗总量依然呈增长趋势。随着大陆及海洋深部油气钻探需求日益增长,这不仅使钻探工作量增加,而且还使单井钻进深度逐年加深。因此,对钻井装备和机具的综合性能提出了更高的要求^[1-5]。7075和2024等高强度铝合金材料因具有高比强度、低刚度和高耐腐蚀等性能^[6-7],已经被应用于大位移井、定向井和超深井钻探的钻柱中。7075铝合金作为一种超高强度7系铝合金(Al-Zn-Mg-Cu),在室温下具有高强度和高可靠性,已作为生产钻杆的材料用于深井钻探中^[8-10]。

在钻井钻探中铝合金钻杆需承受钻杆整体的拉伸应力,因而被应用于上部井段。在上世纪70年代,前苏联成功将铝合金钻杆应用于科拉半岛SG-3超深孔钻探中^[11-12],钻杆材料从井口向井底依次使用了超高强7075铝合金、2024耐高温铝合金和传统钢,该井目前仍保持着全球垂深最深的世界纪录(深度12 262 m)。铝合金钻杆已在美国、日本、法国和俄罗斯等国家得到广泛的应用^[13-15],市场已形成系列产品并制定了相关标准。虽然铝合金钻杆在满足钻井安全施工前提下,具有整体重量小、无磁性、耐酸性腐蚀,可实现小功率钻机完成更深的钻井施工的特点,但是铝合金钻杆的强度和硬度等力学性能随

收稿日期:2023-09-11

基金项目:国家自然科学基金项目(42302355)

作者简介:马少明,博士,助理研究员,研究方向为煤矿钻探机具用轻质材料。E-mail:mashaoming@cctegxian.com。

着井深增加及地温升高而衰减。因此,有必要进一步研究铝合金高温下成形性能和评价方法。国内通过引进、消化和吸收等手段,在钻杆外加厚铝合金管体,并在两端过盈装配钢接头,改装了石油天然气用铝合金钻杆,减轻了钻杆的整体重量,降低了运输能耗和钻机的大钩载荷。该钻杆应用于松科二井(完井深度 7 018 m)大陆科学钻探野外试验,在深度 2 966—4 963 m 段两次使用了国产直径 147 mm 铝合金钻杆,该铝合金钻杆累计下井 29 回次,进尺 307 m,服役时间累计超过 40 d。

7075 铝合金的力学性能可通过热处理工艺大幅提升,在实际生产中铝合金的热处理温度参照非平衡固相线或合金中低熔点相的熔化温度^[20]。近年来,大量学者系统研究了挤压和轧制工艺对 7075 铝合金组织及力学性能的影响^[8,16-19]。Panigrahi 等^[21]优化了 7075 铝合金的轧制工艺,将低温轧制与固溶处理相结合,在较低温度 100 °C 下时效处理 45 h,获得了细晶组织,提升了合金的抗拉强度。禹鑫磊等^[22]通过同步轧制和异步轧制为预变形方式制备样品,研究了辊径比和温度对半固态 7075 组织演变的影响。夏华丹^[23]研究了轧制变形量对汽车用 7075 铝合金组织和力学性能的影响,袁焕等^[24]研究了轧制态 7075 铝合金深冷处理工艺。但是,关于轧制温度对 7075 铝合金组织和力学性能的影响,国内外相关报道较少。

本文结合热轧工艺,研究了不同轧制温度对 7075 铝合金显微组织和主要力学性能的影响规律,优化出适合于 7075 铝合金的轧制加工温度,为轻质高强 7075 铝合金的轧制加工提供了借鉴,为深井及超深井钻探用铝合金钻杆的批量化生产提供了技术支持。

