



商用飞机起落架用单真空300M钢疲劳性能 控制现状及展望

韩 顺¹, 厉 勇¹, 赵肃武², 王 瑞³, 孙 勇³, 李建新³, 王春旭¹

(1 钢铁研究总院有限公司特殊钢研究院, 北京 100081; 2 宝武特种冶金有限公司技术中心, 上海 200940;

3 抚顺特殊钢股份有限公司技术中心, 抚顺 113001)

摘 要: 根据国内商用飞机起落架用300M钢研究和生产现状, 介绍了国内单真空300M钢生产工艺以及疲劳性能控制现状, 分析了国产单真空300M钢疲劳强度与抗拉强度、断裂韧性的对应关系, 以及疲劳开裂过程中非金属夹杂物种类、喷丸强化作用等, 展望了国内商用起落架300M钢未来市场潜力及大尺寸、高性能的绿色发展方向。通过研制攻关, 国内形成了商用飞机起落架300M钢单真空冶炼技术, 抚顺特钢和宝武特冶已建立了单真空300M钢生产体系且具备批量供货能力。研制生产过程中还需重点关注材料的批次稳定性、纯净度及疲劳性能, 加强生产过程控制, 持续优化熔炼和锻造工艺, 降低能耗及成本, 积累数据并完善材料标准体系, 同时研制 $\phi 1\ 080\ \text{mm}$ 及更大锭型的单真空300M钢, 在质量、标准、成本及认证等方面与国际全面接轨。

关键词: 300M钢; 单真空熔炼; 抗拉强度; 疲劳性能; 非金属夹杂物

DOI: 10. 20057/j. 1003-8620. 2023-00123 **中图分类号:** TG142. 1

Current Status and Prospects of Fatigue Performance for 300M Steel by Single Vacuum Process for Landing Gear of Commercial Aircraft

Han Shun¹, Li Yong¹, Zhao Suwu², Wang Rui³, Sun Yong³, Li Jianxin³, Wang Chunxu¹

(1 Institute of Special Steels, Central Iron and Steel Research Institute Co., Ltd., Beijing 100081, China;

2 Technology Center, Bao Wu Special Metallurgy Co., Ltd., Shanghai 200940, China;

3 Technology Center, Fushun Special Steel Co., Ltd., Fushun 113001, China)

Abstract: According to the research and production status of 300M steel for commercial aircraft landing gear in China, the production process and fatigue properties of 300M steel by single vacuum melting process in China are introduced. The relation of fatigue strength, tensile strength and fracture toughness, and fatigue crack source inclusion species of 300M steel for domestic commercial aircraft landing gear are analyzed, and the market potential, future green development direction of 300M steel for commercial aircraft landing gear in China is prospected. Through research and tackle key problems, China has formed 300M steel technology by single vacuum smelting for commercial aircraft landing gear. Fushun Special steel and Bao Wu Special Metallurgy have established process production system with mass production capacity on 300M steel by single vacuum smelting. With the development of production technology, it is necessary to focus on the performance stability, purity and fatigue performance of the material, strengthen control during production, continue to optimize the melting and forging process, reduce energy consumption and costs, accumulate data and improve the material standard system. At the same time, the single vacuum 300M steel of $\phi 1\ 080\ \text{mm}$ and more larger ingot type is developed, which is fully in line with international standards in quality, standards, costs and certification

Key Words: 300M Steel; Single Vacuum Melting Process; Tensile Strength; Fatigue Properties; Non-metallic Inclusion

作为飞机起飞和着陆过程中不可替代的关键装置,起落架承受着机身重量及巨大的冲击载荷,要求材料必须具备高强度、高塑韧性及良好的抗疲劳性能,因此,具有优异比强度和比刚度的超高强度钢成为制造飞机起落架的首选材料^[1-2]。高比强度和比刚度能有效降低起落架重量,提高飞机有效载重,减少飞机的排放,是航空减碳和绿色发展的

重要一环。世界上的众多起落架材料中,应用最广泛的无疑是1 900 MPa级的300M钢,美国90%以上现役军民飞机起落架均使用300M钢制造,同时300M钢也被欧洲各国作为起落架材料使用,如C-17、Boeing747、Boeing787及A350、A380等。目前,国际通用的300M钢标准为SAE发布的AMS 6417($w[\text{C}]0.38\% \sim 0.43\%$)和AMS 6419($w[\text{C}]$

