

摩擦与润滑

真空等温锻造润滑技术

周耀青, 贺小毛, 周乐育

(中国机械总院集团北京机电研究所有限公司, 北京 100083)

摘要: 为了改善真空等温锻造中的润滑问题, 针对两种自制的玻璃润滑剂 RD-1 和 GR-2, 采用座滴法测量了润湿角, 采用示差法测定了线膨胀系数, 采用旋转法测定了高温黏度, 采用试烧法并结合扫描电镜观察了涂层与基体的结合情况。在不同工艺条件下开展了真空等温压缩试验, 以探究摩擦因数与工艺参数的关系。试验结果表明: 在真空等温锻造中, RD-1 玻璃润滑剂具有更好的润湿性和更低的高温黏度; 两种玻璃润滑剂的线膨胀系数相近, 界面涂层厚度均为 40~50 μm ; 在 950~1000 $^{\circ}\text{C}$ 的锻造温度区间, RD-1 玻璃润滑剂的摩擦因数更低, 表现出更好的润滑性能, 更适合于 1000 $^{\circ}\text{C}$ 以下的真空等温锻造工艺。

关键词: 真空等温锻造; 玻璃润滑剂; 摩擦因数; 润滑性; 高温黏度

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2023.12.031

中图分类号: TG316

文献标志码: A

文章编号: 1000-3940 (2023) 12-0217-07

Lubrication technology on vacuum isothermal forging

Zhou Yaoqing, He Xiaomao, Zhou Leyu

(Beijing Research Institute of Mechanical & Electrical Technology Co., Ltd. CAM, Beijing 100083, China)

Abstract: In order to solve the lubrication problems in vacuum isothermal forging, for two glass lubricants RD-1 and GR-2, the wetting angle was measured by the seat drop method, the linear expansion coefficient was measured by the differential method, the high-temperature viscosity was measured by the rotation method, and the combination of coating and substrate was observed by the trial firing method combined with scanning electron microscopy. Then, vacuum isothermal compression tests were conducted under different process conditions to explore the relationship between friction factor and process parameters. The experimental results show that RD-1 glass lubricant has better wettability property and lower high-temperature viscosity in the vacuum isothermal forging. The linear expansion coefficients of the two glass lubricants are similar, and the thicknesses of the interface coating are both 40–50 μm . In the forging temperature range of 950–1000 $^{\circ}\text{C}$, the friction factor of RD-1 glass lubricant is lower, which shows better lubrication performance and is more suitable for the vacuum isothermal forging process below 1000 $^{\circ}\text{C}$.

Key words: vacuum isothermal forging; glass lubricants; friction factor; wettability property; high-temperature viscosity

真空等温锻造是在真空环境下进行等温锻造的成形技术, 应用于镍基粉末高温合金、钛铝间金属化合物等难变形材料的成形, 用以生产飞机机身结构件、航空发动机涡轮盘等关键零部件^[1-6]。真空等温锻造的工作环境温度高、成形速率慢, 容易出现“粘模”现象, 对模具和工件表面的润滑提出了很高的要求^[7]。

对于大气环境下玻璃润滑剂, 已经有大量学者开展了研究。早在 1982 年, 中国机械总院集团北京

机电研究所有限公司的柴训等^[8]对 $\Phi 110$ mm 钛合金涡轮盘的超塑成形润滑剂进行了研究, 通过考虑润滑剂的线膨胀系数、软化起始温度和润湿角等 10 个因素来设计玻璃润滑剂, 研制出 BL-14 涂料, 并应用在涡轮盘的生产中, 取得了良好的效果。北京航空材料研究院李光远等^[9]以硼硅酸盐玻璃为主体, 加入改性丙烯酸树脂作为粘结剂制成水悬浮液润滑剂 FR, FR 系列的润滑剂的使用温度为 680~1200 $^{\circ}\text{C}$, 可以在钛合金、高温合金和不锈钢等材料的热变形工艺下使用。为了适应 T281 精锻工艺和静电喷涂工艺, 北京天力创玻璃科技开发公司的段素杰等^[10]根据复合玻璃的思想设计了专用的玻璃润滑剂, 并对喷涂后润滑剂的干膜厚度进行研究, 试验表明, 干膜厚度为 0.05~0.10 mm, 致密的膜层对