1 实验材料和方法

1.1 实验材料

试样采用商用 7075 铝合金铸锭,试验用铝合金的主要元素成分及含量(质量分数)列于表 1。

表 1 7075 铝合金主要化学元素成分

Table 1 The main chemical compositions of 7075 Al alloy in this experiment

元素	Zn	Mg	Cu	Fe	Si	Cr	Al
含量 $w/\%$	5.63	2.35	1.64	≤ 0.4	≤ 0.1	≤ 0.25	余量

1.2 实验方法

首先,在电阻炉中对 7075 铝合金铸锭进行均质处理,其中温度为 450 °C、均质处理时间 4 h、水淬。

利用线切割机制作尺寸为 45 mm×12 mm×7 mm 的轧制试样,并用 6.5 μm 的砂纸磨平。轧制前,试样需在电阻炉内分别加热至 250、300、350 和 400 °C 并保温 10 min。在轧制过程中,轧辊需保持在室温,且转速恒定为 14 $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$,轧制最终压下量为 90%。轧制完成后,试样需进行 T6(固溶+时效)热处理,固溶温度和时间分别选取 470 °C 和 1 h,时效温度和时间分别选取 120 °C 和 24 h。

对热处理后的试样进行预磨、精磨、抛光和腐蚀,以制备金相试样。腐蚀剂选用 Keller 试剂(1.0 mL 的 HF+1.5 mL 的 HCl+2.5 mL 的 HNO₃+95 mL 的 H₂O),室温下侵蚀试样 30 s。用光学显微镜(Carl Zeiss, Germany),观察试样的金相组织和第二相分布。利用 X 光衍射实验仪(XRD, D/Max 2500PC, Rigaku, Japan),检测分析试样中的第二相成分。通过万能试验机(Instron universal tensile machine, USA),在室温下检测试样的拉伸性能和断裂延伸率,拉伸速率恒定为 0.18 $\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$,单个轧制温度下的试样至少进行 3 组拉伸试验。通过扫描电镜试验(ZEISS EVO18, Germany),观察试样断口形貌。

2 实验结果

2.1 轧制温度对微观组织的影响

铸态 7075 铝合金试样的显微组织如图 1 所示。从图 1 可见,轧制加工前,铸态试样的晶粒分布均匀,大小约为 50 μm 。

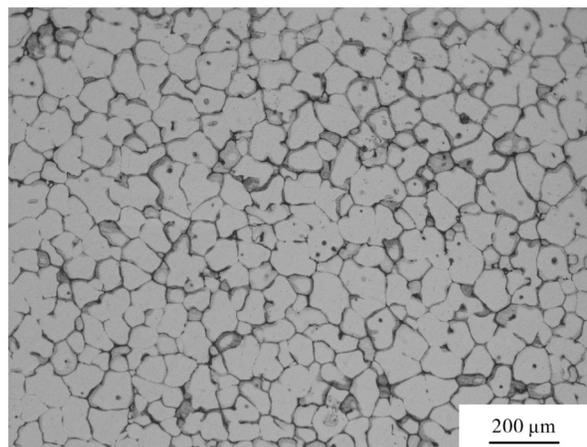
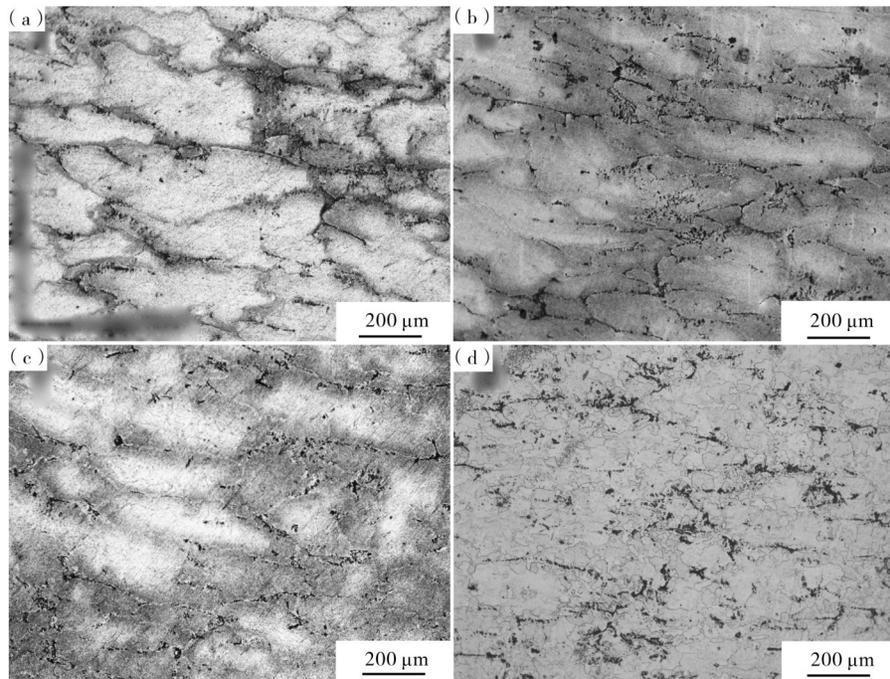


