

0Cr17Ni4Cu4Nb材料在宇航紧固件中的应用

胡庆宽^{1, 2}, 许永春^{1, 2}, 金宏^{1, 2}

河南航天精工制造有限公司 河南信阳 464000

河南省紧固连接技术重点实验室 河南信阳 464000

摘要: 阐述了0Cr17Ni4Cu4Nb材料特性、紧固件镦制成形性能及常见缺陷、机械加工特性、热处理及表面处理工艺, 结合常用碳素钢、合金结构钢及马氏体不锈钢紧固件结构和力学性能特点, 制定了0Cr17Ni4Cu4Nb材料紧固件性能指标。0Cr17Ni4Cu4Nb材料耐蚀性高, 综合力学性能优异, 在国内宇航紧固件领域应用条件已经成熟。

关键词: 0Cr17Ni4Cu4Nb; 紧固件; 耐蚀性; 加工工艺; 性能指标

1 序言

由于碳素钢及合金钢紧固件具有良好的冷加工性能且成本低廉, 所以在宇航紧固件领域中大量应用; GB、GJB、HB标准中合金钢、碳素钢紧固件占有较大的比例^[1, 2]。在宇航型号部件结构设计中, 800MPa以上等级的紧固件多以30CrMnSiA材料为主, 30CrMnSiA钢具有良好的机械加工性能, 但在实际使用过程中存在较多对产品质量造成影响的缺陷, 如淬透性差, 存在回火脆性、脱碳等风险; 其屈强比低, 纵向、横向力学指标差异较大, 无法满足高承载、高抗疲劳性能要求; 耐蚀性差, 需要进行表面处理(镀锌、镀镉、氧化等), 电镀后存在氢脆风险较大等缺点。随着航空航天海防装备的发展, 对海防飞机、航天飞行器所用紧固件在海洋环境下的耐蚀性能提出了更高的要求。为提高紧固件的耐蚀性, 普遍做法是采用良好耐蚀性基体材料与适当的表面涂/镀层。为进一步提升航天海防装备专用紧固件在海洋环境下的适应性能力, 必须开发新型材料, 研制各种新型紧固件。

海防新型紧固件需要采用稳定的高强度不锈钢材料, 通过先进的加工技术和表面处理方式, 使之具有较好的耐蚀性及综合力学性能, 其中0Cr17Ni4Cu4Nb不锈钢是高强度不锈钢的典型代表。本文从材料特性、成形特性、紧固件结构特点、表面处理工艺等几个方面论证了

0Cr17Ni4Cu4Nb材料在航天海防装备应用的可行性。

2 材料特性

奥氏体不锈钢具有较好的耐蚀性, 但只能通过机械加工强化。在机械加工过程中, 受产品形状的限制, 成形工艺较为复杂, 一般用于制造性能要求较低的非主承力紧固件。马氏体不锈钢通过淬火形成马氏体相变强化, 但存在较大的回火脆性风险, 其耐蚀性比奥氏体不锈钢差。为了克服以上缺点, 开发了耐蚀性和综合力学性能较好的沉淀硬化不锈钢, 其中0Cr17Ni4Cu4Nb不锈钢应用最为广泛。0Cr17Ni4Cu4Nb材料是在Cr17型不锈钢基础上, 加入Cu、Nb等元素研制的一种马氏体沉淀硬化不锈钢, 通过马氏体相变和在400~650℃温度内时效时, 析出 ϵ -Cu、NbC和M₂₃C₆等时效强化相而产生沉淀硬化。在固溶状态下组织为低碳板条马氏体, 随后通过在400~650℃温度内时效, 其 A_{c1} 约为670℃, A_{c3} 约为740℃, M_s 为80~140℃, M_f 约为32℃^[3], 常用热处理工艺为1020~1060℃固溶, 460~650℃时效, 具体热处理工艺见表1。

经过热处理强化后材料抗拉强度可达到1100MPa以上, 同时具有较好的韧性和塑性。0Cr17Ni4Cu4Nb材料中抗氧化性能与普通奥氏体不锈钢相近, 耐大气腐蚀和耐酸腐蚀能力明显优于马氏体不锈钢, 与某些奥氏体不锈钢相当, 且该钢