收稿日期: 2023-05-04; 修订日期: 2023-08-10

基金项目: 中国机械科学研究总院集团有限公司技术发展基金项目

作者简介: 周耀青 (1995-), 男, 硕士研究生

E-mail: zhouyaoqing2013@126.com

通信作者: 贺小毛 (1971-), 男, 博士, 正高级工程师

E-mail: hexiaomaos@163.com

钛合金基体具有良好的保护作用。

锻造成形过程中摩擦因数的大小是衡量润滑剂性质的重要参数。锻造摩擦因数的测量方法主要有直接测量法、圆环压缩试验、双杯挤压试样法、圆柱压缩试验等^[11-17]。圆柱锻粗是典型的自由锻工艺，由于端面摩擦的存在使变形后圆柱上下表面的尺寸小于中间自由段的尺寸。Ebrahimi R 和 Najafizadeh A^[12]最早在 2004 年提出利用圆柱的鼓形来评估摩擦因数的方式，并且在各种试验条件下均取得了满意的结果。许树勤等^[18]利用有限元软件模拟了高径比为 1.5 和 1.0、摩擦因数为 0.1~1.0 的圆柱压缩试验，并得到了变形后鼓度与摩擦因数的定量关系，用以剔除摩擦对真应力-真应变曲线的影响。Yao Z H 等^[19]将应变硬化指数考虑进圆柱压缩试验中，提出一种经验模型，用于考虑摩擦因数和应变硬化指数对圆柱压缩试验的影响。

针对为大气环境研制的等温锻造玻璃防护润滑剂，存在高温黏度过高、润滑效果不佳以及不能用在真空等温锻造工艺的问题，开发了两种适用于真空等温锻造的玻璃润滑剂 RD-1 和 GR-2。对两种润

滑剂的润湿性、线膨胀系数、高温黏度、试烧后的涂层和金属基体界面进行了表征和分析，通过真空等温圆柱压缩试验测定了两种润滑剂在 950~1000 ℃、应变速率为 $10^{-3} \sim 10^{-1} \text{ s}^{-1}$ 工艺区间内的摩擦因数。最后，讨论了不同工艺参数对摩擦因数的影响。

1 试验过程

1.1 试验方法

1.1.1 试样材料

试验选用的试样材料为 GH3536 高温合金，是铬、钼固溶强化的镍基高温合金，具有良好的冷热加工成形性能和优秀的抗高温、抗氧化和耐腐蚀性能^[20]。在试验准备过程中，将 GH3536 高温合金坯料加工为 $\Phi 50 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$ 的圆柱形试样。

1.1.2 润滑剂

使用高温熔融+水淬的方法制备了编号为 RD-1 和 GR-2 的两种玻璃润滑剂，其主要成分为蒸馏水、玻璃粉和甲基纤维素。两种玻璃粉的主要成分如表 1 所示。

表 1 两种玻璃粉的化学成分（%，质量分数）

Table 1 Chemical compositions of two glass powders（%，mass fraction）

编号	SiO ₂	B ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CaO	PbO	BaO	Na ₂ O	Fe ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃
RD-1	45~50	13~15	12~15	6~10	0~2	2~3	5~8	2~3	0
GR-2	50~55	10~12	10~12	5~9	4~6	2~3	4~5	0	4~5

由表 1 中可以看出，RD-1 型玻璃粉中高熔点玻璃骨架的成分 SiO₂ 的含量低于 GR-2 型玻璃粉，而低熔点玻璃骨架成分 B₂O₃ 的含量却高于 GR-2 型玻璃粉^[21]。RD-1 型玻璃润滑剂溶液中由于 Fe₂O₃ 提供 Fe³⁺ 而呈红色，GR-2 型玻璃润滑剂溶液中由于 Cr₂O₃ 提供 Cr³⁺ 而呈绿色，他们的加入均是为了提高玻璃熔体与金属基体的润湿性^[22]。

1.2 试验过程

1.2.1 润滑剂性能表征

使用 DataPhysics OCA 高温接触角试验机进行了两种玻璃粉在 GH3536 基体上动态湿润角的拍照和测量。试验过程中首先将玻璃粉压实成直径为 $\Phi 2 \text{ mm}$ 、高度为 4 mm 的小圆柱，随后以 $10 \text{ }^\circ\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$ 的加热速率将试样从室温加热至 1200 ℃，使用设备自带的高清摄像机对玻璃粉加热熔融过程进行记录。

使用 DIL-2014 热膨胀仪对玻璃粉试样进行线膨胀系数的测量。首先将玻璃粉末制样为条状，测量其原始长度，再放入热膨胀仪中持续加热至其状态

发生明显变化，根据千分表的读值，得到各温度对应的位移量，最后绘制玻璃粉的线膨胀系数曲线。

使用 HTV-1600 型高温黏度仪对玻璃粉的高温黏度进行了测定，转子转速为 $100 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 。首先将样品以 $10 \text{ }^\circ\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$ 的升温速率加热至 1400 ℃，保温 25 min，再以 $2 \text{ }^\circ\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$ 的降温速率使液体温度逐步下降至 600 ℃，得到其高温黏度曲线。