0.40%~0.45%),分别为低C、高C含量的两个强度级别的标准,各航空公司针对各自起落架性能需求,又有自己的标准要求。

为了保证服役过程中的安全性,疲劳性能成为起落架用钢的关键性能指标。300M钢优异的疲劳性能一方面来源于其高的抗拉强度,提高抗拉强度可直接提高钢的疲劳强度^[3-4];另一方面则来源于其较低的杂质元素和夹杂物含量,同时,通过控制钢中夹杂物的尺寸、类型和形貌来改善疲劳服役表现^[5-9]。“双真空”工艺在高纯净度、低偏析和高组织均匀性等方面的突出优势^[10-12],使其成为航空航天超高强度钢的主要熔炼工艺,但随着超高强度钢越来越广泛的应用需求,双真空工艺周期长、成本高等缺点也逐渐显现^[13],而且双真空工艺耗能较高,在民用航空等领域,应坚持绿色低碳特钢的发展理念,不断优化生产工艺,实现节能减排。

中国自20世纪80年代开展300M钢的研制和试生产,不断优化材料的熔炼、锻造工艺,在双真空300M钢的研制生产上积累了大量的经验和数据,满足了各型号飞机及航空建设事业的需求。随着国内自行研制、具有自主知识产权的商用干线喷气式飞机C919的成功研发和交付使用,推动和促进了中国商用民机起落架技术发展、制造平台建立,而且作为一款绿色排放、适应环保要求的先进飞机,不同于国内以往起落架研发,C919飞机起落架要综合考虑材料性能、成本、通用性及节能减排,其熔炼采用国际工艺—真空电弧重熔工艺,达到稳定的高质量批产,才能真正实现和支撑中国大型客机用超高强度300M钢“中国制造”。

本文介绍了商用飞机起落架用单真空300M钢熔炼生产技术,分析了国内单真空300M钢材料疲劳性能,指出国内民机起落架用超高强度钢高性能、大尺寸、绿色环保的发展方向。

1 单真空300M钢熔炼生产工艺

300M钢的国产化研发已有40余年的历史,在大型客机C919研发前,国内起落架用300M钢全部采用双真空工艺熔炼,双真空300M钢生产工艺流程:超纯净钢材→真空感应熔炼→真空自耗重熔→锻造→预备热处理→检验、探伤等,国内应用的起落架用双真空300M钢主要由抚顺特钢生产供货^[14]。

随着中国民用航空的发展,特别是C919客机按照国际民航规章及技术要求研发,起落架材料既要

达到技术指标要求,又要满足商业运行需要,因此,国产商用300M钢依据国际民用航空起落架材料要求,采用单真空工艺熔炼,以期在全球采购中,同时具备质量和价格的竞争能力。单真空300M钢生产工艺流程:电弧炉→炉外精炼→真空自耗重熔→锻造→预备热处理→检验、探伤等,该工艺缩短了生产流程,减少能耗并降低了生产成本。目前,抚顺特钢正在开展赛峰起落架300M钢合格供应商认证^[15],宝武特冶已列入利勃海尔合格供应商目录。

双真空熔炼与单真空熔炼的工艺区别,主要在于自耗重熔电极的来源,双真空工艺中利用真空感应准备自耗电电极,单真空工艺中电极则来源于电弧炉+炉外精炼浇铸。单真空熔炼只经过了真空电弧重熔1次严格意义的真空熔炼,但并不意味对纯净度要求的降低,特别是民机对起落架材料高断裂韧度和疲劳性能要求的情况下,需严格控制300M钢中S、P、O、N等杂质元素和气体含量,利用电弧炉氧化精炼期大量造渣除P、LF炉造白渣控制S、VD/VHD大量氩气搅拌保证最大脱气等手段保证电极的纯净度,自耗重熔阶段进一步脱气并均匀成分组织,保证单真空300M钢的纯净度及成分稳定性。

2 单真空熔炼300M钢疲劳性能

2.1 疲劳性能与抗拉强度、断裂韧性关系

300M钢的高强度主要来源于高位错密度的板条马氏体组织及低温回火析出的碳化物。热处理过程中,C原子进入八面体间隙位置产生晶格畸变,产生间隙固溶强化效果,回火过程中产生的 ϵ -碳化物的弥散析出强化,有研究表明^[16],低合金超高强度钢的抗拉强度与钢中的碳含量成正比关系。

$$R_m = [294 \times w[C] + 82] \times 9.8 \quad (1)$$

式中: R_m 为抗拉强度,MPa; $w[C]$ 适用范围为0.3%~0.5%。

对 $w[C]$ 为0.41%、0.43%和0.45%的300M钢进行拉伸性能、断裂韧性及疲劳性能测试,以探究疲劳性能与抗拉强度及断裂韧性之间的关系。3组试验钢抗拉强度、断裂韧性、高周光滑疲劳($K_t=1$)和高周缺口疲劳($K_t=3$)的疲劳强度变化图如图1所示。由图1可以看出,在 $w[C]$ 为0.41%~0.45%时,由于C的固溶强化作用,C的增加显著提高了300M钢的抗拉强度,断裂韧性随C变化与抗拉强度相反。

