DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2020.08.004

喷射成形 7075 铝合金钻杆的摩擦性能研究

谈 衡¹,王 泽¹,姚远远¹,孙志娟¹,李小平¹,谈文胜²,闫辰侃¹

(1.江苏理工学院材料工程学院,江苏省先进材料设计与增材制造重点实验室,江苏常州213001;2.常州信息职业技术 学院常州市大型塑料件智能化制造重点实验室,江苏常州213164)

摘 要:采用喷射成形技术制备出晶粒细小组织均匀的 7075 铝合金坯料,平均粒径约 10 µm;把坯料半固态挤压 成圆管,挤压温度为 520 ℃,再进行固溶+时效处理,固溶温度 490±5 ℃,保温时间 1.5 h,冷却介质为水(室温);时效温 度 190±5 ℃,保温时间 12 h。采用高温摩擦磨损试验仪,在干摩擦条件下分别测试载荷和速度对摩擦系数和磨痕的影 响。实验结果表明:干摩擦条件下,磨损量和摩擦系数随着载荷和速度增大而增大,载荷比速度对磨损量和摩擦系数影 响更大。磨损机理:当载荷小于临界值 15 N,磨损机制以塑性变形主导,由塑性变形转变成犁沟推挤和剥层磨损。当载荷 大于 15 N 磨损机制以氧化磨损主导,由塑性变形转变成氧化磨损和剥层磨损。当速度小于临界值 600 r/min,磨损机制 以塑性变形为主导,速度越大材料软化越强,塑性变形引起的犁沟效应越强。当速度大于 600 r/min,磨损机制以氧化磨 损和剥层磨损为主导,由轻微磨损到严重磨损再到轻微磨损的转变。

关键词:7075 铝合金;喷射成形;钻杆;固溶时效;摩擦性能

中图分类号: TH117.2; TG133 文献标识码: A 文章编号: 1000-8365(2020)08-0720-07

Study on Friction Properties of Spray Deposited 7075 Aluminium Alloy Drill

TANan Heng¹, WANG Ze¹, YAO Yuanyuan¹, SUN Zhijuan¹¹, LI Xiaoping¹,

TAN Wensheng², YAN Chenkai¹

(1.School of Material Engineering, Jiangsu University of Technology, Jiangsu Key Laboratory of Advanced Materials Design and Additive Manufacturing, Changzhou 213001, China; 2. Changzhou Key Laboratory of Large Plastic Parts Intelligence Manufacturing, Changzhou College of Information Technology, Changzhou 213164, China)

Abstract: 7075 aluminum alloy as a drill pipe is widely used in oil and gas drilling, the study of 7075 aluminum alloy friction performance is of great significance. In this paper, 7075 aluminum alloy blanks with uniform grain size were prepared by spray-deposition technology. The average particle size was about 10 μ m. Secondly, Drill pipe was extruded at 520 °C in the semi-solid and then treated by solid solution+failure, the solution temperature is 490±5 °C, holding time is 12 hours. Finally, the influence of load and velocity on friction coefficient and wear scar was tested under dry friction condition by high temperature friction and wear tester. The experimental results show that under the dry friction condition, the wear extent and the friction coefficient. Wear mechanism: When the load is less than the critical value of 15 N, wear mechanism dominated by plastic deformation, from plastic deformation into furrow and stripping wear. When the velocity is less than the critical value of 600 r/min, the wear mechanism is dominated by plastic deformation, the greater the speed, the stronger the softening of the material, the stronger the furrow effect caused by the plastic deformation. When the speed is greater than 600 r/min, the wear mechanism is dominated by oxidative wear and stripping wear, from slight wear to severe wear and slight wear.