图 1 7075 铝合金的微观组织

Figure 1 Microstructure of as-cast 7075 Al alloy

图 2 为热轧后试样的显微组织。从图 2 可见,在 250、300、350、400 °C 不同温度下,轧制后试样组织为层状组织,晶粒平行于轧制方向。



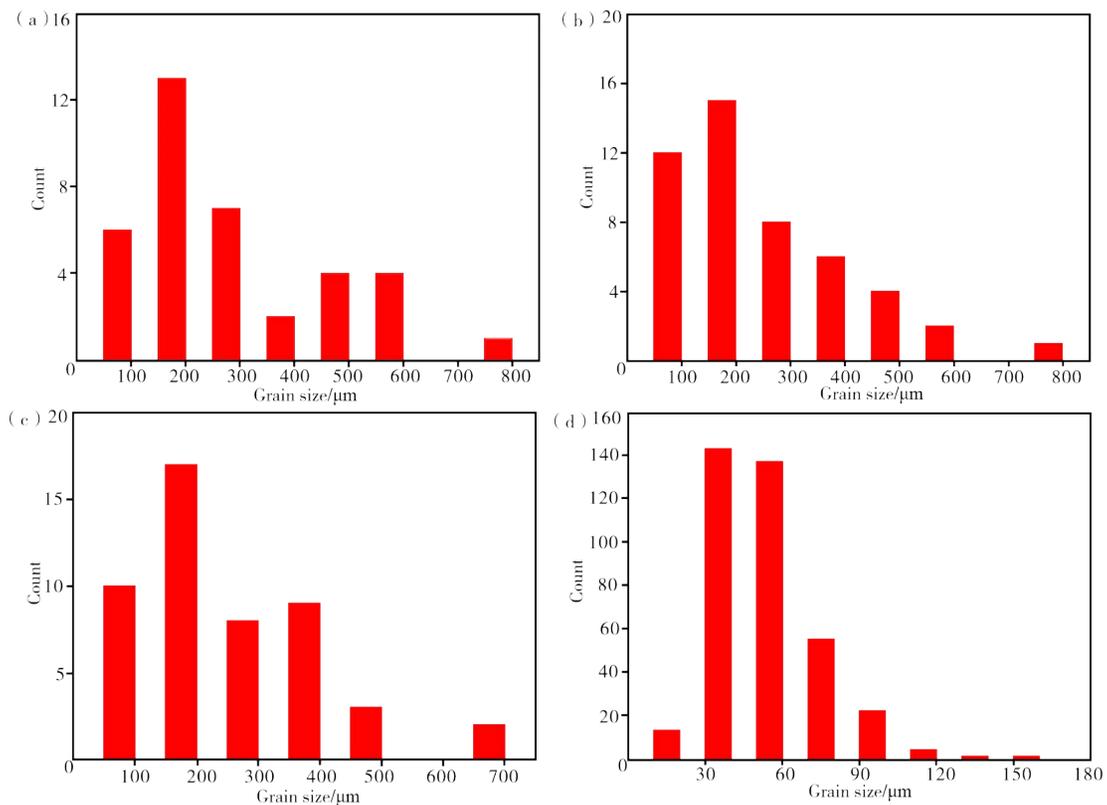
(a)—250 °C;(b)—300 °C;(c)—350 °C;(d)—400 °C。

图2 不同轧制温度下7075铝合金的微观组织

Figure 2 Microstructures and of 7075 Al alloy rolled at different temperatures

采用当量直径法,利用Nano Measurer软件对不同温度轧制的试样晶粒尺寸进行统计计算,统计结果见图3。从图3可见:当轧制温度从250 °C升高

至300 °C,晶粒当量直径平均值由215 μm增加至257 μm;当轧制温度从300 °C升高至350 °C,晶粒当量直径平均值由257 μm降低至220 μm;当轧制温



