

DOI: 10.11973/jxgcl201902007

2195 铝锂合金的化学铣切工艺优化

刘凤娟,陈永来,于峰,何仕桓,林军,姚草根

(航天材料及工艺研究所,北京 100076)

摘要: 在 2 种化学铣切(化铣)液($\text{NaOH} + \text{Al}^{3+} + \text{Na}_2\text{S}$ + 三乙醇胺和 $\text{NaOH} + \text{Al}^{3+} + \text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$)中对 2195 铝锂合金进行化铣加工,确定了较佳的化铣液,并利用正交试验对其配方进行优化;在优化化铣液中对试验合金进行化铣加工,研究了化铣温度对化铣速率和表面粗糙度的影响,并对比了化铣前后的表面形貌及拉伸性能。结果表明:由 NaOH 、 Al^{3+} 、 Na_2S 和三乙醇胺组成的化铣液对试验合金的化铣效果优于由 NaOH 、 Al^{3+} 和 $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 组成的,其优化组成为 $210 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1} \text{NaOH}, 40 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1} \text{Na}_2\text{S}, 30 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1} \text{Al}^{3+}$ 和 $50 \text{ mL} \cdot \text{L}^{-1}$ 三乙醇胺;在优化化铣液中,随化铣温度的升高,试验合金的化铣速率增大,侧切率先增后降,化铣温度在 $85 \sim 95^\circ\text{C}$ 较适宜;在 85°C 优化化铣液中化铣至深度约 4.3 mm 时,试验合金表面无裂纹、腐蚀凹坑等缺陷,在 $85 \sim 90^\circ\text{C}$ 化铣至深度约 3.0 mm 时的拉伸性能与化铣前的相近。

关键词: 化学铣切;2195 铝锂合金;化铣速率;表面粗糙度;力学性能

中图分类号: TG178 文献标志码: A 文章编号: 1000-3738(2019)02-0034-05

Optimization of Chemical Milling Process of 2195 Al-Li Alloy

LIU Fengjuan, CHEN Yonglai, YU Feng, HE Shihuan, LIN Jun, YAO Caogen

(Aerospace Research Institute of Materials & Processing Technology, Beijing 100076, China)

Abstract: 2195 Al-Li alloy was machined by chemical milling in two chemical milling solutions ($\text{NaOH} + \text{Al}^{3+} + \text{Na}_2\text{S}$ + triethanolamine and $\text{NaOH} + \text{Al}^{3+} + \text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$). The relatively suitable chemical milling solution was determined and its composition was optimized by orthogonal test. The tested alloy was machined by chemical milling in the optimal chemical milling solution. The effects of chemical milling temperature on the chemical milling rate and surface roughness were studied and the surface morphology and tensile property before and after chemical milling were compared. The results show that the chemical milling solution made up of NaOH , Al^{3+} , Na_2S and triethanolamine had a better chemical milling effect on the tested alloy than that of NaOH , Al^{3+} and $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$, and its optimal composition was listed as follows: $210 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1} \text{NaOH}$, $40 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1} \text{Na}_2\text{S}$, $30 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1} \text{Al}^{3+}$ and $50 \text{ mL} \cdot \text{L}^{-1}$ triethanolamine. In the optimal chemical milling solution, with rising chemical milling temperature, the chemical milling rate of the tested alloy increased whereas the etching ratio increased and then decreased. The chemical milling temperature was relatively suitable at $85 \sim 95^\circ\text{C}$. The surface of the tested alloy had no defects such as cracks and corrosion holes after chemical milling in the optimal chemical milling solution at 85°C to the depth around 4.3 mm, and the tensile property after chemical milling at $85 \sim 95^\circ\text{C}$ to the depth around 3.0 mm was similar to that before chemical milling.