Key words: 7075 aluminum alloy; spray-deposition; drill pipe; solid solution aging treatment; friction properties

钻杆作用是传递钻机动力和传送钻井泥浆的, 长度约占整个钻柱 85% 以上,是钻探石油和天然气 的主要钻具之一^[1]。当钻井不断加深,需要不断连接 钻杆延长钻柱,其自重不断增加,仅靠发展大规格钻 机完成深井和超深井的钻探是很困难的,还需开发 高性能轻质的钻杆。与钢钻杆相比,铝合金钻杆重量 轻、抗腐蚀性强、比强度高、耗能低等优点,已成为水 平井、科学超深井、大位移井、地球深部科研钻柱设 计的优先方案^[2]。铝合金钻杆在俄罗斯、美国、德国 等国家早已广泛用于石油天然气开采、岩心和煤炭

收稿日期: 2018-09-22

基金项目: 2018 年江苏省产学研合作项目(BY2018206), 江苏理 工学院产学研项目(KYH18044, KYH18031)

作者简介:谈 衡(1980-),江苏常州人,讲师.研究方向:先进制 造技术.

地质勘探等领域。比如在西伯利亚 834 R/87 水平井 中,铝合金钻杆有明显的技术优势。在塔里木油田 采用铝合金钻杆顺利钻进 4 983 m,解决了钢钻杆 氢脆化断裂的问题,降低了钻机动力消耗和施工难 度,提高了钻探效率。

虽然铝合金钻杆表现出优异的技术优点,但其 表面硬度低,大约是钢的 50%~66%,平均寿命是钢 钻杆的 50%~80%^[3]。钻进过程中与井壁发生碰撞, 易产生摩擦磨损、划伤和压痕等,导致钻杆磨损减 薄严重、承载力下降,增加了井内事故隐患。在我国 塔里木油田钻探过程中,15 根铝合金钻杆表面均出 现明显的横向、纵向及螺旋状磨痕(如图 1),这是钻 杆工作时横向偏移大,与井壁不断发生碰撞和接触 造成表面擦伤和磨损。因此,研究铝合金钻杆的摩 擦性能具有重要意义,摩擦性能主要通过摩擦系数 和磨损量来衡量^[3,4]。

目前,石油钻杆用的铝合金材料主要有3种: Al-Cu-Mg 系、Al-Zn-Mg-Cu 系及 Al-Cu-Mg-Fe-Ni 系,在强度和塑性指标上能满足钻井的需要,但硬 度低服役时易出现磨损降低钻柱的可靠性。我国在 研发石油钻杆用铝合金材料时,应以该3大铝合金 材料体系为基础重点研发高热强性铝合金,根据钻 杆使用工况,有针对性的提高其耐磨性能,开发高 性能的铝合金钻杆。本文以7075 铝合金为研究对 象,采用喷射成形和半固态挤压技术,制备出晶粒 细小组织均匀的铝合金钻杆坯料,再通过固溶+时 效处理获得高性能的耐磨铝合金钻杆^[5]。

1 实验

1.1 材料制备与金相组织

步骤 1:采用自主研发的喷射成形设备完成 7075 铝合金钻杆坯料制备,工作参数:①工作温度 高于熔点 120~150 ℃;②气压 0.70~0.85 MPa;③ 沉积速度 5~8 kg/min;④沉积距离 450~550 mm; ⑤沉积台转速 50~100 r/min;⑥雾化气体为氮气。 步骤 2:半固态挤压,挤压温度 520 ℃,挤压比 30,



(a)划痕

挤压速度 0.2~0.4 mm/s。步骤 3:固溶时效,固溶温 度 490±5 ℃,保温时间 1.5 h,冷却介质水(室温),转 移时间≤12 s;时效温度 190±5 ℃,保温时间 12 h。 采用线切割从钻杆端部切割出 20 mm×10 mm× 5 mm 的试样,依次使用 400、800、1 200、2 000、3 000、 5 000 号砂纸抛光,保证试样观察面的平整,每更换 砂纸后打磨方向旋转 90°。抛光后使用无水乙醇超 声清洗自然风干,腐蚀其表面 3 s 观察金相组织^[6]。

