

冷轧变形量及退火工艺对 Gr.39 钛合金带卷组织性能的影响

蒋孟玲¹, 陈彦辉¹, 孔 玢^{1,2}, 刘正乔¹, 涂爱东¹, 谢宗瑜¹

(1. 湖南湘投金天钛金属股份有限公司, 湖南 长沙 410025)

(2. 南方海洋科学与工程广东省实验室(珠海), 广东 珠海 519080)

摘要: 研究了不同冷轧变形量和退火工艺对 Gr.39 钛合金带卷显微组织和力学性能的影响。结果表明, 对于热轧退火态 Gr.39 钛合金带卷, 当冷轧变形量从 0 升高到 59.4% 时, 显微组织由完全退火的等轴组织逐渐变形为被拉长的纤维状组织, 并且随着变形量的增加, 材料加工硬化程度逐渐增加。考虑到轧制过程的稳定性, 建议单轧程冷轧变形量控制在 60% 以内。Gr.39 钛合金带卷在 700 °C 退火发生完全再结晶, 退火温度升高至相变点以上时, 显微组织转变为粗大魏氏组织。随着退火温度的升高, 抗拉强度和屈服强度逐渐降低, 延伸率逐渐升高。推荐冷轧 Gr.39 钛合金带卷退火制度为 700 °C/8 h/AC。

关键词: Gr.39 钛合金; 冷轧变形量; 退火工艺; 组织性能

中图分类号: TG337.6; TG146.23

文献标识码: A

文章编号: 1009-9964(2023)04-035-05

Effect of Cold Rolling Deformation and Annealing Process on Microstructure and Properties of Gr.39 Titanium Alloy Coil

Jiang Mengling¹, Chen Yanhui¹, Kong Bin^{1,2}, Liu Zhengqiao¹, Tu Aidong¹, Xie Zongyu¹

(1. Hunan Xiangtou Goldsky Titanium Metal Co., Ltd., Changsha 410025, China)

(2. Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory (Zhuhai), Zhuhai 519080, China)

Abstract: The effects of different cold rolling deformation and annealing processes on microstructures and mechanical properties of Gr.39 titanium alloy were studied. The results show that when the cold rolling deformation of annealed hot rolling Gr.39 titanium alloy coil increases from 0 to 59.4%, the uniform equiaxial microstructures change to elongated fibrous microstructures gradually. The working hardening of Gr.39 titanium alloy coil increases with the increasing of cold rolling deformation. Considering the stability of cold rolling, the suggested single rolling deformation is not more than 60%. The Gr.39 titanium alloy coil is completely recrystallized after annealing at 700 °C, when the annealing temperature increases to the phase transition point, the microstructures turn to coarse widmanstatten organization. With the annealing temperature increasing, the tensile strength and yield strength decrease gradually, while the elongation increases gradually. The recommended annealing process of cold-rolled Gr.39 titanium alloy coil is 700 °C/8 h/AC.

Keywords: Gr.39 titanium alloy; cold rolling deformation; annealing process; microstructure and properties

钛及钛合金因其比强度高、生物相容性良好及耐腐蚀性能优异而被广泛应用于航空航天、海洋船舶、医疗器械、化工装备、高端消费品等领域^[1-2]。近年来, Ti-6Al-4V、Ti-5Al-3Mo-2Fe 等钛合金开始被应用于汽车领域, 可制作发动机系统气门、气门座、连杆和曲轴等部件以及底盘部件中的弹簧、排气系统、半轴和

紧固件等^[3]。钛及钛合金的应用有利于减轻汽车重量, 降低摩擦损失和空气阻力, 改善发动机燃烧状态, 提高性能, 从而节油 2%~3%, 降低噪音 5%~10%。日本本田公司等将钛制消音器用于大型汽车和个别中型汽车上, 替代后的系统强度不变, 但汽车速度更快、操作更灵活且更节约燃料^[4]。

2000 年, 工业纯钛在通用汽车排气系统中的年用量超过 150 t^[5]。Ti-0.5Si-Fe 合金由于合金化元素 Si 和

收稿日期: 2023-04-10

通信作者: 刘正乔 (1986—), 女, 高级工程师。

Fe 的添加, 在 600 °C 以上表现出优异的抗氧化性, 同时可保持足够的强度和延伸率^[6]。2014 年, 波音选定埃赛公司为新型 777X 飞机的发动机供应钛制排气系统, 这种排气系统不仅重量更轻, 而且高温性能优异^[7]。2019 年, 日本新日铁住金公司 (NSSM) 将开发的新型钛基合金用于高级跑车“日产 GT-R”的排气系统。该合金具有较高的可加工性和耐热性^[8]。