Key words: chemical milling; 2195 Al-Li alloy; chemical milling rate; surface roughness; mechanical property

收稿日期:2017-11-06;修订日期:2018-12-08

基金项目:中央军委装备发展部科研订购局装备预先研究项目(18项)(41422010701);中央军委装备发展部科研订购局装备

预研共用技术项目(12项)(41423050307)

作者简介:刘凤娟(1978—),女,吉林松原人,高级工程师,博士

0 引言

载人航天工程、空间站、探月工程的建设以及超声速飞行器的发展对轻质金属结构材料的性能提出了更高的要求。新型铝锂合金因具有低密度、高比

强度、高比刚度,以及优良的低温性能和耐腐蚀性能而逐渐得到了应用。第三代铝锂合金更是突破了第一代、第二代铝锂合金存在的各向异性严重、热稳定性和加工性能差且不可焊接等缺点而实现了工业化生产,并在火箭、导弹上获得了实际应用^[1-2]。其中,第三代铝锂合金的代表——2195铝锂合金已替代2219铝合金成功应用在美国“奋进号”航天飞机燃料外贮箱上,使得此航天飞机的质量减轻了5%,运载能力提高了3.4 t^[3]。

近年来,随着航空航天的快速发展,国内对2195铝锂合金的应用研究日趋迫切。2195铝锂合金制品的成形工艺包括旋压、超塑性成形、数控加工、化学铣切(简称化铣)等。为保证结构强度,满足轻质要求,铝锂合金制造的蒙皮或燃料贮箱通常设计为带加强筋网格的薄壁件结构^[4],并采用数控加工及化铣加工工艺进行加强筋网格制造。常规数控加工加强筋网格的生产效率低、周期长,而且加工应力大、成本高。化铣加工因具有无刀具损耗、无切削应力、化铣效率高等优点而成为先进制造领域中一

项重要的加工技术。国外对化铣加工技术在化学腐蚀剂、防腐层方面的应用进行了大量研究,并积累了各种材料的化铣数据,但有关铝锂合金化铣技术的公开报道较少。国内针对常规铝合金的化铣加工工艺已经较为成熟^[5-7],但新型铝锂合金的化铣加工工艺研究仍处于初始阶段。2195铝锂合金中的合金元素(如铜、锂、银等)含量较高,因此其微电偶腐蚀严重,这就对其化铣加工工艺提出了苛刻的要求。随着航天航空部件精密化的发展,2195铝锂合金化铣加工工艺的研究意义重大。

为此,作者对2195铝锂合金在2种碱性化铣液中进行了化铣加工,研究了溶液配方、工艺参数对化铣速率、化铣精度、表面粗糙度等的影响,分析了新型铝锂合金的化铣机制并确定了适用于2195铝锂合金的化铣液及相关工艺参数。

1 试样制备与试验方法

试验材料为2195铝锂合金热轧板,由航天材料及工艺研究所提供,其化学成分见表1。

表1 2195铝锂合金的化学成分(质量分数)

Table 1 Chemical composition of 2195 Al-Li alloy (mass)

Cu	Li	Mg	Zr	Ag	Mn	Zn	Ti	Al	%
3.7~4.3	0.8~1.2	0.25~0.80	0.14	0.25~0.60	<0.25	<0.25	<0.1	余	

在2195铝锂合金热轧板上截取尺寸为150 mm×100 mm×5 mm的试样,经丙酮脱脂、水洗、预处理去除表面氧化皮后,在组成为25 g·L⁻¹NaOH+20 g·L⁻¹Na₂CO₃的溶液中浸洗1 min,水洗,用HNO₃溶液(HNO₃体积分数40%)腐蚀1 min出光,再水洗、干燥。按照贮箱产品的网格结构在试样表面设计加强筋,将试样表面划分成4个尺寸为35 mm×50 mm小长方格,采用保护涂料进行表面整体涂覆,固化并刻型,将待铣表面的涂料去除。