1.2 硬度与摩擦性能测试

用砂纸和金刚石抛光膏对 7075 铝合金钻杆试 样表面进行抛光至 0.25 μm,用维氏硬度测试仪将 金刚石压头压入材料表面,测试载荷 50 g,停留时间 15 s,分别取 5 个点求平均值。

采用 MMQ-02G 高温摩擦磨损仪对试样进行室 温下摩擦磨损性能测试,摩擦对偶件为 φ6 mm 陶瓷 球。对于给定的摩擦表面,磨损率是以载荷、速度、温 度及材料的热机械、化学性能为变量的函数。该实验 分为两组进行测试载荷和速度对摩擦性能影响,摩 擦时间均为 20 min,摩擦球回转半径 2 mm:①转速 设为 500 r/min、载荷分别设置为 5、10、15、20 和 25 N, 测试摩擦系数、磨损率与载荷的变化关系;②载荷 设定为 15 N,转速分别设置为 400 r/min(线速度 104.67 mm/s)、600 r/min(线速度 125.6 mm/s)、 800 r/min(线速度 83.73 mm/s)、1 000 r/min(线速度 104.67 mm/s)和 1 200 r/min(线速度 125.6 mm/s),测 试摩擦系数、磨损率与转速的变化关系。最后采用光 学显微镜和轮廓仪对磨痕形貌进行表征,并分析其 摩擦磨损机理^[7-11]。

2 结果与讨论

2.1 金相组织及硬度

图 2 所示为喷射成形坯料不同阶段的金相组织,图 2(a)为喷射成形后的坯料金相组织,可看出 晶粒细小、组织均匀,但组织致密度不够。图 2(b)为 挤压后的金相组织,可看出未出现层状组织及粗晶 等缺陷,晶粒被拉长,形成了挤压纤维组织。图 2(c)





图 1 铝合金钻杆磨损形式 Fig.1 Wear failure of aluminum alloy drill rod



(a)喷射成形



(c)固溶失效



为固溶时效处理后的金相组织,大部分第二相已经 溶入了α(Al)中,在晶界处有少数球状的第二相没 有完全溶入。喷射成形坯料不同阶段的硬度,挤压 和热处理前的平均维氏硬度 76.42,挤压和热处理 后的平均维氏硬度 147.81,说明挤压和热处理后硬 度大幅度提高,与金相组织变化是相吻合的。

2.2 载荷的影响

图 3 所示为不同载荷时的磨痕和摩擦系数,可 看出随着载荷增大磨痕变宽变深,在磨痕区形成了 不同尺寸的犁沟。如图 3(a)所示当载荷 5 N 时,犁 沟深度浅、宽度窄、密度大,并且分布着圆形微孔。 如图 3(b)所示当载荷 10 N 时,犁沟深度较深、宽度 较宽,并且在一级犁沟的底部又形成了密集的二级 微犁沟,磨痕局部出现微裂纹同时形成了椭圆形微 孔。如图 3(c)所示当载荷 15 N 时,犁沟深度明显加 深,局部材料已经剥离造成更深的犁沟,并且形成 了长条状微孔。如图 3(d)所示当载荷 20 N 时,磨痕 较平滑犁沟较少,整个表面分布着大量的不规则微 孔呈蜂窝状结构。如图 3(e)所示当载荷 25 N 时,磨 痕宽度大没有明显的犁沟结构并出现剥层现象,沿 着摩擦球运动方向出现了较长的贯穿性裂纹,在磨 痕中心区域颜色比两侧深色出现了压实层。如图 3 (f)所示随着载荷增大摩擦系数增大,并且 15 N 是 临界值,当载荷小于 15 N 摩擦系数变化平缓增幅较 小,大于 15 N 摩擦系数变化剧烈增幅较大^[12]。

