

新型金属热挤压用玻璃润滑剂的研制

邹 丰, 冯 驰, 刘 琪, 段素杰

(北京天力创玻璃科技开发有限公司, 北京 100176)

摘要: 为了提升热挤压镍基高温合金无缝管材的加工质量与效率、防止高温氧化与合金元素贫化、保护模具并延长寿命, 调整了玻璃组分中 SiO_2 和 Al_2O_3 的含量, 研制出了一种满足镍基高温合金热挤压工艺 ($1000\sim 1150\text{ }^\circ\text{C}$) 要求的新型玻璃润滑剂。该玻璃润滑剂的软化点为 $740\text{ }^\circ\text{C}$, 半球点为 $822\text{ }^\circ\text{C}$, 流动点为 $897\text{ }^\circ\text{C}$, 其在热挤压温度范围内的高温粘度为 $1.8\sim 2.4\text{ Pa}\cdot\text{s}$, 高温物性与高温粘度均与热挤压工艺要求相匹配。通过圆环墩粗实验得到喷涂玻璃润滑剂的样品的平均摩擦因数为 0.071 , 而无涂层样品的摩擦因数为 0.460 , 摩擦因数降低了 84.6% , 有效地降低了热挤压工艺中的阻力。结果表明, 该玻璃润滑剂具有较好的润滑效果。

关键词: 热挤压; 镍基高温合金; 无缝管材; 玻璃润滑剂; 摩擦因数

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2025.03.017

中图分类号: TG31 文献标志码: A 文章编号: 1000-3940 (2025) 03-0144-06

Development of new type glass lubricant for hot extrusion of metals

Zou Feng, Feng Chi, Liu Qi, Duan Sujie

(Beijing TLC Glass Tech Co., Ltd., Beijing 100176, China)

Abstract: To enhance the processing quality and efficiency of hot extrusion for nickel-based superalloy seamless tube, prevent the high temperature oxidation and alloy element depletion, and protect the die while extending its lifespan, a new type glass lubricant tailored for the hot extrusion process ($1000\sim 1150\text{ }^\circ\text{C}$) of nickel-based superalloy was developed by adjusting the SiO_2 and Al_2O_3 contents in the glass composition. The softening point of the glass lubricant was $740\text{ }^\circ\text{C}$, the hemispherical point was $822\text{ }^\circ\text{C}$, the flow point was $897\text{ }^\circ\text{C}$, and the high temperature viscosity was $1.8\sim 2.4\text{ Pa}\cdot\text{s}$ in the hot extrusion temperature range. The high temperature physical properties and high temperature viscosity were well matched with the requirements of the hot extrusion process. Through the ring upsetting experiment, the average friction coefficient of the sample sprayed with the glass lubricant was 0.071 , while the friction coefficient of the uncoated sample was 0.460 , and the friction coefficient was reduced by 84.6% , which effectively reduced the resistance in the hot extrusion process. The results show that the glass lubricant has a good lubrication effect.

Key words: hot extrusion; nickel-based superalloy; seamless tube; glass lubricant; friction coefficient

金属的热挤压工艺是指通过对挤压筒内的金属坯料施加压力, 使其从特定的模孔中流出, 从而得到所需要的断面形状和尺寸的一种塑性加工方法^[1-3]。该工艺具有许多显著的优点, 例如, 能够破碎碳化物、细化晶粒, 从而改善坯料组织, 提高材料的强度、塑性等力学性能, 此外, 热挤压工艺还能有效地提高材料利用率, 降低材料的生产成本, 在管材、异型材等材料的生产中起着无可替代的重要作用^[4-7]。在大于 $850\text{ }^\circ\text{C}$ 的热挤压变形过程中,