将待铣试样在化铣液中浸泡1 h进行化铣加工,取出,冷水冲洗,用HNO₃溶液(HNO₃体积分数40%)腐蚀1 min出光,依次经冷、热水洗,再去除表面涂料,待用。参考常规铝合金化铣工艺设计2种化铣液,组成为180 g·L⁻¹NaOH+25 g·L⁻¹Na₂S+30 g·L⁻¹Al³⁺+40 mL·L⁻¹三乙醇胺(1#化铣液),180 g·L⁻¹NaOH+30 g·L⁻¹Al³⁺+40 g·L⁻¹Na₂S₂O₄·5H₂O(2#化铣液),化铣温度为75~95 °C。采用WykoNT9100型三维表面白光轮廓仪测表面粗糙度;采用微米千分尺测量化铣前后试样的厚度,计算化铣速率,计算公式为

$$v = (h_0 - h_1)/t \quad (1)$$

式中:v为化铣速率;h₀,h₁分别为试样原始及化铣后的厚度;t为化铣时间。

以化铣速率和化铣后试样的表面粗糙度为指标,挑选出较优的化铣液,并以表面粗糙度为指标,采用正交设计对该化铣液进行配方优化。

在优化化铣液中,改变化铣温度(75~105 °C)对试样进行化铣加工,化铣时间为20 min,化铣深度约1 mm,研究了化铣温度对化铣速率和侧切率的影响,确定了较佳的化铣温度。侧切率为平行于表面的腐蚀速率和垂直于表面的腐蚀速率之比,而腐蚀速率可通过一段时间内测量得到的腐蚀宽度及腐蚀深度计算得到。在化铣加工过程中,铝锂合金中的铝会溶解在化铣液中,根据铣切掉的金属中的铝含量可以推算得到溶解在化铣液中的Al³⁺含量(又称为溶解铝含量);在85 °C优化化铣液中进行化铣试验,分析了溶解铝含量对化铣速率和侧切率的影响。

采用Olympus GX51型光学显微镜观察在85 °C优化化铣液中化铣不同时前后的宏观形貌;使用Hitachi S-480型场发射扫描电子显微镜(SEM)观察

化铣 100 min 后试样的表面及截面形貌。

取无划格、未刻型的尺寸为 150 mm×100 mm×5 mm 的试样,在优化化铣液中进行化铣加工,化铣温度控制在 85~90 °C,化铣时间为 1 h,化铣厚度约 3.0 mm,试样的剩余厚度为 2.0 mm。在该试样上截取尺寸为 80 mm×16 mm×2 mm 的拉伸试样,标距尺寸为 40 mm×10 mm,根据 GB/T 228.1—2010,在 CMT5105 型电子万能试验机上进行室温拉伸试验,拉伸速度为 1 mm·min⁻¹。采用 Hitachi S-480 型场发射扫描电子显微镜观察拉伸断口形貌。

2 试验结果与讨论

2.1 化铣液的选择

由图 1 可见:当化铣温度相同时,试样在 2 种化铣液中的化铣速率相近,且均随化铣温度的升高而增大,在 75~95 °C 温度区间的化铣速率均在 22~55 μm·min⁻¹;在相同化铣液中,不同温度下试样的表面粗糙度变化较小,在 2# 化铣液中化铣后试样的表面粗糙度约为 2 μm,是在 1# 化铣液中化铣后的近 2 倍。在 2 种化铣液中化铣后表面粗糙度的差异明显,这主要与 2195 铝锂合金中铜、银等合金元素和杂质元素的含量较高有关。在化铣过程中高电极电位的铜等金属元素与铝发生电化学作用,导致电化学腐蚀,从而影响到铝锂合金表面的均匀性。 Na_2S 和 $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_4$ 均可与铜等金属元素形成沉淀,从而减少电偶腐蚀,降低表面粗糙度。但 1# 化铣液中的三乙醇胺既可以通过螯合合金元素而降低 S^{2-} 的消耗,同时还可以使附着于化铣表面的沉淀迅速脱离而增大 S^{2-} 与化铣表面的接触面积,使得更多的铜形成沉淀,因此在 1# 化铣液中化铣后的表面粗糙度更低^[8-9]。

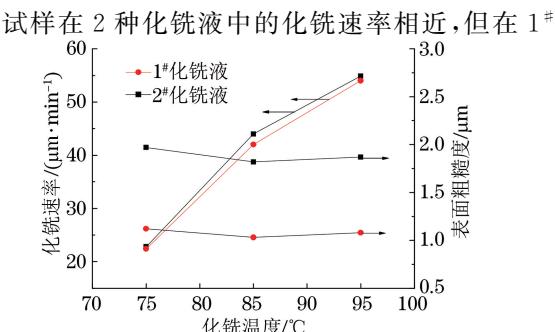


图 1 在 2 种化铣液中试样的化铣速率和表面粗糙度随化铣温度的变化曲线

Fig.1 Chemical milling rate and surface roughness vs chemical milling temperature curves of samples in two chemical milling solutions