Gr.39 (UNS R53390, Ti-0.25Fe-0.4Si) 是由美国 TIMET 公司研发的一种钛合金, 因其耐高温、抗氧化及室温成形性良好等特点而被用作中高端汽车排气管。该钛合金的室温和高温强度均高于 Gr.2 (TA2) 纯钛, 可加工性和耐腐蚀性与 Gr.2 纯钛相当, 在 260 °C 高温环境下具有优异的抗氧化性能^[9], 因此成为极具竞争力的机动车排气管候选材料。

Kosaka 等^[10]研究了 Gr.39 钛合金的抗氧化性能和耐腐蚀性能, 研究发现其抗氧化性能优于 Ti-3Al-2.5V 合金, 缝隙腐蚀和应力腐蚀开裂 (SCC) 性能与 Gr.2 工业纯钛相似。Nawaya 等^[11]研究结果表明, Gr.39 钛合金在 400~800 °C 范围内的强度值高于 KS1.2ASNEX 合金。目前国内外关于 Gr.39 钛合金的研究主要集中在耐腐蚀性能、高温氧化性能和高温力学性能等方面, 极少有关于 Gr.39 钛合金带卷加工制造工艺尤其是冷、热轧变形性能及退火等工艺研究的相关报道。采用卷式生产方式可以大大提升生产效率, 降低批量加工成本, 因此, 研究 Gr.39 钛合金带卷的冷形变强化规律、形变参数及变形、退火后组织性能变化规律, 对于降低生产成本、进一步扩大其应用范围、促进汽车轻量化发展具有重要意义。

1 实验

实验材料为采用热连轧制备的 4.5 mm 厚 Gr.39 钛合金带卷, 其化学成分如表 1 所示。热轧态 Gr.39 钛合金带卷经 760 °C/15 min/AC 连续退火后, 其组织为典型的等轴 α 组织, 部分晶界平直、完整, 晶粒尺寸比较均匀, 晶粒度评级为 6.5 级 (平均粒径为 33.6 μm), 如图 1 所示。退火态 Gr.39 钛合金带卷经抛丸酸洗后, 利用森吉米尔 20 辊轧机一轧程冷轧至 1.8 mm, 轧制过程中从不同轧制道次的冷轧带卷上切取试验样品, 其冷轧变形量为 11.2%~59.4%, 如表 2 所示。

表 1 Gr.39 钛合金带卷化学成分 (w%)

Ti	Si	Fe	C	N	H	O
Bal.	0.33	0.24	0.004	0.005	0.003	0.11



图 1 热轧态 Gr.39 钛合金带卷显微组织

Fig.1 Microstructure of Gr.39 titanium alloy coil as hot rolled

表 2 Gr.39 钛合金带卷厚度与变形量

Table 2 Thickness and cold rolling deformation of Gr.39 titanium alloy coil

No.	Thickness/mm	Cold rolling deformation/%
1	3.994	11.2
2	3.300	26.7
3	3.001	33.3
4	2.736	39.2
5	2.464	45.2
6	2.168	51.8
7	1.990	55.8
8	1.825	59.4

对冷轧 Gr.39 钛合金带卷进行退火处理, 退火温度在 650~920 °C 之间, 退火时间分为短时退火 (0.5 h) 和长时退火 (4 h 和 8 h), 冷却方式为空冷, 如表 3 所示。

表 3 冷轧 Gr.39 钛合金带卷退火工艺

Table 3 Annealing processes of cold rolled Gr.39 titanium alloy coil

No.	Annealing process	No.	Annealing process
1	650 °C/0.5 h/AC	6	700 °C/8 h/AC
2	650 °C/8 h/AC	7	750 °C/0.5 h/AC
3	680 °C/8 h/AC	8	850 °C/0.5 h/AC
4	700 °C/0.5 h/AC	9	920 °C/0.5 h/AC
5	700 °C/4 h/AC		

首先用丙酮、酒精溶液去除样品表面油污, 然后采用液压摆式剪板机截取不同厚度的样品 (10 mm × 10 mm) 用于硬度检测, 将截取的不同厚度横向样品 (10 mm × 15 mm) 镶嵌后用于显微组织检测, 按 GB/T 228.1—2021 标准要求切取不同状态、不同厚度的纵、横向样品用于室温拉伸试验。采用 Axiover 40 MAT 型光学电子显微镜 (OM) 观察材料内部显微组织, 采