玻璃垫是不可或缺的润滑剂, 可利用玻璃垫为变形金属和挤压模具之间提供持续的润滑作用^[8]。玻璃垫与模具的配合效果如图 1 所示^[9]。

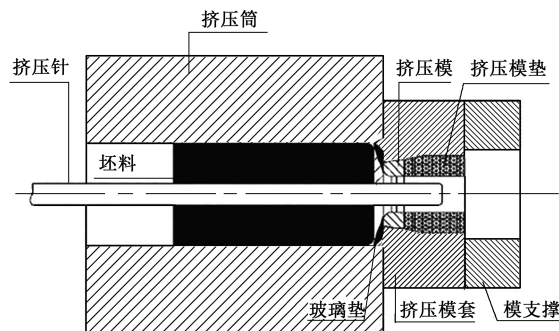


图 1 玻璃垫与挤压工模具的配合效果

Fig. 1 Assembly effect of glass pad and extrusion dies

收稿日期: 2025-01-10; 修订日期: 2025-03-14

作者简介: 邹 丰 (1984-), 男, 学士, 工程师

E-mail: zoufeng@tlcglass.com.cn

金属热挤压工艺受许多关键因素的影响，例如，坯料温度、挤压速度与润滑效果等，其中，优异的润滑效果对金属热挤压工艺十分重要^[10-11]。因为在挤压过程中坯料与挤压筒、模具、挤压芯棒之间有相对位移，会发生摩擦。较大的摩擦会影响成形工件的质量，造成报废，还会损坏模具，缩短使用寿命^[12-14]。在众多的润滑剂中，玻璃润滑剂凭借润滑效果好、导热系数低、隔热效果良好，并且能够形成致密的玻璃膜而避免金属坯料发生氧化等诸多优点得到了十分广泛的应用，也是目前研究的热点。

镍基高温合金无缝管材结合了镍基合金优异的抗氧化、耐腐蚀和抗疲劳，以及无缝管材抗弯能力强、强度与韧性好等优异特性，被广泛应用于石油、化工及军工等领域。相比钻孔轧制法，通过热挤压工艺制备镍基无缝钢管能够显著地提升效率，提高管材的力学性能。但是镍基高温合金，尤其是沉淀强化型合金的塑性变形性能较差，热加工温度窗口较窄，挤压温度过高或过低均会严重影响产品及生产设备，较高的挤压温度会造成晶粒粗大或表面裂纹等问题，较低的挤压温度容易引起焖车现象、管材分层等许多问题。目前，热挤压工艺制备镍基高温合金无缝管材仍然面临许多的挑战，急需解决工艺中的痛点问题。

因此，本研究研制了一种适用于 GH600 和 GH835 镍基高温合金热挤压工艺的玻璃润滑剂。通过调整玻璃润滑剂的组成，研制出一种新的玻璃润滑剂，其高温物性和高温粘度更符合实际工况。同时，还测试了该玻璃润滑剂的摩擦因数，为相关工艺中玻璃润滑剂的制备提供了参考。

1 实验材料及方法

1.1 实验材料

实验材料包括石英砂（SiO₂）、Al₂O₃、Na₂CO₃、Ca₂CO₃、MgO 与硼酸（B₂O₃），所有材料均未经过提纯直接使用。圆环镦粗实验以镍基高温合金为基材，圆环的尺寸如图 2 所示， D （外径）= $\Phi 20$ mm， d （内径）= $\Phi 10$ mm， H （高度）= 7 mm。

1.2 实验方法

1.2.1 玻璃粉制备

粘度的变化与玻璃组分的种类和含量有关，调节 SiO₂ 和 Al₂O₃ 含量，主要是为了提高玻璃的高温粘度和高温稳定性，使得玻璃具有更宽的使用温度范围。加入 B₂O₃、Na₂CO₃、Ca₂CO₃ 和 MgO 可以降

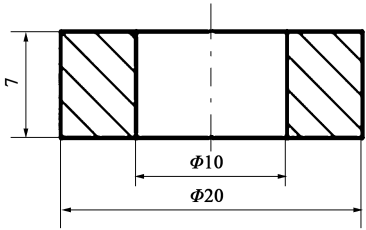


图 2 圆环镦粗实验镍基高温合金圆环尺寸
Fig. 2 Dimensions of nickel-based superalloy ring for upsetting experiment of ring