表1 0Cr17Ni4Cu4Nb不锈钢性能指标

试样毛坯尺寸/mm	组别	热处理/℃				力学性能				
		固溶	冷却介质	回火或时效	淬火冷却介质	R_m /MPa	$R_{p0.2}$ /MPa	A (%)	Z (%)	HBW
25	1	1020~1060	水	—	—	—	—	—	—	≤363
	2	1020~1060	水	470~490	空气	≥1310	≥1180	≥10	≥40	≥375
	3			540~560	空气	≥1040	≥1000	≥12	≥45	≥331
	4			570~590	空气	≥1000	≥865	≥13	≥45	≥302
	5			610~630	空气	≥930	≥725	≥16	≥50	≥277

在还原性酸、特别是硫酸中耐腐蚀性良好。在海水中的腐蚀减重约为0Cr17Ni7Al不锈钢的30%，与1Cr18Ni9Ti不锈钢相当。在高温高压水中的缝隙腐蚀性能大致与1Cr18Ni9Nb不锈钢相当，综合性能优于30CrMnSiA不锈钢。

0Cr17Ni4Cu4Nb不锈钢不同热处理状态下的显微组织如图1所示。

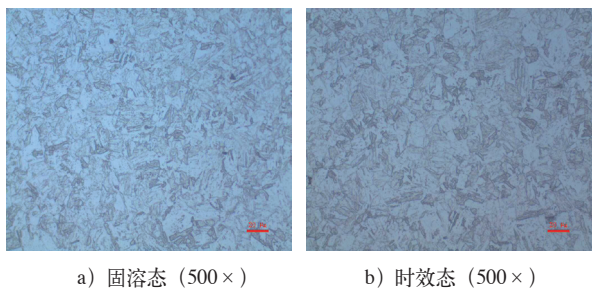
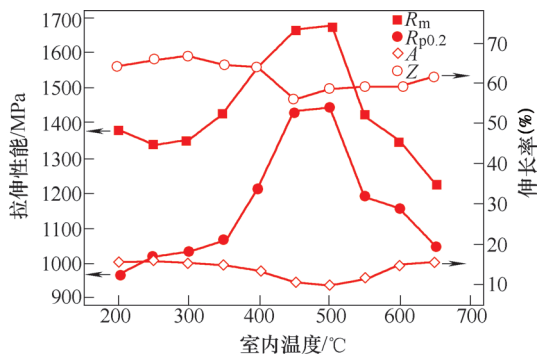


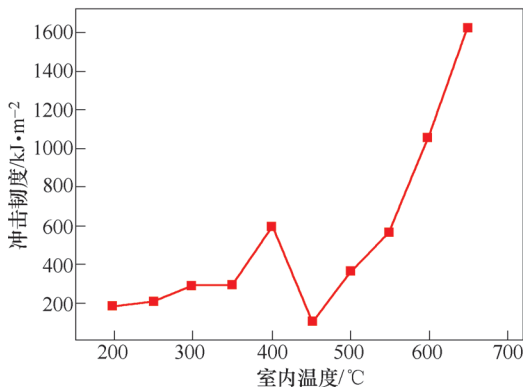
图1 0Cr17Ni4Cu4Nb不锈钢不同状态下显微组织

0Cr17Ni4Cu4Nb不锈钢在固溶状态下，其显微组织为过饱和低碳板条马氏体。为保证材料获得足够的强度和韧性，在选择固溶温度时，一般固溶温度不要太高。时效的目的是利用弥散强化作用产生细小并弥散分布的沉淀相，以获得尽可能好的综合力学性能。固溶处理后时效时，马氏体组织发生回火转变，析出尺寸极小（约20nm）的 ϵ -Cu和NbC、 $M_{23}C_6$ 等时效强化相，以获得尽可能好的综合力学性能。

查阅航空材料手册^[4]，在1040℃固溶1h，不同时效温度下0Cr17Ni4Cu4Nb不锈钢室温拉伸性能如图2a所示，冲击性能如图2b所示。随着时效温度（200~650℃）的升高，抗拉强度和屈服强度先升高后降低，500℃达到最高；伸长率先降低后升高，500℃达到最低；断面收缩率先升高后降低再升高，450℃达到最低；冲击韧度先升高后降低再升高，450℃最低。