2.3 速度的影响

图 4 所示为不同速度时的磨痕和摩擦系数,可 看出随着速度增大磨痕宽度基本不变深度增加,在 摩擦区域形成了不同的磨损形貌。图 4(a)可看出当 转速为 400 r/min 时,犁沟深度浅并且犁沟细小密度 大,磨痕中间区刮擦明显。图 4(b)可看出当转速为 600 r/min 时,犁沟深度和宽度增大尤其是在中间区 域形成了较深的犁沟。图 4(c)可看出当转速为 800 r/min 时,磨痕由沟犁和椭圆形微凹坑组成,犁



图 3 速度恒定,磨痕和摩擦系数随载荷的变化关系 Fig.3 Under constant rotation speed, variation of wear scar and friction coefficient with loads





沟表面形成了较多的微凹坑局部出现微裂纹。图 4(d)可看出当转速为1000 r/min时,可看出沟犁表 面出现较大的凹坑,也有多个微凹坑贯通形成的长 条状凹坑。图4(e)可看出当转速为1200 r/min 时,可看出磨痕表面犁沟上出现较大的片状凹 坑。图4(f)可看出随着速度增大摩擦系数增大并 且600 r/min是临界值,当载荷小于600 r/min摩擦 系数变化剧烈增幅较大,大于600 r/min摩擦系数变 化平缓增幅较小,摩擦系数均处于10²数量级^[16-18]。

2.4 磨损机理分析

图 5 所示为磨痕的三维轮廓图。图 5(a)可看出 当载荷 5 N 时,磨痕宽度大约为 800 μm 深度大约 为 15 μm,并且磨痕底部比较粗糙。图 5(b)可看出 当载荷 10 N 时,磨痕宽度大约为 1 000 μm 深度大 约为 20 μm,并且磨痕底部比较粗糙。

图 5(c)可看出当载荷 15 N 时,磨痕宽度大约 为1200 μm 深度大约为 35 μm,并且磨痕底部比较 粗糙。图 5(d)可看出当载荷 20 N 时,磨痕宽度大约 为1200 μm 深度大约为 40 μm,并且磨痕底部比较 平滑。图 5(e)可看出当载荷 25 N 时,磨痕宽度大约 为1200 μm 深度大约为 80 μm,并且磨痕底部比较 平滑。

磨损率是评价材料耐磨性能的重要指标,绝大数材料经过塑性流变发生位移,但材料没有实质损失,直接的失重测量低于磨痕体积损失。因此,采用计算磨损体积测定磨损率,计算公式如式(1) 所示^[15]。

$$W = \frac{V}{S} = \frac{V}{\pi dnt} \tag{1}$$

式中,W 为体积磨损率;V 为磨损体积,mm³;S 为滑 动距离,mm;d 为磨损轨道的直径,mm;n 为转速, r/min;t 为时间,min。

图 6 所示为磨损量、磨损率随载荷的变化关系, 由图 6(a)可看出随着载荷增大磨损量增大,当载荷 在 0~20 N 时磨损量增幅量变化不明显,当载荷达 到 25 N 磨损量增幅急剧增加。由图 6(b)可看出随 着载荷增大磨损率增大,当载荷在 0~20 N 时磨损 率增幅量变化不明显,当载荷达到 25 N 磨损率增幅 急剧增加。因此,可得出结论随着载荷增加磨损量和 磨损率增加,并且超过临界值 25 N 磨损量和磨损率 急剧增加。

机理分析:当载荷小于 15 N时,摩擦陶瓷球会 在载荷作用下使受压区铝合金表层材料发生塑性变 形,随着摩擦球运动将运动前端绝大数材料推挤到 两侧,如图 3 所示,这是由于铝合金塑性较好并且硬 度远小于摩擦球造成的。摩擦陶瓷球表面是非光滑 表面存在微凸凹结构,随着载荷增加凸凹结构压入 铝合金表面深度越大,被推挤出的材料越多形成的 犁沟越深越宽。另外随着载荷增加磨痕表面微孔被 拉长,这是由于载荷增大铝合金表面塑性变形增大 导致高摩擦力,在滑动界面产生较大的剪切应变,近 表面材料存在应变梯度微孔被拉长所致。当载荷增 大到 15 N时,磨痕表面被拉长的微孔演变成微裂纹 并相互贯通,同时应变梯度也会导致摩擦层下材料