化铣液中化铣后的表面粗糙度相对较低,因此选择 1# 化铣液进行工艺优化研究^[10-11]。

2.2 1# 化铣液的优化

对 1# 化铣液配方进行优化。以 NaOH 、 Na_2S 、 Al^{3+} 和三乙醇胺含量为 4 个影响因素,选择 L₉(3⁴) 正交表设计试验,其因素水平见表 2,表中 A,B,C,D 分别代表 NaOH 质量浓度、 Na_2S 质量浓度、 Al^{3+} 质量浓度和三乙醇胺体积分数等 4 个因素。化铣温度控制在(85±2) °C,通过控制化铣时间使化铣深度达到(2.0±0.2) mm,正交试验结果见表 3。

表 2 正交试验的因素水平

Table 2 Factors and levels for orthogonal test

水平	A/(g·L ⁻¹)	B/(g·L ⁻¹)	C/(g·L ⁻¹)	D/(mL·L ⁻¹)
1	180	25	30	40
2	210	40	45	50
3	240	55	60	60

由表 3 中极差 R 的大小,可以判断出 NaOH 对试样表面粗糙度的影响最大,其次是 Na_2S 和三乙醇胺, Al^{3+} 的影响最小。根据 \bar{k}_i 的大小,可以确定 1# 化铣液的最佳组成为 210 g·L⁻¹ NaOH 、40 g·L⁻¹ Na_2S 、30 g·L⁻¹ Al^{3+} 、50 mL·L⁻¹ 三乙醇胺。如无特别说明,下文所用优化化铣液均为最佳组成的 1# 化铣液。

表 3 正交试验结果

Table 3 Results of orthogonal testing

序号	A/(g·L ⁻¹)	B/(g·L ⁻¹)	C/(g·L ⁻¹)	D/(mL·L ⁻¹)	表面粗糙度/μm
1	180	25	30	40	1.03
2	180	40	45	50	0.86
3	180	55	60	60	1.13
4	210	25	45	60	0.75
5	210	40	60	40	0.71
6	210	55	30	50	0.68
7	240	25	60	50	0.85
8	240	40	30	60	0.81
9	240	55	45	40	0.93
\bar{k}_1	1.007	0.877	0.840	0.890	
\bar{k}_2	0.713	0.793	0.847	0.797	
\bar{k}_3	0.863	0.913	0.897	0.897	
R	0.293	0.120	0.050	0.100	

2.3 化铣温度和溶解铝含量对化铣速率和侧切率的影响

由图 2 可见:在优化化铣液中,试样的化铣速率

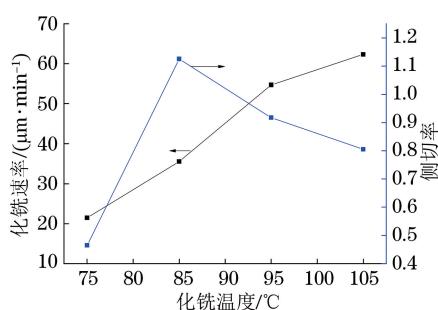


图2 在优化化铣液中试样的化铣速率和侧切率随化铣温度的变化曲线

Fig.2 Curves of chemical milling rate and etching ratio vs chemical milling temperature of samples in optimal chemical milling solution

随化铣温度的升高而增大,当温度由85 ℃升至95 ℃时,化铣速率由35 $\mu\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$ 增至55 $\mu\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$;侧切率随温度的升高先增大后下降。当化铣温度为75 ℃时,侧切率低于0.5,这是因为化铣温度低,则试样的总体腐蚀速率较低;当化铣温度升高至85 ℃时,化铣液活性显著提高,化铣速率增加,侧切率显著提高;当温度继续升高时,化铣速率继续增大,化铣液中的溶解铝含量越来越高,侧切率逐渐下降。为保证化铣质量及化铣速率,化铣温度保持在85~95 ℃较适宜,此时的侧切率在0.91~1.12。