300M钢的韧性主要受基体中C决定,C原子以间隙式溶入过饱和的 α -Fe中,引起点阵畸变,造成弹性应力场,其应力场与位错的弹性应力场发生交

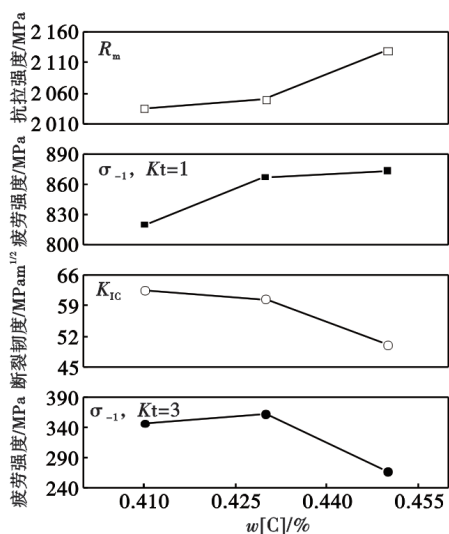


图 1 C 对 300M 钢抗拉强度、疲劳强度、断裂韧性性能的影响

Fig. 1 Influence of C content on tensile strength, fatigue strength, fracture toughness of 300M steel

互作用而成为碳钉扎位错^[17], 固溶强化的同时也降低了韧性。此外, 300M 钢回火后仍有部分残余奥氏体以薄膜状分布在马氏体板条间, 如图 2 所示, 在受力变形时能缓解应力, 组织开裂时残余奥氏体能有效钝化裂纹尖端的应力集中, 改变并分化裂纹走向, 提高裂纹扩展能量^[18], 因此, 稳定含量的残余奥氏体是 300M 钢保持良好韧性的主要原因之一。国产商用起落架用 300M 钢的抗拉强度数值分布如图 3 所示。抗拉强度实测值为 1 945 ~ 2 064 MPa, 平均值约 2 013 MPa, 其中近 80% 的实测值在 1 990 ~ 2 050 MPa; 断裂韧性实测值为 56 ~ 85 MPa m^{1/2}, 平均值约 72 MPa m^{1/2}, 国产商用 300M 钢的性能稳定。

对于疲劳强度而言, 一般情况下, 金属材料的疲劳极限随抗拉强度的提高而增高, 中低强度钢的疲劳极限与抗拉强度之间大体呈线性关系, 但超高强度下, 疲劳强度与抗拉强度并非均为正相关关系^[19]。Pang 等^[20]研究了 4340 钢抗拉强度 1 200 ~ 2 200 MPa 内对应的疲劳强度变化, 结果如图 4 所示, 可以看出, 随着抗拉强度的升高, 疲劳强度与抗拉强度的比值逐渐降低, 当抗拉强度提升至 2 000 MPa 以上时, 疲劳强度反而有所下降。

图 1 中的 300M 钢抗拉强度都在 2 000 MPa 以上, 抗拉强度与疲劳强度的线性关系也发生了偏离。从图 1 中可以看出, 虽然偏离了线性关系, 试验钢的高周光滑疲劳 ($Kt=1$) 强度仍然随抗拉强度的增大而增加。试验钢的高周缺口疲劳 ($Kt=3$) 强度主要

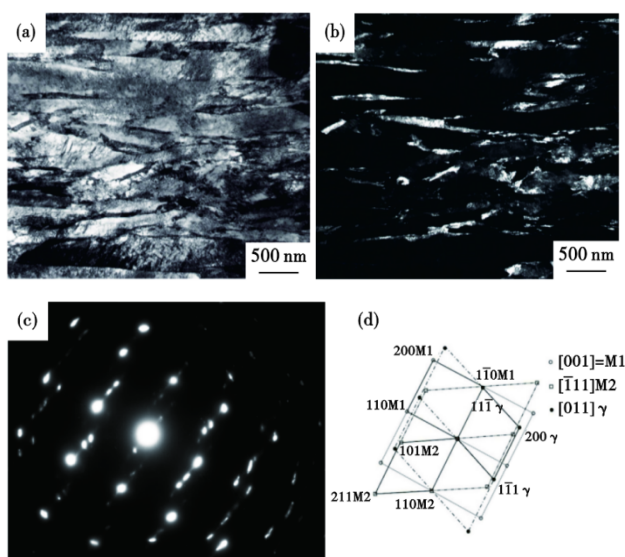


图 2 300M 钢回火后残余奥氏体 TEM 形貌及标定: (a) 明场像, (b) 暗场像, (c) 残余衍射斑, (d) 衍射斑标定

Fig. 2 TEM morphology and calibration of retained austenite of 300M after tempering: (a) bright field image, (b) dark field image, (c) diffraction pattern of retained austenite, (d) diffraction spot calibration