发生蠕变,降低了对摩擦层的支撑作用,导致局部 材料从基体剥离推挤出去造成磨痕表面形成很深 的犁沟。因此,可得出结论当载荷小于15N磨损机 制以塑性变形主导,由塑性变形转变成犁沟推挤和 剥层磨损。当载荷大于15N时,由公式(2)可知摩擦 表面温升与载荷、速度呈正比,载荷越大表面温升 越高,超过临界平均温度 125 ℃铝合金将从轻微氧 化磨损转变成严重粘着 / 剥层磨损。可推断当载荷 20N时摩擦区域温升超过临界平均温度 125 ℃,铝 合金氧化严重表面形成了脆性大硬度更高的 Al₂O₃ 耐磨层,增加了其耐磨性减小了磨损率。硬的 Al₂O₃ 耐磨层也导致了更高的摩擦力和剪切应力,摩擦系 数也增加。Al₂O₃ 脆性大与基体材料结合变弱,在剪 切应力作用下很容易剥落,剥落后形成了大面积的 蜂窝状结构。当载荷增大到 25 N 时,摩擦表面的剪 切应变进一步增大,脆性的 Al₂O₃ 耐磨层剥落露出 新的基体材料,进入了塑性变形裂纹扩展、严重氧 化和剥落交替进行的动态平衡过程,剥离的氧化物容易滞留在中间区域并被压实。因此,可得出结论当载荷小于15N磨损机制以塑性变形主导,由塑性变形转变成犁沟推挤和剥层磨损。当载荷大于15N磨损机制以氧化磨损主导,由塑性变形转变成氧化磨损和剥层磨损^[12-14]。

$$T_{\rm f} = T_{\rm b} + \frac{\mu F \nu}{A_{\rm r}} \left(\frac{K_1}{l_{\rm lf}} + \frac{K_2}{l_{\rm 2f}} \right)^{-1}$$
(2)

式中, T_{f} 为闪温; T_{b} 为表面平均温度; μ 为摩擦系数; F为载荷; ν 为滑动速度; A_{r} 为真实接触面积; K_{1},K_{2} 热传导系数; l_{1f},l_{2f} 为线性热扩散长度。

图 7 所示为磨痕的三维轮廓图。图 7(a)~(e) 可看出磨痕的宽度均在 1 000 μm 左右,随着旋转速 度增大磨痕宽度基本不变化仅深度发生较大变化。 当转速为 400 r/min 时,磨痕深度约为 40 μm,磨痕 底部粗糙。当转速为 600 r/min 时,磨痕深度约为 50 μm,磨痕底部粗糙。当转速为 800 r/min 时,磨痕深



Fig.7 Under constant load, 3D images of wear scar for different rotation speeds

度约为 60 μm,磨痕底部粗糙。当转速为 1 000 r/min 时,磨痕深度约为 80 μm,磨痕底部粗糙。当转速为 1 200 r/min 时,磨痕深度约为 100 μm,磨痕底部平 滑。总之,载荷对磨痕宽度和深度均有影响,速度对 磨痕深度影响较大对磨痕宽度影响较小,磨痕宽度 与载荷有关。载荷比速度对摩擦系数影响大。