使用 ZEISS GeminiSEM 500 扫描电镜对锻烧后 GH3536 基体和涂层的结合界面进行了观察。

1.2.2 圆柱压缩试验

将 GH3536 高温合金圆柱试样放入马弗炉中，以 $10 \text{ }^\circ\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$ 的升温速率加热至 150 ℃，并保温 20 min，以保证坯料温度均匀。在预热后的试样表面刷涂两种玻璃润滑剂，并使用热风枪烘干。将涂有两种玻璃润滑剂的试样转移至真空等温锻压机中，见图 1。关闭舱门，开启机械泵和罗茨泵，将腔体抽至 $5 \times 10^{-1} \text{ Pa}$ 真空度。

采用如图 2 所示加热曲线进行加热，并在到达



图 1 真空等温锻压机腔体中涂有两种玻璃润滑剂的试样

Fig. 1 Samples coated with two glass lubricants in vacuum isothermal forging press cavity

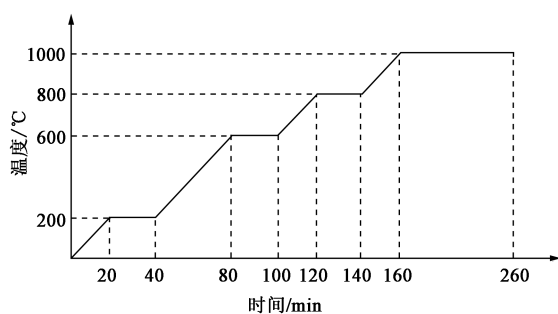


图 2 试验过程中的升温曲线

Fig. 2 Temperature rising curve during test process

最终设定温度后保温 90 min, 以保证模具和坯料的温度均匀性。

启动真空等温锻压机系统, 温度为 950 ~ 1000 °C, 应变速率为 $10^{-3} \sim 10^{-1} \text{ s}^{-1}$, 试样压下量为 30 mm, 即圆柱试样的变形量为 60%。关闭真空等温锻造加热系统, 使模具温度冷却至 200 °C 以下, 取出试样。测量压缩后试样上下表面的平均直径 R_T 、最大鼓度处直径 R_M 和压缩后高度 H' , 并重复 3 次, 对 3 次测量结果取平均值。

2 试验结果与讨论

2.1 玻璃粉性能表征

2.1.1 动态高温湿润角

在真空下玻璃粉的润湿情况如图 3 所示, 从试验结果可以看出, 这两种润滑剂的玻璃粉末在 840 ~ 1200 °C 的温度区间内逐渐从固态颗粒过渡到熔融玻璃液。在加热熔融过程中, 玻璃液内不断有气泡生成, 是玻璃粉中低熔点的成分在分解, 并由于真空

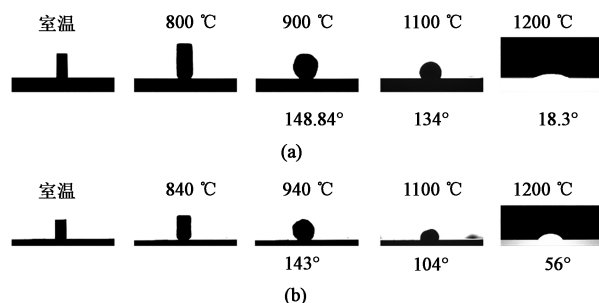


图 3 RD-1 (a) 和 GR-2 (b) 玻璃粉的真空高温润湿角

Fig. 3 Vacuum high-temperature wetting angles of RD-1 (a) and GR-2 (b) glass powders

环境外部气压低而排出。在 1200 °C 下, RD-1 型玻璃润滑剂的润湿角为 18.3°, GR-2 型玻璃润滑剂的润湿角为 56°, 可见 RD-1 型玻璃润滑剂与 GH3536 基体的润湿性更好。

2.1.2 线膨胀系数测定

由于两种玻璃粉的主要成分相同, 因此, 线膨胀系数差别不大, RD-1 型玻璃粉的线膨胀系数为 $6.18 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, 而 GR-2 型玻璃粉的线膨胀系数为 $6.28 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, 见图 4。文献 [23] 显示, 玻璃粉与金属基体的线膨胀系数相差 25% 以上时, 玻璃粉在冷却过程中可自行从金属表面剥落。GH3536 合金的线膨胀系数为 $1.3 \times 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, 因此, 玻璃粉在降温过程中不会与坯料和模具粘连, 导致难以去除。