(a)—250 °C;(b)—300 °C;(c)—350 °C;(d)—400 °C。

图3 不同轧制温度下7075铝合金的晶粒分布

Figure 3 Grain size distribution of 7075 Al alloy rolled at different temperatures

度从 350 °C 升高至 400 °C, 当量直径平均值减小至 47 μm。随着轧制温度的升高晶粒进一步细化, 一次晶界组织变得不明显, 原始粗大晶界逐步消失, 出现了细小球状晶粒, 表明发生了再结晶现象。

2.2 轧制温度对第二相的影响

试样经轧制后进行了 T6 热处理, 其目的是使第二相在 7075 铝合金中均匀分布。图 4 为热轧制后试样的 XRD 图。从图 4 可见: 在原始材料中, 只存在 Al 相; 当轧制加工温度分别为 250、300 和 350 °C 时, 轧制试样中同时存在 Al 相和 MgZn₂ 相(γ 相); 当轧制温度进一步提升至 400 °C 时, 轧制试样中未能检测出 MgZn₂ 相。XRD 试验结果证明, 轧制温度对 7075 铝合金中析出相的成分和含量有一定影响作用。

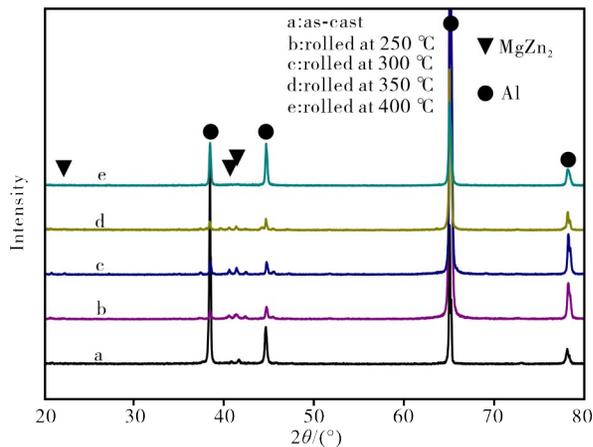


图 4 不同轧制加工温度下的 7075 铝合金 XRD 图谱
Figure 4 XRD patterns of as-cast 7075 Al alloy and rolled at different temperatures

2.3 轧制温度对力学性能的影响

为进一步探明轧制温度对钻杆用 7075 轻质铝合金主要力学性能的影响规律, 对轧制的 7075 铝合金进行了室温拉伸试验。图 5 为轧制试样的工程应力-应变曲线

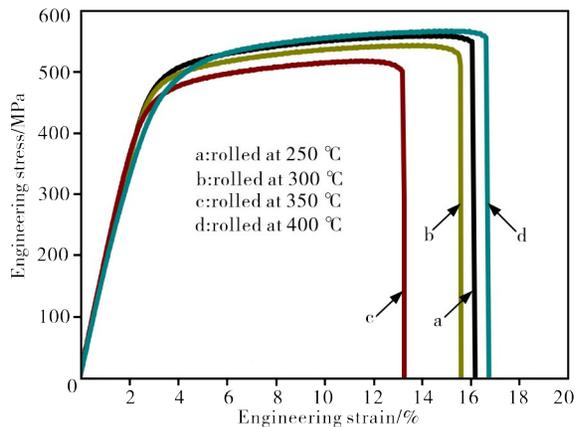


图 5 不同轧制温度下 7075 铝合金的工程应力-应变曲线
Figure 5 Relationship between rolling temperature and engineering stress-stain of 7075 Al alloy

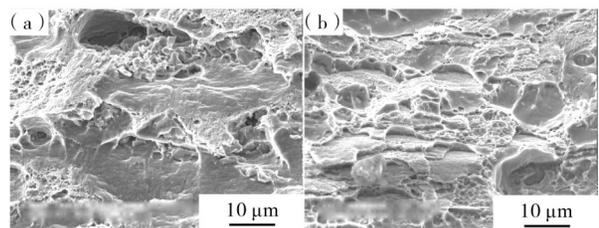
力-应变曲线。从图 5 可见: 当轧制温度从 250 °C 提升到 350 °C 时, 试样的抗拉强度、屈服强度和断裂延伸率均有所下降; 当轧制温度达到 400 °C 时, 强度和塑性均达到最大。