低玻璃的高温粘度。本研究主要探讨玻璃中 SiO₂ 和 Al₂O₃ 的最佳含量，为此设定了 8 种玻璃，其组分如表 1 所示。

表 1 玻璃的化学组成（%，质量分数）

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

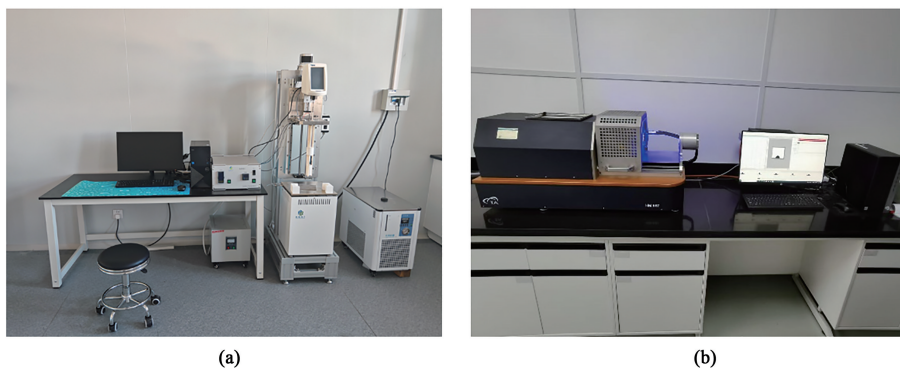
玻璃种类	成分					
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	B ₂ O ₃	Na ₂ CO ₃	Ca ₂ CO ₃	MgO
1 号	48	22				
2 号	53	17				
3 号	58	12				
4 号	63	7				
5 号	63	22	10	2	13	5
6 号	58	17				
7 号	53	12				
8 号	48	7				

按照计算比例称取相应质量的粉体放入氧化锆球磨罐中，在球磨罐中加入不同尺寸的氧化锆球，氧化锆球与玻璃先驱体粉末的质量比为 10：1，行星球磨 30 min 以确保粉末混合均匀。将混合均匀的玻璃先驱体粉末放入马弗炉中预热的坩埚中，烧结温度为 1400 ℃，烧结 40 min 后进行搅拌，搅拌后 20 min 后进行水淬，将水淬后的玻璃渣放入 110 ℃ 的烘箱进行烘干。

称取 50 g 烘干后的玻璃放入刚玉坩埚中进行高温粘度测试，测试仪器为 BROOKFIELD 的 DV-III ULTRA，如图 3a 所示。将干燥后的玻璃研磨后压制尺寸为 $D=\Phi 3$ mm、 $H=3$ mm 的圆柱进行高温物性测试，测试仪器为北京电影机械研究所的 GX-III，如图 3b 所示。

1.2.2 圆环镦粗实验

将制备的玻璃通过行星球磨破碎得到玻璃粉，用 150 目标准筛对球磨后的玻璃粉进行筛分。称取 50 g 筛分后的玻璃粉与 40 g 水混合，倒入 300 mL



(a)

(b)

图 3 测试设备

(a) 高温粘度仪 (b) 高温物性仪

Fig. 3 Testing equipments

(a) High temperature viscosity meter (b) High temperature physical property meter

的球磨罐中球磨 1 h 得到浆料。通过压缩空气将浆料喷涂于镍基高温合金试样表面, 喷涂时确保试样被浆料完全覆盖, 涂层厚度为 200 μm 。

玻璃防护润滑剂摩擦因数的测试依据 HB 7065—1994^[15] 进行, 设计喷涂玻璃润滑剂的样品 1、样品 2、样品 3 作为实验组, 无玻璃润滑剂的样品为空白对照组。将实验组和对照组的圆环试样放入 1100 $^{\circ}\text{C}$ 的马弗炉中加热 5 min, 取出样品后放置在压机上依次进行镦粗, 压机的上下模具表面喷涂水基石墨润滑剂以防止粘连。从马弗炉中取出到镦粗成形完成的时间应在 6 s 内, 规定试样镦粗变形程度为 $(50 \pm 2)\%$ 。镦粗后测量圆环内孔的尺寸并计算出平均直径, 通过式 (1) 计算内径变化率。按内径变化率和镦粗变形程度在 HB 7065—1994^[15] 的圆环镦粗测定摩擦因数校正曲线上查出相应的摩擦因子数值, 通过式 (2) 计算摩擦因数数值。