用 HVS-30Z 型自动转塔式维氏硬度计检测材料不同状态下的表面硬度, 采用 AG-X 100 kN 型电子万能试验机检测材料纵、横向室温力学性能。

2 结果与分析

2.1 冷轧变形量对显微组织的影响

图 2 为不同冷轧变形量下 Gr.39 钛合金带卷的横

截面显微组织。经 11.2% 冷轧变形后 (图 2a), 显微组织中晶粒已有一定程度变形; 冷轧变形量增大到 33.3% 时 (图 2b), 晶粒已明显变形被拉长, 且各晶粒的变形呈现不均匀现象, 部分晶粒变形严重 (衬度较暗), 而另一些晶粒变形程度相对较小。当变形量进一步增加到 59.4% 时 (图 2c), 晶粒被拉长形成纤维状, 晶界变得模糊。

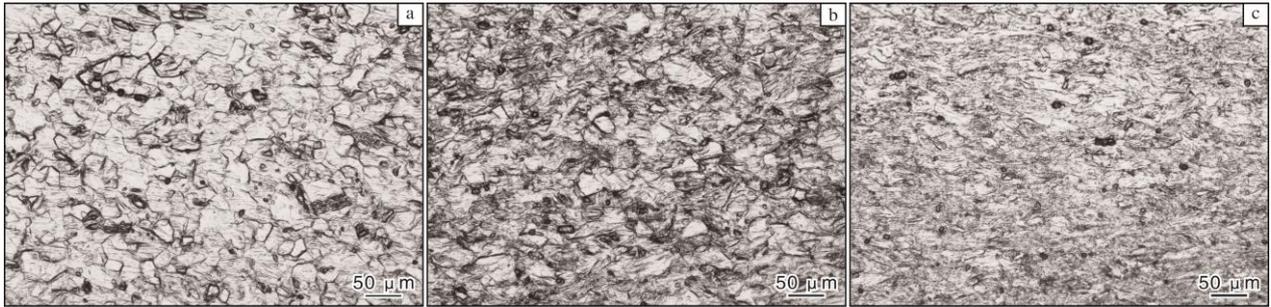


图 2 不同冷轧变形量下 Gr.39 钛合金带卷的横截面显微组织

Fig.2 Microstructures in cross section of Gr.39 titanium alloy coil under different cold rolling deformation conditions: (a) 11.2%; (b) 33.3%; (c) 59.4%

2.2 冷轧变形量对力学性能的影响

图 3 为 Gr.39 钛合金带卷的拉伸性能随冷轧变形量的变化曲线。从图 3 可以看出, 随着冷轧变形量的增大, 强度逐渐升高而塑性降低, 且纵横向力学性能变化规律一致。热轧退火态 (变形量为 0%) 时, 其纵向

抗拉强度和屈服强度分别为 571 MPa 和 407 MPa (屈强比为 0.713), 纵向延伸率为 24.5%。当变形量为 11.2% 时, 纵向抗拉和屈服强度分别提高到 665 MPa 和 574 MPa (屈强比上升到 0.84), 纵向延伸率降低至 15.5%。当变形量大于 40% 时, 强度增加和延伸率下降趋势均减缓, 即加工硬化现象明显。当冷轧变形量增加到 59.4% 时, 合金强度进一步增加, 其中纵向抗拉强度和屈服强度分别达到 916 MPa 和 796 MPa, 屈强比 (0.869) 增大了 0.22 倍, 而纵横向延伸率分别降低至 6.0% 和 7.5%。结合图 2 显微组织分析, 随着冷轧的进行, 等轴 α 相被拉长严重变形, 晶粒细化, 畸变能增加, 同时位错密度增加, 位错运动时相互交割加剧, 阻碍位错的进一步运动, 引起变形抗力增加, 使材料强度提高, 塑性降低。考虑到轧制过程的稳定性, 建议单轧程变形量控制在 60% 以内。