在不同轧制温度下, 对 T6 热处理态 7075 铝合金的主要力学性能参数值进行了统计, 主要包括屈服强度、抗拉强度和断裂延伸率, 结果列于表 2。由表 2 可知, 当轧制加工温度从 250 °C 升高至 400 °C 时, 试样的屈服强度、抗拉强度和断裂延伸率均呈现先减小后增大的变化趋势。在 350 °C 轧制加工温度下, 试样的屈服强度、抗拉强度、断裂延伸率均降低到最小值, 分别为 453 和 521 MPa 及 12.1%; 而随着轧制温度进一步提高到 400 °C, 试样的屈服强度、抗拉强度、断裂延伸率均提高到最大值, 分别为 505 和 570 MPa 及 16.9%。

表 2 不同轧制温度下 T6 热处理态 7075 铝合金的力学性能
Table 2 Mechanical properties of 7075-T6 Al alloy rolled at different temperatures

轧制温度/ °C	屈服强度/ MPa	抗拉强度/ MPa	断裂延伸率 ε _f / %
250	498 ⁺⁹ ₋₆	561 ⁺⁴ ₋₆	16.0 ^{+0.2} _{-0.4}
300	489 ⁺⁸ ₋₁₄	548 ⁺⁶ ₋₃	15.5 ^{+0.3} _{-0.5}
350	453 ⁺¹² ₋₁₀	521 ⁺¹ ₋₅	12.1 ^{+0.2} _{-0.2}
400	505 ⁺¹¹ ₋₉	570 ⁺⁵ ₋₃	16.9 ^{+0.5} _{-0.4}

图 6 为轧制 7075 铝合金的拉伸断口形貌。从图 6 可见, 当轧制温度由 350 °C 提升到 400 °C 度时, 拉伸断口由脆性断裂变为韧性断裂, 表明试样的塑性增加。在 350 °C 轧制温度下, 断口表面韧窝的数量少且尺寸小, 同时还存在大面积平滑的解理面, 因此试样呈现一定程度的脆性, 易造成抗拉强度和断裂延伸率下降。而在 400 °C 下轧制, 断口表面韧窝丰富, 且尺寸相对较大, 同时解理面面积明显变小, 从而使试样具有一定的塑性, 在拉伸过程中不易过早断裂。



(a)—350 °C; (b)—400 °C。

图 6 轧制 7075 铝合金的拉伸断口

Figure 6 Tensile fracture surface of rolled 7075 Al alloy at different temperatures

3 讨论分析

合金的力学性能遵循 Hall-Petch 定律, 通过公式 $\sigma = \sigma_0 + kd^{-1/2}$ 可计算晶粒尺寸, 晶粒尺寸值越

小,理论上合金力学性能越好。式中, σ_0 和 k 为晶粒类型有关的常数, d 为平均晶粒尺寸。

通过试样的微观组织和力学性能参数,分析轧制后显微组织对力学性能的影响规律。当试样在250、300和350℃下进行轧制时,合金组织中的等轴晶被拉长且平行于轧制方向,表现为晶界形状从圆形改变为长条状,同时未观察到明显的二次再结晶晶界,此时铝合金的增强机制为细晶强化和析出强化。研究^[26-27]表明,7075铝合金中第二相的析出顺序通常为固溶体→GP区→ η' 相→ η 相(MgZn₂)。由此推测,在250—350℃轧制温度下,位错强化机制占主导地位,试样中位错密度维持在相对较高的程度,与300℃轧制的样品相比,其具有更高的屈服强度和抗拉强度。而400℃轧制的样品,其微观组织发生了明显的变化,原始粗大晶界逐步消失,出现了细小球状晶粒,细晶强化机制占主导地位,除了强度的提升,塑性也得到显著提升。这是因为在T6热处理过程中位错消失,为试样断裂提供了更大范围的位错累积,导致了塑性的增强。