$$X = \frac{d_1 - d_2}{d_1} \quad (1)$$

$$\mu = \frac{m}{\sqrt{3}} \quad (2)$$

式中: X 为内径变化率, %; d_1 为圆环试样镦粗前的内径; d_2 为圆环试样镦粗后的平均内径; μ 为摩擦因数; m 为摩擦因子。

2 实验结果及讨论分析

2.1 高温物性

图 4 为玻璃配方调整过程中不同样品的高温物性对比。高温物性是玻璃材料重要的特性, 其对玻璃润滑剂的使用具有重要的意义, 其中需重点关注

样品的软化点、半球点与流动点。软化点温度为玻璃由固态转变为液态的临界温度, 玻璃在加热过程中形成半球形状时的温度为半球点, 而流动点指玻璃在加热过程中开始流动的温度。从图 4 中能够看出, 使用不同组分配比玻璃的样品的高温物性差距很大, 结合国内外其他研究^[16-17], 镍基高温合金热挤压过程中热挤压润滑用的最佳使用温度为 1000 ~ 1150 $^{\circ}\text{C}$, 实际所需要的玻璃润滑剂软化点为 780 $^{\circ}\text{C}$, 半球点为 830 $^{\circ}\text{C}$, 流动点为 910 $^{\circ}\text{C}$ 。

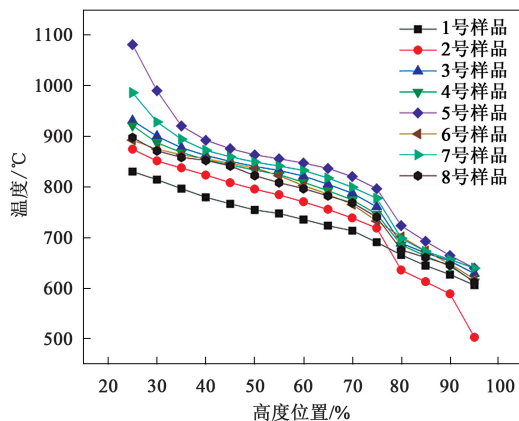


图 4 不同新型玻璃润滑剂的高温物性对比

Fig. 4 Comparison of high temperature physical properties of different new type glass lubricants

在本研究中, 制备得到的 8 号样品玻璃的高温物性与需求的匹配度最高, 8 号玻璃的软化点为 740 $^{\circ}\text{C}$, 半球点为 822 $^{\circ}\text{C}$, 流动点为 897 $^{\circ}\text{C}$ 。玻璃润滑剂的高温物性与热挤压工艺的良好匹配, 能够有效提升热挤压管材的性能。

2.2 高温粘度

图 5 为玻璃配方调节过程中不同样品的高温粘度 η 对比图。从图 5 中可以看出, 玻璃组分的调整

对玻璃材料的高温粘度的影响很大。玻璃润滑剂的高温粘度同样是热挤压过程重要的影响因素，高温粘度的不匹配会引起“橘皮效应”，严重影响热挤压制备的管材的表面质量。此外，镍基高温合金的热加工温度范围较窄，因此对玻璃润滑剂的高温粘度提出了更高的要求。在实际加工过程中热挤压温度范围为 1000~1150 ℃，在该温度范围内润滑剂的高温粘度为 $10^{1.8} \sim 10^{2.3} \text{ Pa} \cdot \text{s}$ 。

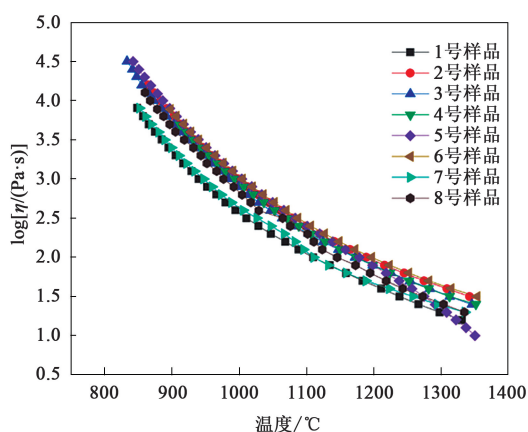


图5 不同新型玻璃润滑剂的高温粘度对比

Fig. 5 Comparison of high temperature viscosity of different new type glass lubricants