由图3可见:在优化化铣液中,随着溶解铝含量的增加,试样的化铣速率呈现先快速提高而后缓慢降低的变化趋势,侧切率则先降低,而后略有升高,最终趋于稳定;初始化铣速率最小,为15.5 $\mu\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$,初始侧切率则高达3,这可能与铝锂合金表面仍存在未去除干净的氧化膜有关。铝跟碱溶液的反应,实际上是铝与水的反应,生成的氢氧化铝很快溶于NaOH强碱溶液^[11],促使铝和水继续反应。在铝锂合金化铣加工过程中,若铝锂合金表面存在氧化膜,则在反应初期会因表面氧化膜的存在而阻

碍铝和水的反应,导致反应速率较低;但NaOH会与表面氧化膜反应形成偏铝酸钠,造成平行于表面的腐蚀速率高于垂直于表面的,从而形成高的侧切率。随着反应的继续进行,氧化膜消失,裸露的铝与水反应生成氢氧化铝,导致铝锂合金的化铣速率迅速提升,侧切率随之下降。随后,NaOH逐渐消耗殆尽,溶解铝含量逐渐增加;溶解铝在溶液中可生成偏铝酸根离子(AlO_2^-),使 Li^+ 沉淀而减少其在试样表面的集结,从而减缓化铣速率,侧切率逐渐趋于1。

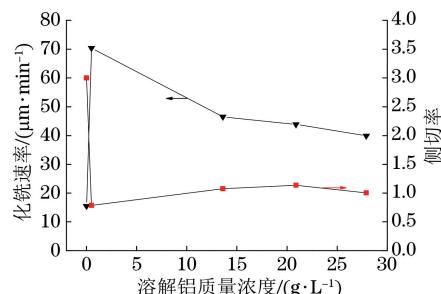


图3 在85 ℃优化化铣液中试样的化铣速率和侧切率随溶解铝含量的变化曲线

Fig.3 Curves of chemical milling rate and etching ratio vs solved aluminum content of samples in optimal chemical milling solution at 85 ℃

2.4 化铣后的表面形貌

由图4可见,在优化化铣液中化铣不同时间后,试样表面均匀光亮、平直度较好、轮廓工整。当化铣温度为85 ℃,化铣时间为100 min,化铣厚度约4.3 mm时,试样的表面粗糙度为0.64 μm ,与化铣前的0.39 μm 相比,化铣后的表面粗糙度略有提高,但与其他参数下的(见表3)相比,其增幅显著降低。

由图5可见:在优化化铣液中化铣后,试样截面基本无腐蚀凹坑、裂纹等缺陷;试样表面轮廓线(箭头所指)在化铣前后无明显差异,均比较平整,说明化铣深度较均匀;化铣后试样的表面也无明显腐蚀凹坑、裂纹等缺陷,化铣表面平整。

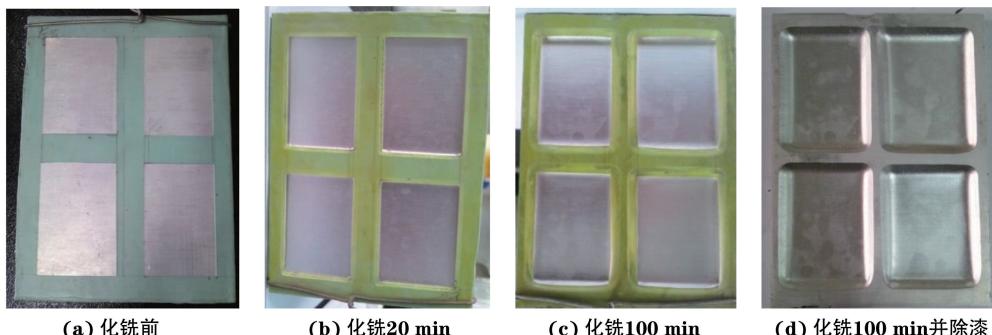


图4 在85 ℃优化化铣液中化铣不同时间前后及化铣100 min并除漆后试样的外观

Fig.4 Appearance of samples before (a) and after chemical milling for different times (b, c) in optimal chemical milling solution at 85 ℃ and after chemical milling for 100 min followed by paint removal (d)