4 结论

(1)在组织演变方面,当轧制温度从250℃增长到400℃时,7075铝合金的晶粒尺寸呈现先增大后减小的趋势。当轧制温度从250℃升高至300℃时,晶粒当量直径平均值由215 μm增加至257 μm。当轧制温度从300℃升高至350℃时,晶粒当量直径平均值由257 μm降低至220 μm。当轧制温度从350℃升高至400℃,晶粒进一步细化,一次晶界组织变得不明显,原始粗大晶界逐步消失,出现了细小球状晶粒,晶粒当量直径平均值减小至47 μm,显然在400℃轧制时存在再结晶现象。

(2)在力学性能方面,当热轧温度从250℃升高至400℃时,T6热处理态的轻质铝合金钻杆试样的屈服强度、抗拉强度和断裂延伸率呈现先减小后增大。在350℃热轧加工下,7075铝合金样品的屈服强度、抗拉强度、断裂延伸率均为最小值,分别为453、521 MPa和12.1%。在400℃热轧加工下,7075铝合金样品的屈服强度、抗拉强度、断裂延伸率均增长到最大值,分别为505、570 MPa和16.9%。与350℃轧制试样相比,400℃轧制试样的抗拉强度提高了9.4%,断裂延伸率提高了39.7%。综述可知,400℃轧制温度可作为适宜的热轧加工温度。

参考文献:

[1] 彭先波,马都都,王飞文,等. V150高强度钻杆在超深

井修井作业中的适用性[J]. 新疆石油天然气, 2022, 18(3): 25-30.

- [2] 尹浩,梁健,孙建华,等. 万米科学钻探钻杆柱的优化配置发展趋势[J]. 科技导报, 2023, 41(6): 108-120.
- [3] 张然,王显林,向桂林,等. 深层开窗侧钻小井眼专用钻杆的研制与应用[J]. 钢管, 2023, 52(1): 36-40.
- [4] 吴金昊. 镀层短碳纤维对钻杆用7075铝合金材料的高温拉伸性能影响及强化机制研究[D]. 长春:吉林大学, 2022.
- [5] 陈培亮,孙伟光,钟文建,等. 钛合金钻杆在短半径水平井中应用技术研究[J]. 石油机械, 2021, 49(10): 38-44.
- [6] XU X F, ZHAO Y G, MA B D, et al. Electropulsing induced evolution of grain-boundary precipitates without loss of strength in the 7075 Al alloy [J]. Materials Characterization, 2015, 105: 90-94.
- [7] 梁健,李嘉栋,林冰,等. 超声波冷锻与微弧氧化处理铝合金钻杆的耐腐蚀性能[J]. 表面技术, 2022, 51(6): 255-266.
- [8] 沈忱,孙会,鄧东东. 7XXX系(Al-Zn-Mg-Cu)铝合金淬火特性的研究进展[J]. 有色金属科学与工程, 2018, 9(4): 70-75.
- [9] 王济生,陈卫东,孔永平. 铝合金钻杆在腐蚀环境下的力学性能[J]. 矿冶, 2022, 31(6): 70-75.
- [10] 杨浩坤,黎伟华. 三种汽车用轻量化材料的研究进展[J]. 材料研究与应用, 2022, 16(3): 471-484.
- [11] MAKAYONAK Y. Analysis of drill-string based on case study of ultra-deep drilling on Kola Peninsula[D]. Stavanger: University of Stavanger(Norway), 2015.
- [12] 陈县伟. 深井超深井钻井技术现状和发展趋势[J]. 化学工程与装备, 2023, 312(1): 211-213.
- [13] 马少明. 轻质高强铝合金钻杆材料组织与性能的改善研究[D]. 长春:吉林大学, 2017.
- [14] 卞玮. 俄罗斯超深井钻井技术相关资料翻译实践报告[D]. 青岛:中国石油大学(华东), 2019.
- [15] 张冰冰. 超深井条件下钻柱使用深度极限的研究[D]. 北京:中国地质大学(北京), 2011.
- [16] 林兆勇,陈应烟. 激光冲击强化对钻杆7075铝合金疲劳强度的影响[J]. 石油和化工设备, 2021, 24(10): 52-56.
- [17] SUN Z C, ZHENG L S, YANG H. Softening mechanism and microstructure evolution of as-extruded 7075 aluminum alloy during hot deformation [J]. Materials Characterization, 2014, 90(4): 71-80.
- [18] DONG X, CHEN F, CHEN S, et al. Microstructure and microhardness of hot extruded 7075 aluminum alloy micro-gear. [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2015, 219: 199-208.
- [19] WANG L, YU H, LEE Y S. Effect of microstructure on hot tensile deformation behavior of 7075 alloy sheet fabricated by twin roll casting [J]. Materials Science &