在本实验中，8号样品在温度范围为 1000~1150 ℃下的高温粘度为 $10^{1.8} \sim 10^{2.4} \text{ Pa} \cdot \text{s}$ ，与热挤压的高温粘度要求十分匹配，在挤压温度范围内的高温粘度值与进口样品的较小差距说明该玻璃润滑剂能够很好地满足使用要求^[16]。

2.3 圆环镦粗

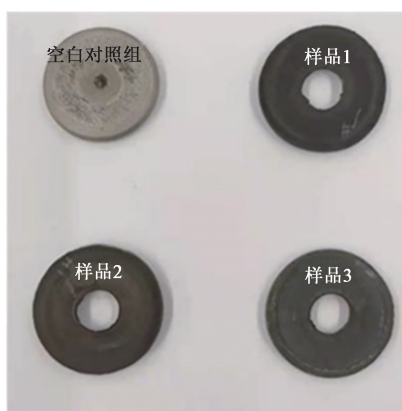
将箱式热处理炉升温至 1100 ℃，放入 3 个喷涂

8号玻璃润滑剂的实验组试样与 1 个空白对照组试样，保温 5 min 后依次取出进行镦粗。图 6 为实验组的 3 个试样与空白对照组的高温合金圆环镦粗前后的图像。经过测量，喷涂新型玻璃润滑剂与无玻璃润滑剂的镍基高温合金圆环镦粗后的平均内径均变小，而无玻璃润滑剂的镍基高温合金圆环镦粗后的平均内径尺寸更大，内径变化率更小。

镦粗后在圆环的 4 个对称位置（每隔 90°测量一次）测量变形高度和内径，表 2 与表 3 分别为喷涂玻璃润滑剂的镍基高温合金和空白对照样品的圆环镦粗实验结果，通过计算得到喷涂玻璃润滑剂的平均摩擦因数为 0.071，无玻璃润滑剂的摩擦因数为 0.460，摩擦因数减小了 84.6%。玻璃润滑剂有效地降低了摩擦因数，减少了金属热挤压工艺中的摩擦阻力，这对于热挤压工艺十分重要^[17]。在圆环镦粗过程中，无玻璃润滑剂的镍基高温合金圆环与模具间的摩擦因数较大。根据圆环镦粗原理，当摩擦因数大于某一临界值时，圆环内部会出现中性层，中性层以内的金属向内流动，使内径缩小；中性层以外的金属向外流动，使外径增大。而喷涂新型玻璃润滑剂后，玻璃润滑剂在镍基高温合金圆环与模具间形成了润滑膜，降低了摩擦因数，使得金属流动更加均匀，内径缩小的趋势相对减弱，但由于加工过程中可能存在的其他因素影响，导致内径有所减小。无玻璃润滑剂时，镍基高温合金圆环与模具之间的摩擦力较大，导致金属流动的不均匀性增加。在镦粗过程中，靠近模具表面的金属受到较大的摩擦阻力，流动相对困难，而内部金属的流动相对自由。这种不均匀的金属流动可能使得圆环内部的应



(a)



(b)

图6 圆环镦粗前后的样品

(a) 镦粗前 (b) 镦粗后

Fig. 6 Samples before and after ring upsetting

(a) Before upsetting (b) After upsetting

表 2 1100 ℃下喷涂新型玻璃润滑剂的圆环镦粗实验结果 (mm)

Table 2 Experimental results of ring upsetting sprayed with new type glass lubricant at 1100 ℃ (mm)

序号	样品 1		样品 2		样品 3	
	变形后高度	变形后内径	变形后高度	变形后内径	变形后高度	变形后内径
1	2.83	Φ8.73	2.89	Φ9.45	3.07	Φ9.05
2	2.83	Φ8.67	2.82	Φ9.33	3.11	Φ9.26
3	2.85	Φ8.76	2.92	Φ9.01	3.08	Φ9.01
4	2.80	Φ8.79	2.87	Φ9.21	3.19	Φ9.32
平均尺寸	2.8275	Φ8.7375	2.8750	Φ9.2500	3.1125	Φ9.1600
变形率/%	59.61	12.63	58.93	7.50	55.54	8.40
摩擦因数 μ	0.076		0.067		0.070	
μ 平均值	0.071					