此外, 还可以从图 4 中获得两种玻璃粉的转变点温度 T_g , RD-1 型玻璃粉的 T_g 为 606 °C, GR-2 型玻璃粉的 T_g 为 601 °C。

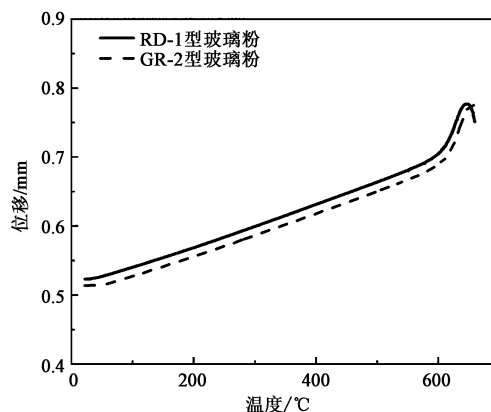


图 4 两种玻璃粉的线膨胀系数

Fig. 4 Linear expansion coefficients of two kinds of glass powders

2.1.3 高温黏度测定

黏度是玻璃润滑剂最重要的性能指标, 关系着润滑剂能否在对应的温度区间内提供足够的润滑^[24]。黏度过低将使摩擦因数增大, 降低成形工件

的表面质量;黏度过高将导致润滑剂容易流淌,“料性”不足,无法有效形成致密薄膜,将模具与工件隔离开^[10]。因此,润滑剂黏度决定了它的使用工艺范围,通常对等温锻造来说,合适的润滑剂黏度为 $10^3 \sim 10^4 \text{ P}$ ^[8-9]。对所配制的两种玻璃润滑剂进行了黏度测试,绘制了图 5 所示的温黏曲线,其中, η 为润滑剂黏度。

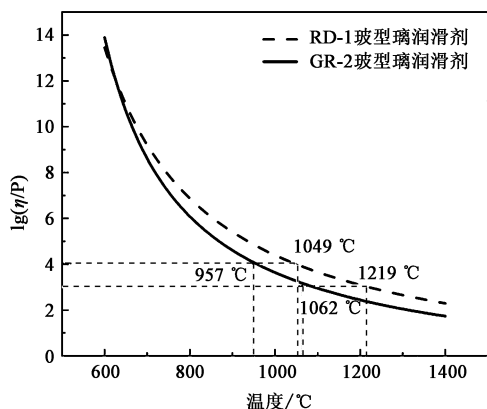


图 5 两种玻璃润滑剂的温黏曲线

Fig. 5 Temperature-viscosity curves for two kinds of glass lubricants

由图 5 可以看出, RD-1 型玻璃润滑剂在 $957 \sim 1049 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 具有 $10^3 \sim 10^4 \text{ P}$ 的黏度, GR-2 型玻璃润滑剂在 $1062 \sim 1219 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 的范围具有该黏度。

2.1.4 基体与涂层界面的 SEM 分析

从图 6 可以看出,界面可以分为 3 部分:最左侧为 GH3536 基体,中间部分为过渡层,最外层为玻璃涂层。涂层的厚度大约为 $40 \sim 50 \text{ }\mu\text{m}$,而过渡层为 $20 \sim 35 \text{ }\mu\text{m}$,基体表面完整,未经腐蚀。从元素线扫描结果来看,最外层为玻璃的主要组成成分,即硅等非金属元素,金属阳离子位于中间层,使用 RD-1 型玻璃润滑剂时中间层聚集了大量 Fe 元素,而使用 GR-2 型玻璃润滑剂时中间层主要为 Cr 元素。因此,在润滑剂中加入适当的金属阳离子,有助于中间层的形成,可以促进金属润滑剂与玻璃润滑剂的润湿性。

2.2 摩擦因数测定

RD-1 圆柱压缩试验的尺寸数据如表 2 和表 3 所示。Ebrahimi R 和 Najafizadeh A^[12]在进行圆柱压缩试验时(图 7),引进了圆柱鼓度系数 b ,用来反映圆柱的最大鼓起程度,表达式见式(1)~式(4)。