- Engineering A, 2016, 652:221-230.
- [20] 黄惠毅, 乐永康, 李飞龙, 等. 低温均匀化对 6082 铝合金组织及性能的影响[J]. 材料研究与应用, 2023, 17(4): 728-732.
- [21] PANIGRAHI S K, JAYAGANTHAN R. Effect of ageing on microstructure and mechanical properties of bulk, cryorolled, and room temperature rolled Al 7075 alloy. [J]. Journal of Alloys & Compounds, 2011, 509: 9609-9616.
- [22] 禹鑫磊, 郑小平, 曹通, 等. 等温温度对轧制 SIMA 法制备 7075 合金半固态显微组织的影响[J]. 金属热处理, 2022, 47(2): 164-167.
- [23] 夏华丹. 轧制变形量对汽车用 7075 铝合金组织和力学性能的影响[J]. 热加工工艺, 2019, 48(11): 104-106.
- [24] 袁焕, 尚林伟, 王向杰. 轧制态 7075 铝合金深冷处理工艺研究[J]. 热加工工艺, 2016, 45(10): 202-204.
- [25] ELWERS M, CRITCHLOW V. The contribution of deformation twins to yield stress: The Hall-Petch law for inter-twin spacing [J]. Scripta Metallurgica, 1978, 12(11):1031-1035.
- [26] 王梦寒, 咸国材, 黄龙. 时效温度对轧制态 7075 铝合金组织及性能的影响[J]. 金属热处理, 2014, 39(5): 129-131.
- [27] 王洋. 形变热处理对 7075 铝合金搅拌摩擦加工组织及性能影响的研究[D]. 重庆:重庆大学, 2020.

Effect of Rolling Temperatures on Microstructure Evolution and Mechanical Properties of 7075 Aluminum Alloy

MA Shaoming

(CCTEG Xi'an Research Institute (Group) Co., Ltd., Xi'an 710077, China)

Abstract: Aluminum alloy is the most widely used non-steel structural material. Increasing drilling depths in geological exploration, oil exploitation and scientific drilling impose higher requirements on the performance of drilling equipment and tools. High strength aluminum alloy materials, known for their high specific strength, low stiffness, and high corrosion resistance, have been extensively used in the design of drill strings for extended reach wells, directional wells and ultra-deep wells. However, there is a lack of systematic research on the optimal hot working temperature of 7075 superhard aluminum alloy used in drill pipe. In this paper, the microstructure evolution and mechanical properties of 7075 aluminum alloy were studied at different rolling temperatures such as 250 °C, 300 °C, 350 °C and 400 °C. The grain size and second phase were analyzed by optical microscopy and X-ray diffraction, while the tensile strength and fracture elongation were measured using a universal testing machine. The results show that the microstructure and mechanical properties of 7075 aluminum alloy change with the increase of rolling temperature. Within the 250 °C to 350 °C range, the grain size initially increases and then decreases as rolling temperature rises, with the average grain equivalent diameter increasing from 215 μm to 257 μm, and then decreasing to 220 μm. At 400 °C, grain boundaries become less distinct, original coarse grain boundaries gradually disappear, and fine spherical grains emerge, reducing the average equivalent diameter to 47 μm. Additionally, as the rolling temperature increased from 250 °C to 400 °C, the tensile strength of 7075 aluminum alloy first decreased and then increased, reaching a minimum of 521 MPa at 350 °C and a maximum of 570 MPa at 400 °C. The strength and plasticity of 7075 aluminum alloy were enhanced at 400 °C. The SEM images of tensile fracture also show that the fracture mode of 7075 aluminum alloy sample shifts from brittle to ductile at 400 °C. Therefore, a rolling temperature of 400 °C is identified as the optimal hot rolling processing temperature for 7075 aluminum alloy.

Keywords: 7075 Al alloy; rolling temperature; microstructure; grain size; precipitation particles; tensile strength; elongation-to-failure; dynamic recrystallization

(学术编辑:常成)