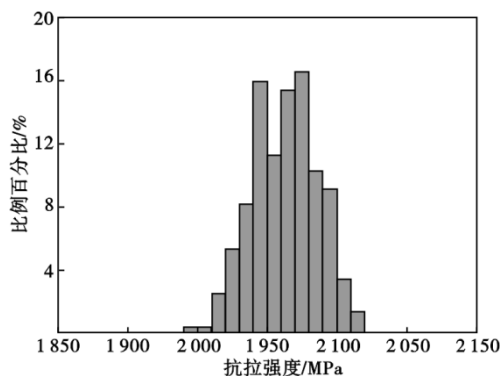


图 3 国产商用起落架用 300M 钢抗拉强度数值分布
Fig. 3 Numerical distribution of tensile strength of 300M steel for domestic commercial landing gear

与材料的韧性有关, 韧性越好, 缺口处的应力集中越小, 材料的缺口疲劳强度越大, 而且试验钢的强度较高, 高应力水平下试样所表现出的缺口敏感性也较高。此外, 有研究^[21-23]指出, 钢中残余奥氏体会阻止裂纹扩展, 缓解裂纹尖端的应力集中, 但会降低缺口疲劳萌生寿命。

2.2 疲劳起裂与非金属夹杂物

航空起落架结构的关键问题是如何实现高可靠性和长寿命, 这对于民用大飞机来说尤为重要^[24-25], 基于此, 国内外学者对起落架用 300M 钢的疲劳性能开展了系统研究及统计分析^[26-28]。Murakami 等通过等效投影模型证明, 建立了高强钢

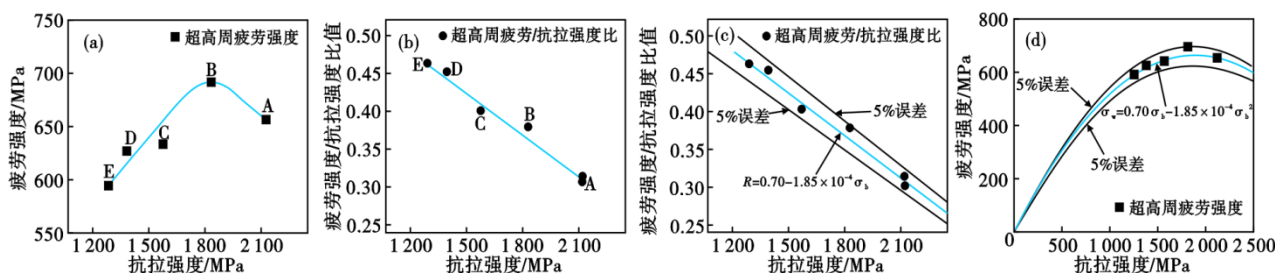


图4 4340 钢的性能:(a)抗拉强度和疲劳强度,(b)抗拉强度与疲劳强度/抗拉强度比值,(c)抗拉强度与疲劳强度/抗拉强度比值拟合,(d)抗拉强度与疲劳强度的拟合曲线^[20]

Fig. 4 Properties of 4340 steel : (a) tensile strength and fatigue strength , (b) tensile strength and fatigue strength/tensile strength ratio , (c) fitting of tensile strength and fatigue strength/tensile strength ratio , (d) fitting curve of tensile strength and fatigue strength^[20]

疲劳性能与钢基体硬度、夹杂物尺寸的关系,在钢的硬度(强度)确定的情况下,超过某临界尺寸的非金属夹杂物才会对钢的疲劳性能产生影响,300M 钢使用公式估算出的临界夹杂尺寸约为 $2 \mu\text{m}$ ^[28],实际引起疲劳断裂的夹杂物远大于 $2 \mu\text{m}$,截止目前,国产商用起落架用 300M 钢高周疲劳寿命 ($Kt=1, R=0.1, S_{\text{max}}=1\ 100 \text{ MPa}$) 统计图如图 5 所示,可以看出,疲劳寿命在 20 ~ 50 万次的比例为 5.92%;疲劳寿命在 50 ~ 100 万次的比例为 15.1%;疲劳寿命在 100 ~ 200 万次的比例为 12.49%;疲劳寿命在 200 ~ 300 万次的比例为 11.84%;疲劳寿命 > 300 万次的比例为 54.59%, 约占到统计总数的一半以上。

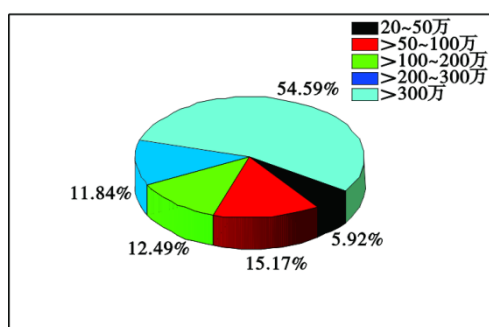


图5 国产商用起落架用 300M 钢高周疲劳寿命统计图

Fig. 5 Life statistical chart of high cycle fatigue performance of 300M steel for domestic commercial landing gear