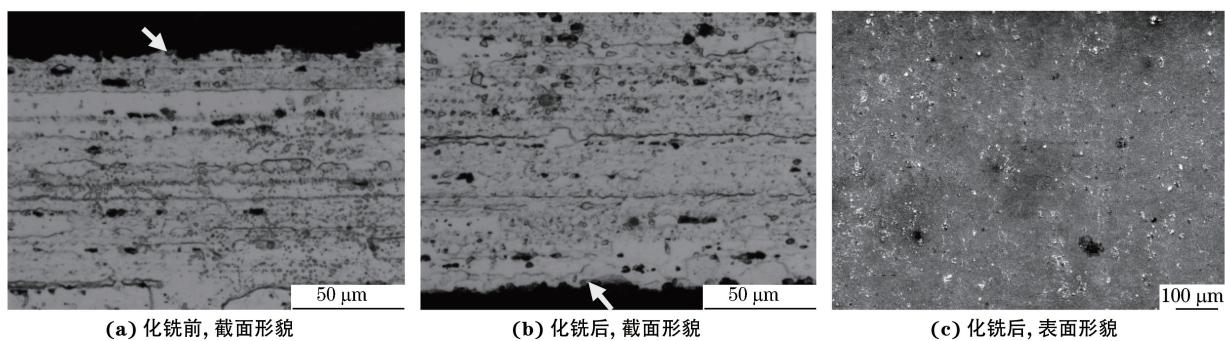


图 5 在 85 °C 优化化铣液中化铣 100 min 前后试样的截面和表面微观形貌

Fig.5 Cross-section (a–b) and surface (c) micromorphology of samples before (a) and after (b–c) chemical milling for 100 min in optimal chemical milling solution at 85 °C

2.5 拉伸性能

化铣前试样的抗拉强度为 580 MPa, 屈服强度为 550 MPa, 伸长率为 8.0%。在优化化铣液中化铣后, 试样的抗拉强度测试值在 575~585 MPa(平均 581 MPa), 屈服强度测试值在 546~554 MPa(平均

551 MPa), 伸长率测试值在 6.5%~11.0%(平均 9.1%)。可见化铣前后试样的拉伸性能相近, 说明此化铣工艺对 2195 铝锂合金的拉伸性能影响不大^[12]。由图 6 可见, 在优化化铣液中化铣后, 试样的拉伸断口呈现典型的韧性断裂特征, 无微观裂纹。

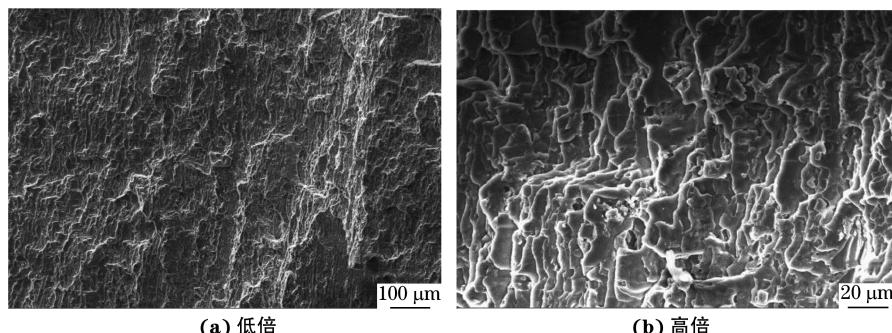


图 6 在优化化铣液中化铣后试样的拉伸断口形貌

Fig.6 Tensile fracture morphology of sample after chemical milling in optimal milling solution: (a) at low magnification and (b) at high magnification