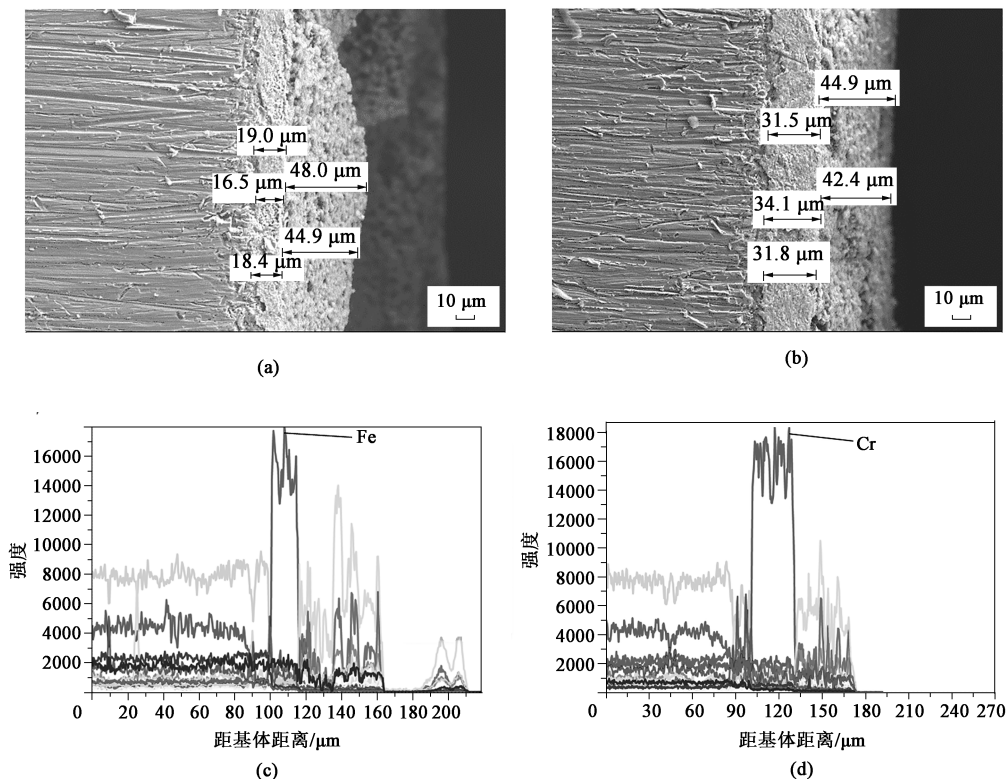


图 6 玻璃涂层与基体的界面图和线扫描图

(a) RD-1 玻璃涂层与 GH3536 基体界面图 (b) GR-2 玻璃涂层与 GH3536 基体界面图 (c) RD-1 玻璃涂层与 GH3536 基体界面线扫描图 (d) GR-2 玻璃涂层与 GH3536 基体界面线扫描图

Fig. 6 Interface images and line scanning images of glass coating and substrate

(a) Interface image of RD-1 glass coating and GH3536 substrate (b) Interface image of GR-2 glass coating and GH3536 substrate (c) Interface line scanning image of RD-1 glass coating and GH3536 substrate (d) Interface line scanning image of GR-2 glass coating and GH3536 substrate

表 2 使用 RD-1 型玻璃润滑剂时变形前后的圆柱尺寸 (mm)
Table 2 Dimensions of cylinders using RD-1 glass lubricant before and after deformation (mm)

变形温度/ ℃	应变速率/ s ⁻¹	H ₀	H	R ₀	R _M	R _T
950	0.001	50.00	22.20	25.00	39.20	37.88
	0.01	50.00	20.52	25.00	37.94	36.16
	0.1	50.00	20.52	25.00	37.20	35.52
1000	0.001	50.00	21.98	25.00	37.95	36.12
	0.01	50.00	19.30	25.00	40.15	37.70
	0.1	50.00	18.40	25.00	39.81	36.67

表 3 使用 GR-2 型玻璃润滑剂时变形前后的圆柱尺寸 (mm)
Table 3 Dimensions of cylinders using GR-2 glass lubricant before and after deformation (mm)

变形温度/ ℃	应变速率/ s ⁻¹	H ₀	H	R ₀	R _M	R _T
950	0.001	50.00	22.20	25.00	37.67	35.03
	0.01	50.00	21.12	25.00	37.32	35.29
	0.1	50.00	20.52	25.00	37.39	36.04
1000	0.001	50.00	18.40	25.00	39.81	36.67
	0.01	50.00	20.00	25.00	39.70	36.92
	0.1	50.00	20.00	25.00	38.50	36.07