a) 室温拉伸性能曲线



b) 冲击韧度曲线

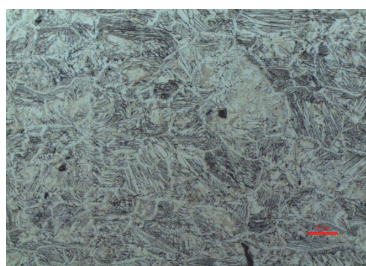
图2 不同时效温度力学性能

3 成形特性

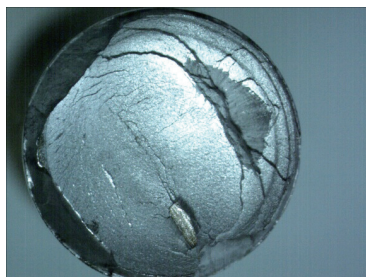
3.1 镦制成形性能

由于其固溶状态下强度较高，所以在制造紧固件时对镦制成形设备吨位和模具精度的要求也较高。该材料还具有非常高的热稳定性和耐蚀性，在进行热加工成形时，选择合适的工艺参数，不容易出现过热、过烧现象，典型过热组织如图3a所示。对于六角头、扁圆头等头部大变形量的产品一般采用热镦方式成形，如果采用冷变形形式易产生“应变线”，使产品在受力过程中易出现快速解体开裂。冷滚压控制头杆结合部位金属流线 and 螺纹处金

属流线，提高产品疲劳寿命。



a) 热锻过热 (500×)



b) 冷锻掉头 (10×)

图3 加工过程存在的典型缺陷

3.2 机加工性能

0Cr17Ni4Cu4Nb材料主要用于制造1100MPa级高强度紧固件，由于其对表面质量要求较高，所以在制造紧固件过程中需要数控车削和无心磨削等精加工手段予以保证。该材料机加工性能良好，在车削、磨削加工过程中，可以选用较高加工速度和较大车削量，但注意冷却以免产生磨削烧伤。加工后的产品表面粗糙度值低，表面质量及尺寸一致性好。

4 紧固件结构和性能指标

采用0Cr17Ni4Cu4Nb不锈钢制造的螺栓、螺钉、螺柱和螺母紧固件的结构参照HB系列标准中的30CrMnSiA不锈钢和1Cr17Ni2不锈钢。热处理状态为固溶+时效，螺栓性能有抗拉强度和硬度两种方式，螺栓抗拉强度一般为 $1180\text{MPa} \pm 100\text{MPa}$ ，硬度为35~42HRC（通过HB0-94—1977换算后抗拉强度为1078~1303MPa）。为验证0Cr17Ni4Cu4Nb不锈钢紧固件标准性能指标和实测情况，确定0Cr17Ni4Cu4Nb不锈钢材料性能的稳定性和合理性。按照航空航天型号最普遍使用的几种头型、型式和典型规格进行选择螺栓、螺钉和螺母来验证其紧固件性能方案，并对其强度和硬度进行实际检测，结果见表2。

对于0Cr17Ni4Cu4Nb不锈钢紧固件，为了获得良好的综合力学性能，选定具体检测指标见表3。

表2 0Cr17Ni4Cu4Nb不锈钢产品性能实测性能

产品名称	规格	抗拉强度/MPa (或硬度HRC)
六角头螺栓	M6×26	1196、1202、1215
六角头螺栓	M8×24	1227、1205、1210
六角头螺栓	M10×40	1122、1119、1119
六角头螺栓	M12×120	1120、1113、1120
六角头螺栓	M16×70	1194、1192、1188
六角头螺栓	M20×55	1226、1214、1223
六角螺母	M4	1123、1124、1121
六角螺母	M5	1180、1193、1186
六角螺母	M6	1153、1170、1172
六角螺母	M10	(37.5、37.2、37.6)
角型托板自锁螺母	M5	(37.3、37.5、37.6)
六角自锁螺母	M20×1.5	(36.9、37.5、37.9)

表3 0Cr17Ni4Cu4Nb螺栓性能指标

R_m/MPa	$R_{p0.2}/\text{MPa}$	$A(\%)$	$Z(\%)$	冲击吸收能量 KU_2/J
1075~1275	≥ 1000	≥ 12	≥ 45	≥ 40

5 表面处理工艺

0Cr17Ni4Cu4Nb材料自身耐蚀性好，一般可用在抗氧化、耐弱酸、碱和盐腐蚀环境。表面处理方式主要用化学钝化（Ct.P），特殊情况下可进行其他类型的表面处理方式如涂 MoS_2 、涂十六醇等提升表面润滑性，防止冷焊（咬死）问题产生，也可依据客户需求和环境选用不同的表面处理方式。目前，在海防装备上为进一步提升0Cr17Ni4Cu4Nb不锈钢紧固件的耐蚀性，常在紧固件表面采用物理气相沉积技术（PVD）真空离子镀膜CrN纳米涂层^[5]。