表 3 无玻璃润滑剂的圆环镦粗实验结果 (mm)

Table 3 Experimental results of ring upsetting without glass lubricant (mm)

序号	空白对照组样品	
	变形后高度	变形后内径
1	2.96	Φ2.42
2	2.88	Φ2.47
3	2.98	Φ2.61
4	3.00	Φ2.52
平均尺寸	2.955	Φ2.505
变形率/%	57.79	74.95
摩擦因数 μ	0.460	

力分布不均匀,进而导致内径尺寸的变化相对复杂。相比之下,喷涂新型玻璃润滑剂后,由于润滑剂的作用,金属流动更加均匀,虽然内径也会变小,但变化相对较为一致,不会出现因局部金属流动受阻而导致的内径尺寸异常增大的情况,因此,平均内径尺寸相对较小,而内径变化率相对较大。

3 结论

(1) 通过主要调整玻璃组分中 SiO₂ 和 Al₂O₃ 的含量,得到喷涂 8 号玻璃的软化点为 740 ℃,半球点为 822 ℃,流动点为 897 ℃,在温度为 1000~1150 ℃下的高温粘度为 10^{1.8}~10^{2.4} Pa·s。高温物性与高温粘度均与镍基高温合金无缝管材的热挤压工艺十分匹配。

(2) 圆环镦粗实验结果表明,喷涂了 8 号玻璃润滑剂的样品的摩擦因数为 0.071,而无玻璃润滑剂的样品的摩擦因数为 0.460,摩擦因数降低了

84.6%,有效地降低热挤压工艺中的阻力。

参考文献:

[1] 张雷. 玻璃润滑剂高温物性及润滑剂/钛材界面行为研究 [D]. 沈阳: 东北大学, 2022.
Zhang L. Study on High-temperature Properties of Glass Lubricants and Lubricant/Titanium Material Interface Behavior [D]. Shenyang: Northeastern University, 2022.

[2] 王宝顺, 林奔, 罗坤杰, 等. 玻璃润滑剂在钢热挤压工艺中的应用 [J]. 世界钢铁, 2010, 10 (3): 44-50.
Wang B S, Lin B, Luo K J, et al. Application of glass lubricants in steel hot extrusion process [J]. World Iron & Steel, 2010, 10 (3): 44-50.

[3] 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文集 (上册) [C]. 中山, 2016.
Bao T J, Li F L, Wang Z J, et al. Development and performance testing of a new glass protective lubricant for large titanium alloy forgings [A]. Proceedings of the 7th Youth Science and Technology Forum of the Chinese Aeronautical Society (Volume I) [C]. Zhongshan, 2016.

[4] 张雷, 王怀柳, 陈鑫, 等. 硼硅酸盐玻璃润滑剂的黏度及析晶行为 [J]. 材料与冶金学报, 2023, 22 (2): 172-177.
Zhang L, Wang H L, Chen X, et al. Viscosity and crystallization behavior of borosilicate glass lubricants [J]. Journal of Materials and Metallurgy, 2023, 22 (2): 172-177.

[5] 党利, 韩敏, 马胜龙, 等. 玻璃润滑剂垫成型模设计 [J]. 模具工业, 2021, 47 (7): 56-58.
Dang L, Han M, Ma S L, et al. Design of glass lubricant pad forming molds [J]. Die & Mould Industry, 2021, 47 (7): 56-58.

[6] 吴任东, 王雪凤, 张磊. 钢管玻璃润滑热挤压工艺的边界条件 [J]. 塑性工程学报, 2009, 16 (4): 95-99.
Wu R D, Wang X F, Zhang L. Boundary conditions of glass lubricated hot extrusion process for steel tubes [J]. Journal of Plastic Engineering, 2009, 16 (4): 95-99.