3 结 论

(1) 2195 铝锂合金试样在组成为 $180 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ NaOH、 $25 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ Na₂S、 $30 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ Al³⁺ 和 $40 \text{ mL} \cdot \text{L}^{-1}$ 三乙醇胺的化铣液中化铣加工后的表面粗糙度低于在组成为 $180 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ NaOH、 $30 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ Al³⁺ 和 $40 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ Na₂S₂O₄·5H₂O 的化铣液中的, 由 NaOH、Na₂S、Al³⁺ 和三乙醇胺组成的化铣液的化铣效果较好; 对此化铣液进行配方优化, 确定其最佳组成为 $210 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ NaOH、 $40 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ NaS₂、 $30 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ Al³⁺ 和 $50 \text{ mL} \cdot \text{L}^{-1}$ 三乙醇胺。

(2) 在优化化铣液中, 随化铣温度的升高, 试样的化铣速率增大, 侧切率先增后降, 化铣温度控制在 85~95 °C 较适宜; 在化铣加工过程中, 随溶解铝含量的增加, 试样的化铣速率先增后降, 侧切率则先降后增最后趋于稳定。

(3) 在 85 °C 优化化铣液中化铣加工后, 当化铣深度约 4.3 mm 时, 试样表面未发现微裂纹、腐蚀凹坑等缺陷, 表面平整; 在 85~90 °C 优化化铣液中化铣加工后, 当化铣深度约 3.0 mm 时, 试样的拉伸性能与化铣前的相近, 拉伸断口呈韧性断裂特征, 此化铣工艺对拉伸性能的影响很小。

参考文献:

- [1] 熊焕. 低温贮箱及铝锂合金的应用[J]. 导弹与航天运载技术, 2001(6):37-39.
- [2] 阳志光, 范瑞祥. 1420 铝锂合金在宇航薄壁加筋铆接结构上的应用研究[J]. 宇航材料工艺, 1998(4):74-76.
- [3] 邱慧中. 国外 Al-Li 合金及其航天产品的制造技术[J]. 宇航材料工艺, 1998(4):39-43.
- [4] 金以元. 火箭贮箱壁板化学铣切装备的设计[J]. 导弹与航天运载技术, 2009(2):52-56.

(下转第 42 页)

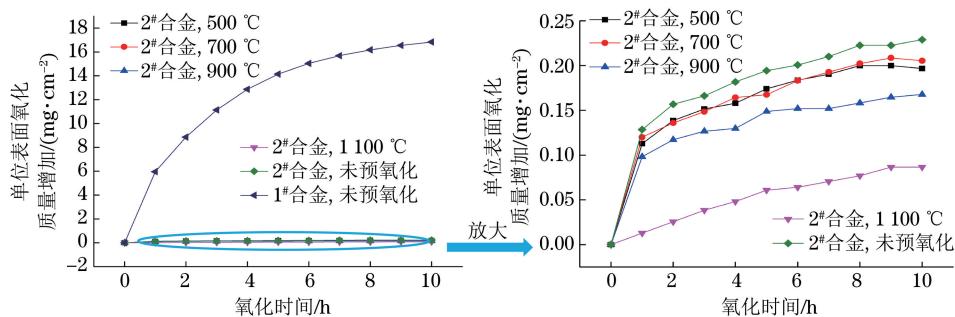


图3 不同温度预氧化处理前后不同合金的氧化动力学曲线

Fig.3 Oxidation kinetic curves of different alloys before and after pre-oxidation at different temperatures

的抗高温氧化性能明显优于Ni-15Cr-5Al合金的。

(2) 预氧化处理后,Ni-15Cr-5Al-5Si合金表面形成 Al_2O_3 和 NiCr_2O_4 氧化膜,当预氧化温度为500,700,900 °C时, Al_2O_3 和 NiCr_2O_4 的含量较少;预氧化温度为1100 °C时, Al_2O_3 和 NiCr_2O_4 的含量增多,但 NiCr_2O_4 的含量少于 Al_2O_3 的。

(3) 不同温度预氧化处理后,Ni-15Cr-5Al-5Si合金在1100 °C循环氧化过程中的氧化质量增加小于未预氧化处理的,说明预氧化处理提高了合金的抗高温氧化性能;随预氧化温度的升高,抗氧化性能逐渐增强,但是增强的效果并不明显。