根据疲劳断口统计分析,引起疲劳断裂的非金属夹杂物外形主要为球类、椭球类,该类起裂源形态为单颗或团聚的链状复合夹杂物,主要成分为 Al、Ca、O 和 S 元素,部分还含有 Mg、Si 等元素,典型的 $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3$ 与 CaS 的团聚夹杂物如图 6 所示;部分起裂源为方块状非金属夹杂物,主要含 Ti、C 等元素,为碳氮化钛类夹杂物,该类夹杂物均为单颗夹

杂起裂,尺寸 $5 \sim 30 \mu\text{m}$,如图 7 所示为含 S 的碳氮化钛夹杂物,夹杂物中还包裹了 $\text{MgO-Al}_2\text{O}_3$ 夹杂。

国产单真空 300M 钢疲劳断裂的断口夹杂物种类分析见表 1,近 90% 的起裂源夹杂物含氧化铝或钙铝酸盐类夹杂物。国产单真空 300M 钢疲劳寿命 ($Kt=1, R=0.1, S_{\text{max}}=1\ 100 \text{ MPa}$) 与钢中 Al 元素含量的关系图如图 8 所示,可以看出,300M 钢的高周疲劳平均寿命和最低寿命随钢中 Al 含量的升高呈下降趋势。Al 是强脱氧元素,也是钢中最常见的脱氧剂,其脱氧产物氧化铝是影响钢纯净度、进而形成氧化铝夹杂主要元素,特别是链状夹杂对钢的疲劳性能影响很大,因此,冶炼过程中脱氧及夹杂物上浮去除对控制氧化铝夹杂十分重要^[29]。

表 1 国产 300M 钢疲劳断口夹杂物种类统计

Table 1 Statistics of inclusions species in fatigue fracture of domestic 300M steel

				%
$\text{CaO-Al}_2\text{O}_3$	$\text{CaO-Al}_2\text{O}_3$ 及 CaS	CaS 或 MnS	Ti(C,N)	
21	68	4	7	

此外,分析 300M 钢的疲劳寿命与起裂源位置发现,低寿命疲劳试样的起裂源往往位于试样的表面和亚表面,图 8 中低寿命段试样的起裂源夹杂物均位于试样表面或亚表面,这是由于夹杂物靠近表面时,应力应变集中系数越大,裂纹容易在表面萌生^[30]。喷丸强化是提高钢铁材料疲劳寿命的有效手段之一,单真空 300M 钢未喷丸、覆盖率 100% ~ 150% 和覆盖率 200% ~ 250% 疲劳试样寿命对比如图 9 所示,低寿命 300M 钢试样喷丸后,疲劳裂纹不再在表面或亚表面萌生,虽然最高疲劳寿命、平均疲劳寿命提升较小,但大幅度提高了最低疲劳寿命值。喷丸使 300M 钢表面形成强化层,表层组织晶粒、亚晶粒产生塑性变形,导致晶格畸变,马氏