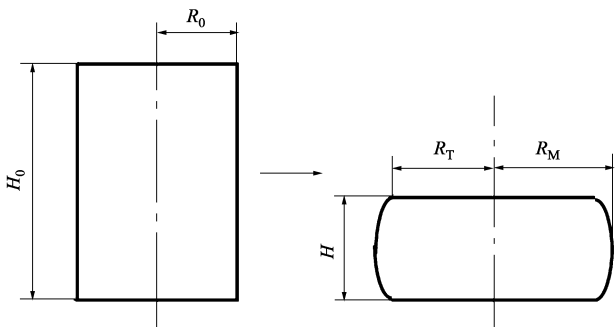


图 7 圆柱压缩试验示意图
Fig. 7 Schematic diagrams of cylindrical compression test

$$b = 4 \times \frac{\Delta R}{R} \times \frac{H}{\Delta H} \tag{1}$$

$$\Delta R = R_M - R_T \tag{2}$$

$$R = R_0 \sqrt{\frac{H_0}{H}} \tag{3}$$

$$\Delta H = H_0 - H \tag{4}$$

式中：R₀ 为圆柱初始半径；R 为压缩后圆柱的名义

半径，可利用压缩前后的体积不变性求得；R_M 为压缩后最大鼓肚半径；R_T 为压缩后的圆柱表面半径；ΔR 为 R_M 和 R_T 的差值；H₀ 为圆柱初始高度；H 为圆柱压缩后的高度；ΔH 为圆柱高度的压缩量。

使用上限法^[12]推得了试样压缩前后几何尺寸与常剪切摩擦因数 m 的关系：

$$m = \frac{R \times b/H}{4/\sqrt{3} - 2b/3\sqrt{3}} \tag{5}$$

利用表 2 和表 3 的试验结果和式 (1) ~ 式 (5) 可以获得不同工艺条件下的摩擦因数，见表 4。

表 4 使用两种玻璃润滑剂不同工艺条件下的摩擦因数
Table 4 Friction coefficients under different process conditions using two kinds of glass lubricants

变形温度/ ℃	应变速率/s ⁻¹	摩擦因数 m	
		GR-2 玻璃润滑剂	RD-1 玻璃润滑剂
950	0.001	0.20	0.16
	0.01	0.16	0.14
	0.1	0.15	0.13
1000	0.001	0.25	0.23
	0.01	0.24	0.20
	0.1	0.19	0.13

2.3 真空摩擦行为

在真空环境下，两种玻璃润滑剂均具有良好的润滑效果。RD-1 型玻璃润滑剂由于其在 950 ~ 1000 ℃ 范围内具有更适当的黏度，相比于 GR-2 型玻璃润滑剂，具有更低的摩擦因数，见表 4。

对于同一种玻璃润滑剂，在相同的温度下，摩擦因数随应变速率 ε̇ 降低而升高，如图 8 所示。这是因为慢速的压缩过程不断将玻璃熔体从工件

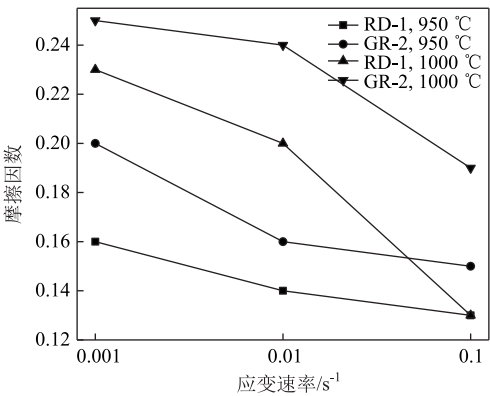


图 8 使用两种玻璃润滑剂时摩擦因数与应变速率的关系曲线
Fig. 8 Relationship curves between friction factor and strain rate using two kinds of glass lubricants

和模具接触面挤出^[25],造成了部分表面模具和工件直接接触,从而形成混合摩擦现象。从图 9 压缩后的圆柱体表面可看出:一部分由于缺少润滑剂而导致表面质量差,说明其接触摩擦因数较大;而应变速率较快时,压缩后圆柱表面附着有连续的玻璃

涂层(一部分金属裸露是因为在冷却过程中金属和玻璃体的热膨胀系数不一致而造成的),且应变速率越快,其连续玻璃体的面积越大,象征着良好的表面润滑效果。因此,高应变速率时摩擦因数较小,见图 10。



图 9 950 °C 时不同工艺条件下压缩后圆柱试样表面情况

Fig. 9 Surface conditions of cylinder samples after compression under different process conditions at temperature of 950 °C

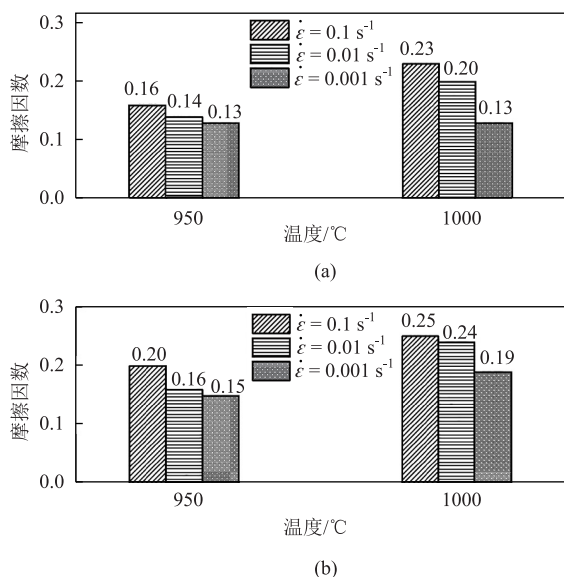


图 10 使用两种玻璃润滑剂时摩擦因数与温度的关系

(a) RD-1 (b) GR-2

Fig. 10 Relationships between friction factor and temperature using two kinds of glass lubricants