参考文献:

- [1] GIGGINS C S, PETTIT F S. Oxidation of Ni-Cr alloys between 800 °C and 1 200 °C[J]. Metallurgical Transactions, 1970,1(4):1088.
- [2] AHMAD B. Analysis of the transient oxidation of a Ni-20Cr alloy at high temperature[J]. Oxidation of Metals, 1999,52(1-2):113-138.
- [3] PARK S J, SEO S M, YOO Y S, et al. Effects of Al and Ta on the high temperature oxidation of Ni-based superalloys[J]. Corrosion Science, 2015,90(5):305-312.
- [4] NIU Y, ZHANG X J, WU Y, et al. The third-element effect in the oxidation of Ni- x Cr-7Al ($x=0, 5, 10, 15$ at.%) alloys in 1 atm O_2 at 900—1 000 °C [J]. Corrosion Science, 2006, 48

(上接第38页)

- [5] 周一扬,黄明珠,李澄.铝合金的化学铣切加工[J].模具技术,2000(1):90-91.
- [6] 尹茂生,廖广其,文庆杰,等.铝合金筒段化学铣切工艺研究[J].材料保护,2005,38(8):24-25.
- [7] 廖广其,尹茂生,朱晓英.化学铣切对铝合金基体粗糙度的影响[J].涂料涂装与电镀,2005,3(6):38-39.
- [8] 陈庆龙.铝合金化学铣切工艺及机理研究[D].南昌:南昌航空大学,2011.
- [9] 毛大恒,张灿,周亚军,等.2197铝锂合金化学铣切工艺的探讨

- (12):4020-4036.
- [5] 吴莹,牛焱,Si对Ni- x Al合金900 °C氧化行为的影响[J].金属学报,2005,41(8):865-870.
- [6] WANG S, WU Y, NI C S, et al. The effect of Si additions on the high-temperature oxidation of a ternary Ni-10Cr-4Al alloy in 1 atm O_2 at 900—1 000 °C [J]. Oxidation of Metals, 2009, 51(3):511-517.
- [7] SUN D J, LIANG C Y, WANG E P, et al. The oxidation of four oxide dispersion strengthened Ni-5Al- x Si-0.2 Y_2O_3 ($x=1, 3, 5, 7$ wt.%) alloys in air at 1 100 °C [J]. Corrosion Science, 2018, 133(1):336-348.
- [8] 邱军,赵文金,苗志.预氧化对N18锆合金高温氧化行为的影响[C]//中国核科学技术进展报告.北京:中国原子能出版社,2013:359-364.
- [9] 李志明,钱士强,王伟,等.预氧化温度对GH3128合金抗高温循环氧化性能的影响[J].稀有金属材料与工程,2012,41(11):1980-1984.
- [10] 孙端君,梁春园,尚金龙,等.预氧化温度对Ni-20Cr-5Al-0.2 Y_2O_3 合金抗高温循环氧化性能的影响[J].机械工程材料,2017,41(4):39-43.
- [11] ZHANG X H, ZHANG C, ZHANG Y D, et al. Effect of yttrium and aluminum additions on isothermal oxidation behavior of Tribaloy T-700 alloys [J]. Corrosion Science, 2014, 88(6):405-415.
- [12] 初蕾,刘英才,梁丹维,等.Si含量对镍基合金氧化保护膜影响机制的研究[J].中国海洋大学学报(自然科学版),2011(增刊1):291-294.

- [J].材料保护,2010,43(10):33-36.

- [10] 中国航天工业总公司二一一厂.铝合金化学铣切工艺规范:QJ 2911-1997[S].北京:中国航天工业总公司七〇八所,1997.
- [11] 中国航空综合技术研究所,北京航空制造工程研究所,沈阳飞机工业(集团)有限责任公司.铝合金在碱性溶液中化学铣切工艺:HB/Z 5125-2008[S].北京:中国航空综合技术研究所,2008.
- [12] 胡铁牛.热处理工艺对2195铝锂合金低温力学性能影响规律研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2008.