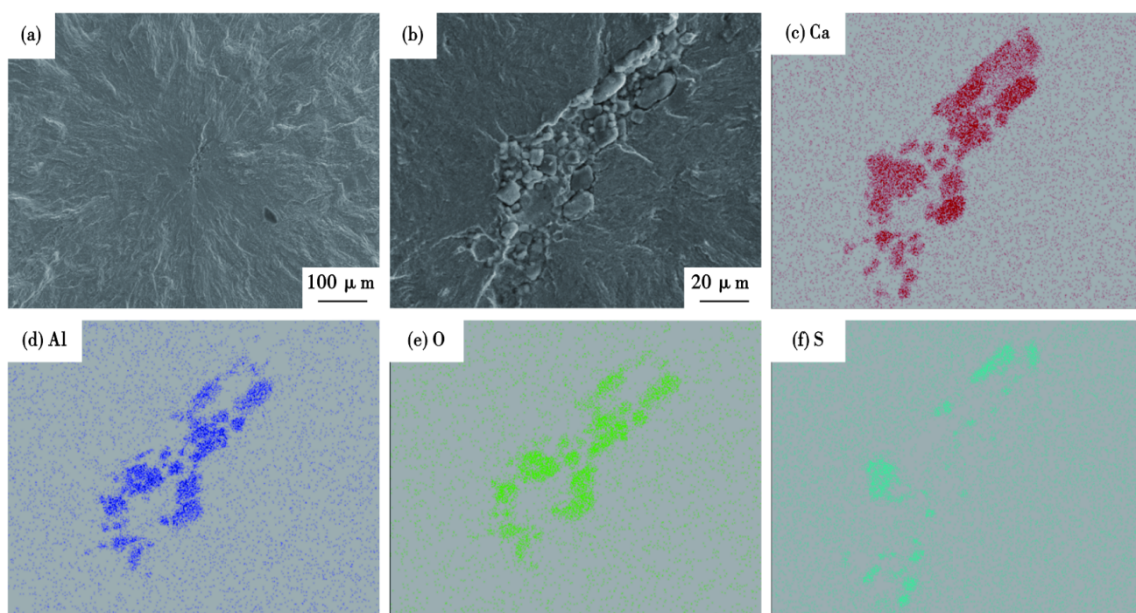


图 6 电镜下疲劳源夹杂物的元素面分析($\sigma=1\ 400\ \text{MPa}$, $N_f=239\ 859$ 次): (a)100倍下照片, (b)500倍下照片, (c)Ca 元素分布, (d)Al 元素分布, (e)O 元素分布, (f)S 元素分布

Fig 6 EDS maps of element of the inclusion at the fatigue origin observed by SEM ($\sigma=1\ 400\ \text{MPa}$, $N_f=239\ 859$ times): (a) image of 100 times, (b) image of 500 times, (c) distribution mapping of Ca, (d) distribution mapping of Al, (e) distribution mapping of O, (f) distribution mapping of S.

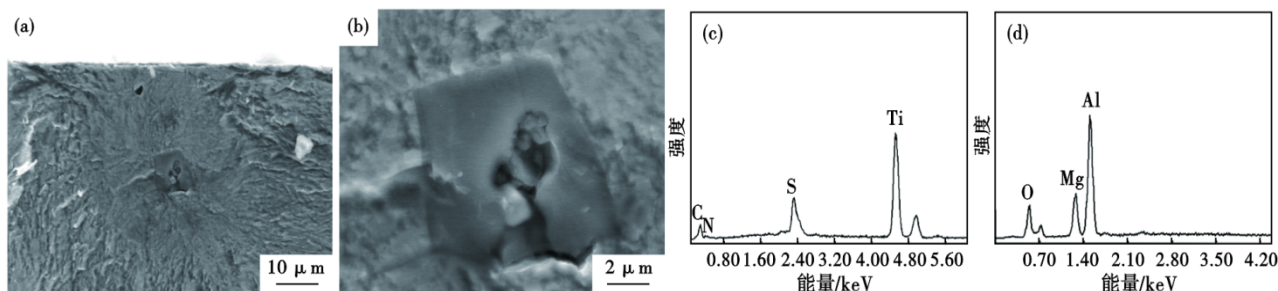


图 7 电镜下疲劳源夹杂物及能谱分析: (a)和(b)碳氮化钛夹杂物, (c)外部夹杂物能谱, (d)被包裹夹杂物能谱

Fig. 7 EDS and micrograph of the inclusion at the fatigue origin observed by SEM: (a) and (b) titanium carbonitride inclusions, (c) EDS spectrum of outer inclusion, (d) EDS spectrum of inner inclusion.

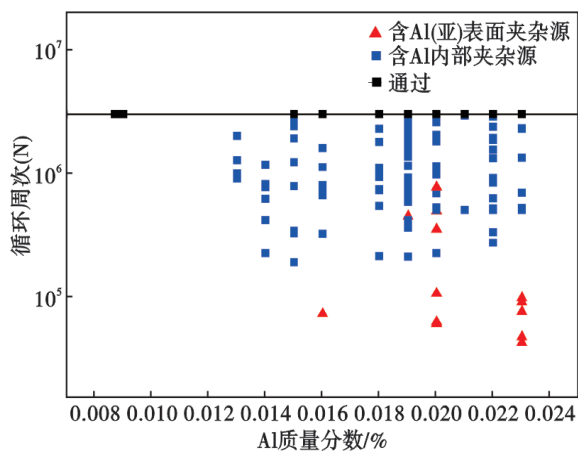


图 8 国产单真空 300M 钢疲劳寿命与钢中 Al 含量的关系

Fig. 8 Relationship between fatigue life and Al content of domestic 300M steel by single vacuum process

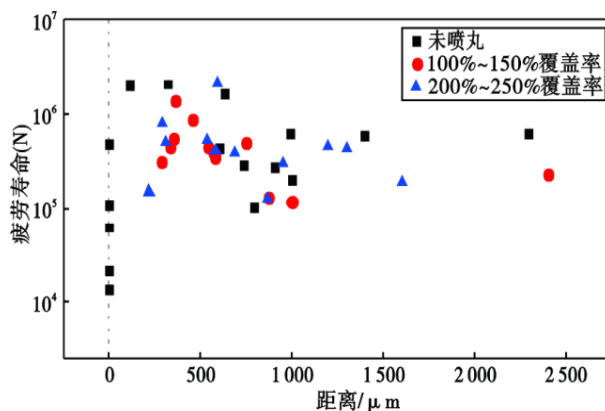


图 9 喷丸强化对单真空 300M 钢疲劳寿命的影响

Fig. 9 Effect of shot peening on fatigue life of 300M steel by single vacuum process