6 结束语

综合分析了0Cr17Ni4Cu4Nb材料特性，锻制成形性能，机加工性能、热处理和表面处理工艺及紧固件结构特点，并制定了紧固件综合性能指标。0Cr17Ni4Cu4Nb材料在国内宇航紧固件领域应用条件已经成熟，加工工艺稳定，材料供应渠道畅通，供应充足，价格相比钛合金与高温合金等高端紧固件材料成本较低；耐蚀能力可以达到传统结构钢电镀紧固件的5~10倍，性价比高，能够取代传统结构

浅析内花键感应淬火变形

闫科, 李精华, 贾武, 刘光宗

西安双特智能传动有限公司 陕西西安 710119

摘要: 感应淬火后, 由于内花键无法进行有效地磨削加工来保证尺寸要求, 因此在热处理前的内花键加工时, 一定要预留合理的余量, 确保尺寸变形符合最终图样要求。从零件感应淬火硬化层深、尺寸结构、加工方法、材料等几个方面因素, 来说明对内花键感应淬火变形的影响, 并推荐合理的预留量。

关键词: 磨削; 硬化层深; 预留量

1 序言

由于内花键的结构特性, 无法在热处理后进行精加工来保证尺寸, 因此在内花键热处理前编制机加工工艺时, 要考虑到热处理变形的影响, 需预留一定的变化量, 而预留量的多少则要经过大量工艺试验验证。不同的感应淬火频率、淬硬层深、感应加热工艺都会有不同的变形量; 不同的零件结构及内花键壁厚, 感应淬火后也会有不同的变形量; 另外, 不同的材料、金相组织, 热处理后变形量也不尽相同。

经过试验验证, 摸索出各因素对感应淬火变形的影响数据, 可较大程度地缩短类似内花键零件的开发周期, 提高感应淬火质量, 对内花键感应淬火具有积极的指导、参考意义。

2 零件说明

图1是两种不同结构的行星架, 材料为QT700-2, 其内花键顶圆直径均为54mm, 有效长度均为53mm, 花键模数均为1.5875, 壁厚分别是12mm和23mm。感应淬火要求内花键根部淬硬层深 $\geq 0.4\text{mm}$, 硬度 $\geq 45\text{HRC}$, 允许内花键全长淬火。

零件开发过程中, 尝试采用不同频率的感应加热电源, 所得到的感应淬火层深和变形数据也都不相同。采用不同的淬火机床, 零件装夹跳动不同, 热后内花键锥度、圆度也不同。

3 淬硬层深对内花键变形的影响

在满足最小淬硬层深及硬度要求的前提下, 选择加热电源的频率越低, 淬硬层深就越大; 其感应加热影响区深度越大, 冷却时内花键缩量也越大。

钢电镀紧固件。国外相近材料牌号17-4PH沉淀硬化不锈钢, 已在欧美等发达国家宇航紧固件领域得到广泛应用^[6], 为0Cr17Ni4Cu4Nb材料在我国相关领域的应用提供了重要的借鉴。

参考文献:

- [1] 胡隆伟, 叶文君, 等. 紧固件材料手册[M]. 北京: 中国宇航出版社, 2014: 26-27.
- [2] 刘汉宝. ASME规范中碳钢和低合金钢材料冲击试验规定的探讨[J]. 石油化工设备技术, 2019, 233(1): 9-12.
- [3] 王剑星, 杨钢, 张忠模, 等. 热处理工艺对0Cr17Ni4Cu4Nb不锈钢组织和力学性能的影响[J]. 金

属热处理, 2012, 37(11): 90-94.

- [4] 《中国航空材料手册》编辑委员会. 中国航空材料手册[M]. 2版. 北京: 中国标准出版社, 2001: 508-514.
- [5] 单磊, 王永欣, 李金龙, 等. TiN、TiCN和CrN涂层在海水环境下的摩擦学性能[J]. 中国表面工程, 2013: 86-92.
- [6] LARA-BANDA M, GAONA-TIBURCIO C, ZAMBRANO-ROBLEDO P, et al. Alternative to nitric acid passivation of 15-5 and 17-4PH stainless steel using electrochemical techniques[J]. Materials, 2020, 13(23): 5322.

MW 20210402