由图 10 可知,对于同一种玻璃润滑剂,摩擦因数随着温度的升高而增大。这与 Zhang D W 等^[26]在 TA15 钛合金等温锻造试验中的结论一致。在高应变速率时,由于接触表面润滑充分,处于流体摩擦状态,因此,摩擦因数与 950 °C 时相差不大;在低应变速率时,由于压缩的挤出效应导致部分接触表面处于干摩擦状态,并且温度的升高使黏着摩擦加剧,造成了摩擦因数的上升。

3 结论

(1) 在 1200 °C 时, RD-1 玻璃润滑剂的润湿角

为 18.3°, GR-2 玻璃润滑剂的润湿角为 56°, RD-1 玻璃润滑剂具有更好的润湿性。

(2) RD-1 玻璃润滑剂在 957~1049 °C、GR-2 玻璃润滑剂在 1062~1219 °C 范围内具有适合真空等温锻造工艺的黏度。

(3) 两种玻璃润滑剂的线膨胀系数相近,与金属基体线膨胀系数的差异大于 25%,有利于润滑剂的清除;润滑剂与基体结合良好,其厚度大约为 40~50 μm,过渡层的厚度为 20~35 μm,基体表面完整,无腐蚀现象。

(4) 使用真空等温圆柱压缩试验测量了两种玻璃润滑剂的摩擦因数, RD-1 型玻璃润滑剂在相同工艺下的摩擦因数更低。

(5) 在变形温度为 950~1000 °C、应变速率为 $10^{-3} \sim 10^{-1} \text{ s}^{-1}$ 真空等温锻工艺区间中,摩擦因数随温度升高而升高,随应变速率升高而降低。

参考文献:

- [1] 王淑云, 杨洪涛, 李惠曲. 粉末冶金高温合金盘件等温锻造技术 [A]. 第十一届中国高温合金年会论文集 [C]. 北京: 冶金工业出版社, 2007.
Wang S Y, Yang H T, Li H Q. Isothermal forging technology of P/M superalloy discs [A]. The 11th Chinese Superalloy on the High Temperature Structure Materials for Power and Energy Sources [C]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2007.
- [2] 程葭. 热等温锻造设备 [J]. 有色金属材料与工程, 1988, (5): 60-60.
Cheng Y. Hot isothermal forging equipments [J]. Nonferrous Metal Materials and Engineering, 1988, (5): 60-60.
- [3] 普惠推出全新真空等温锻造压机 [J]. 锻压装备与制造技术, 2019, 54 (3): 5-6.