体中的有效晶粒细化^[31-32],有效提高了其疲劳寿命。

3 商用飞机起落架用 300M 超高强度钢展望

国际商用航空市场空间巨大,特别是 C919 正式商业首飞后,商业化批产将给 300M 钢带来巨大的发展商机。根据中国航空工业发展研究中心发布的《民用飞机中国市场预测年报(2021—2040 年)》,预计 2021—2040 年间,中国需补充民用客机 7 646 架,其中宽体客机 1 561 架、窄体客机 5 276 架、支线客机 809 架。根据中国商飞公司和美国波音公司共同预测,中国未来 20 年对窄体客机的年需求量约 300 架左右,标准的中短程干线客机 C919 刚好满足需求,在与波音、空客的竞争中,假设 C919 在国内市场占有率达到 1/3, C919 飞机年均交付量有望达到 100 架,在此基础上,国内民机用 300M 钢将形成需求超千吨、产值过亿元的关键高端航空特殊钢产业,同时使中国具备民用航空主力特殊钢跻身国际市场的能力,全面与国际先进水平看齐,形成国内大飞机产业体系,打开中国特殊钢通往国际民用航空的窗口,为中国制造业的产业升级做出贡献^[33]。

随着我国航空事业的不断发展,国产大型宽体客机研发及国际市场竞争需要,对超高强度 300M 钢提出了更高要求,更大尺寸的起落架需大型 300M 钢锻坯成形,国内须尽早突破 20 t 级以上直径

1 080 mm 甚至更大自耗锭型高纯净冶金技术、超大规模锻坯开坯锻造技术,提高锻坯的成分均匀性及纯净度,保证大尺寸 300M 钢锻坯的疲劳性能。

此外,全球航空业实现绿色低碳转型发展的步伐正在加速,国际民航组织提高航空减排目标,据相关测算,飞机重量每减少 1 kg,每架飞机每年航空燃油节省约 20 万元,减少油耗约 50 t,折合减少碳排放 155.68 t。对于飞机上用量最大的钢铁材料,在 300M 钢成分基础上研发更高强度的航空起落架主干材料,是航空节能减排的重要手段之一。因此,自主设计高性价比的 2 200 MPa 以上航空起落架用超高强度钢,不仅能实现民航客机主干材料的升级换代,还能满足民航客机减重增程和商业化成本控制需要。

4 结束语

中国已逐步形成了商用飞机起落架 300M 钢单真空冶炼技术,抚顺特钢和宝武特冶分别建立了单真空 300M 钢生产体系。在单真空 300M 钢研制与生产过程中,需积累数据并优化熔炼和锻造工艺,重点提高材料的纯净度和成分组织均匀性,保证材料疲劳及常规力学性能的批次稳定性,同时降低成本,完善标准体系,在质量、标准、成本及认证等方面与国际全面接轨,使中国的商用航空起落架材料冶金及制造水平达到一个新高度。

参考文献

- [1] 赵博,许广兴,贺飞,等.飞机起落架用超高强度钢应用现状及展望[J].航空材料学报,2017,37(6):1-6.
- [2] 张格.起落架:飞机的“腿”[J].大飞机,2015(4):97.
- [3] Liu R, Zhang P, Zhang Z J, et al. A practical model for efficient anti-fatigue design and selection of metallic: I. Model building and fatigue strength prediction[J]. J. Mater. Sci. Technol. 2021, 70: 233-249.
- [4] Liu R, Zhang P, Zhang Z J, et al. A practical model for efficient anti-fatigue design and selection of metallic: II. Parameter analysis and fatigue strength improvement[J]. J. Mater. Sci. Technol. 2021, 70: 250-267.
- [5] Wang P, Wang B, Liu Y, et al. Effects of inclusion types on the high-cycle fatigue properties of high-strength steel[J]. Scripta Materialia, 2022, 206: 114232.
- [6] Zhu M L, Jin L, Xuan F Z. Fatigue life and mechanistic modeling of interior micro-defect induced cracking in high cycle and very high cycle regimes[J]. Acta Materialia. 2018, 157, 259 - 275.
- [7] Sun C Q, Lei Z Q, Xie J J, et al. Effects of inclusion size and stress ratio on fatigue strength for high-strength steels with fish-eye mode failure[J]. International Journal of Fatigue, 2013, 48: 19-27.
- [8] 王习术,梁锋,曾燕屏,等.夹杂物对超高强度钢低周疲劳裂纹萌生和扩展影响的原位观测[J].金属学报,2005,41(12):1272-1276.
- [9] 曹红福,王毛球,孙鸿平,等.20MnCr5 齿轮钢氧含量控制及其对钢的疲劳性能影响[J].特殊钢,2023,44(1):1-4.
- [10] 金一标,姚钰明,李亚军,等.300 kg 真空感应炉熔炼 08Cr9CoMo 钢的氧含量研究[J].特殊钢,2021,42(6):19-24.
- [11] 类承帅,陈国鑫,陆星宇,等.真空技术在高品质钢制备中的应用与发展[J].真空,2023,60(2):14-19.
- [12] 谢璞石,俞峰,魏果能,等.冶炼工艺对新型不锈钢的冶金质量和接触疲劳寿命的影响[J].天津冶金,2010(2):29-32+59.
- [13] 姜周华,龚伟,王承,等.超高强度钢高纯净熔炼技术[J].航空材料学报,2017,37(6):7-15.
- [14] 王瑞,李志,王春旭,等.飞机起落架用 300M 钢熔炼、开坯技术:大型飞机关键技术高层论坛暨中国航空学会 2007 年学术年会论文集[C]. 2007: 2048-2055.
- [15] 王飞,李建新,张玉春.抚顺特钢高强钢及超高强度钢发展现状[J].特殊钢,2021,42(5):30-35.