磨损率按公式(1)计算,结果如图 8 所示磨损 量、磨损率随速度的变化关系,由图 8(a)可看出随 着速度增大磨损量增大,并且磨损量的增幅变化均 一。由图 8(b)可看出随着速度增大磨损率逐渐减 一。机理分析:当速度小于 600 r/min,磨损机制还是 以塑性变形为主导,随着速度增大摩擦功转化呈热 量对材料有软化作用越强,速度越大表层材料塑性 越好硬度越低,在载荷相同条件下摩擦球压入深度 越大,排挤出去的材料越多形成的犁沟越深越宽。 当速度大于 600 r/min,由公式(1)可知温升与速度 成正比,当表层材料温度达到临界平均温度表面出 现严重氧化,形成一层耐磨氧化层减轻了磨损率,犁 沟深度较浅。但氧化层脆性较大与基体结合较弱, 在高速条件下很容易剥离和排出形成了很多凹坑。 当氧化层随着磨损时间延长不断剥离和排出,裸露 出基体新的材料,形成氧化磨损和剥层的交替动态 平衡过程。因此,可得出结论当速度小于 600 r/min,磨 损机制以塑性变形为主导,速度越大材料软化越强, 塑性变形引起的犁沟效应越强。当速度大于 600r/min, 磨损机制以氧化磨损和剥层磨损为主导,由轻微磨







损到严重磨损再到轻微磨损的转变。

3 结论

(1) 干摩擦条件下, 磨损率和摩擦系数随着载荷

和速度增大而增大,载荷比速度对磨损率和摩擦系数影响更大。

(2)当载荷小于临界值 15 N,磨损机制以塑性 变形主导,由塑性变形转变成犁沟推挤和剥层磨损。 当载荷大于 15 N 磨损机制以氧化磨损主导,由塑性 变形转变成氧化磨损和剥层磨损。

(3)当速度小于临界值 600 r/min,磨损机制以 塑性变形为主导,速度越大材料软化越强,塑性变形 引起的犁沟效应越强。当速度大于 600 r/min,磨损 机制以氧化磨损和剥层磨损为主导,由轻微磨损到 严重磨损再到轻微磨损的转变。

参考文献:

- 梁健,李鑫森,王汉宝,等.连续循环系统在科学超深井中的需求分析[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2015,42(4):1-5.
- [2] 孙建华,梁健,张永勤,等.地质钻探高强度铝合金钻杆研制及 其应用[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程),2011,38(7):5-8,62.
- [3] 张喜超. 71 mm 绳索取心铝合金钻杆的研制[J]. 探矿工程(岩土 钻掘工程),2015,42(7):58-61,71.
- [4] 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.
- [5] 鄢泰宁,薛维,兰凯·高可靠性铝合金钻杆及其在超深井和水平 井中的应用[J].地质科技情况,2010,29(1):112-115.
- [6] 杨振兴,李小平,钱绪.挤压比对喷射成形 7075 铝合金材料后 续工艺的影响[J]. 热加工工艺,2016,45(6): 108-111.
- [7] 王永夏,张传涛,张蓓.新型钛合金和铝合金钻杆结构安全性分析[J].石油矿场机械,2010,39(12):31-33.
- [8] 舒志强,袁鹏斌,欧阳志英,等. 铝合金钻杆拉伸性能及应用特点[J]. 石油矿场机械, 2015, 44(12): 37-41.

- [9] 唐继平,狄勤丰,胡以宝,等.铝合金钻杆的动态特性及磨损机 理分析[J].石油学报,2010(4):684-688.
- [10] 吴亮,吴修德,魏世忠,等. 铝合金钻杆的特点介绍 [J]. 机械工程师, 2015(3):177-178.
- [11] 阎美萍. 俄罗斯铝合金钻杆技术应用及前景分析[D].青岛:中国 石油大学(华东),2013.
- [12] Anderson, E R. Aluminum Alloy Drill Pipe in Geothermal Drilling. Proc.World Geothermal Congress 2010, Bali, Indonesia, 12 p.
- [13] 熊党生,李建亮.高温摩擦磨损与润滑[M].西安:西北工业大学 出版社,2013.
- [14] Bertini L, Beghini M, Santus C, et al. Resonant test rigs for fatigue full scale testing of oil drill string connections [J]. International Journal of Fatigue, 2008, 30(6): 978-988.
- [15] Santus C, Bertini L, Beghini M, et al. Torsional strength comparison between two assembling techniques for aluminum drill pipe to steel tool joint connection [J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 2009, 86: 177-186.
- [16] Mahindru D V. Protective treatment of aluminum and its alloys[J]. Global Journal of R esearch in Engineering, 2011, 11(3): 10-14.
- [17] She Ding-shun, Yue Wen, Fu Zhi-qiang, et al. Effects of nitriding temperature on microstructures and vacuum tribological properties of plasma-nitrided titanium[J]. Surface Coatings and Technology, 2015, 264: 32 -40.
- [18] She Ding-shun, Yue Wen, Du Ying-jun, et al. Vacuum tribological properties of titanium with a nano-crystalline surface layer[J]. Tribology Letters, 2015, 57(1): 1-12.