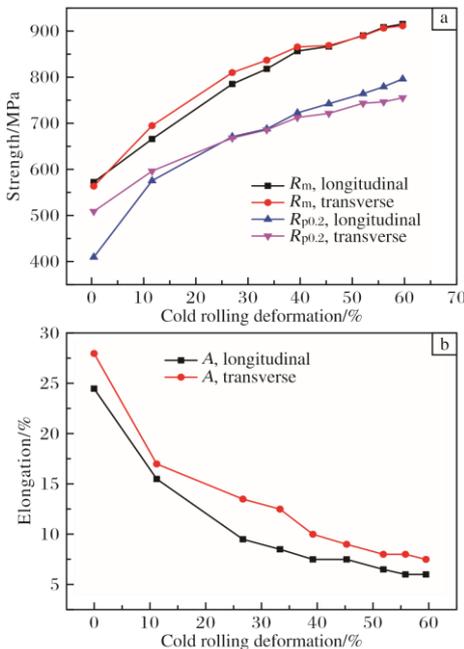


图 3 不同冷轧变形量下 Gr.39 钛合金带卷的室温力学性能

Fig.3 Room temperature mechanical properties of Gr.39 titanium alloy coil under different cold rolling deformation conditions: (a) strength; (b) elongation

表 4 为不同冷轧变形量下 Gr.39 钛合金带卷的屈强比。从表 4 可以看出, 随着冷轧变形量增加, 屈强比变化趋势减缓, 在最大变形量 59.4% 时为 0.869。因此, 在冷轧加工 Gr.39 钛合金带卷时, 应严格控制变

表 4 不同冷轧变形量下 Gr.39 钛合金带卷的屈强比

Deformation	0	11.2%	33.3%	59.4%
Yield ratio	0.713	0.84	0.863	0.869

形量, 保证在合理变形量下所加载荷, 既要高于材料的屈服强度以产生所需要的塑性变形, 又要低于材料的抗拉强度以避免发生不稳定变形而导致断裂。

图 4 为不同冷轧变形量下 Gr.39 钛合金带卷的表面硬度。从图 4 可以看出, 随着冷轧变形量的增加, 表面硬度呈上升趋势, 且变形量小于 40% 时增幅

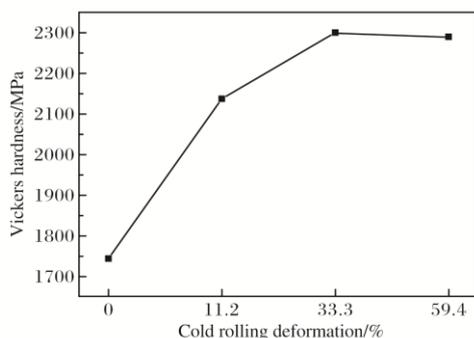


图 4 不同冷轧变形量下 Gr.39 钛合金带卷的表面硬度

Fig.4 Surface hardness of Gr.39 titanium alloy coil under different cold rolling deformations

较大, 随后增加趋势减缓。

2.3 退火工艺对显微组织和性能的影响

图 5 为冷轧 Gr.39 钛合金带卷经不同工艺退火后的显微组织。从图 5 可以看出, Gr.39 钛合金带卷在 650 °C 退火时大部分组织仍为变形组织; 在 700 °C 退火时组织发生完全再结晶并等轴化; 随着退火温度升高, 晶粒长大明显, 在 850 °C 退火时晶粒度约为 7 级。在 700 °C 下, 退火时间延长至 8 h 时, 晶粒尺寸约为 6.5 级。在 920 °C 退火时, 开始出现粗大魏氏组织, 主要原因为退火温度超过其相变点温度 (910~915 °C)。由此可见, 在相变点温度以下, 提高退火温度或延长退火时间均会导致 Gr.39 钛合金带卷晶粒长大。

图 6 为 Gr.39 钛合金带卷经不同工艺退火后的室温拉伸性能。从图 6 可以看出, 当退火时间为 0.5 h 时, 随着退火温度的升高, Gr.39 钛合金抗拉强度和屈服强度逐渐降低并趋于稳定, 延伸率由冷轧态的 7.5% 逐渐升高趋于稳定值 25.5%。当退火温度升高至 850 °C 时, 屈服强度降低至 400 MPa (ASTM B265 标