- [16] 孙珍宝,朱谱藩,林慧国,等. 合金钢手册[M]. 修订版. 北京:冶金工业出版社,1991.
- [17] Liu Z C, Ji Y P, Wang H Y, et al. Discussion of Mechanism of Martensite Phase Transformation[C]. International Conference on Mechanical, Industrial, and Manufacturing Engineering, 2011: 350-353.
- [18] 赵振业,钟炳文. 超高强度钢300M 回火热处理[J]. 材料工程, 1992, 20(S1): 139-141+145.
- [19] Liu R, Tian Y Z, Zhang Z J, et al. Exploring the fatigue strength improvement of Cu-Al alloys[J]. Acta Materialia. 2018, 144: 613-626.
- [20] Pang J C, Li S X, Wang Z G, et al. General relation between tensile strength and fatigue strength of metallic materials[J]. Materials Science and Engineering: A, 2013, 564: 331-341.
- [21] 葛心慧. 钢中残余奥氏体的作用[J]. 南通职大教学研究, 1995,9(1):26-28
- [22] Christodoulou P I, Kermanidis A T, Krizan D. Fatigue behavior and retained austenite transformation of Al-containing TRIP steels [J]. International Journal of Fatigue 2016, 91: 220-231.
- [23] 徐 伟,黄明浩,王金亮,等. 综述:钢中亚稳奥氏体组织与疲劳性能关系[J]. 金属学报, 2020, 56(4): 459-475.
- [24] Hong N. Fatigue load evaluation of aircraft landing gear based on dynamic analysis in frequency domain [C]. Fatigue 2000, Proceedings of the fourth International Conference of Engineering Integrity Society, Cambridge, 2000, 439-448.
- [25] 王旭亮,聂 宏,薛彩军,等. 飞机起落架疲劳与可靠性技术研究综述[C]. 大型飞机关键技术高层论坛暨中国航空学会2007年学术年会论文集. 深圳, 2007:125-130.
- [26] Gao Y K, Li X B, Yang Q X, et al. Influence of surface integrity on fatigue strength of 40CrNi2Si2MoVA steel [J]. Materials Letters, 2007, 61(2): 466-469.
- [27] Bag A, Delbergue D, Bocher P, et al. Statistical analysis of high cycle fatigue life and inclusion size distribution in shot peened 300M steel [J]. International Journal of Fatigue, 2019, 118: 126-138.
- [28] 章伟钢,韩 顺,厉 勇,等. 大型客机用300M钢疲劳破坏行为[J]. 钢铁,2017,52(10):83-88.
- [29] 赵智刚,顾文涛,张 龙,等. 控制高铝钢45CrAlMo中 Al_2O_3 夹杂的工艺实践[J]. 特殊钢, 2018,39(3):35-39.
- [30] 冯 磊,轩福贞. 非金属夹杂物对材料内局部应力集中的影响[J]. 机械工程学报, 2013,49(8):41-48.
- [31] Zhao C M, Gao Y K, Guo J, et al. Investigation on residual stress induced by shot peening[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2015, 24(3): 1340-1346.
- [32] 刘天琦,李春志,盛 伟,等. 40CrNi2Si2MoVA钢喷丸强化层微观结构[J]. 航空材料学报,2016,36(2):28-32.
- [33] 罗忠河. 我国大飞机用超高强度钢前景可期[N]. 中国冶金报,2022-05-19(1).