(上接第719页)

滑与密封,2012(8):119-124.

- [2] 陈宣宇,曹建春,周晓龙,等.国内外易切削钢的研究进展及展 望[J]. 热加工工艺,2016(24): 25-28.
- [3] 吴华杰,岳峰,尤大利,等. Mn/S 对含硫非调质钢中硫化物形态 的影响[J]. 北京科技大学学报,2014(S1): 77-82.
- [4] 吕泽安, 倪红卫, 张华, 等. 利用硫化物改善钢性能的应用研究 进展[J]. 材料与冶金学报, 2015, 14(1): 51-57.
- [5] 张硕,杨树峰,李京社,等.碲处理控制 Y15 易切削钢中 MnS 夹 杂物形貌[J]. 钢铁,2017(9): 28-33.
- [6] 霍向东,柳得橹,王元立,等. CSP 工艺生产的低碳钢中纳米尺 寸硫化物[J]. 钢铁,2005,40(8): 60-64.
- [7] Sun W P, Militzer M, Jonas J J. Strain-induced nucleation of MnS in electrical steels [J]. Metallurgical Transactions A, 1992, 23(3): 821-830.
- [8] 杨维宇,杨卓越,丁雅莉,等. Thermo-Calc 在马氏体时效钢热处 理工艺优化中的应用[J]. 钢铁研究学报,2009,21(11): 56-59.
- [9] Valdez M E, Wang Y, Sridhar S. In-situ observation of the formation of MnS during solidification of high sulphur steels [J]. Steel Research International, 2004, 75(4): 247-256.
- [10] Mishra S, Kumar V. Co-precipitation of copper-manganese sulphide in Fe-3%Si steel [J]. Materials Science and Engineering B, 1995, 32(3): 177-184.
- [11] 张海霞,梁娜,翟正龙,等.易切削钢中硫化物形态的研究[J]. 冶

金丛刊,2011(6):49-51.

- [12] 娄德春,崔昆,吴晓春,等. 硫化锰夹杂物的热变形行为[J]. 钢铁 研究学报,1996(6): 11-14.
- [13] 杨俊,汤伟,陈卫金,等.超低硫钢中硫化锰夹杂的生成机理研究[J].金属材料与冶金工程,2015(5):9-15.

| 精铸用 石英砂 | 、石英粉、 | 铝矾土、 | 高铝砂 |
|---|--------------|-------------------------------------|-------------------------------------|
| 灵寿县德泰矿产品有限公司是一家专业 从事非金属矿物的生产厂家,设备先进,技 术力量雄厚。 让客户满意是我们的亲旨 | | | |
| 化学成分 | | | |
| 石英砂 | 石英粉 | 铝矾土 | 高铝砂 |
| SiO₂≥98.7% | ‰ SiO₂≥98.7% | Al ₂ O ₃ ≥55% | Al ₂ O ₃ ≥52% |
| 地 址:河北省灵寿县洞里工业区 电 话:0311-82617801(传真),15175156717 联系人:刘喜亮 | | | |