- Pratt & Whitney Launches new vacuum isothermal forging press [J]. China Metalforming Equipment & Manufacturing Technology, 2019, 54 (3): 5-6.
- [4] Semiatin S L. ASM Metals Handbook Volume 14-Forming and forging [M]. Ninth Edition. USA: ASM International, 2009.
- [5] Li Q H, Li F G, Wan Q, et al. Finite element simulation of superplastic isothermal forging process for nickel-base PM superalloy [J]. Materials Science Forum, 2007, 551-552: 297-302.
- [6] Ohuchi K, Nakazawa Y, Matsuno K. Isothermal forging of nickel-base superalloy modified IN-100 disk [J]. Materials Transactions, 1989, 30 (1): 67-76.
- [7] Dohda K, Boher C, Rezai-Aria F, et al. Tribology in metal forming at elevated temperatures [J]. Friction, 2015, 3 (1): 1-27.
- [8] 柴训, 宋天培, 安利. 钛合金涡轮盘超塑性等温锻造用保护—润滑剂的研制 [J]. 锻压技术, 1982, (2): 34-39.
- Chai X, Song T P, An L. Development of protective lubricants for superplastic isothermal forging of titanium alloy turbine disks [J]. Forging & Stamping Technology, 1982, (2): 34-39.
- [9] 李光远, 栾慧智. FR 系列金属材料热变形防护润滑剂 [J]. 航空材料学报, 1989, (4): 24-31.
- Li G Y, Luan H Z. FR series metal material thermal deformation protection lubricant [J]. Aeronautical Materials, 1989, (4): 24-31.
- [10] 段素杰, 李锡春. 钛合金精锻工艺用 T281 环保型玻璃防护润滑剂 [J]. 锻压技术, 2010, 35 (1): 114-116.
- Duan S J, Li X C. T281 environmentally friendly glass protective lubricant for titanium alloy precision forging process [J]. Forging & Stamping Technology, 2010, 35 (1): 114-116.
- [11] Schrader T, Shirgaokar M, Altan T. A critical evaluation of the double cup extrusion test for selection of cold forging lubricants [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2007, 189 (1-3): 36-44.
- [12] Ebrahimi R, Najafizadeh A. A new method for evaluation of friction in bulk metal forming [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2004, 152 (2): 136-143.
- [13] Tan X, Martins P A F, Bay N, et al. Friction studies at different normal pressures with alternative ring-compression tests [J]. Journal of Materials Processing Technology, 1998, 80-81: 292-297.
- [14] Buschhausen A, Weinmann K, Lee J Y, et al. Evaluation of lubrication and friction in cold forging using a double backward-extrusion process [J]. Journal of Materials Processing Technology, 1992, 33 (1-2): 95-108.
- [15] Bay N. The state of the art in cold forging lubrication [J]. Journal of Materials Processing Technology, 1994, 46 (1): 19-40.
- [16] 林治平. 在锻压生产条件下测定塑性变形摩擦因数——关于圆环镦粗法应用的研究 [J]. 南昌大学学报: 工科版, 1979: 53-67.
- Lin Z P. Determination of plastic deformation friction factor under forging production conditions—Research on the application of ring upsetting method [J]. Journal of Nanchang University: Engineering & Technology, 1979: 53-67.
- [17] Male A T. Variations in friction coefficients of metals during compressive deformation [J]. The Journal of the Institute of Metals, 1966, 94 (4): 121-125.
- [18] 许树勤, 陈志英, 张善元. 镦粗试验中鼓度与摩擦的相关性研究 [J]. 锻压技术, 2004, (5): 46-48.
- Xu S Q, Chen Z Y, Zhang S Y. Research on the relation between bulging and friction in cylinder upsetting [J]. Forging & Stamping Technology, 2004, (5): 46-48.
- [19] Yao Z H, Mei D Q, Shen H, et al. A friction evaluation method based on barrel compression test [J]. Tribology Letters, 2013, 51: 525-535.
- [20] 谢寅, 滕庆, 孙闪闪, 等. 热等静压温度对激光选区熔化成形 GH3536 裂纹和组织性能的影响 [J]. 机械工程学报, 2023, 59 (4): 25-33.
- Xie Y, Teng Q, Sun S S, et al. Effect of hot isostatic pressing temperature on microcrack microstructure and mechanical properties of GH3536 nickel-based superalloy fabricated by selective laser melting [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2023, 59 (4): 25-33.
- [21] 鲍天骄, 李凤兰, 王振军, 等. 大型钛合金锻件用新型玻璃防护润滑剂的研制与性能测试 [A]. 第七届中国航空学会青年科技论坛 [C]. 中山, 2016.
- Bao T J, Li F L, Wang Z J, et al. Research and properties of new type glass protective lubricant for large-size titanium alloy forging [A]. Proceedings of 7th CSAA Science and Technology Youth Forum [C]. Zhongshan, 2016.
- [22] 林承先, 毛复兴, 席聚奎. 模具钢超塑成形用保护润滑剂的研制 [J]. 河南科技大学学报: 自然科学版, 1985, (2): 68-71.
- Lin C X, Mao F X, Xi J K. The Development of protectant-lubricants for superplastic forming of die steel [J]. Journal of Henan University of Science and Technology: Natural Science, 1985, (2): 68-71.
- [23] Harris R, Kelly E, Leeds D H, et al. Graded CVD ZrC Coatings for Low-thermal-expansion Substrates [R]. Santa Fe Springs, CA: Super-Temp Co., 1972.
- [24] 马英仁. 玻璃润滑剂及其在热挤压中的应用 [J]. 摩擦学报, 1984, (2): 84-88.
- Ma Y R. The glass lubricant and its application to thermoset extrusion [J]. Tribology, 1984, (2): 84-88.
- [25] Li L X, Peng D S, Liu J A, et al. An experimental study of the lubrication behavior of A5 glass lubricant by means of the ring compression test [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2000, 102 (1): 138-142.
- [26] Zhang D W, Yang H, Li H W, et al. Friction factor evaluation by FEM and experiment for TA15 titanium alloy in isothermal forming process [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2012, 60 (5-8): 527-536.