- [7] 刘长勇, 张人佶, 颜永年, 等. 玻璃润滑热挤压工艺的润滑行为分析 [J]. 机械工程学报, 2011, 47 (20): 127-134.
Liu C Y, Zhang R J, Yan Y N, et al. Analysis of lubrication behavior in glass lubricated hot extrusion process [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47 (20): 127-134.
- [8] 万鹏, 李树荣, 李永林. 玻璃润滑剂对 TC4 钛合金挤压管材外表面质量的影响 [J]. 云南冶金, 2017, 46 (4): 58-62.
Wan P, Li S R, Li Y L. Effect of glass lubricants on the surface quality of TC4 titanium alloy extruded tubes [J]. Yunnan Metallurgy, 2017, 46 (4): 58-62.
- [9] 于志强, 拓雷锋, 周根树. 不锈钢管热挤压用玻璃垫形状研究 [J]. 锻压技术, 2014, 39 (10): 122-127.
Yu Z Q, Tuo L F, Zhou G S. Study on the shape of glass mat for hot extrusion of stainless steel tube [J]. Forging & Stamping Technology, 2014, 39 (10): 122-127.
- [10] 秦伟. “极端制造”的跨越——中国兵器北方重工首台 3.6 万吨垂直挤压机问世 [J]. 装备制造, 2009 (8): 79.
Qin W. The leap of “Extreme Manufacturing” —The first 36,000-ton vertical extruder developed by China north industries group corporation [J]. China Equipment, 2009 (8): 79.
- [11] 段素杰, 邹丰. 新型金属热挤压用玻璃润滑剂使用必要性及其性能特点 [A]. 第三届全国金属加工润滑技术学术研讨会论文集 [C]. 北京, 2011.
Duan S J, Zou F. Necessity and performance characteristics of new glass lubricants for metal hot extrusion [A]. Proceedings of the 3rd National Academic Symposium on Metalworking Lubrication Technology [C]. Beijing, 2011.
- [12] 周运洪, 鲍永鑫, 张晨. 挤压比对 Be-50Al 合金棒材热挤压成形的影响 [J]. 科技创新与应用, 2024 (35): 90-93.
Zhou Y H, Bao Y X, Zhang C. Effect of extrusion ratio on the hot extrusion forming of Be-50Al alloy rods [J]. Technology Innovation and Application, 2024 (35): 90-93.
- [13] 刘长勇, 张人佶, 颜永年, 等. 钢热挤压中的玻璃润滑工艺 [J]. 热加工工艺, 2010, 39 (5): 108-111.
Liu C Y, Zhang R J, Yan Y N, et al. Glass lubrication process in steel hot extrusion [J]. Hot Working Technology, 2010, 39 (5): 108-111.
- [14] 张秀妹. 挤压比对快速凝固-热挤压 5083 铝合金组织与性能的影响 [J]. 机械研究与应用, 2024, 37 (5): 30-31.
Zhang X M. Effect of extrusion ratio on the microstructure and properties of rapidly solidified hot extruded 5083 aluminum alloy [J]. Mechanical Research and Application, 2024, 37 (5): 30-31.
- [15] HB 7065—1994, 金属材料热变形用玻璃防护润滑剂规范 [S].
HB 7065—1994, Specification for glass protective lubricants for thermal deformation of metallic materials [S].
- [16] 张雷, 王怀柳, 陈鑫, 等. 硼硅酸盐玻璃润滑剂的黏度及析晶行为 [J]. 材料与冶金学报, 2023, 22 (2): 172-177.
Zhang L, Wang H L, Chen X, et al. Viscosity and crystallization behavior of borosilicate glass lubricants [J]. Journal of Materials and Metallurgy, 2023, 22 (2): 172-177.
- [17] 赵帆, 赵乙丞, 齐鹏, 等. 锆合金热挤压用防护润滑剂的试制与性能 [J]. 工程科学学报, 2021, 43 (2): 232-238.
Zhao F, Zhao Y C, Qi P, et al. Preparation and performance of protective lubricants for zirconium alloy hot extrusion [J]. Chinese Journal of Engineering, 2021, 43 (2): 232-238.

《锻压技术》全文获取通道全线开通!

方式1: 官方网站

方式2: 《锻压技术》杂志微信公众号