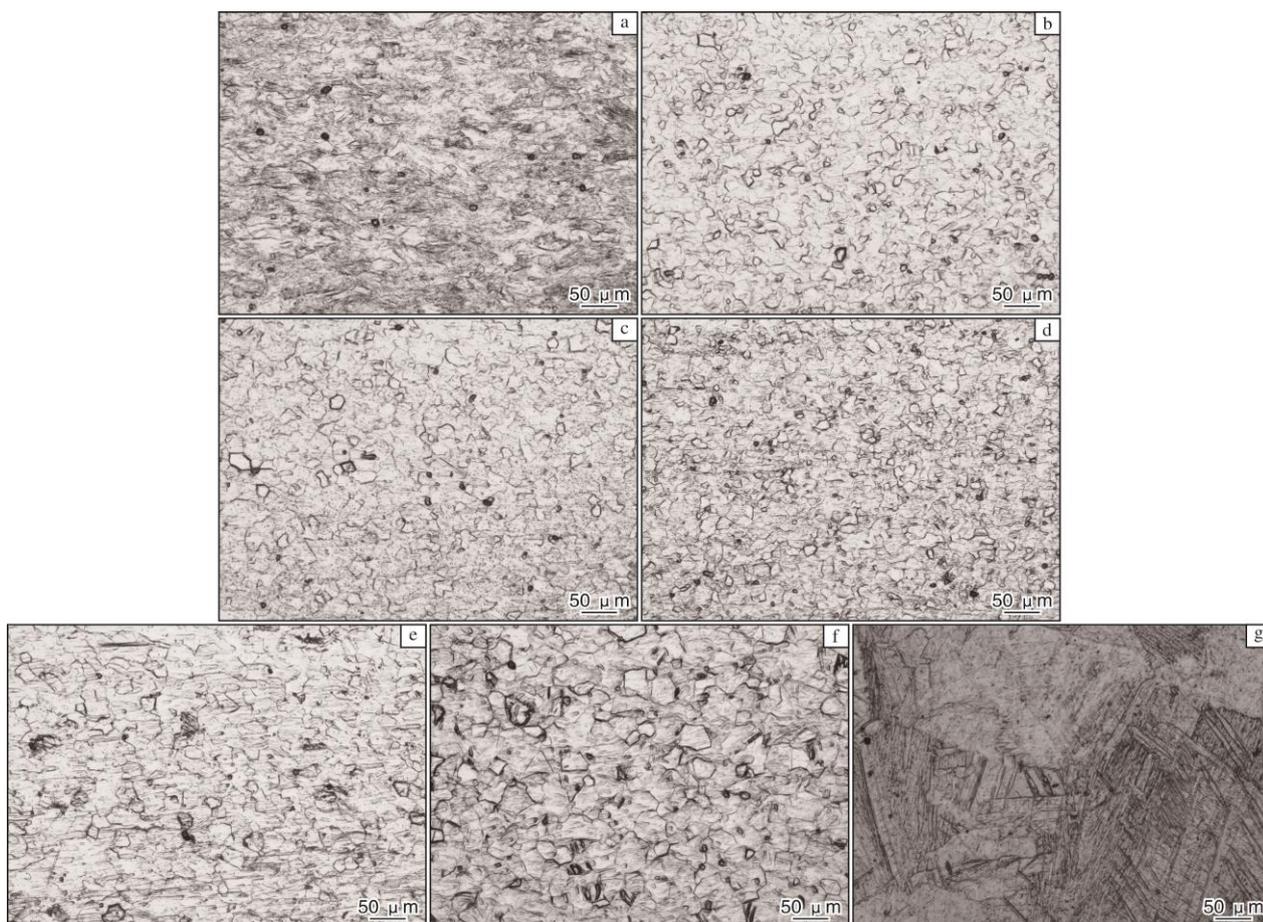


图 5 Gr.39 钛合金带卷经不同工艺退火后的显微组织

Fig.5 Microstructures of Gr.39 titanium alloy coil under different annealing processes: (a) 650 °C/0.5 h; (b) 700 °C/0.5 h; (c) 750 °C/0.5 h; (d) 850 °C/0.5 h; (e) 700 °C/4 h; (f) 700 °C/8 h; (g) 920 °C/0.5 h

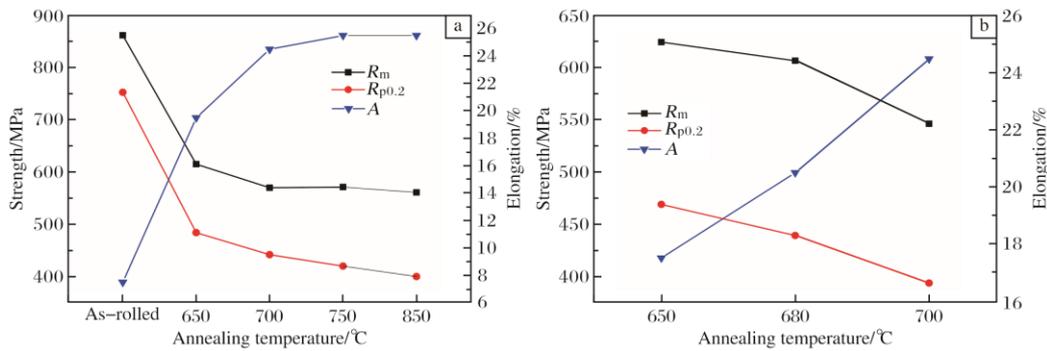


图6 Gr.39 钛合金带卷经不同工艺退火后的室温拉伸性能

Fig.6 Room temperature tension properties of Gr.39 titanium alloy coil under different annealing processes:

(a) annealing time is 0.5 h; (b) annealing time is 8 h

准下限 410 MPa)。因此, Gr.39 钛合金带卷退火温度不宜高于 850 °C。

为模拟 Gr.39 钛合金带卷工业化生产退火制度, 将退火时间延长至 8 h。当退火温度由 650 °C 升高至 700 °C 时, 抗拉强度和屈服强度均降低, 屈服强度仅为 417 MPa (ASTM B265 标准要求 ≥ 410 MPa), 延伸率升高至 24.5% (ASTM B265 标准要求 $\geq 20\%$)。

结合不同退火制度下 Gr.39 钛合金带卷显微组织和力学性能变化规律, 并根据工业化钛带卷生产特点, 推荐退火制度为 700 °C/8 h/AC。

3 结论

(1) Gr.39 钛合金带卷冷轧过程中, 随着冷轧变形量的增加, 其显微组织由等轴 α 组织逐渐变形为被拉长的纤维状组织, 当变形量大于 40% 时, 出现加工硬化现象。

(2) 随着冷轧变形量的增加, Gr.39 钛合金带卷强度和表面硬度呈增加趋势, 延伸率呈降低趋势, 当变形量大于 40% 时, 变化幅度相对减小, 变形量为 59.4% 时, 屈强比达到 0.869。考虑轧制过程的稳定性, Gr.39 钛合金带卷单轧程冷轧变形量建议控制在 60% 以内。

(3) 随着退火温度的升高, Gr.39 钛合金带卷显微组织由冷轧变形纤维状组织逐渐转变为再结晶组织, 在 700 °C 退火时发生完全再结晶, 在相变点以上退火时, 显微组织转变为粗大魏氏组织。随着退火温度升高, Gr.39 钛合金带卷抗拉强度和屈服强度逐渐降低, 延伸率逐渐升高, 推荐退火制度为 700 °C/8h/AC。

参考文献 References

[1] 孙纯纯, 郭志君, 张金勇, 等. 亚稳 β 钛合金在生物医学领

域的研究进展[J]. 稀有金属材料与工程, 2022, 51(3): 1111-1124.

[2] Zhao Y Q, Wu C, Wang H. Advance in relationship between tensile strength and toughness for 1200 MPa high strength and high toughness ti-alloy with damage tolerance[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2022, 51(12): 4389-4397.

[3] 李振江, 任洁. 浅谈轻质材料在新能源汽车轻量化中的应用与发展[J]. 汽车文摘, 2021, 547(8): 15-18.

[4] 李中. 钛及钛合金在汽车上的应用[J]. 中国有色金属学报, 2010, 20(S1): 1034-1038.

[5] 杨遇春. 钛在汽车工业中的应用及降低钛材成本的工艺[J]. 中国工程科学, 2005, 7(8): 9-17.

[6] Kosakal Y, Fox S P. Recent development of titanium and its alloys in automotive and motorcycle applications[C]//TMS Annual Meeting. Sendai: Japan Institute of Metals, 2006: 1383-1386.

[7] 佚名. 波音选定埃赛公司为新型 777X 飞机的发动机供应钛制排气系统[J]. 铸造, 2015, 64(1): 100.

[8] 何蕾. NSSM 宣布研发的新型钛合金将被用于日产 GT-R 汽车排气系统[J]. 钛工业进展, 2019, 36(5): 47.

[9] Calvert K, Kosaka Y. Evaluation of titanium alloys after high temperature air exposure[C]//Proceedings of the 13th World Conference on Titanium. California: The Minerals, Metals & Materials Society, 2016: 1605-1612.

[10] Kosaka Y, Faller K, Fox S P. Newly developed titanium alloysheets for the exhaust systems of motorcycles and automobiles[J]. JOM, 2004, 56: 32-34.

[11] Nawaya T, Beck W, von Hehl A. Tensile properties of α -titanium alloys at elevated temperatures[J]. MATEC Web of Conferences, 2020, 321: 04016.